Lexikon

der

von

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

http://www.mpe.mpg.de/~amueller

April 2007

Wir haben verlernt uns zu wundern.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF. 10
2.2 System aus Bulk und 2 Branen 11
2.3 Kernaussage des Äquivalenzprinzips anschaulich. 17
2.4 Vereinheitlichtes Schema der Akkretionsphysik. 23
2.5 Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala. 30
2.6 Multiwellenlängenspektrum eines AGN Typ-1. 33
2.7 Die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in tensorieller Form. 38
2.8 Entfernungsskala der Planeten im Sonnensystem. 57
2.9 Pluto und seine drei Monde. 58
2.10 Weltraumteleskop Hubble, kurz HST. 59
2.11 Auflösungsvermögen: Pluto, der Herr der Unterwelt, mit seinem Diener, Charon. 61

3.1 System aus Bulk und 2 Branen. 91

4.1 Klassischer Casimir-Effekt zwischen zwei Metallplatten. 98
4.2 Mach-Kegel der Cerenkov-Strahlung eines relativistischen, geladenen Teilchens. 101
4.3 Comptonisierung. 109

5.1 Hubble Deep Field - North von 1996. 114
5.2 Lockman Hole Deep Field 2005. 115
5.3 Starre vs. differenzielle Rotation. 121
5.4 12 Pentagone konstituieren einen Dodekaeder. 123
5.5 Doppler-Blauverschiebung und Doppler-Rotverschiebung einer Lichtwelle. . . 124
5.6 Λ und andere Formen Dunkler Energie. 130
5.7 5 SN Ia in verschiedenen Wirtsgalaxien, beobachtet mit HST 2006. 132
5.8 w-Parameter der Zustandsgleichungen verschiedener kosmischer Ingredienzen. 134
5.9 Anteile der Energieformen im Universum. 136
5.10 3D-Karte der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt. 142

6.1 Der erste Einstein-Ring, beobachtet 1988 mit dem VLA. 150
6.2 Fluoreszenzübergang der Eisenemissionslinie im Röntgenbereich. 154
6.3 relativistische Emissionslinie von ionisiertem Eisen nahe eines Schwarzen Lochs. 155
6.4 Energie - Wichtigste Größe der Physik. 165
6.5 Innerer und äußerer Horizont in Abhängigkeit des Kerr-Parameters a. . . . 173
6.6 Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre. 176
6.7 Radialverhalten der metrischen 00-Komponente in der Äquatorialebene. . . . 177
6.8 Streuung und Extinktion an interstellarem Staub. 178
6.9 Pferdekopfnebel im Sternbild Orion, ESO/VLT 2002. 180

6.10 Reflektionsnebel M78 und NGC 2071 im Pferdekopfnebel im Orion-Molekülwolkenkomplex, 2007. 181
6.11 Beschränkung der SM-Felder und Unbeschränktheit der Gravitationsfelder. . 182
6.12 Exzentrizitäten der Kegelschnitte. 187

7.1 Falschfarbenbild des Planetarischen Nebels NGC3242. 191
7.2 Falschfarbenbild: doppelte Radioquelle 3C175, beobachtet mit dem VLA. . . 193
7.3 Phasendiagramm der QCD. 197
7.4 Einsteinsche Feldgleichungen. 199
7.5 Feynman-Diagramm des β^--Zerfalls. 205
7.6 Feynman-Diagramm erster Ordnung mit einer Schleife (nicht-photonische Strahlungskorrektur). 205
7.7 Frame-dragging-Formel in der Kerr-Geometrie. 209
7.8 Friedmann-Weltmodelle: Entwicklung verschiedener Universen. 217

8.1 Röntgendoppelstern. 221
8.2 Andromedagalaxie M31. 223
8.3 Galaxie: Millennium Run 2005: Struktur des Kosmos im Großen. 225
8.4 Illustration eines GRBs. 226
8.5 Illustration einer Neutronensternverscmelzung. 228
8.6 Feuerball-Modell für GRBs. 229
8.7 Teile von Shoemaker-Levy 9 fallen 1994 auf Jupiter. 238
8.8 Vulkanausbruch auf Io. 239
8.9 Antennengalaxien NGC4038-4039, HST 2006. 240
8.10 Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel. 241
8.11 Phasen des Zerreiß-Szenarios eines Sterns durch Gezeitenkräfte. 242
8.12 Schwarzschild- versus Gezeitenradius für sonnenartige Sterne. 246
8.13 Struktur eines Gravasterns. 249
8.14 Illustration des Epizykel-Modells. 254
8.15 Inspirierte Fallobst zur Gravitationsforschung?. 256
8.16 einfache Darstellung einer gekrümmten Raumzeit. 257
8.17 Feldgleichung der ART. 257
8.18 Ende eines Sterns in Abhängigkeit seiner Masse. 265
8.19 Galaxienkollision. 270
8.20 Doppelbild eines Quasars durch Galaxiencluster als Gravitationslinse. 270
8.21 Gelinste Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln. 272
8.22 Gravitationsrotverschiebung um ein Schwarzes Loch. 276
8.23 ebene Gravitationswellen in der TT-Eichung. 279
8.24 Aufbau des Michelson-Interferometers. 283
8.25 Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT). 289
8.26 Definition und Eigenschaften einer Gruppe. 294

9.1 Hamilton-Jacobi-Gleichung. 302
9.2 Higgs-Teilchen: Kurvenverlauf des reellen Higgs-Potential parametrisiert durch die Temperatur. 318
9.3 Higgs-Teilchen: Kurvenverlauf des Tangens Hyperbolikus. 319

9.4 Hintergrundstrahlung: WMAP-Himmelskarte der Hintergrundstrahlung, projiziert auf Himmelsglobus. . . . 324
9.5 Struktur eines Holosterns. . . . 328
9.6 Anschauliche Darstellung eines Horizonts. . . . 333
9.7 Hubble-Klassifikation in Ellipsen, Spiralen und Balkenspiralen. . . . 341
9.8 Ellipse NGC 1316, HST 2005. . . . 342
9.9 Spirale NGC 4622, HST 2002. . . . 344
9.10 Sb-Galaxie NGC 1300, HST 2005. . . . 345
9.11 hydrostatisches Gleichgewicht der Drücke. . . . 349
9.12 Superstern Eta Carinae im Homunculus-Nebel. . . . 354

10.1 Potentialverlauf bei neuer Inflation. . . . 360

11.1 Jahreszeiten auf der Erde. . . . 372
11.2 HST-Foto von M87 mit Jet. . . . 374
11.3 Jet: Entstehung aus zwei Komponenten. . . . 377
11.4 Kollimation und Beschleunigung von Jets. . . . 378
11.5 Strukturen eines sich ausbreitenden Jets. . . . 378

12.1 Haare verboten! Erlaubt: Masse, Drehimpuls und Ladung. . . . 386
12.2 Ellipse als einer der Kegelschnitte. . . . 389
12.3 Vergleich von Schwarzschild- und Kerr-Loch. . . . 394
12.4 Emission einer Akkretionsscheibe um ein rotierendes Schwarzes Loch bei 40 Grad Neigung. . . . 395
12.5 11D-Raum konstituiert sich aus 4D-ART-Raumzeit und 6D kompaktifizierten Unterraum. . . . 408
12.6 typisches Röntgenspektrum eines AGN Typ-1. . . . 414
12.7 Geometrien der Korona in der Akkretionsphysik. . . . 416
12.8 Die vier Säulen der Urknallhypothese. . . . 424
12.9 Lambda und andere Formen Dunkler Energie. . . . 429
12.10 Krümmungseigenschaften der Kerr-Geometrie. . . . 437
12.11 Kugelsternhaufen M15 und M31 beobachtet mit HST 2002. . . . 440

13.1 Lapse-Funktion visualisiert Gravitationstrichter. . . . 445
13.2 Laserstrahl am Unit telescope Yepun am VLT, ESO. . . . 446
13.3 Die Große Magellanische Wolke im Infrarot (links) und optisch (rechts) 2006. 463
13.4 granulare Struktur der Raumzeit. . . . 465
13.5 Spin-Netzwerk Darstellung eines Würfels. . . . 468
13.6 Spinschaum und Foliation in Spin-Netzwerke. . . . 470
13.7 kleine Lorentz-Faktoren. . . . 477
13.8 mittlere Lorentz-Faktoren. . . . 477
13.9 ultrarelativistisch. . . . 478
13.10 Lorentz-Kontraktion von Atomkernen. . . . 483

14.1 mechanisches Model für die MRI. . . . 495
14.2 Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre. . . . 499
14.3 effektives Potential in Schwarzschild, parametrisiert durch den spezifischen Drehimpuls. . . . 500

14.4 Illustration einer flachen Metrik. 507
14.5 Illustration einer allgemeinen, gekrümmten Metrik. 508
14.6 Mikroquasar: überfließende Materie von einem massereichen Stern auf ein kompaktes Objekt. 511
14.7 Panorama der Milchstraße, beobachtet mit 2MASS (Infrarot). 514
14.8 Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COBE, DIRBE (Infrarot). 515
14.9 ROSAT-Panorama der Milchstraße (weiche Röntgenstrahlung). 517
14.10Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COMPTEL (Gammastrahlung). . 518
14.11zwei Sternhaufen im Röntgen- und Infrarotlicht. 522
14.12Verlauf der Milgrom-Funktionen in MOND. 526
14.13duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie. 529

15.1 QCD-Phasendiagramm. 544
15.2 Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenaufbau und Konstituenten. . . 545
15.3 Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenradien und Dichtedomänen. . 547
15.4 Nova T Pyxidis, beobachtet 1997 mit HST. 552

17.1 Penrose-Diagramm der Minkowski-Raumzeit. 569
17.2 Penrose-Diagramm eines kugelsymmetrischen Gravitationskollapses. 570
17.3 Penrose Paarbildung in der Ergosphäre. 570
17.4 charakteristische Radien eines Schwarzen Loches. 572
17.5 Hierarchie der Petrov-Typen. 577
17.6 Lichtquantenhypothese. 581
17.7 Pioneer 10 kurz vor dem Start. 589
17.8 Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen. 596
17.9 Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Strahlungsenergie für verschiedene Temperaturen. 598
17.10Katzenaugennebel NGC 6543. 604
17.11Planetarischer Nebel NGC 2440. 605
17.12HST-Bild des Adlernebels. 614
17.13Pulsar mit Magnetosphäre und Ausfluss. 617
17.14Crab-Nebel fotografiert mit HST 2005. 619

18.1 Typisches Feynman-Diagramm der QED: Elektron und Positron wechselwirken über den Austausch eines Photons. 626
18.2 Feuerball nach Gold-Gold-Kollision. 644
18.3 Quarkfamilie. 646
18.4 QCD-Phasendiagramm. 648
18.5 Quarkstern: HST-Bild des Quarkstern-Kandidaten RX J185635-3754. 650
18.6 Quasar-Sample mit Wirtsgalaxien, beobachtet mit dem HST. 652
18.7 Quasar QSO-PG1115+080 als Vierfachbild, beobachtet mit dem HST. 656

19.1 Illustration des RSI-Modells. 663
19.2 SOHO-Bild der Sonne mit Sonnenflecken und Randverdunklung 2003. 665
19.3 Das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum. 666
19.4 gekrümmte Raumzeit. 667

19.5 Illustration der Ray-Tracing-Methode. 670
19.6 Ray Tracing Ergebnis einer Scheibe um ein Schwarzes Loch. 671
19.7 Sequenz der Reionisationsphasen. 674
19.8 Kosmische Zeit und Rotverschiebung in der Rekombinationsepoche. 677
19.9 Kosmische Zeit und Rotverschiebung von $z = 0$ bis 10. 678
19.10Zentrale Gleichungen der Relativitätstheorie Albert Einsteins. 680
19.11Renormierung: Die Beseitigung von Unendlichkeiten macht Physiker glücklich! 683
19.12Gravitationstrichter: Krümmung und gravitative Zeitdilatation. 689
19.13Roche-Volumen: Potentialgebirge, Lagrange-Punkte und Roche-Volumen eines Doppelsternsystems. 693
19.14Äquipotentiallinienstruktur, Lagrange-Punkte und Roche-Volumina eines Binärs. 694
19.15Röntgendoppelstern aus Riesenstern und Schwarzem Loch. 696
19.16Röntgendoppelstern Mira A und Mira B im Röntgenlicht. 698
19.17Beteigeuze - Orions rote Schulter. 700
19.18Sonne wird zum Roten Riesen und innere Planeten verschlingen. 701
19.19Beziehung zwischen kosmischer Zeit und kosmologischer Rotverschiebung bis $z = 10$. 706
19.20Galaxienverteilung beobachtet im Survey 2dF, 2003. 708

20.1 Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gasen. 713
20.2 Triangulation der scheinbaren Größe aus Distanz und Radius. 714
20.3 Feynman-Diagramm des Beta-Zerfalls. 717
20.4 Schwarzes Loch: Computersimulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Schwarzes Loch. 720
20.5 Schwarze Löcher: Schwarzschild vs. Kerr. 723
20.6 Das Innere Schwarzer Löcher in verschiedenen Theorien. 728
20.7 2D-Schnitt durch Seyfert-Galaxie. 735
20.8 Circinus Galaxie, eine Seyfert-Galaxie Typ-2, beobachtet 2000 mit HST. . . . 736
20.9 Singularität. 737
20.10Chandra-Röntgenbild des Krebsnebels mit Pulsar. 742
20.11innere Struktur der Sonne. 745
20.12SOHO-Bild der Sonnenstürme und Massenausflüsse. 746
20.13aktuelle Sequenz der Spektratypen von Sternen. 750
20.14Bauweise eines Michelson-Interferometers. 754
20.15Relativistischer Energieerhaltungssatz: 'relativistischer Pythagoras'. 756
20.16Bosonen vs. Fermionen. 760
20.17Standardmodell der Teilchenphysik. 763
20.18Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF. 769
20.19Entstehung oder Vermeidung von Fluoreszenslinien bei verschiedenen Scheibenmodellen. 770
20.20Staubtorus: Staubabsorption formt ein Kreuz inmitten von M51, beobachtet mit dem HST. 774
20.21Sonne im Licht von Helium-II, beobachtet mit SOHO. 778
20.22Der offene Sternhaufen *Pismis 24* mit massereichen, jungen Sternen (rechts) und der Emissionsnebel NGC 6357 (links); HST 2006. 782
20.23Stringtheorie: Punktteilchen, offene und geschlossene Strings. 785

20.24duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie. 787
20.25Querschnitt durch die Morphologie eines AGN. 794
20.26SN 1994D beobachtet mit HST. 801
20.27Chandra-Röntgenbild des Supernovaüberrests Cas A. 803
20.28SN 1987A beobachtet mit HST. 805
20.29Die Spiegelwelt der Supersymmetrie. 808
20.30Symmetriegruppe: unitäre Transformation. 814

21.1 Der Teilchenzoo. 820
21.2 Tensor: Gestalt und Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe. 828
21.3 Ausschnitt des Tierkreises von der Erde aus betrachtet. 839
21.4 Topologie: 2D-Analoga der drei Geometrien des Universums mit simpler Topologie. 841
21.5 Tunneln einer Welle durch einen Potentialwall. 850

22.1 Multiwellenlängen-Beobachtungsfoto der Cartwheel-Galaxie von 2006. 857
22.2 Vergößerung des Chandra-Beobachtungsfotos der Cartwheel-Galaxie von 2006. 858
22.3 Beziehung zwischen kosmischer Zeit und Rotverschiebung im Universum. . . 861
22.4 Urknall: Expansion und Abkühlung des Universums. 865

23.1 Explosionsregion um den Velapulsar 2007. 872
23.2 Geometrie und Lichtkurve der Algolveränderlichen. 873
23.3 Vereinheitlichung: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT). 877
23.4 Eine Radioantenne des Very Large Arrays in Socorro 2006. 879
23.5 Prinzip der interkontinentalen Interferometrie. 879
23.6 Das Very Large Telescope auf dem Paranal 1999. 881

24.1 Zwei Klassen Weißer Zwerge. 887
24.2 w-Parameter für verschiedene kosmische Materie- und Energieformen. 895

25.1 Vereinheitlichung von drei der vier Naturkräften zur X-Kraft. 900

27.1 Zeitdilatation in der Speziellen Relativitätstheorie. 908
27.2 kosmologische Zeitdilatation in Supernova-Lichtkurven. 909
27.3 Mathematische Form von Zustandsgleichungen und ideales Gas. 911
27.4 Superstern im Pistolennebel. 914
27.5 Stadien im Zyklischen Universum. 917

1 Vorwort

Es ist eine wunderbare Sache, sich mit dem Weltall zu beschäftigen - ob als Hobby, oder als Beruf. Um zu verstehen, was da draußen passiert, ist es gut ein paar Grundkenntnisse in den Naturwissenschaften zu haben. Vor allem die Physik bietet in Gestalt der Astrophysik fundierte Modelle, die sehr erfolgreich viele Beobachtungen in der Natur beschreiben. Die moderne Astronomie ist ein stetig wachsender Wissenschaftszweig und hat sich weit von den Anfängen seit der Erfindung des Fernrohrs im 17. Jahrhundert entfernt. Dies verdanken wir einerseits den schnellen, technologischen Entwicklungen: moderne Teleskope sind Hightech-Geräte, die in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums - von Radiowellen bis in den hochenergetischen Bereich der kosmischen Strahlung - Beobachtungsdaten in Form von Fotos und Spektren liefern. Andererseits verdanken wir es den Erfolgen in der Theorie, die eine mathematisch-physikalische Berechnung der Vorgänge in der Natur gestattet. Die rasante Entwicklung der Computer- und Speichertechnologie beschleunigt den wissenschaftlichen Fortschritt, weil sie erst den Umgang mit großen Datenmengen erlaubt (Beobachtung) und weil dadurch komplexe Berechnungen erst möglich werden (Simulation).

Zusammen liefern Beobachtung und Theorie ein Verständnis der Vorgänge im Kosmos: Wir verstehen, weshalb Sterne leuchten; wir bekommen eine quantitative Vorstellung von Galaxien, Galaxienhaufen und dem ganzen Universum. Dieses Wissen führt uns an die Grenzen des Vorstellbaren und darüber hinaus.

Haben Sie sich schon einmal gefragt, weshalb die Sonne jeden morgen aufgeht und beständig scheint? Wieso können sogar Sterne explodieren? Wie nehmen Massen Einfluss auf Raum und Zeit? Gibt es wirklich Schwarze Löcher? Was ist Quintessenz, und was verbirgt sich hinter dieser mysteriösen Dunklen Energie, die unser Universum so stark beeinflussen soll? Was ist so anders an der Welt im Kleinen, wenn wir subatomare Bereiche betrachten? Was sind Quanten, Quarks, Fermionen, Leptonen und Hyperonen? Weshalb ist der Tunneleffekt nicht mit unserer Alltagserfahrung vereinbar? In diesem **Wissensportal für Astrophysik** bekommen Sie einige Antworten präsentiert, die Sie verblüffen werden. Alles wird auf der Grundlage der modernen, naturwissenschaftlichen Forschung erörtert.

Moderne Weltraumforschung deckt das ganze Spektrum des Denkbaren ab: von wohl etabliert und nachvollziehbar bis hoch spekulativ und verrückt; von verifiziert bis hypothetisch, von glaubwürdig bis unglaublich. Geist und Natur kennen keine Grenzen und ständig wächst der forschende Mensch über seine eigenen Grenzen hinaus.

Dieses Lexikon möchte dabei ein Werkzeug sein, um die unglaubliche Wissensflut, die uns Beobachtungen und Veröffentlichungen täglich bescheren, zu bändigen. Der Leser erfährt in kompakter Form die wesentlichen Aspekte eines Begriffs, der in der Astronomie eine Rolle spielt. Verständlichkeit und Aktualität sind dabei wichtige Kriterien. Links bieten eine hervorragende Möglichkeit, um die Wissenseinheiten miteinander zu verknüpfen: Der Leser kann bequem von einem Begriff zum nächsten, inhaltlich relevanten Begriff kommen. Das Lexikon ist natürlich inhaltlich beschränkt, doch bereits nach dem Lesen weniger Begriffe eignet sich der Leser ein **kompaktes Wissen über die großen Fragen der Astrophysik** an. Dieses Wissen kann den Blick an den Nachthimmel mit Verständnis bereichern oder

Ausgangspunkt für mehr sein - für eine wissenschaftliche Diskussion, für vertiefende Lektüre, für Forschung oder für ein schlichtes Bestaunen dieser faszinierenden Komplexität und Ästhetik.

> *Dieses Astro-Lexikon möchte Ariadnefaden im Minotaurus-Labyrinth der modernen Astrophysik sein. Der Leser bekommt Einblicke in das, was Physiker in ihren Elfenbeintürmen treiben.*

Im Index gibt es **550 Begriffe**, die Bestandteil folgender Disziplinen sind:

Gravitation	Relativitätstheorie	Kosmologie
Weiße Zwerge	Neutronensterne	Schwarze Löcher
Galaxien	Aktive Galaktische Kerne	Extragalaktik
Stellarphysik	Nukleare Astrophysik	Hochenergiephysik
Quantenphysik	Teilchenphysik	Quantenfeldtheorien
Fluiddynamik	Hydrodynamik	Magnetohydrodynamik

Die Einteilung ist alphabetisch von **A** wie *Abbremsparameter* bis **Z** wie *Zyklotron*. In der Webversion des Lexikons finden Sie rechts oben den Index; in der Druckversion ist er am Ende des Dokuments: einfach auf den Begriff klicken und eine kompakte Beschreibung kann nachgelesen werden. Nutzen Sie dabei die Vernetzung der Begriffe, um das Wissen - ausgehend von einem Aspekt - allmählich zu erweitern oder gehen Sie gezielt vor.

1.1 Zielgruppe

In meinem Lexikon der Astrophysik habe ich von Anfang an versucht über eine oberflächliche und knappe Behandlung eines Begriffs hinauszugehen. Aus Erfahrung weiß ich, dass die meisten Leser es schon gerne genau wissen wollen. Zu grobe Vereinfachungen eines Sachverhalts oder Weglassen damit zusammenhängender Aspekte werden oft einem Thema nicht gerecht und 'gaukeln Banalität vor, wo keine ist'. Ich bin davon überzeugt, dass die Kenntnisse, die Neugier und die damit verbundene Motivation des Lesers häufig unterschätzt werden. Deshalb möchte ich mit meinem Lexikon nach einer grundlegenden Einordnung und Klärung des jeweiligen Begriffs dort anknüpfen, wo andere Lexika aufhören.

Der Vorteil ist, dass die Inhalte sehr nahe an der aktuellen Forschung sind. Für den einen oder anderen Leser wird es ein Nachteil sein, weil zur Beschreibung auch die wissenschaftliche Sprache verwendet wird - aber ich habe auch den Versuch unternommen, diesen Fachjargon mit verständlicher Alltagssprache zu erklären.

Verständnis ist eine Frage des Anspruchs.

Das profunde Verständnis einer Theorie ist - nicht nur in den Naturwissenschaften - mit einem sorgfältigen Studium sämtlicher Methoden der Theorie verbunden. Das kostet viel Zeit. Gewissermaßen gibt es verschiedene Verständnisebenen für eine physikalische Theorie:

- ◇ kein Verstehen,
- ◇ oberflächliches Verstehen in rein prosaischen Grundzügen,

- ◇ konzeptionelles Verstehen in dem Sinne 'Was will die Theorie womit erreichen?' (qualitatives Verständnis),
- ◇ abstrakt-mathematisches Verstehen von Begrifflichkeiten und Gesetzmäßigkeiten (quantitatives Verständnis),
- ◇ umfassendes Verstehen in allen mathematischen Details mit vielen Anknüpfungspunkten zu anderen facheigenen Theorien,
- ◇ Ausbau der begrifflich und mathematisch fundierten Erkenntnisse auf fachfremdem Gebiet: Interdisziplinarität.

Niemand kann alles machen - nicht einmal, wenn man sich nur auf die Astrophysik beschränkt, die ihrerseits ja schon eine Teildisziplin der Physik ist. Somit ist Verständnis untrennbar mit dem Anspruch des Interessenten und mit Selektion verbunden.

Dieses Lexikon bewegt sich auf den mittleren Stufen der gerade genannten Verständnisebenen. Die Einträge können nur ein *konzeptionelles Verständnis* von Bereichen oben genannter Teildisziplinen der Physik vermitteln. Es handelt sich um 'Physik in Prosa', also eine Verwendung der Alltagssprache und Fachsprache, um physikalisches Wissen darzustellen. Die exakte Sprache der Physik ist jedoch die Mathematik. Nur sie kann ein *analytisches Verständnis* der Physik leisten. Ich habe bei den Erläuterungen großteils auf Gleichungen und Formeln verzichtet. Falls einige dargestellt sind, werden sie auch erklärt. Für ein **volles und tiefes Verständnis der Physik** sind mathematische Gleichungen allerdings unerlässlich! Die Gleichungen sind das Werkzeug, um ein naturwissenschaftliches Phänomen zu berechnen. Erst der routinierte Umgang mit Gleichungen ermöglicht das Lösen physikalischer Fragen und festigt das naturwissenschaftliche Verständnis.

Die Physik ist eine exakte Naturwissenschaft, die sich der mathematischen Sprache und der Methode der Logik bedient.

Ich habe häufig in den Lexikoneinträgen auf wissenschaftliche Veröffentlichungen verwiesen und in den Literaturangaben sowie unter dem Abschnitt Literatur für die Astrophysik mit dem Charakter einer Rezension finden sich ebenfalls hervorragende Standardwerke, die ein analytisch-mathematisches und profundes oder breiteres Verständnis fördern.

Die **Zielsetzung dieses Lexikons** ist es, eine grobe Vorstellung von den großen Fragen der Astrophysik zu vermitteln. Es versteht sich als Bindeglied zwischen Laien und Fachmann und popularisiert die wissenschaftliche Arbeit. Die **Zielgruppe** setzt sich eher aus naturwissenschaftlich fortgeschrittenen Interessierten, Hobbyastronomen und Studenten der Naturwissenschaften zusammen; aber auch der naturwissenschaftliche Laie soll eine Antwort auf seine Fragen erhalten. Dabei erhebt das Lexikon sicher keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie werden sicherlich den einen oder anderen Begriff vermissen. Ich werde versuchen, dieses Lexikon ständig zu erweitern und zu aktualisieren, so dass Sie immer auf dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung in der Astrophysik sind - so wie in den letzten Jahren auch.

1.2 Benutzerhinweise

Im April 2007 wurde ein **Relaunch der Website** durchgeführt: die Website präsentiert sich in neuem, farbfrohem Design und natürlich wurden auch die Inhalte aktualisiert. Viele neue

Grafiken veranschaulichen die Inhalte. Außerdem gibt es fast 120 neue Lexikoneinträge. Für das Glossar wurde eine technisch bessere Lösung gefunden: In der Webvariante des Lexikons gelangen Sie über Links auf Buchstaben am Ende eines jeden Lexikoneintrags zum Index und zwar an die Position des Anfangsbuchstabens Ihres Suchbegriffs. In der pdf-Druckversion gibt es links einen Verzeichnisbaum, der direkt Buchstabe, Eintrag und Unterkapitel listet. Nun muss nur der gewünschte Suchbegriff in der Liste angeklickt werden, und Sie finden die entsprechenden Informationen. Nachschlagen und 'Querlesen' vieler Einträge wurde dadurch vereinfacht.

Ihre Meinung interessiert mich! Empfinden Sie das Lexikon und die Website insgesamt als benutzerfreundlich? Vermissen Sie bestimmte Inhalte? Bei Fragen, Anregungen oder Hinweisen auf Fehler würde ich mich in jedem Fall über einen Kontakt mit Ihnen sehr freuen! Meine Kontaktinformationen befinden sich am Ende des Vorworts.

1.3 neue Lexikoneinträge

Um die neuen Einträge im Lexikon schneller auffinden zu können, folgt hier eine Liste:
A AdS/CFT-Korrespondenz, Apastron, Aphel, Apogäum, asymptotisch flach, Auflösungsvermögen, **B** Balbus-Hawley-Instabilität, Bardeen-Beobachter, baryonische Materie, Bezugssystem, Blandford-Payne-Szenario, Bogenminute, Bogensekunde, Bosonenstern, Brans-Dicke-Theorie, Bulk, **C** Chaplygin-Gas, **D** Deep Fields, Derricks Theorem, DGP-Szenario, Doppler-Effekt, **E** Eklipse, Ekliptik, Elementarladung, Energiebedingungen, Epizykel, Extinktion, Exzentrizität, **F** Falschfarbenbild, Fermionenstern, Fernparallelismus, Flachheitsproblem, FLRW-Kosmologie, Fluchtgeschwindigkeit, f(R)-Gravitation, **G** Galaxie, Grad, Granulation, Gravitation, Gravitationskühlung, Gravitomagnetismus, **H** Hierarchieproblem, Hintergrundmetrik, HLX, Homogenitätsproblem, Horizontproblem, **I** intermediate-mass black hole, Isospin, Isotop, ITER, **J** Jahreszeiten, **K** Kaluza-Klein-Theorie, Kaup-Grenzmasse, Kerr-de-Sitter-Lösung, Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung, K-Korrektur, Koinzidenzproblem, Kompaktheit, **L** Laborsystem, Laserleitstern, Leuchtkraftdistanz, Levi-Civita-Zusammenhang, Licht, Lichtkurve, LIRG, Lokale Gruppe, **M** Magnitude, Mikroblazar, Milchstraße, mittelschwere Schwarze Löcher, MOND, Monopolproblem, **N** Newtonsche Gravitation, Nullgeodäte, **O** Öffnung, Oppenheimer-Volkoff-Grenze, **P** Periastron, Perigäum, Perihel, periodisch, persistent, PG1159-Sterne, Pioneer-Anomalie, Planckscher Strahler, Planet, Planetarische Nebel, Polytrop, Post-Newtonsche Approximation, Pseudo-Newtonsche Gravitation, **Q** quasi-periodisch, Quelle, **R** Radioaktivität, Randverdunklung, Rayleigh-Jeans-Strahlungsformel, Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung, relativistisch, RGB-Bild, Robinson-Theorem, RRAT, Ruhesystem, **S** scheinbare Größe, Schwarzer Körper, Schwarzschild-de-Sitter-Lösung, Schwerkraft, Stefan-Boltzmann-Gesetz, **T** Tagbogen, Tetraden, TeVeS, Tiefenfeldbeobachtung, Tierkreis, TNO, transient, Transit, **U** ULX, **W** Wellenfunktion, Wiensche Strahlungsformel, w-Parameter, **Z** Zwergplanet

1.4 Druckversionen

Neben der Webvariante steht das Lexikon im weit verbreiteten **pdf-Format** (Portable Document File) zum Download zur Verfügung. Diese Dateien können Sie mit dem *Acrobat-Reader* von Adobe öffnen und ausdrucken. Das Lexikon ist sowohl komplett, als auch

buchstabenweise als pdf erhältlich.

Eine **Neuerung 2007** ist, dass nun auch in der pdf-Version die *volle Funktionalität mit Hyperlinks* umgesetzt wurde - genau wie in der html-Version. Die Links sind im pdf farblich hervorgehoben und verweisen sowohl intern an die jeweilige Stelle im Lexikon (blau gerahmte Links), als auch extern ins Worldwide Web (rot gerahmte Links; zur Nutzung der Links ins WWW in das entsprechende Plug-In für den *Acrobat-Reader* erforderlich). Außerdem gibt es am Ende des Lexikons einen **Index**, der auf die Seitenzahl des Stichworts verweist *und* die gleiche Funktion hat, wie der Index der html-Version.

Achtung: Die Linkfunktionalität im pdf von Eintrag zu Eintrag (blau gerahmt) ist *nur bei der kompletten Version* mit knapp 1000 Seiten gegeben! WWW-Links (rot gerahmt) bleiben in allen Versionen erhalten.

Wichtiger Hinweis zum Ausdrucken: Die farblichen Rahmen der Links werden *nicht* gedruckt. Die Druckversionen wurden wie die professionelle Fachliteratur mit dem Textsatzsystem LaTeX erzeugt. Daher präsentiert sich das Lexikon nach dem Ausdruck in Buchqualität.

Sowohl Webversion, als auch Druckversion sind vom Stand April 2007.

1.5 Literatur

1.5.1 von Andreas Müller – antichronologisch

- ◇ Müller, A.: Experimental Evidence of Black Holes, Proceedings of Science (P2GC) 017, 2007; Editors: L. Bonora, S. Fajfer, R. Iengo, D. Klabucar, S. Pallua, I. Picek; pdf, Preprint pdf
- ◇ Müller, A.: The onset of General Relativity: Gravitationally redshifted emission lines, Astronomische Nachrichten 327, 1024-1027, 2006; Proceedings zum ESAC/XMM-Newton Science Operations Centre Workshop *Variable and Broad Iron Lines around Black Holes*, 26.-28.06.06 in Madrid; preprint pdf
- ◇ Müller, A. & Wold, M.: On the Signatures of Gravitational Redshift: The Onset of Relativistic Emission Lines, Astronomy & Astrophysics 457, 485, 2006; pdf Preprint pdf
- ◇ Hasinger, G. & Müller, A.: Active Cores in Deep Fields, Proceedings zum Symposium der Internationalen Astronomischen Union Nr. 230, *Populations of High Energy Sources in Galaxies*, Aug 15-19 2005, Dublin, Eds E.J.A. Meurs & G. Fabbiano; pdf
- ◇ Müller, Andreas: Wirbel der Raumzeit - Die Astrophysik rotierender Schwarzer Löcher, Sterne und Weltraum 10, 2004; pdf
- ◇ Müller, Andreas & Camenzind, M.: Relativistic emission lines from accreting black holes - The effect of disk truncation on line profiles, Astronomy & Astrophysics 413, 861, 2004; pdf
- ◇ Müller, Andreas: Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry, Dissertationsschrift, Ruperto-Carola-Universität Heidelberg, 2004; pdf (9.9 MB). Die Dissertation ist komplett in englischer Sprache, hat 182 Seiten und enthält 33 Farbabbildungen, 20 s/w Abbildungen sowie einen Index.

◇ Müller, Andreas: Emissionslinienprofile relativistischer Scheiben um rotierende Schwarze Löcher, Diplomarbeit, Landessternwarte Heidelberg, 2000; pdf (3.9 MB). Die Diplomarbeit ist in deutscher Sprache, hat 183 Seiten und enthält 27 Farbabbildungen sowie 27 s/w Abbildungen.

1.5.2 wissenschaftliche Veröffentlichungen

Die Papiere, die einen Großteil der hier dargestellten Inhalte ausmachen, werden an geeigneter Stelle im Lexikon zitiert. Die Veröffentlichungen können über den Preprintserver arXiv beschafft werden (vor allem aus den Rubriken *astro–ph/* und *gr–qc/*) oder sind über The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System (**ADS**) erhältlich. Achtung: In der Regel erfordern die Fachjournale ein kostenpflichtiges Abonnement.

Eine wunderbare Website ist Astronomy Picture of the Day (*APOD*), die von der NASA betrieben wird und auf der täglich neue und faszinierende Bilder aus dem Weltall erscheinen. Die Bilder werden knapp und verständlich kommentiert.

1.5.3 Bücher – nach Relevanz

◇ C.W. Misner, K.S. Thorne und J.A. Wheeler, **Gravitation** (1973), Freeman San Francisco

◇ S.L. Shapiro & S.A. Teukolsky, **Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars - The Physics of Compact Objects** (1983), Wiley, New York

◇ S. Chandrasekhar, **The Mathematical Theory of Black Holes** (1983), Clarendon Press, New York

◇ R. d'Inverno, **Introducing Einstein's Relativity** (1992), Oxford University Press

◇ M. Camenzind, **Compact Objects in Astrophysics. White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes** (2007), Springer Berlin

◇ K.R. Popper, **Logik der Forschung** (1994), Verlag J.C.B. Mohr, Tübingen

◇ W. Nolting, **Grundkurs: Theoretische Physik** (1993), Band 1 - 7, Verlag Zimmermann-Neufang

◇ K.S. Thorne, R.H. Price, D.A. Macdonald, **Black Holes: The Membrane Paradigm** (1986), Yale University Press, New Haven and London

◇ K.S. Thorne, **Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy** (1994), Papermac London

◇ H. Goenner: **Einführung in die Kosmologie** (1994), Spektrum Verlag

◇ S.W. Hawking, **Eine kurze Geschichte der Zeit** (1993), Rowohlt Taschenbuch Verlag

◇ T. Bührke, **Albert Einstein** (2004), dtv portrait, Deutscher Taschenbuch Verlag

◇ G.B. Rybicki & A.P. Lightman, **Radiative Processes in Astrophysics** (1979), Wiley, New York

- ◇ J.A. Peacock, **Cosmological Physics** (1999), Cambridge University Press
- ◇ S.W. Hawking und G.F.R. Ellis, **The Large Scale Structure of Space-Time** (1973), Cambridge University Press
- ◇ S.W. Hawking und versch. Autoren, **Hawking on the Big Bang and Black Holes** (1993), World Scientific Publishing
- ◇ diverse Autoren, **Die Klassiker der Physik -** $E = mc^2$ (2004), Verlag Hoffmann und Campe
- ◇ G. Fasching, **Sternbilder und ihre Mythen** (1993), Springer-Verlag Wien – New York
- ◇ Schülerduden **Die Astronomie** (1989), Meyers Lexikonverlag
- ◇ P.A. Tipler, **Physik** (1994), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg – Berlin – Oxford
- ◇ J.R Gott, **Zeitreisen in Einsteins Universum** (2003), Rowohlt Taschenbuch Verlag
- ◇ Diverse Autoren: **Teilchen, Felder und Symmetrien** (1988), Verlag Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg
- ◇ S. Weinberg, **Gravitation and Cosmology** (1972), Wiley, New York
- ◇ H. Weyl, **Raum-Zeit-Materie** (1988), Springer Verlag, Berlin
- ◇ Duden, **Die deutsche Rechtschreibung** (2001), Band 1, 22. Auflage, Dudenverlag Mannheim – Leipzig – Wien – Zürich
- ◇ Langenscheidt, **Taschenwörterbuch Altgriechisch** (1993), Teil 1, Langenscheidt Berlin – München – Wien – Zürich – New York
- ◇ Schülerduden **Lateinisch – Deutsch** (2002), 2. Auflage, Dudenverlag Mannheim – Leipzig – Wien – Zürich
- ◇ Bitte schauen Sie auch in meine Buchbesprechungen.

1.5.4 Vorlesungsskripte

- ◇ M. Camenzind, **General Relativity**, LSW Heidelberg, 2004
- ◇ M. Camenzind, **Quasars and Rotating Black Holes**, LSW Heidelberg, 2002
- ◇ M. Camenzind, **Compact Objects in Astrophysics**, LSW Heidelberg, 2000/2001
- ◇ M. Camenzind, **Physik Rotierender Schwarzer Löcher**, LSW Heidelberg, 1998
- ◇ M. Camenzind, **Einführung in die Astronomie und Astrophysik I & II**, LSW Heidelberg, 1997
- ◇ M. Bartelmann: **Cosmology**, ZAH Heidelberg, 2005

- ◇ P. Schneider: **Einführung in die Astronomie II**, Argelander-Institut für Astronomie Bonn, 2002
- ◇ N. Grewe, **Theoretische Physik** (Klassische Mechanik, Klassische Elektrodynamik, Quantenmechanik, Quantenfeldtheorien, Vielteilchenphysik), TU Darmstadt, 1994 - 1998
- ◇ J. Wambach, **Physik der Kompakten Sterne**, TU Darmstadt, 1998
- ◇ T. Mohaupt, verschiedene Ressourcen zum Thema **Stringtheorien**

1.6 Danksagungen

Vielen Dank an die vielen Wissenschaftler, die zur Anreicherung dieses Wissens, dieses etablierten Weltbildes beigetragen haben. Besten Dank an meine Förderer und Ausbilder, die mir die Erstellung dieses Lexikons ermöglicht haben: Prof. Dr. Max Camenzind (Landessternwarte Heidelberg) und Prof. Dr. Günther Hasinger (Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching). Ein herzliches Dankeschön an die Leser meiner Website, die mit Lob, Kritik und vielen Anregungen zur Verbesserung des Angebots beigetragen haben. Ein spezielles Dankeschön an Dr. Michael Petri, Dr. Bernd Aschenbach, Dr. Neven Bilic, Thomas Mädler, Werner Kasper und Sönke Derlin für sehr inspirierende Diskussionen. Ich danke auch der Max-Planck-Gesellschaft, die exzellente Bedingungen für Forschung und Öffentlichkeitsarbeit bietet. Und natürlich danke ich meiner Familie Anja, Pascal & Dominic, die mir immer dann Bodenhaftung verleiht, wenn ich mich um Lichtjahre von der irdischen Normalität zu entfernen drohe.

Nun endlich viel Spaß mit dem Lexikon der Astrophysik!

Ihr **A**ndreas **M**üller

1.7 Kontakt

Dr. Andreas Müller

Technische Universität München (TUM)
Exzellenzcluster Universe
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching
Germany

http://www.universe-cluster.de

andreas.mueller@universe-cluster.de

+49 (0)89 - 35831 - 71 - 04

2 Lexikon A

2.1 Abbremsparameter

Der Abbremsparameter q_0 ist ein wichtiger Modellparameter der Kosmologie, der ein **Maß für die Abbremsung oder Beschleunigung der Expansion des Universums** ist. Zusammen mit der Hubble-Konstanten bzw. allgemeiner gesprochen des Hubble-Parameters ist der Abbremsparameter einer der fundamentalen Parameter der Kosmodynamik. Näheres dazu unter den Einträgen Hubble-Gesetz und Friedmann-Weltmodelle.

2.2 ADAF

Das Akronym ADAF steht für *advection-dominated accretion flow*, was man gleichwohl als **advektionsdominierter Akkretionsfluss** übersetzen kann. Vereinfacht gesagt, verbirgt sich hinter ADAF eine aufgeblähte Materieströmung aus heißem, dünnem Gas, die eine etwa kugelige Gestalt um das Materie aufsammelnde Zentralobjekt annimmt. Die Astronomie ist auf die Existenz solch heißer Akkretionsflüsse um kosmische Objekte wie Neutronensternen oder Schwarzer Löcher angewiesen, um erklären zu können, wie die hochenergetischen Röntgenspektren zustande kommen.

2.2.1 Beschreibung der Akkretionslösung

Zunächst soll es jedoch um die Charakterisierung des ADAFs gehen, auch wenn die Beschreibungen recht technisch sind: Ein ADAF ist eine spezielle, analytische Lösung, die sehr bekannt in der Akkretionsphysik ist. Es ist eine selbstähnliche Akkretionslösung, die auf dem theoretischen Zweig der dissipativen Hydrodynamik beruht. Der ADAF wurde 1994 entdeckt (*Narayan & Yi* 1994) und weist ein paar klare Unterschiede zur Standardscheibe (SSD), einer anderen, berühmten Akkretionslösung, auf. Im Wesentlichen liegt das darin begründet, dass die akkretierte Materie **nicht effizient durch Strahlung gekühlt** wird. Das ist eine so markante Eigenschaft, dass sich für solche Akkretionsflüsse der Oberbegriff **RIAF** für *radiatively-inefficient accretion flow* (dt.: durch Strahlung ineffizient gekühlter Akkretionsfluss) etabliert hat. Jeder ADAF ist demnach ein RIAF - aber nicht umgekehrt! Das Unterbleiben der Kühlung führt zur Aufheizung des Akkretionsflusses: Wie kochendes Wasser in einem Topf dehnt sich der heiße Fluss aus. Dabei wird der Akkretionsfluss ausgedünnt, das Gas wird demnach weniger dicht. Ein dünnes Gas kann durch Strahlung kaum gekühlt werden, weil es kaum Wechselwirkungen zwischen Gas und Strahlung gibt. Die mittlere, freie Weglänge ist recht groß. Im Gegensatz zur Standardscheibe wird die thermische Energie nicht als elektromagnetische Wellen abgestrahlt, sondern im Gas als innere Energie und Entropie gespeichert. Der radiale Entropiegradient ist eine geeignete Größe, um den Unterschied der beiden wichtigsten analytischen Akkretionslösungen zu beschreiben: Der Entropiegradient verschwindet bei SSDs und nicht bei ADAFs. Die somit im ADAF gespeicherte Energie verschwindet im aufsammelnden Objekt - dem so genannten *Akkretor*. Die Akkretionsphysiker

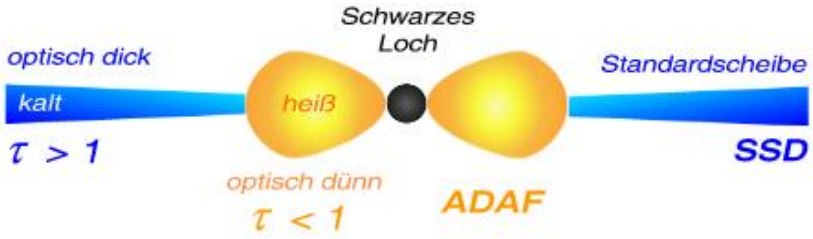

Abbildung 2.1: Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.

sagen: *Die Energie wird advektiert*. Die Bezeichnung advektions-*dominiert* bezieht sich nun darauf, dass die Kühlung sehr ineffizient ist.

2.2.2 Teilchenbewegungen im ADAF

Das **Geschwindigkeitsfeld im ADAF** ist *sub-Keplersch*, d. h. dass bei einem vorgegebenen Radius die Rotation nur etwa 40% der Keplerschen Umlaufgeschwindigkeit an diesem Radius ist. Die radiale Geschwindigkeit, also die Einfallgeschwindigkeit in Richtung auf das Zentralobjekt ist vergleichbar mit dieser sub-Keplerschen Rotationsgeschwindigkeit. ADAFs bilden sich typischerweise bei **kleinen Akkretionsraten** aus. Pro Zeiteinheit fällt verhältnismäßig wenig Materie auf den Akkretor. Bei hohen Akkretionsraten dominieren andere Akkretionslösungen, wie die Standardscheibe oder die so genannten **schlanke Scheiben** (engl. *slim disks*).

2.2.3 Warum ist der ADAF von allgemeiner Bedeutung?

Im Gegensatz zum ADAF findet man die Standardscheibe in unterschiedlicher Ausprägung in allen Akkretionsflüssen - unabhängig von der Akkretionsrate. Diese Aussage deutet sich zumindest in einem vereinheitlichenden Akkretionsmodell (engl. *accretion unification scheme*) an, das unter dem Lexikoneintrag Akkretion illustriert ist. In Abbildung 2.1 ist der Schnitt durch einen Akkretionsfluss (hier ein SSD-ADAF-Übergang) entlang der Symmetrieachse dargestellt. Schematisch sind die Unterschiede von kalter, geometrisch dünner, optisch dicker Standardscheibe und heißem, geometrisch dickem, optisch dünnem ADAF illustriert; als Akkretor wurde ein Schwarzes Loch angenommen, was jedoch nicht zwingend ist.

Das heiße Material im ADAF ist so heiß, dass die Plancksche Strahlungsverteilung viel Intensität im Röntgenbereich abgibt. Außerdem wird im heißen, optisch dünnen Gas die energiearme Strahlung Comptonisiert. Beide Komponenten zusammen - thermische Röntgenstrahlung und Comptonisierter Teil - erklären sehr gut die beobachteten Röntgenspektren von Akkretoren, in denen man den ADAF vermutet.

Das ausgedünnte Material des ADAF bietet gute Transparenzeigenschaften (auch Transmissionseigenschaften genannt) für elektromagnetische Wellen. Die Akkretionsphysiker sagen, ein ADAF sei *optisch dünn* (siehe dazu optische Tiefe). Die dominierende Strahlungsform, die zur Kühlung ausgedünnter Gase beiträgt, ist **Bremsstrahlung**. Der Energieverlust von Bremsstrahlung skaliert mit dem Quadrat der Dichte und der Wurzel der Gastemperatur, so dass extrem ausgedünntes Material kaum effizient durch Emission von

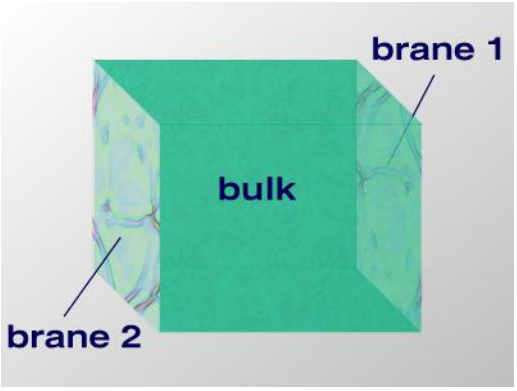

Abbildung 2.2: System aus Bulk und 2 Branen

Bremsstrahlung abkühlt.

2.3 ADD-Szenario

Das ADD-Szenario ist benannt nach den Forschern ***A**rkani-Hamed*, ***D**imopoulos* & ***D**vali*, die es 1998 vorstellten (*Arkani-Hamed et al.* 1998). Es greift einen Aspekt der Kaluza-Klein-Theorie aus den 1920er Jahren auf, der 1990 von *Antoniadis* wiederbelebt wurde: die Existenz von räumlichen Extradimensionen. Motiviert war dieses Modell durch das **Hierarchieproblem**. Physiker beobachten einen deutlichen Unterschied, wenn sie die Stärken der vier Wechselwirkungen, die so genannten Kopplungskonstanten, miteinander vergleichen: die Gravitation ist deutlich schwächer als die anderen drei Wechselwirkungen (starke, schwache und elektromagnetische Kraft). Anders gesagt: die Planck-Skala, diejenige Skala, wo Quanteneffekte der Gravitation wichtig werden, liegt mit 10^{19} GeV deutlich über der Energieskala der elektroschwachen Theorie, 100 GeV. Warum?

2.3.1 Ansatz: Gravitation wirkt in allen Raumdimensionen

Der Ansatz im ADD-Szenario ist, dass die Gravitation in Gestalt des (hypothetischen) Gravitons in räumliche Extradimensionen vorzudringen vermag, wohingegen alle anderen Teilchen und Felder des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen Unterraum, der so genannten **Bran** (genauer: *3-Bran*), beschränkt sind. Anschaulich gesprochen trägt die Gravitation Energie in eine andere Dimension, was in ihrer Schwäche resultiert, wie es ein Beobachter wahrnimmt, der auf einen Raum niedrigerer Dimension beschränkt ist.

2.3.2 Von Bulk und Branen

Den übergeordneten Raum höherer Dimension nennen die Hochenergiephysiker **Bulk** (gesprochen 'balk'), in dem die Branen *Hyperflächen* (eine Dimension weniger) repräsentieren. Die Grundidee ist in Abbildung 2.2 skizziert. Im ADD-Szenario ist der Bulk fünfdimensional und weist eine **flache** Metrik auf, die 5D-Verallgemeinerung der vierdimensionalen Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie. Die Extradimensionen sind auf einen bestimmten Radius, dem *Kompaktifizierungsradius*, beschränkt sein (das ist ein Unterschied

zum DGP-Modell). Kommt dieser Radius in den makroskopischen Bereich, so spricht man von großen Extradimensionen (engl. *large extra dimensions*, LED oder LXD). Im ADD-Szenario lässt sich nachrechnen, dass sich die Extradimensionen physikalisch darin bemerkbar machen, dass bei Erreichen des Kompaktifizierungsradius **Abweichungen vom klassischen Newtonschen Gravitationsgesetz** auftreten. Bisher ist es nicht gelungen, diese Abweichungen im Experiment bis zu einer Längenskala von einem Millimeter zu bestätigen. Die Extradimensionen müssen also - wenn sie denn existieren - auf kleinere Abstände kompaktifiziert sein.

2.3.3 reduzierte Planck-Skala

Eine natürliche Konsequenz des ADD-Modells ist eine modifizierte Planck-Skala. Die zusätzlichen Raumdimensionen bewirken, dass die klassisch sehr hohe Planck-Skala von der Größenordnung $\mathrm{M_{Pl}} \sim 10^{19}$ GeV herabgesetzt wird auf der Bran - also unserer niedrigdimensionalen Welt. Die **reduzierte Planck-Skala** $\mathrm{M_{Pl,D}}$ berechnet sich gemäß dieser Gleichung:

$$\mathrm{M_{Pl,D}} = {\mathrm{M_{Pl}}}^{2/(2+n)} \left(\frac{\hbar}{Rc}\right)^{n/(2+n)}$$

Dabei geht die Anzahl der Extradimensionen n ein, der Kompaktifizierungsradius R und ansonsten nur fundamentale Naturkonstanten.

2.3.4 Abenteuerliches Experiment: Schwarzes Loch im Teilchenbeschleuniger

Die reduzierte Planck-Skala hat den wesentlichen Aspekt, dass es möglich sein könnte, eine Miniversion von Schwarzen Löchern in Teilchenbeschleunigern herzustellen, die eine Masse von etwa 1 TeV hätten. Das Konzept läuft unter dem Stichwort TeV-Quantengravitation. Eine Laborphysik Schwarzer Löcher rückt damit in experimentell greifbare Nähe und könnte vielleicht schon am neuen LHC-Beschleuniger am CERN umgesetzt werden. Diese Forschung ist auch für Astrophysiker aufregend und von großem Interesse. Ab Ende 2007 beginnen die Messungen am LHC.

2.3.5 Ein realistisches Szenario?

Bislang ist das ADD-Szenario **eine Hypothese**, weil Extradimensionen nicht nachgewiesen werden konnten, auch nicht indirekt. Allerdings erfordern die Stringtheorien zwingend die Existenz von mehr Raumdimensionen als die klassischen drei: Länge, Breite und Höhe. Sollten die Stringtheorien zunehmend mehr Erscheinungen in der Natur erklären können, so würde auch das ADD-Szenario realistischer werden. Schwierig wird sich eine Auswahl gestalten, da es eine Vielzahl solcher höherdimensionalen Branenmodellen gibt, so u. a. auch die **Randall-Sundrum-Modelle** und das **DGP-Szenario** (mit nicht kompaktifizierter Extradimension).

2.3.6 Originalveröffentlichung

◇ *Arkani-Hamed, N., Dimopoulos, S. & Dvali, G.*: The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter, Phys. Lett. **B 429**, 263, 1998; als Preprint hep-ph/9803315

2.4 ADM-Formalismus

Es handelt sich um eine spezielle mathematische Methode, die in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) mit Erfolg eingesetzt wird. Diese Technik wurde von *Arnowitt*, *Deser* und *Misner* 1962 entwickelt und ist außerordentlich nützlich für die **Numerische Relativitätstheorie**.

2.4.1 Motivation zu dieser Methode

Wenn man physikalische, dynamische Prozesse in einer gekrümmten Raumzeit untersuchen möchte, ergibt sich das Problem, dass die Zeit in jedem Punkt der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit anders ablaufen kann: hier schneller, da langsamer, sie kann sogar - für einen Außenbeobachter - stillstehen! Dies ist besonders problematisch, wenn man zeitabhängige Prozesse simulieren möchte, weil man nicht weiß, welcher Beobachter (FIDO, FFO, ZAMO) der geeignete ist und eine 'richtige Physik' beschreibt. Generell erlaubt die ART von einem auf den anderen Beobachter zu transformieren. Dies geschieht mittels Lorentz-Transformationen und Poincarè-Transformationen.

2.4.2 Und so geht's

Im ADM-Formalismus spaltet man nun die von der Relativitätstheorie geschaffene Symmetrie zwischen Raum und Zeit (daher Raumzeit) wieder auf. Deshalb nennt man diese Methode auch den **3+1 Split**, weil man in die *drei Raumkoordinaten* einerseits und die *eine Zeitkoordinate* andererseits aufspaltet. Dies gelingt dadurch, dass man die vierdimensionale Raumzeit aus **dreidimensionalen raumartigen Hyperflächen** zusammensetzt, auf denen der Zeitparameter jeweils konstant ist. Der Ablauf der Zeit geschieht nun durch 'Springen' von einer Hyperfläche zur nächsten in dieser **Foliation** (*Blätterung*) aus Hyperflächen. Jede Hyperfläche hat ihre eigene **Drei-Metrik**, h_{ij}, die man aus der kovarianten, vierdimensionalen (also übergeordneten) Metrik gewinnt: es sind gerade die Elemente der unteren, rechten 3×3-Matrix, die in die 4×4-Matrix des so dargestellten metrischen Tensors (in einem bestimmten Koordinatensystem) eingebettet sind. Die folgende Gleichung zeigt das Linienelement der ART, das die Eigenschaften einer Raumzeit charakterisiert im 3+1 Split:

$$ds^2 = \alpha^2 dt^2 - h_{ij}\left(dx^i + \beta^i dt\right)\left(dx^j + \beta^j dt\right);\ i,j = 1,2,3$$

Der linke Term enthält die Zeitdimension, der rechte die drei Raumdimensionen. Jede (nicht pathologische) Raumzeit kann in diese Form gebracht werden, so dass man die Größen α und β identifizieren kann. Aber was sagen uns nun diese Größen?

2.4.3 Wer α sagt, muss auch β sagen

Von einer Hyperfläche zur nächsten vermittelt die **Lapse-Funktion** (übliche Bezeichnung mit α) die Veränderung des Zeitablaufs. Physikalisch betrachtet ist die Lapse-Funktion gerade das Differential der Eigenzeit über dem der Beobachterzeit, also die Gravitationsrotverschiebung. Die Lapse-Funktion misst gerade diejenige Zeit, die für den lokalen Beobachter - FIDO genannt - vergangen ist, wenn für den unendlich entfernten Außenbeobachter gerade eine Einheit seiner 'universellen' Zeit vergangen ist.

Auf einer Hyperfläche selbst vermittelt der **Shift-Vektor** (β) eine Verschiebung im 3D-Raum innerhalb einer Hyperfläche. Es handelt sich um eine Verschiebung des räumlichen

Koordinatengitters gegenüber dem des FIDOs. Der Begriff *Shift-Vektor* geht auf den Relativisten *John A. Wheeler* zurück (1964). Im Frame-Dragging-Effekt der Kerr-Metrik wird diese Verschiebung anschaulich klar. Das 3D-Koordinatengitter in Boyer-Lindquist-Koordinaten wandert im 3+1 Split der Kerr-Geometrie entlang der azimutalen Richtung: der Raum selbst wird um die Rotationsachse des sich drehenden Schwarzen Loches gedreht.

2.4.4 Vorteil: Studie dynamischer Prozesse in der ART

Lapse, Shift und 3-Metrik sind alle zeit**un**abhängig und legen dann eindeutig eine neue Formulierung der Metrik im 3+1 Split fest! Auf diese Art und Weise hat man sich eine **globale Zeit** konstruiert, kann zeitabhängige Prozesse allgemein relativistisch beschreiben und numerisch studieren. Entsprechend kann man bei der Untersuchung magnetohydrodynamischer Prozesse einen 3+1 Split des Maxwell-Tensors vornehmen, der dabei in elektrisches und magnetisches Feld zerfällt. Aber auch in der allgemein relativistischen Hydrodynamik muss der 3+1 Split verwendet werden.

Eine Verallgemeinerung des soeben beschriebenen In-Scheiben-Schneidens der Raumzeit, des *ADM-Slicings*, gelingt in der Loop-Quantengravitation, einer Quantengravitation, die ihre fundamentalen Quanten in Loops bzw. in neuerer Formulierung in Spin-Netzwerken sieht. Ihre Zeitentwicklung bildet den Spinschaum auf der Planck-Skala. Slicing des Spinschaums liefert gerade Momentaufnahmen von Spin-Netzwerken.

2.5 AdS/CFT-Korrespondenz

Die AdS/CFT-Korrespondenz, AdS-CFT-Dualität oder Maldacena-Dualität gehört zu den wichtigsten Entdeckungen in der theoretischen Physik in den 1990er Jahren. Sehr salopp umschrieben handelt es sich um eine Art Verwandtschaft zwischen der Gravitation und Theorien für Teilchenphysik. Um konkreter zu erklären, was gemeint ist, müssen zunächst einige Begrifflichkeiten und Grundlagen geklärt werden.

2.5.1 Was ist AdS?

AdS ist die Abkürzung für **A**nti-**d**e-**S**itter und meint eine gekrümmte Raumzeit, die mit dem de-Sitter-Kosmos zusammenhängt. Diese Raumzeit ist durchsetzt von einer Energieform, die als kosmologische Konstante Λ bezeichnet wird. *Albert Einstein* hat diese Größe 1917 erfunden, um mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) Fragen der Kosmologie zu lösen.

Das 'Anti' bedeutet, dass die Raumzeit von einer kosmologischen Konstante mit *negativem* Vorzeichen gekrümmt wird. In der AdS/CFT-Korrespondenz geht es aber nicht um vierdimensionale Raumzeiten wie in der ART, sondern um eine **fünfdimensionale** Anti-de-Sitter-Raumzeit. Diese wird abgekürzt mit AdS_5. Auf dieser gekrümmten 5D-Raumzeit wird nun eine Stringtheorie aufgebaut, d. h. AdS_5 fungiert als Hintergrundmetrik einer Theorie für Elementarteilchen. Es ist eine Stringtheorie, die die Gravitation berücksichtigt.

An dieser Stelle sollten Sie als Leser stutzig werden und einwenden: '*Moment, die Stringtheorien sind doch zehndimensional - wo sind die anderen fünf Dimensionen in dieser Betrachtung geblieben?*' Völlig richtig! Die verbleibenden fünf Dimensionen sind auf einer kompakten Mannigfaltigkeit kompaktifiziert. So kann man die Stringtheorie Typ IIB auf dem Produkt der Räume $AdS_5 \times S^5$ bewerkstelligen, wobei S^5 die kompakte 5D-Sphäre ist.

2.5.2 Was ist CFT?

CFT steht für **C**onformal **F**ield **T**heory, also übersetzt konforme Feldtheorie. Eine Feldtheorie beschreibt Kräfte in der Natur entweder klassisch (wie bei der ART oder bei der Maxwellschen Elektrodynamik) oder quantisiert (siehe Quantenfeldtheorie).

Das Attribut 'konform' bedeutet, dass eine bestimmte Symmetrie bei dieser Feldtheorie vorliegt, nämlich die *konforme Symmetrie*. Was das genau bedeutet, ist nur mit einigen Kenntnissen der Gruppentheorie zu verstehen. Im Folgenden wird versucht, die konforme Symmetrie zu erklären: Mathematisch assoziiert man Symmetrien mit Gruppen. In diesem Fall betrachten wir also die konforme Gruppe. Sie setzt sich aus verschiedenen Transformationen (**Generatoren**) zusammen, die gerade die Gruppeneigenschaften erfüllen. Im Falle der konformen Gruppe sind das die Generatoren der Poincarègruppe (d. h. die Lorentz-Generatoren, die zur Lorentzgruppe gehören, plus Translationen), der Generator für Dilatationen sowie spezielle konforme Transformation. Dilatationen sind Transformationen, die die Längen- oder Energieskala verändern. Die zugehörige Symmetrie heißt **Skaleninvarianz**. Eine skaleninvariante Theorie hängt demnach nicht von der Längen- oder Energieskala ab.

Ein Beispiel für eine konforme Feldtheorie ist die vierdimensionale, supersymmetrische Yang-Mills-Theorie, die die starke Kraft beschreibt und die die Supersymmetrie beinhaltet.

2.5.3 Entdecker und Mitbegründer

Juan M. Maldacena, damals an der Harvard University in Cambridge (USA), veröffentlichte 1997 eine wissenschaftliche Arbeit, die in der Fachwelt für viel Aufsehen und Inspiration gesorgt hat. Er entdeckte die AdS/CFT-Korrespondenz, die in der Folgezeit klarer ausgearbeitet wurde, u. a. von dem bekannten Stringtheoretiker *Edward Witten*.

2.5.4 Was ist eine Korrespondenz zwischen AdS und CFT?

Diese Korrespondenz besteht zwischen der Supergravitation oder einer Stringtheorie (Typ IIB) auf einer 5D Anti-de-Sitter-Raumzeit **mit** Gravitation und einer 4D konformen Feldtheorie **ohne** Gravitation. Man sagt auch, die Feldtheorie operiere nur auf dem 4D Rand der 5D AdS-Raumzeit. Wie muss man sich das vorstellen?

Nun, die 5D-Strings vermögen eine Reihe der Eigenschaften der 4D-Yang-Mills-Theorie zu beschreiben. Die Yang-Mills-Theorie ist gerade ein mathematisches Konzept für die starke Kraft. Mathematisch lassen sich nun aus Rechnungen mit Strings in 5D Eigenschaften der 4D-Welt ableiten, die mit der Quantenchromodynamik zusammenhängen. Diese verblüffende Analogie legt eine tiefsinnige Einsicht in die Gravitation und Teilchenphysik frei.

2.5.5 Dualität mit viel allgemeinerem Charakter

Es ist sogar in der weiteren Erforschung der Korrespondenz gelungen, die Dualität auch für andere Raumzeiten als AdS zu verallgemeinern. Ähnlich ist es bei den Feldtheorien, die letztlich Eichtheorien sind. In der Verallgemeinerung sprechen die Theoretiker daher von einer **fundamentalen Dualität von Eichung und Gravitation** (engl. *gauge/gravity dual*, *gauge/string duality*). Dualität meint in diesem Zusammenhang, dass es zwei gleichwertige Beschreibungen der Natur gibt - sozusagen zwei Seiten einer Medaille.

AdS/CFT ist eine konkrete Realisierung des **holographischen Prinzips** (siehe auch Holostern), das *'t Hooft* und *Süsskind* 1993/94 entdeckt haben.

AdS/CFT ist zwar eine **unbewiesene Vermutung**, wurde aber in einigen konkreten Fällen getestet, bei denen **Übereinstimmung** gefunden wurde!

2.5.6 wissenschaftliche Papiere und Links

- ◇ *Maldacena, Juan M.*: The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity, hep-th/9711200
- ◇ *Witten, Edward*: Anti De Sitter Space And Holography, hep-th/9802150
- ◇ Website von Juan M. Maldacena (Princeton, USA)

2.6 AGB-Stern

AGB-Stern kennzeichnet einen Stern, der eine bestimmte Entwicklungsphase im Hertzsprung-Russell-Diagramm durchläuft: er befindet sich auf dem **asymptotischen Riesenast** (engl. *asymtotic giant branch*, kurz **AGB**). Der Stern ist in der AGB-Phase stark aufgebläht zu einem Roten Riesen. AGB-Sterne erzeugen in s-Prozessen Elemente, die *schwerer* sind als Eisen. Damit sind diese Sterne wichtig für die Anreicherung des interstellaren Mediums mit Metallen. Genauer und im Zusammenhang wird die AGB-Phase unter dem Eintrag Sonne beschrieben.

2.7 Äquivalenzprinzip

Das Äquivalenzprinzip ist das wichtigste Prinzip, auf dem *Albert Einsteins* Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beruht. Andere wichtige Prinzipien der ART sind das Machsche Prinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung.

2.7.1 Kernaussage dieses Prinzips

In seiner knappen Formulierung besagt das Äquivalenzprinzip:

Schwere Masse und träge Masse sind gleichwertig.

Das bedeutet, dass es für einen Beobachter in einem abgeschlossenen Kasten nicht möglich ist zu unterscheiden, ob der Kasten auf der Oberfläche einer Masse in dessen Gravitationsfeld steht oder ob er gleichmäßig durch eine konstant wirkende Kraft ohne Gravitationsfeld im freien Raum beschleunigt wird. Diese beiden Fälle werden in der Abbildung 2.3 veranschaulicht: Wie man sieht, wirkt die Beschleunigung durch die Gravitation links genau entgegengesetzt zur Beschleunigung rechts; Testmassen innerhalb des Kastens - hier eine Kugel - zeigen dennoch in beiden Fällen das gleiche Verhalten und werden durch die gleiche Kraft (grüner Pfeil) nach unten gezogen.

Eine etwas andere Formulierung des Äquivalenzprinzips ist, dass man durch lokale Experimente nicht entscheiden kann, ob sich ein System im freien Fall in einer gekrümmten Raumzeit befindet oder ob es kräftefrei eine gleichförmig geradlinige Bewegung in flacher

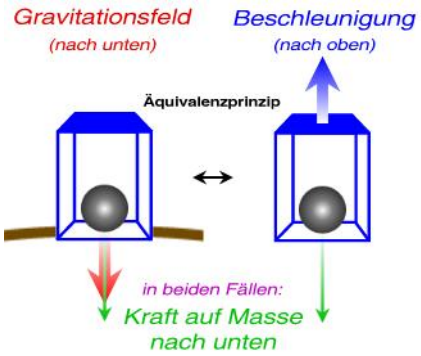

Abbildung 2.3: Kernaussage des Äquivalenzprinzips anschaulich.

Raumzeit ausführt. Beide Systeme führen zu äquivalenten Beobachtungsphänomenen. Diese Eigenschaft heißt **lokale Lorentzinvarianz**: Man kann in der ART immer ein lokales Lorentzsystem konstruieren.

Bisweilen unterscheidet man die schwere Masse in *passive schwere Masse*, wenn ein Körper passiv in einem Gravitationsfeld fällt und in *aktive schwere Masse*, wenn ein Körper aktiv ein Gravitationsfeld erzeugt.

2.7.2 Historische Wegbereiter des Einsteinschen Äquivalenzprinzips

Galilei

Die berühmten **Fall-Experimente** *Galileo Galileis* (1564 - 1642) am Schiefen Turm von Pisa belegten, dass verschiedene Körper im freien Fall die gleiche Beschleunigung erfahren, also zum gleichen Zeitpunkt am Boden ankommen, *unabhängig von ihrer Masse und Zusammensetzung*. Diese Beobachtung Galileis wird als **schwaches Äquivalenzprinzip** bezeichnet. Gegensätzliche Beobachtungen sind meist die Folge des Luftwiderstandes und können in evakuierten Fallanordnungen eliminiert werden.

Eötvös

Im Jahr 1891 entwarf der ungarische Naturwissenschaftler *Loràn Eötvös* (1848 - 1919) - der übrigens auch in Heidelberg studierte - das erste **Drehwaagen-Experiment**. Mit dieser Anordnung konnte er die Gravitationskonstante G mit einer erstaunlichen Genauigkeit ermitteln. Das Messprinzip beruht darauf, dass zwei Massen unterschiedlicher Dichte starr miteinander durch einen Stab bekannter Länge verbunden sind und dieses hantelförmige Gebilde an einem Draht aufgehängt wird. Durch die Wirkung äußerer Gravitationskräfte werden die Massen aufgrund verschiedener Dichten unterschiedlich stark ausgelenkt: der Draht wird durch ein Drehmoment verdrillt (*Torsion*). Rückstellkräfte im Draht versuchen nun diesem Einfluss entgegenzuwirken, und es entsteht eine *Torsionsschwingung*. Die Methode ist dynamisch, weil sich die Massen zwischen massiven Wänden bewegen.

Mit diesem experimentellen Aufbau kann der Experimentator entweder bei sehr exakt bekannten Massen die Gravitationskonstante ermitteln, was von Interesse für die Physik ist, oder er kann unter Zugrundelegung der Gravitationskonstante das irdische Gravitationsfeld vermessen, was Eötvös im Dienste der Geologie anwandte.

2.7.3 Hochpräzision in experimenteller Physik

Die Drehwaagen erlaubten schon damals im 19. Jahrhundert, die Äquivalenz von schwerer und träger Masse bis auf eine Genauigkeit von $1{:}10^8$ genau zu ermitteln. Mittlerweile wurde das Experiment mittels Laser verfeinert (**EötWash**-Experiment) und die Genauigkeit gehört zu den präzisesten Messungen der Physik: träge und schwere Masse sind bis auf $1{:}10^{13}$ genau gleich!

2.7.4 Ein Pendel genauer betrachtet

Die Äquivalenz von schwerer und träger Masse setzt man übrigens stillschweigend beim Lösen der Pendelgleichung in der Mechanik voraus. Denn hier kürzt man die Masse des Schwingers heraus: auf der einen Seite der Gleichung seine *schwere* Masse, auf der anderen Seite seine *träge* Masse. Umgekehrt kann man gerade aus exakten Messungen in solchen Pendelexperimenten auf die Äquivalenz der Massen schließen.

2.7.5 Bedeutung des Äquivalenzprinzips

Die Unabhängigkeit von der Masse beim Fall von Testkörpern im Gravitationsfeld ist bereits ein Hinweis darauf, dass Gravitation eine **geometrische Eigenschaft** ist. Denn gemäß der ART ist Gravitation eine **gekrümmte Raumzeit**, in der sich Licht und Materieteilchen auf Geodäten bewegen!

Einstein nutzte das Äquivalenzprinzip aus, um seine Spezielle Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme zu verallgemeinern. Am Ende dieser Jahre dauernden, theoretischen Ausarbeitungen stand die Allgemeine Relativitätstheorie, eine (unquantisierte) Gravitationstheorie, die sehr erfolgreich unzählige Phänomene, die mit der Gravitation zusammenhängen, beschreibt.

Das Äquivalenzprinzip führt auch zu der Äquivalenz von Hawking-Effekt (im Gravitationsfeld Schwarzer Löcher) und Unruh-Effekt (im Vakuum).

2.8 Akkretion

Akkretion bezeichnet den Prozess, bei dem Materie von einem kosmischen Objekt aufgesammelt wird. Der Begriff stammt aus dem Lateinischen *accretio*, dt. 'Anwachsen', 'Zunahme'. Das aufsammelnde Zentralobjekt wird *Akkretor* oder gravitierendes Objekt genannt. Es kann sich dabei z. B. um einen gewöhnlichen Stern handeln. Besonders junge Sterne wie die Protosterne sind bekannt dafür, dass sie von der Materiewolke, aus der sie entstanden sind, Material aufsammeln. Eine andere prominente und wichtige Gruppe von Akkretoren sind die kompakten Objekte. Dazu zählen die Weißen Zwerge, Neutronensterne, stellare Schwarze Löcher und supermassereiche Schwarze Löcher.

Den Materiestrom nennt man in der Akkretionsphysik den **Akkretionsfluss**. Der Name Akkretions*fluss* ist gerechtfertigt durch die Tatsache, dass die Materieströmung fließt wie eine Flüssigkeit. Die Wechselwirkung der Teilchen im Materiestrom ist paarweise und verleiht dem Akkretionsfluss die typischen Fließeigenschaften eines Fluidums.

2.8.1 Ursachen der Akkretion

Letztendlich ist Akkretion darauf zurückzuführen, dass ein kosmisches Objekt mit seiner Umgebung wechselwirkt. Die Umgebung des Akkretors ist nicht leer, sondern angefüllt mit Material wie dem interstellaren Medium (ISM). Der Akkretor ist massiv (im Sinne von massebehaftet) und besitzt daher ein Gravitationsfeld, das andere Objekte in der Nähe anzuziehen vermag (Dies ist die 'Newtonsche Sprache'. In der Sprache von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie krümmt eine Masse die Raumzeit so sehr, dass die zeitartigen Geodäten am Akkretor enden. Akkretion ist somit eine geometrische Konsequenz.). Die **Gravitation** ist also die Ursache dafür, dass sich ein Akkretionsfluss ausbildet.

2.8.2 Vorsicht: Hier saugt keiner!

Es sei an dieser Stelle auf einen kleinen sprachlichen Aspekt zur Akkretion erläutert: Häufig liest man davon, dass die Akkretoren, insbesondere Schwarze Löcher, die Materie 'ansaugen', 'aufsaugen' oder 'einsaugen'. Diese Bezeichnungen sind nicht ganz korrekt: Saugen hat immer etwas mit einem Unterdruck zu tun (z. B. beim Staubsauger). Ein Unterdruck ist aber **nicht** die Ursache dafür, dass die Materie vom Loch aufgesammelt wird. Man kann allenfalls von Gravitationsdrücken sprechen. Ein Druck ist in der Physik eine Kraft auf eine Fläche, z. B. einer Masse auf eine Unterlage. Deshalb bietet sich an, von Gravitationskräften oder äquivalent Gravitationsdrücken zu sprechen.

2.8.3 Die effizienteste Strahlungsquelle im Kosmos!

Mit der Akkretion sind eine Reihe von **Strahlungsprozesse** verbunden: Das Material im Akkretionsfluss wird durch Reibungseffekte heiß und strahlt deshalb thermisch (Wärmestrahlung, Planckscher Strahler). In einem weniger dichten Akkretionsfluss wird Bremsstrahlung relevant. Sie entsteht dann, wenn elektrisch geladene Teilchen in einem elektromagnetischen Feld abgelenkt oder sogar gestoppt werden. Auch nichtthermische Strahlungsformen wie die Zyklotronstrahlung und die Synchrotronstrahlung spielen eine Rolle, wenn starke Magnetfelder und schnelle Elektronen (seltener auch von Protonen) im akkretierten Material vorkommen. Strahlung wechselwirkt mit Materie durch Streuung, Absorption und Emission. Allgemein sprechen Astronomen vom **Strahlungstransport**. In sehr heißen Materiereservoirs wird die Comptonisierung von niederenergetischer Strahlung wesentlich. Das erklärt die harten Spektren bis in den Bereich einiger 100 keV.

Ob und wie ausgeprägt die genannten Strahlungsprozesse vorkommen ist eine Frage des Akkretors: Generell kann man sagen, dass die Akkretionsflüsse bei kompakten Objekten sehr heiß und schnell werden. Deshalb wird das akkretierte Material ionisiert und in die Ladungsträger Ionen und Elektronen getrennt. Das involviert im Prinzip alle genannten Strahlungsformen. Bei weniger kompakten Objekten hingegen (normalen Sternen, Protosternen) ist der Akkretionsfluss kalt und langsam. Daher spielt hier die Atom- und Molekülphysik eine große Rolle.

Akkretion ist der **effizienteste Prozess**, um Gravitationsenergie in Strahlungsenergie umzuwandeln. Sie ist sogar effizienter als das nukleare Feuer in Sternen! Denn bis zu 42% der Ruheenergie der Materie kann bei der Akkretion in Strahlungsenergie verwandelt werden (rechnerische Details unter Eddington-Leuchtkraft). Demgegenüber weist die thermonukleare Fusion im Innern von Sternen nur eine Effizienz von 0.7% auf. Akkretion auf ein kompaktes Objekt erzeugt deshalb die größten bekannten Leuchtkräfte im Universum!

Spricht man von den hellsten Objekten im Kosmos, so bezieht man sich auf zwei Objektklassen:

- ◇ Die Gamma Ray Bursts (GRBs) und die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN). GRBs sind Strahlungsausbrüche im höchsten Energiebereich elektromagnetischer Wellen. Strahlungsenergien liegen im Bereich von einigen 10 keV bis GeV. GRBs sind mit der Bildung eines stellaren Schwarzen Loches verbunden, das Materie des/der Vorläufersterns/-sterne akkretiert. Dabei treibt es einen hochrelativistischen Jet an, der sehr große Lorentz-Faktoren von 100 bis 1000 aufweist! Ein Lorentzfaktor von 1000 entspricht 99.99995% der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Der Burst ist eine Folge davon, dass der Plasmastrom mit der Umgebung wechselwirkt und Synchrotronstrahlung im Bereich der Gammastrahlung erzeugt. In diesem **anisotropen Feuerball-Szenario** (*Meszaros & Rees* 1997) verlangsamt sich der Jet und erzeugt dann entsprechend niederenergetische Strahlung, das so genannte Nachleuchten des GRB (engl. *GRB afterglow*). Typische Leuchtkräfte eines GRBs liegen bei 10^{19} Sonnenleuchtkräften.

- ◇ Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch ist gerade der 'Motor', der die hohe Leuchtkraft der AGN erzeugt. Dieses AGN-Paradigma geht auf eine Idee von *Yakov Borisovich Zel'dovich*, *Igor Dmitrievich Novikov* und *Edwin E. Salpeter* aus dem Jahre 1964 zurück und wurde in den Siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts etabliert. In diesen Akkretionsflüssen spielen alle genannten Strahlungsprozesse eine Rolle, haben jedoch von Quelle zu Quelle unterschiedliche Ausprägung. In vielen AGN kommt es auch zur Erzeugung von Jets, die auch relativistisch sind, aber nicht so sehr wie die GRB-Jets. Dafür übertreffen die AGN-Jets die GRB-Jets in der Größe, denn es sind Makro-Jets, die sogar in der Ausdehnung ihre Heimatgalaxie überschreiten können (kpc bis Mpc Skala)! Leuchtkräftige AGN erreichen bis zu 10^{14} Sonnenleuchtkräfte.

2.8.4 Staubtorus & Cooling Flows

Ganz allgemein gesprochen existieren in AGN ganz unterschiedliche Strukturen des Akkretionsflusses. Welche Gestalt der Akkretionsfluss hat, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Nähert man sich von außen dem zentralen, supermassereichen Schwarzen Loch, so kann man unterschiedliche Formen von Akkretionsflüssen charakterisieren: Weit außen, bei einigen 10^4 Gravitationsradien bzw. auf der Parsec-Skala befindet sich vermutlich ein ausgedehnter Staubtorus. In vielen Quellen finden die Astronomen Hinweise auf dieses gigantische Materiereservoir, das über einen Orientierungseffekt für die **Zweiteilung der AGN in zwei Klassen, AGN Typ 1 und 2**, sorgt (Fachbegriff *Dichotomie*). Der Staubtorus hat je nach AGN-Typus und Wirtsgalaxie des AGN typische Massen von etwa 10^8 Sonnenmassen.

Neben dem Staubtors gibt es noch Materieströme, die aus größerer Entfernung auf das Zentrum der Galaxie einströmen. Sie heißen *cooling flows*. Die Umgebung einer Galaxie ist nicht leer, sondern sie sind eingebettet in das intergalaktische Medium (IGM). Insbesondere bei Galaxien, die in Galaxienhaufen eingebettet sind - den Haufengalaxien - gibt es das **Intraclustergas**, also fein verteilte Materie und Staub, die sich zwischen den einzelnen Galaxien des Haufens befinden. Feldgalaxien sind hingegen nicht eingebettet in einen Galaxienhaufen. Dennoch findet sich in ihrer Nähe ebenfalls Materie, das **Interclustergas**. Beide Gasformen kommen von den ersten Generationen von Sternen, z. B. der Population III. Das Umgebungsgas kann nun auf eine Galaxie stürzen, wenn sie die Gravitationskräfte

aus dem Zentrum der Galaxie 'spürt'. Die Wechselwirkungen können auch zu 'galaktischen Ausflüssen' führen. Nun ist der Oberbegriff dieser Ströme ist *cooling flows*.

2.8.5 Die Akkretionsscheibe

Staubtorus und *cooling flows* sind die Massereservoirs, die die galaktische Scheibe und das zentrale supermassereiche Schwarze Loch 'füttern'. Innerhalb des Staubtorus gibt es eine kleine Materielücke, dann schließt sich nach innen eine Gasscheibe an. Woher kommt die Scheibengestalt? Materie besitzt im Allgemeinen Drehimpuls ('sie rotiert'), daher sammelt sie sich in einem abgeflachten Gebilde an, der **Akkretionsscheibe**. Neben der Rotation sind auch Strahlungsprozesse für diese Scheibengeometrie verantwortlich. Bei der Standardscheibe, einem wohl definierten Akkretionsfluss, ist Strahlung sehr effizient, um die akkretierte Materie zu kühlen. Das ist ein weiterer Grund für den vertikalen Kollaps des Akkretionsflusses. 1973 wurde die Standardscheibe als Akkretionslösung von *Nikolai Shakura* und *Rashid Sunyaev* entdeckt. Sie heißt in Fachkreisen auch **SSD** für *Shakura-Sunyaev Disk*. Dieses nichtrelativistische Modell wurde kurze Zeit später *Igor Novikov* und *Kip S. Thorne* relativistisch verallgemeinert. Von AGN zu AGN variiert der Innenrand der Standardscheibe und reicht einige zehn bis hundert Gravitationsradien an das zentrale Loch heran.

2.8.6 Akkretion unmittelbar vor dem Schwarzen Loch

Spätestens bei der marginal stabilen Bahn, also wenige Gravitationsradien vor dem Ereignishorizont des Schwarzen Loches, wird die Scheibe abgeschnitten. Hier bricht die stabile Kepler-Rotation zusammen, denn so nahe am Akkretor sind keine stabilen, gebunden Bahnen mehr möglich. Jetzt heißt es: reinfallen oder rausfliegen. Für ein maximal rotierendes Schwarzes Loch von 100 Mio. Sonnenmassen im Zentrum des AGN liegt die marginal stabile Bahn beim Ereignishorizont, bei etwa 150 Mio. Kilometern oder einer Astronomischen Einheit (dem mittleren Abstand von Erde und Sonne).

Weiter innen bewegt sich der Akkretionsfluss instabil, z. B. im freien Fall. Diese Bewegungen heißen *geodätisch*. Es kann sich dort aber auch eine andere Akkretionslösung ausbilden, für die es verschiedene Vorschläge gibt. Die prominenteste heißt ADAF: Ineffiziente Strahlungskühlung bewirkt eine starke Aufheizung des Materials im Akkretionsstrom. Als Konsequenz bläht sich der Akkretionsfluss auf und *evaporiert* an den Berandungszonen. Es bildet sich ein **advektionsdominierter** Akkretionsfluss aus, der mit dem Akronym ADAF (*advection-dominated accretion flow*) bezeichnet wird. Die Gestalt dieser akkretierten Materie ist eher kugelförmig (*sphäroid*) um das akkretierende Zentralobjekt. Eine mögliche Geometrie ist, dass die Standardscheibe von außen in den ADAF übergeht (*SSD-ADAF transition*). Der Übergangsradius kann bei unterschiedlichen Radien liegen. So legen viele Quellen nahe, dass der ADAF deutlich ausgedehnter ist und bis einigen 100 Gravitationsradien reichen kann (das hängt von der Akkretionsrate ab, wie in einem Absatz unten erläutert wird).

2.8.7 Weitere Akkretionsflüsse

Eine Alternative zum SSD-ADAF-Szenario heißt **TDAT**, was für *truncated disk - advective tori*, also trunkierte (abgeschnittene) Scheiben - advektive Tori, steht. Das TDAT-Modell (*Hujeirat & Camenzind* 2000) ist dadurch charakterisiert, dass eine flache Akkretionsscheibe bereits bei deutlich größeren Radien als der marginal stabilen Bahn endet. Innen schließt sich ein heißer, advektionsdominierter Torus an.

Es wurden viele advektionsdominierte Modelle in den letzten Jahren vorgeschlagen. So kennt man Modelle wie die **ADIOS** (engl. *advection-dominated inflow/outflow solutions*), wo auch signifikante Ausflüsse (Winde) berücksichtigt werden. Beim **CDAF** (engl. *convection-dominated accretion flow*) spielt die Konvektion des akkretierten Plasmas eine wichtige Rolle. Die wesentlichen und zentralen analytischen Lösungen der Akkretionsphysik sind nach wie vor SSD und ADAF.

Schließen wir nun die Reise der Materie aus den Außenbereichen in das zentrale Schwarze Loch ab: Kurz vor dem Ereignishorizont fällt schließlich die Materie im **freien Fall** fast mit Lichtgeschwindigkeit ins Schwarze Loch. Diese Bewegungen im freien Fall heißen geodätisch - es wirken keine weiteren Kräfte als die Gravitation. Man kann in der Theorie Schwarzer Löcher mit den Mitteln der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins* zeigen, dass in radialer Richtung die Materie **immer** mit exakt der Vakuumlichtgeschwindigkeit c den Ereignishorizont passiert (z. B. ist die Rechnung im Papier von mir und *Max Camenzind* enthalten, A& A 413, 861, 2004; ePrint: astro-ph/0309832

2.8.8 Die Korona: Heißes Gas als Quelle hochenergetischer Strahlung

Der heiße Akkretionsfluss in der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Loches ist ein guter Kandidat für die Korona - die nicht mit der Sonnenkorona verwechselt werden sollte. Korona meint in der Akkretionsphysik eine heiße, dynamische Plasmablase, die irgendwo in der Nähe des Loches existiert. Die Astronomen weisen sie mittels harter Röntgenspektren nach, jedoch ist sie nicht bei allen Schwarzen Löchern gleichermaßen ausgeprägt. Die räumliche Nähe von kalter Materie in der Standardscheibe und sehr heißer, koronaler Materie begünstigt die Entstehung charakteristischer **Fluoreszenzlinien**. Dazu gehört die prominente Eisenlinie im Bereich der Röntgenstrahlung. Röntgenastronomen finden, dass diese starke Fluoreszenzlinie besonders von Eisen abgestrahlt wird, weil dieses Element im interstellaren Medium recht häufig vorkommt und weil der Übergang bei Eisen sehr effizient ist. Die Linie liegt für neutrales Eisen (FeI) bei einer Ruheenergie von 6.4 keV. Es gibt allerdings einen ganzen Zoo von Fluoreszenzlinien, deren Stärke und Ruheenergie vom Ionisierungsgrad und vom jeweiligen Element abhängen (*Kaastra & Mewe* 1993). Die Anzahl der Elektronen in den Atomschalen beeinflusst entscheidend, welche Eisenlinie angeregt wird. Die Eisen-K-Linien sind wichtige diagnostische Werkzeuge in der Analyse von Systemen aus Schwarzem Loch und Akkretionsfluss. Denn sie entstehen in so großer Nähe zum Loch, dass allgemein relativistische Effekte das Linienprofil beeinflussen. Die Korona liefert die 'Zündstrahlung' für Fluoreszenzlinien. Jedoch ist die **Geometrie der Korona** nicht vollständig geklärt und Gegenstand aktueller Forschung. Vermutlich hängt die Gestalt von der Fütterungsrate auf das Loch ab. Die Korona hat eine besondere Bedeutung bei der **Comptonisierung**, wo weiche Strahlung der Umgebung (z. B. kosmische Hintergrundstrahlung oder Schwarzkörperstrahlung der kalten Standardscheibe) durch inverse Compton-Streuung zu hochenergetischer Strahlung umgewandelt wird. Das charakteristische Comptonisierungskontinuum mit exponentiellem Abfall (engl. *exponential cutoff*) beobachtet man bei zahlreichen Quellen im Bereich der Röntgenstrahlung (Strahlungsenergie bei wenigen bis etwa hundert keV). Das ist das bereits angesprochene harte Spektrum der AGN.

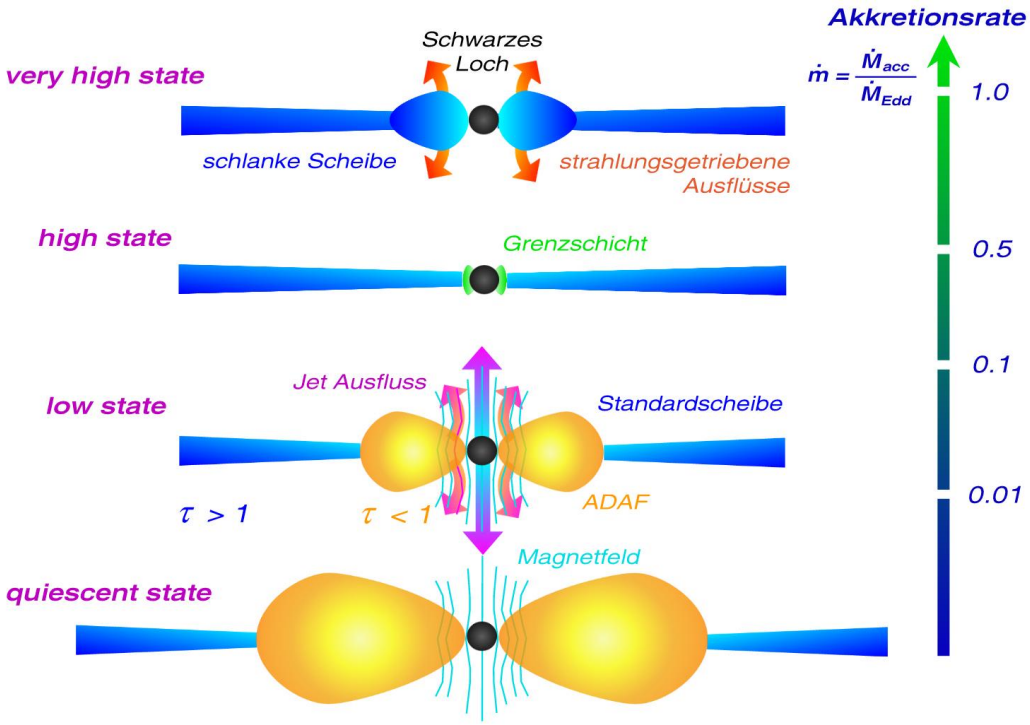

Abbildung 2.4: Vereinheitlichtes Schema der Akkretionsphysik.

2.8.9 Vereinheitlichte Akkretion

Die Akkretionsphysik in unmittelbarer Nähe zu einem Schwarzen Loch ist bei stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern gut vergleichbar, weil die Masse des Schwarzen Loches bei vielen Betrachtungen herausskaliert. Allerdings weichen andere Parameter ab, so beispielsweise die Akkretionsrate oder die Stärke vorhandener Magnetfelder. Die Röntgendoppelsterne mit stellarem Loch besitzen zwar keine Staubtori wie die AGN. Das Materiereservoir ist deutlich kleiner und ist in der Regel ein Begleitstern, der entweder sein Roche-Volumen überschreitet oder einen so starken Teilchenwind abgibt, dass dieser akkretiert werden kann (Wind-Akkretion). Wie die Materie aus dem Materiereservoir nach innen einfällt, ist jedoch durchaus vergleichbar: Sowohl bei den AGN, als auch bei den Röntgendoppelsternen bilden sich SSD und ADAF aus. Bezogen auf konkrete Quellen kann man das salopp so formulieren, dass die Akkretionsphysik eines Quasars derjenigen von Mikroquasaren ähnelt.

Aus den Beobachtungen und Vergleichen von Röntgendoppelsternen, in denen man als eine Komponente ein Schwarzes Loch vermutet (so genannten *black hole X-ray binaries*, **BHXBs**) erwuchs die Idee, die recht unterschiedlichen Quellen in einem vereinheitlichendem Schema zu beschreiben (*Esin* 1997). Das Resultat ist das **vereinheitlichte Akkretionsschema** (engl. *accretion unification scheme*). Die wesentliche Aussage ist, dass im Prinzip nur die **Akkretionsrate**, also der Materiezustrom auf den Akkretor pro Zeit, über die Gestalt des Akkretionsflusses und die daraus resultierenden Spektren entscheidet. Dies wird aus Abbildung 2.4 unmittelbar ersichtlich, die Querschnitte durch Akkretionsflüsse auf ein Schwarzes Loch (schwarz ausgefüllter Kreis in der Bildmitte) illustriert:

Am rechten Bildrand wird die Akkretionsrate in Einheiten der so genannten Eddington-Akkretionsrate dargestellt. Links sind die Zustände der Quellen in der spektroskopischen Nomenklatur genannt (*quiescent, low high, very high*). Historisch sind die Astronomen so vorgegangen, dass sie eine Reihe sehr unterschiedlicher Spektren von Röntgendoppelsternen beobachtet haben - manchmal sogar nach gewisser Zeit bei ein und derselben Quelle. Manche wie Cyg X-1 schienen zyklisch zwischen zwei Zuständen (*high* und Sgr A* blieben immer im gleichen leuchtschwachen Zustand (*quiescent*).

Die Theoretiker versuchten das zu modellieren und zu verstehen. Das Schema zeigt, dass sich abhängig von der Akkretionsrate offenbar unterschiedliche Akkretionslösungen ausbilden. Häufig anzutreffen ist die Standardscheibe (blau dargestellt) - mehr oder weniger unabhängig von der Akkretionsrate. Der ADAF (gelb) hingegen kommt nur bei kleinen Akkretionraten unterhalb von 10% der Eddington-Akkretionsrate vor. Gerichtete, signifikante Materieausflüsse in Form von Jets (violette Pfeile) entstehen laut Schema vorzugsweise bei etwa 5% der Eddington-Akkretionsrate. Doch diese Aussage ist mit einer großen Unsicherheit behaftet. Entsprechend der Strukturen des Akkretionsflusses werden typische Spektren erzeugt, die mit den Bezeichnungen *quiescent*, *low*, *high* und *very high* versehen wurden.

Neben der Akkretionsrate spielen vermutlich nur wenige Parameter eine Rolle, um Akkretionsflüsse von Schwarzen Löchern einheitlich beschreiben zu können. Ein Vorschlag für einen Parametersatz ist (*Camenzind* 2002):

- ◇ Masse des Schwarzen Loches
- ◇ Rotationsparameter des Loches
- ◇ Akkretionsrate (wie vorweggenommen)
- ◇ Neigung der Akkretionsscheibe
- ◇ Masse des Materiereservoirs (z. B. des Staubtorus)
- ◇ Stärke der umgebenden Magnetfelder ('Saat-Felder')

Das unifizierte Bild der Akkretion ist noch nicht etabliert und Gegenstand der aktuellen Forschung der Akkretionsphysik. Nichtsdestotrotz ist es ein reizvoller Vorschlag, um die Vielfalt der Quellen in ein gemeinsames, globales Schema einzuordnen. Für Einzelheiten dieser Thematik verweise ich auf meine Dissertation (S.71f), die am Ende dieses Eintrags heruntergeladen werden kann.

2.8.10 Ohne Einfall, kein Ausstoß - Verbindung von Akkretion und Jet

Besonders wichtig ist in der Astrophysik der Zusammenhang von Akkretion und den Jets. Jets sind Materieausflüsse, die in einer **symbiotischen Beziehung** zur Akkretion stehen (*Falcke & Biermann* 1994). Kein Jet entsteht ohne Akkretion! Ein geringer Anteil der akkretierten Materie kann nämlich, dem Bereich des Akkretors entkommen und ausfließen. Vereinfacht gesagt: Schwarze Löcher schlucken nicht alles. Anfangs ist dieser Ausfluss weit aufgefächert und könnte eher als Teilchenwind bezeichnet werden. In aktuellen Arbeiten wird von *trichterförmigen Jets* (engl. *funnel jets*) gesprochen (*Krolik* 2004). Dieses Phänomen ist morphologisch und entstehungsgeschichtlich verwandt mit dem Sonnenwind. Jets sind an sich erst die **kollimierten Ausflüsse**, die sich in einigem Abstand zum Loch bilden.

Magnetfelder um den Plasmastrom sorgen dabei über Lorentzkräfte für die Bündelung (*magnetische Kollimation*) des Materieflusses in Bewegungsrichtung. Ohne Kollimation sind die Ausflüsse ohne Vorzugsrichtung, also eher isotrop, und strömen radial in alle Richtungen.

Die physikalischen Ursachen für den Ausfluss sind unterschiedlich: Bei **zentrifugal getriebenen** Jets wird Materie mit zuviel Drehimpuls am Drehimpulswall des Akkretorpotentials reflektiert. Das bedeutet, dass die Materie zu schnell rotiert, als dass sie ins Zentrum einfallen kann. Sie muss erst Drehimpuls nach außen abführen, rotiert dann langsamer und kann akkretiert werden. Bei **magnetisch getriebenen** Jets folgen die geladenen Teilchen im Akkretionsfluss den magnetischen Feldlinien (siehe dazu auch Blandford-Znajek Mechanismus). In der Regel beobachtet man beide Effekte bei einem Objekt. Die Magnetosphäre des Akkretors kann unterschiedliche Eigenschaften haben: dipolar, quadrupolar, toroidal etc. Die Einzelheiten hängen vom 'Saatmagnetfeld' ab. So heißt das Magnetfeld, das von außen an das akkretierende Objekt 'geschwemmt' wird. Durch den Einfluss des Akkretors wird das Saatfeld deformiert und beispielsweise in Dynamos sogar verstärkt.

2.8.11 Schnell rotierendes Loch als effektives Katapult

Rotierende Schwarze Löcher spielen höchstwahrscheinlich die Schlüsselrolle bei der Erzeugung der relativistischen GRB- und AGN-Jets. Für sie wurde die Bezeichnung **relativistische Magneto-Rotatoren** (engl. *relativistic magneto-rotators*, **RMRs**; *Gammie* 2003) geprägt. Dieser Begriff soll klar machen, dass allgemein relativistische und magnetische Effekte für die schnellsten Jets verantwortlich ist.

Die Magnetfelder, die von außen - eingebettet im Akkretionsfluss - an das rotierende Loch herangetragen werden, werden von der rotierenden Raumzeit des Kerr-Lochs verdrillt. Dieses Phänomen ist schon seit längerem bekannt, und konnte vor kurzem mit eindrucksvollen Simulationen belegt werden (*Semenov et al.*, Science, 2004). Dass die rotierende Raumzeit alles mit sich zieht wird als frame-dragging ('Ziehen der Bezugssysteme') bezeichnet. Rotierende Raumzeiten können auf sehr elegante Weise mit Wheelers Gravitomagnetismus gedeutet werden (nähere Beschreibungen unter Lense-Thirring Effekt). Frame-dragging bewirkt in dieser Interpretation einen **gravitomagnetischen Dynamo-Effekt**, der dominant toroidale Magnetfelder in der Gegend der marginal stabilen Bahn erzeugt (*Khanna* 1999).

2.8.12 Junge Sterne

Jets treten aber auch bei nicht-kompakten Objekten, wie den Protosternen auf (siehe auch YSOs). Insbesondere T Tauri Sterne und Herbig-Haro Objekte bilden **protostellare, magnetisch getriebene Jets**. Das bedeutet, dass junge Sterne ebenfalls an ihrer Sternoberfläche (Sternwind) oder in deren Nähe (aus der protostellaren Akkretionsscheibe) Ausflüsse erzeugen können. Die Jets zeigen jedoch deutlich geringere Ausflussgeschwindigkeiten. Protostellare Jets emittieren typische Spektrallinien (auch einen Zoo verbotener Linien), über die der Jet gekühlt wird.

2.8.13 Flüssigkeitsmodelle aus der Theorie

Wie eingangs erwähnt, verhält sich ein Akkretionsfluss wie eine strömende Flüssigkeit. Einen theoretischen Zugang zur Akkretionsphysik verschafft man sich aus diesem Grund

mit Simulationen, die auf der Hydrodynamik (HD) beruhen. Der Akkretionsfluss besitzt wie jede Flüssigkeit eine gewisse Zähigkeit, die mit dem Fachausdruck *Viskosität* bezeichnet wird. Bei irdischen Fluiden verhält es sich nicht anders: zäher Honig fließt völlig anders als Wasser. Die viskose Strömung wird durch Reibungsprozesse zu einem so genannten **dissipativen Akkretionsfluss**. Vernachlässigt der Theoretiker die Viskosität, so löst er nicht die Navier-Stokes-, sondern die (etwas einfacheren) *Euler-Gleichungen*. Hydrodynamische Simulationen zeigen vor allem die **hydrodynamische Turbulenz** des Akkretionsflusses. Sie wurde lange Zeit als wesentlich für die Umverteilung des Drehimpulses im Akkretionsfluss angesehen. Das es deutlich effizientere Mechanismen gibt, konnte erst eine neue, magnetische Akkretionsphysik zeigen.

Ein heißer Akkretionsfluss besteht aus einem Plasma, also elektrisch geladenen Teilchen: Elektronen und Ionen. Im Kosmos gibt es immer nicht zu vernachlässigende Magnetfelder, z. B. interstellarer oder intergalaktischer Natur. Für geladene Spezies werden Magnetfelder dynamisch relevant, weil sie über Lorentz-Kräfte den Materiestrom abzulenken vermögen. Die Hydrodynamik muss dann um entsprechende Gleichungen der Elektrodynamik erweitert werden: Dieses Regime heißt Magnetohydrodynamik (MHD). Dabei treten neue Differentialgleichungen wie die Induktionsgleichung auf. Mit dem jeweiligen Satz an Differentialgleichungen ist das Strömungsproblem bei weitem nicht gelöst; es handelt sich nur um den Ansatz. Die Akkretionstheoretiker diskretisieren nun die Differentialgleichungen. Ziel ist es, die Gleichungen auf einem Gitter zu lösen, d. h. das Gebiet, auf dem sich der Akkretionsfluss bewegt, wird in kleine Raumelemente geteilt. In zwei Raumdimensionen (2D) können dies Quadrate sein; in drei Raumdimensionen (3D) eignen sich z. B. Würfel. Die Theoretiker entwickeln nun Computerprogramme (*Solver*, dt. Löser), die die Zeitentwicklung der Strömung auf dem Gitter berechnen. Dazu werden (wie in der Meteorologie, die ähnliche Strömungsaufgaben behandelt) die leistungsfähigsten Rechner benötigt. Am Ende hat man große Datenmengen, die in einem letzten Arbeitsschritt als Bilder und Animationen visualisiert werden. Erst dann folgen die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse und der Vergleich mit der Beobachtung.

Die MHD-Simulationen von Akkretionsflüssen konnten zeigen, dass magnetische Mechanismen wie die magnetische Rotationsinstabilität deutlich effizienter sind, um die Dynamik des Akkretionsstroms zu beeinflussen (aktuelle Arbeiten von *De Villiers & Hawley* 2002-2004). In der Akkretionsphysik endet damit die Epoche der reinen Hydrodynamik, und es beginnt das Zeitalter der Magnetohydrodynamik.

2.8.14 Zweige der Akkretionsphysik

Simulationen sind im Allgemeinen sehr komplex und verlangen eigentlich im Falle der Akkretionsphysik der AGN auch eine adäquate Berücksichtigung der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie, der kovarianten Elektrodynamik und der kovarianten Strahlungsphysik (vergleiche Kovarianzprinzip). Alle Effekte sind jedoch kaum mit einer einzigen Software zu bewältigen. Noch sind die numerischen, aber auch die methodischen Herausforderungen sowie die Anforderungen an den Computer zu groß. Vereinfachungen werden daher - wie immer in der Physik - gemacht, indem man in erster Näherung Teilbereiche vernachlässigt. Bisher haben sich folgende Zweige der Akkretionsphysik herausgebildet und bewährt:

- ◇ **Newtonsche Ideale Hydrodynamik** ohne Berücksichtigung von Magnetfeldern.

Ideal bezieht sich zudem auf die Vernachlässigung von Wärmeleitung im Plasma. Newtonsch bedeutet, dass relativistische Effekte vernachlässigt werden.

◇ **Post-Newtonsche Zugänge** ahmen den Einfluss der Allgemeinen Relativitätstheorie nach: ein nicht rotierendes Schwarzes Loch wird nicht mit der Metrik, sondern mit einem verallgemeinerten Newtonschen Potential, dem *Paczynski-Wiita Potential* (gefunden 1980), beschrieben.

◇ **Nicht-radiative Modelle** (engl. *non-radiative models*) vernachlässigen sämtliche Strahlungsprozesse. Das bedeutet, dass die Wechselwirkung/Rückkopplung von Strahlung auf den Akkretionsfluss keinerlei Beachtung findet, was eine gewichtige Vereinfachung darstellt! Diese Wechselbeziehung von Strahlung und Materie gestaltet sich so, dass durch Emission von Strahlung die Materie gekühlt und durch Absorption von Strahlung geheizt werden kann. Wie man sich vorstellen kann, beeinflussen diese Effekte die Dynamik des Akkretionsflusses in der Natur enorm. Die Strahlungsphysik muss durch Kühl- und Heizfunktionen im Gleichungssystem implementiert werden. Das ist schon in flachen Raumzeiten nicht-trivial, vor allem dann, wenn ein umfangreiches Netzwerk verschiedener Spezies (z. B. Kühlung durch H_2-Chemie in protostellaren Jets) berücksichtigt wird. Die Streuung, Absorption und Reemission der Strahlung wird durch Gleichungen für den **Strahlungstransport** umgesetzt. In einer gekrümmten Raumzeit wurde das zugehörige *kovariante Strahlungstransportproblem* bisher **nicht** gelöst. Nicht-radiative Zugänge finden sich sowohl in der Hydrodynamik (engl. *non-radiative hydrodynamics*) als auch in der Magnetohydrodynamik (engl. *non-radiative MHD*). Die sich ergebenden so simulierten nicht-radiativen Akkretionsflüsse nennt man **NRAFs**. Das englische Akronym steht für *non-radiative accretion flows*. In **Radiativen Modellen** finden Strahlungsprozesse entsprechend Berücksichtigung. Sie werden gegenwärtig nur im Newtonschen und post-Newtonschen Regime untersucht.

◇ Der modernste und aktuell vielfältig erforschte Bereich der Akkretionsphysik ist die **Magnetohydrodynamik auf gekrümmten Raumzeiten**, besonders in der Kerr-Geometrie rotierender Schwarzer Löcher. Diese Domäne heißt **GRMHD**, was für *general relativistic magnetohydrodynamics* steht. Die Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie werden mit denen der Magnetohydrodynamik verknüpft. Typisch ist dabei die Verwendung der idealen MHD (also ohne Wärmeleitung). Pionierarbeit auf diesem Gebiet leisteten *De Villiers & Hawley* (2002). Sie erweiterten den NRAF-Sektor vom post-Newtonschen ('pseudo-relativistischen') in den allgemein relativistischen Sektor. Die gefunden NRAF-Strukturen in diesen Simulationen geben sehr gut die theoretischen Erwartung wieder, bedürfen aber noch weiterer Erforschung. Die GRMHD steht noch am Anfang, es sind allerdings wichtige Entdeckungen zu erwarten, die die relativistische Akkretionsphysik befruchten werden.

◇ Allgemein kann man die Akkretionsphysik in einer, zwei oder in drei Raumdimensionen plus einer Zeitdimension beschreiben. Niedrigere Dimensionalität kann den numerischen und rechenzeitlichen Aufwand erheblich reduzieren. Aber dafür gibt sie nur ein eingeschränktes, möglicherweise sogar falsches Bild der so simulierten Natur ab. Das hohe Ziel sind immer **dreidimensionale Modelle**, weil nur mit allen räumlichen Freiheitsgraden die volle Dynamik des Systems zutage tritt.

Alle simplen Modelle haben ihre Berechtigung darin, dass sie einen grundsätzlichen Einblick in die Akkretionsphysik vermitteln. Aber um den letzten Schritt der Berücksichtigung aller Prozesse wird man nicht herumkommen. Diesem Ziel nähern sich die Akkretionsphysiker sukzessive an.

2.8.15 Von der großen auf die kleine Längenskala - ein Problem

Eine weitere Herausforderung der Akkretionsphysik besteht darin, ausgedehnte Akkretionsscheiben **global**, d. h. auf großen Raumskalen, zu modellieren. Die Physik variiert sehr stark in unterschiedlichen Bereichen der Scheibe, vor allem bei den AGN. Das Interesse der Akkretionsphysik richtet sich auf die Dynamik auf der ganzen Skala! Betrachtet man eine globale Akkretionsscheibe, so befindet sich außen der ausgedehnte Staubtorus (pc-Skala), geht am inneren Ende über in die kalte, dünne Standardscheibe (sub-pc-Skala), die schließlich bei kleinen Abständen vor dem Schwarzen Loch in ein heißes, aufgeblähtes Gebiet mündet (AU-Skala), den heißen Akkretionsfluss. Auf der Längenskala sind das etwa **acht Größenordnungen**. Analog verhält es sich mit der Temperaturskala. Ein großer Skalenunterschied beschwört eine numerische Technik herauf, die man als **Adaptive Gittermethoden** (engl. *adaptive mesh refinement*, **AMR**) bezeichnet. Trotz dieser Techniken ist es bisher aus Gründen, die die Hardware von Supercomputern und die Methodik betreffen, nicht gelungen, globale Simulationen der Akkretionsphysik zu bewerkstelligen. Schon die innere Akkretion bei wenigen Gravitationsradien Abstand stellt die Theoretiker vor eine Vielzahl von Problemen: Relativität, Magnetohydrodynamik und Strahlung (engl. *radiative GRMHD*) müssen hier konsistent modelliert und gelöst werden. Bisher ist das niemandem auf der Welt gelungen...

2.8.16 Weitere Informationen

- ◇ Wie eine Flüssigkeit - Hydrodynamik in der Astrophysik
- ◇ Akkretionsscheiben um rotierende Schwarze Löcher
- ◇ Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ GRMHD war zentrales Thema meiner Doktorarbeit. Download der Dissertation als pdf (9.9 MB) oder als komprimiertes ps (14.4 MB)
- ◇ Einführender und sehr verständlicher Artikel über Akkretion, den ich für Einstein online (AEI Golm) geschrieben habe. Titel: Glühende Scheiben: Wie Schwarze Löcher ihre Nachbarschaft zum Leuchten bringen

2.9 Aktiver Galaktischer Kern

Aktive Galaktische Kerne (engl. *Active Galactic Nuclei*, AGN) sind allgemein gesprochen die Zentren sehr heller, sehr aktiver Galaxien. AGN gehören zum Hauptbeschäftigungsfeld extragalaktischer Forschung in der Astronomie.

2.9.1 AGN-Zoo

Je nach spektralen Eigenschaften - wie dem hellsten Spektralbereich (Radio, Infrarot, UV, Röntgen etc.) beispielsweise - unterscheiden die Astronomen verschiedene AGN-Klassen:

- ◇ Quasi-stellare Objekte (QSOs) und Quasare
- ◇ Seyfertgalaxien
- ◇ Radiogalaxien
- ◇ BL-Lac-Objekte
- ◇ Blazare
- ◇ *Low Ionization Nuclear Emission Line Regions*, kurz LINERs
- ◇ Ultraleuchtkräftige Infrarotgalaxien oder kurz ULIRGs (oder ULIGs)
- ◇ und (heutzutage weniger gebräuchlich) Markariangalaxien

2.9.2 Vereinheitlichte Sicht auf aktive Galaxien

In den letzten beiden Jahrzehnten hat sich ein Trend unter den Astronomen ausgebildet, die Vielfalt der AGN-Klassen in einem einzigen physikalischen Modell zu vereinheitlichen (u. a. *Antonucci & Miller* 1985, *Urry & Padovani* 1995). Diese **Unifikation der AGN** ist möglich, wenn man ein **Standardmodell eines AGN** betrachtet, das grundsätzlich folgende charakteristische Elemente enthält:

- ◇ rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch,
- ◇ Akkretionsscheibe,
- ◇ Staubtorus,
- ◇ und Jets.

Die Vielfalt, die sich in den AGN-Klassen widerspiegelt, beruht auf der unterschiedlich starken Ausprägung dieser Grundelemente: der eine AGN wird dominiert von Jets und zeigt starke Radioemission (Radiogalaxien); ein anderer AGN sammelt besonders viel Materie in besonders kurzer Zeit auf (Quasar) und noch ein weiterer AGN zeigt stark abgeschwächte optische und weiche Röntgenstrahlung (Seyfertgalaxie Typ II). Die unterschiedlich starke Ausprägung wiederum hat ihre Ursachen einerseits in der Physik: grundlegende astrophysikalische Parameter - wie Lochmasse, Akkretionsrate, Torusmasse, etc. - variieren von AGN und zu AGN. Andererseits gibt es auch rein geometrische Effekte, wie die Orientierung des AGN, so dass sich die Galaxie für den Beobachter von ganz unterschiedlichen Seiten präsentieren kann. Das bewirkt beispielsweise den Unterschied von Quasar zu Blazar.

Abbildung 2.5 skizziert schematisch das Standardmodell eines AGN mit oben genannten Grundelementen. Das Schema entspricht einem Querschnitt durch den innersten Bereich eines AGN - etwa die innerste Parsec. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sowohl die horizontale, als auch die vertikale Richtung logarithmisch skaliert ist, damit alle hier dargestellten Komponenten überhaupt ins Bild passen. Die nun folgenden Absätze widmen sich einer detaillierten Beschreibung der einzelnen Komponenten im AGN-Standardmodell.

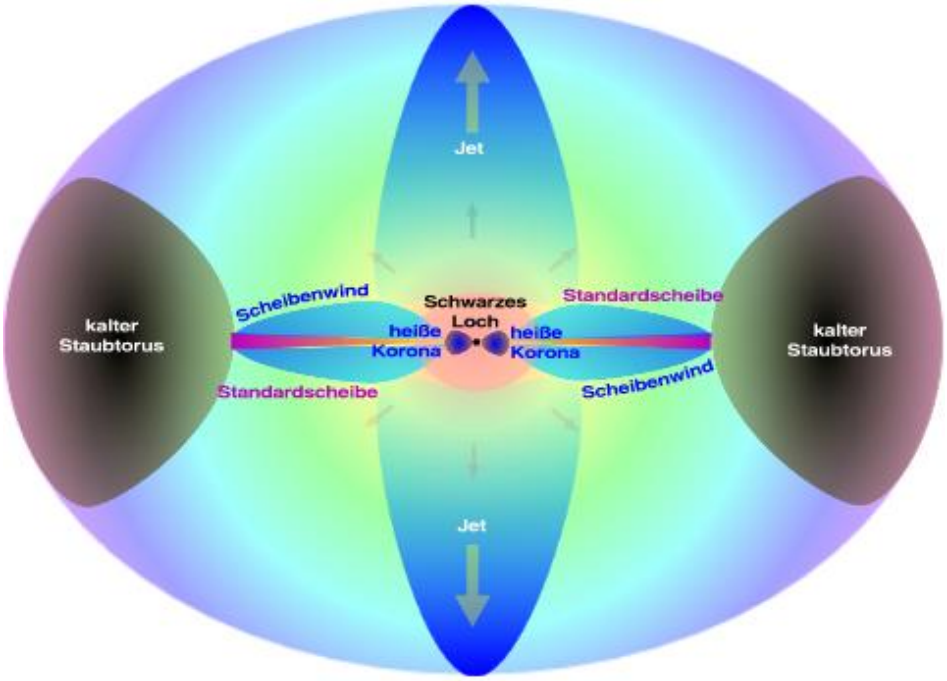

Abbildung 2.5: Tomographie eines Aktiven Galaktischen Kerns bis zur pc-Skala.

2.9.3 Das superschwere Loch: eine unglaubliche Höllenmaschine

Der zentrale Motor der AGN ist nach gängiger Vorstellung ein **akkretierendes, rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch**. Diese Idee wurde schon vor mehr als dreißig Jahren vorgeschlagen (Lynden-Bell 1969, Lynden-Bell & Rees 1971). Die Masse des superschweren Loches kann zum Beispiel kinematisch anhand von Sternbewegungen (vgl. Kepler-Gesetze) bestimmt werden, falls der AGN nah genug ist, um seine Sterne auflösen zu können. Mit diesem Verfahren konnten *Genzel & Eckart* 1995 die Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Galaktischen Zentrum zu 2.4 Millionen Sonnenmassen bestimmen. *Ghez et al.* leiteten später eine Masse von 2 Millionen Sonnenmassen ab. Neuere Messungen korrigieren diesen Wert nach oben auf 3.6 Millionen Sonnenmassen (VLT-Beobachtungen, *Eisenhauer et al.* 2005). Die Milchstraße ist allerdings **kein AGN**, vielleicht war sie jedoch vor Millionen von Jahren aktiver und müsste gemäß der Masse des Schwarzen Loches eine Seyfertgalaxie gewesen sein.

Typische Massen dieser gigantischen Schwarzen Löcher von AGN liegen zwischen einer Million und drei Milliarden Sonnenmassen. Riesige elliptische Radiogalaxien bilden das Zentrum der Galaxienhaufen, z. B. M87 im Virgo-Haufen. Ihre Schwarzen Löcher sind mit einigen Milliarden Sonnenmassen die schwersten überhaupt!

2.9.4 Zutat Nr. 2: Futter für das Loch

Die **Akkretionsscheibe** besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen: der kalten, geometrisch dünnen und optisch dicken Standardscheibe und dem heißen, advektions-dominierten, optisch dünnen Akkretionsfluss (siehe ADAF).

Die Standardscheibe ist infolge des Drehimpulses der einfallenden Materie und infolge von Strahlungskühlung vertikal kollabiert. Sie schließt sich inwärts gerichtet an den Staubtorus an. Am Innenrand der Standardscheibe gibt es eine ausgedehnte, heiße Region, die **Korona**. Hier entsteht die energiereiche elektromagnetische Strahlung der AGN. Die Strahlung entsteht durch unterschiedliche physikalische Prozesse: So entsteht thermische Strahlung, die besonders hohe Energien bei dem heißen Plasma erreicht; aber es entsteht auch Bremsstrahlung oder Synchrotronstrahlung (die nicht-thermisch ist). Die Akkretionsscheibe ist magnetisiert: der galaktische Dynamo bildet und verstärkt die Magnetfelder in der Scheibe; der ergosphärische Dynamo nahe am Ereignishorizont des schnell rotierenden Schwarzen Loches (Kerr-Typ) erzeugt schlauchartige Magnetfelder, die wesentlich zur Bildung Poynting-Fluss-dominierter **Jets** beitragen. Bei diesem komplexen Mechanismus wird dem Schwarzen Loch über magnetische Kopplung Rotationsenergie entzogen, die auf das Plasma übertragen wird (siehe Blandford-Znajek-Mechanismus). Durch den Frame-Dragging-Effekt zwingt das Kerr-Loch dem Plasma und dem Magnetfeld die Rotation auf. Dadurch entstehen verdrillte MHD-Wellen, **torsionale Alfvèn-Wellen**, die sich nach außen mit der Alfvèn-Geschwindigkeit bewegen. Weil die Alfvèn-Geschwindigkeit mit der inversen Wurzel der Dichte skaliert, kann in einem inhomogenen Umgebungsmedium des AGN die Alfvèn-Welle abgebremst oder beschleunigt werden, je nachdem, ob die Dichte nach außen zu- oder abnimmt. Die Torsion legt nahe, dass AGN-Jets im Allgemeinen um ihre Achse rotieren. Der so genannte **torsionale Alfvèn-Wellen-Zug** (engl. **TAWT** für *torsional Alfvèn wave train*) sorgt also neben Beschleunigungen durch Gasdruck und Lorentzkräften dafür, dass die Jets bis auf sehr große Längenskalen (kpc bis Mpc) nach außen propagieren: AGN-Jets sind **magnetisch getrieben**.

Außerdem werden an der Oberfläche der Akkretionsscheibe Teilchenströme erzeugt, die man **Scheibenwinde** nennt. Der Bildungsmechanismus ist ganz analog zu dem des Sonnenwinds: Magnetfelder durchstoßen die Sonnen- bzw. Scheibenoberfläche und entreißen Plasma, dass sich entlang den Magnetfeldlinien bewegt (siehe auch Blandford-Payne-Szenario). Treffen sich Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität, so werden sie vernichtet. Dieses Phänomen nennen Physiker **Rekonnexion**: dabei wird magnetische Feldenergie in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt. Das Plasma kann nun die Oberfläche verlassen und manifestiert sich als Teilchenwind.

2.9.5 Einsicht oder Blockade durch Unmengen von Staub

Massereiche Sterne wie Rote Riesen und Wolf-Rayet-Sterne blasen ihre Materie in Form von Sternenwinden in den interstellaren Raum. Dieser Sternenstaub sammelt sich in einem gigantischen Schlauch an, der sich um das Zentrum des AGN legt und so schwer ist, wie Millionen bis hundert Millionen Sonnen. Das ist der **Staubtorus**, dessen Existenz sehr wahrscheinlich ist. So lässt sich die 10-Mikrometer-Linie, die sich im Infraroten mal als Emissions- und mal als Absorptionslinie zeigt, elegant durch einen Staubtorus erklären, der sie mal reflektiert (Emission) und mal verschluckt (Absorption). Der Abstand dieses Schlauchs vom zentralen superschweren Loch liegt typischerweise unterhalb der pc-Skala. Je nachdem, unter welchem Winkel der astronomische Beobachter auf die Ebene des Schlauchs schaut, sorgt der Staubtorus dafür, dass man in das Zentrum des AGN blicken kann oder nicht. Die Konsequenz ist eine Teilung in **zwei AGN-Typen**: im einen Fall ist der Einblick in das Innere gestattet (Typ 1); im anderen Fall ist das Innere des AGN verhüllt (Typ 2). Dazwischen sind natürlich ebenfalls Neigungswinkel erlaubt, so dass Zwischentypen (1.2, 1.4 etc.) definiert

werden können.

2.9.6 AGN sitzen in Galaxien verschiedener Gestalt

Die **Wirtsgalaxien** (*Hostgalaxien*) der AGN sind - je nach AGN-Typ - ganz unterschiedlichen Hubble-Typs, z. B. elliptisch, spiralförmig, balkenspiralförmig, irregulär. Seyfertgalaxien finden sich fast ausschließlich in Spiralen, Radiogalaxien sind nur in Ellipsen, Quasare sind in allen Typen anzutreffen. Es gibt sogar 'Kannibalismus' unter den Quasaren, also Quasare, die räumlich so dicht beieinander stehen, dass sie sich über gravitative Wechselwirkungen stark deformieren oder sogar miteinander verschmelzen.

2.9.7 AGN im kosmologischen Kontext

Kosmologisch gesehen handelt es sich bei den AGN um Objekte des **jungen Universums**, die also sehr weit entfernt sind, aber aufgrund ihrer Helligkeit und enormen Aktivität über solche Distanzen noch sichtbar sind. Die kosmologischen Rotverschiebungen von AGN erstrecken sich aktuell von $z = 0.008$ (Seyfertgalaxie MCG-6-30-15) bis etwa $z = 6.41$ (ein SDSS-Quasar). Der am weitesten entfernte beobachtete Galaxie bei $z = 10$ befindet sich in einer Phase heftiger Sternentstehung. Es ist eine **Starburstgalaxie**. Die Kosmologie muss nun das Problem lösen, wie in relativ kurzer Zeit (gedacht in kosmischen Zeiträumen) supermassereiche Schwarze Löcher entstehen konnten, die schließlich über Akkretion den Aktivitätszyklus der AGN in Gang brachten und - nach Abklingen der Akkretionsrate - aus den AGN die normalen, d. h. nicht aktiven Galaxien des lokalen Universums wurden.

2.9.8 AGN-Spektroskopie

Die **Spektren von AGN** sind sehr vielfältig, was letztendlich die Ursache des AGN-Zoos ist. Im Prinzip wird heute der gesamte Bereich des elektromagnetischen Spektrums von AGN beobachtet: von Radiowellen, über infrarote und optische Strahlung, in den kurzwelligen Bereich der ultravioletten, Röntgen- und Gammastrahlung sowie TeV-Emission. Radiogalaxien und radiolaute Quasare zeigen starke Radioemission von den Jets. Im optischen Spektrum finden sich bei Seyfertgalaxien und Quasaren häufig ungewöhnlich **breite Spektrallinien**, die durch die hohen Geschwindigkeiten des Plasmas in der Akkretionsscheibe Doppler-verbreitert sind. Zum anderen sind **Exzesse** im Bereich der Röntgen-, UV- oder Infrarotstrahlung beobachtbar. Blazare zeigen sogar TeV-Emission, was konservativ durch Comptonisierung der Hintergrund- oder Jet-Synchrotronstrahlung und nicht-konservativ durch das Proton-Blazar-Modell erklärt wird.

Wenn man alle aktiven Galaxienkerne üer einen Kamm scheren möchte, kann man eine Art Prototypspektrum ableiten. Die Illustration 2.6 zeigt ein **Muliwellenlängenspektrum eines AGN vom Typ-1** in idealisierter Form. Das Spektrum ist eine Auftragung des spektralen Flusses (vertikale Achse) über der Wellenlänge bzw. Strahlungsenergie (obere, horizontale Achse) bzw. über der Strahlungsfrequenz (untere, horizontale Achse). Der Fluss ist ganz salopp gesprochen so etwas wie eine Helligkeit.

Der rote Buckel

Starten wir links so fällt der erste 'rote Buckel' (engl. *red bump*) im Spektrum auf, der im Bereich der Wärmestrahlung Infrarot liegt und etwa bis zum roten Licht reicht. Diese

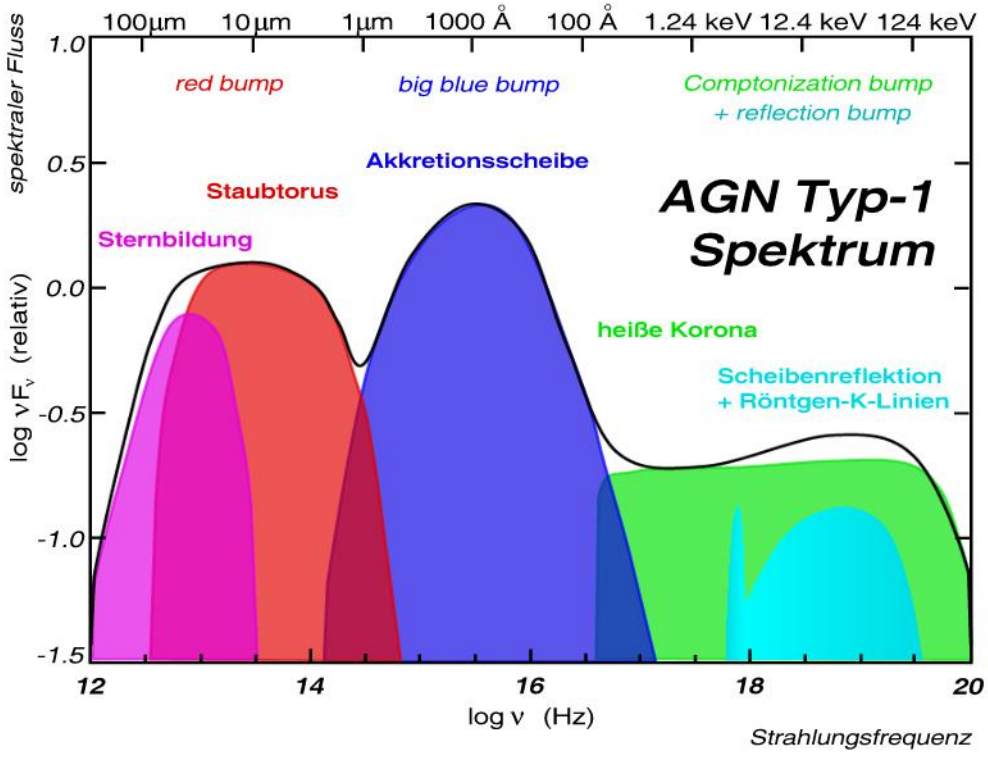

Abbildung 2.6: Multiwellenlängenspektrum eines AGN Typ-1.

Strahlung kommt zum einen von **jungen Sternen** (siehe Protosterne, YSOs); zum anderen handelt es sich bei dieser Strahlung um '**recycelte Strahlung**' aus dem Zentrum des AGN. Trifft nämlich die hochenergetische UV- und weiche Röntgenstrahlung den Staubtorus, so wird sie gestreut, absorbiert und abgeschwächt infolge der Extinktion: die ursprüngliche Strahlung wird gerötet und somit im Spektrum nach links verschoben. Das Maximum des roten Buckels liegt etwa bei 10 Mikrometer Wellenlänge.

Der große, blaue Buckel

In der Mitte gibt es schon wieder einen Buckel. Weil er bei kurzen, optischen Wellenlängen anzutreffen ist (Maximum etwa bei 100 Nanometern) heißt der zweite Buckel der 'große, blaue Buckel' (engl. *big blue bump*). Der Ursprung dieser **Strahlung ist die Akkretionsscheibe**. Sie wird zum Zentrum des AGN hin immer heißer und gibt thermische Strahlung ab. Denkt man sich die Scheibe zerlegt in konzentrische Ringe, so gibt jeder Ring die Wärmestrahlung (Planck-Strahler) seiner charakteristischen Temperatur ab. Die Summe dieser Planck-Kurven ist gerade der blaue Buckel. Er dominiert das Spektrum und erreicht die größten Flüsse (vertikale Achse beachten).

Der Compton- und Reflektionsbuckel

Der dritte Buckel sitzt im Spektrum ganz rechts, bei höchsten Strahlungsenergien: Röntgen-, Gamma- und sogar TeV-Strahlung. Der innere Akkretionsfluss im AGN befindet sich in unmittelbarer Nähe zum zentralen Schwarzen Loch. Dort wird es so heiß, dass hochenergetische Röntgenstrahlung produziert wird. In Magnetfeldern beschleunigte, relativistische Teilchen geben außerdem Synchrotronstrahlung ab. Wenn diese hochenergetischen Strahlungsformen auf die deutlich kältere Akkretionsscheibe weiter außen treffen, wirkt diese wie ein Spiegel: die Standardscheibe reflektiert die energiereiche Strahlung und produziert einen **Reflektionsbuckel** (engl. *reflection bump*; im Bild türkisfarben). Dabei kommt es auch zur *Fluoreszenz* in der Scheibe: die Ionen werden dazu angeregt, charakteristische Linienstrahlung abzugeben. Die dominante Spektrallinie ist die **Eisenlinie**, die zu den Röntgen-K-Linien gehört und einige keV Energie bei der Emission hat.

Es kommt auch vor, dass niederenergetische Umgebungsstrahlung den Weg in den optisch dünnen, heißen, inneren Akkretionsfluss findet. Die Photonen können dabei am heißen Plasma gestreut werden und Energie gewinnen. Dieser Vorgang heißt in der Astrophysik **Comptonisierung** und produziert den Compton-Buckel (in der Abbildung grün dargestellt). Der Compton-Buckel dominiert den energiereichen dritten Buckel im AGN-Typ-1-Spektrum. Verglichen mit den beiden niederenergetischen Buckeln steckt im Compton- und Reflektionsbuckel weniger Fluss.

Der Weg der Astronomie war natürlich umgekehrt: die Astronomen beobachteten Spektren vieler AGN, dachten sich Modelle aus, um diese Beobachtungen zu erklären und gelangten so über Jahrzehnte zu diesem gerade vorgestellten, subtilen Modell der AGN-Multiwellenlängenspektren.

2.9.9 neue Beobachtungsfenster

Es besteht die Hoffnung, dass sich neben den elektromagnetischen Fenstern bald andere Teilchen von AGN beobachten lassen, die uns weitere Informationen über diese interessanten Objekte bescheren, nämlich Neutrinos und Gravitationswellen.

2.9.10 Variabilität & Kompaktheit der AGN

Die **Variabilität** dieser Quellen vor allem im Bereich der Röntgenstrahlung ist sehr hoch und läuft auf kurzen Zeitskalen (Tage!) ab. Das Emissionsgebiet muss daher **recht klein** sein, nämlich im Durchmesser nur einige Lichttage. Es kommt daher nur das enge Gebiet um das supermassereiche Schwarze Loch in Frage.

2.9.11 Unifikation mit wenigen Parametern

Die Fülle der beobachteten Aktiven Galaktischen Kerne kann unifiziert werden, indem man wenige physikalische Parameter vorgibt, die die Aktivität und die wesentlichen Eigenschaften eines AGN steuern. Diese sind die **Masse und Drehimpuls des supermassereichen Schwarzen Loches**, die **Akkretionsrate** und Eigenschaften der Umgebung, also des intergalaktischen Mediums (IGM), wie die **Stärke und Morphologie der Magnetfelder** und die **Dichteverteilung der Materie**. Vermutlich gibt es weitere Parameter, aber das sind sicherlich die wichtigsten.

Dieser Parameterraum bildet die Ausgangssituation für AGN. Die AGN-Physik muss es nun leisten, ausgehend von diesen wenigen Parametern ein **globales Modell von AGN** umzusetzen. Das anspruchsvolle Ziel der AGN-Theoretiker ist es, auf dem Hintergrund der Kerr-Geometrie (weil das Schwarze Loch rotiert) ein magnetohydrodynamisches Modell (weil der Einfluss von Magnetfeldern wesentlich ist) mit allen Strahlungsprozessen (Kontinuumsstrahlung, Emissionslinien, Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung, kovarianter Strahlungstransport) inklusive Mikrophysik (Moleküle, Neutrinos) zu lösen, d. h. zu simulieren. Weil das offensichtlich allein aus Gründen der Längenskala (ein Gravitationsradius beim heißen Akkretionsfluss, 10000 Gravitationsradien beim Staubtorus) nicht möglich ist, kann der Theoretiker nur Teilaspekte untersuchen: die AGN-Physik zerfällt in Akkretionsphysik, Jetphysik, Staubphysik. Daneben gibt es massive numerische Probleme, wo zunächst effiziente Lösungsalgorithmen entwickelt werden müssen (z. B. beim kovarianten Strahlungstransport; Emission von Gravitationswellen). Und natürlich gibt es im Bereich der Computer Hardware-Probleme, vor allem begrenzt der Arbeitsspeicher (*memory*) die Auflösung des Gitters (vergleiche AMR), auf dem das physikalische Verhalten numerisch gelöst wird. Am Ende steht eine globale Sicht, die man aus einer Synopse der Teildisziplinen erhält: das physikalische Verständnis von AGN.

2.9.12 Der entfernteste AGN

Der Entfernungsrekordhalter unter allen AGN ist der Quasar SDSS J1148+5251 (*Fan et al. 2003*) mit einer Rotverschiebung von $z = 6.41$ (*Willott et al. 2003*), der den Quasar SDSS 1030+0524 ($z = 6.28$) ablöste. Er ist so weit entfernt, dass man bis in die **Epoche der Reionisation** zurückblickt, wo das intergalaktische Medium (IGM) zum Teil noch neutral war! Es gelang sogar die Virialmasse des supermassereichen Schwarzen Loches mithilfe der Reverberation Mapping-Technik abzuschätzen. Das Ergebnis: 3 Mrd. Sonnenmassen (ebenfalls *Willott et al. 2003*, astro-ph/0303062).

2.9.13 Weitere Informationen

- ◇ Web-Artikel: Aktive Galaktische Kerne - Leuchtfeuer im All
- ◇ Web-Artikel: Akkretionsflüsse um rotierende Schwarze Löcher

◇ externer Artikel: Aktive Schwarze Löcher: Ultraheiße Leuchtfeuer im All von Andreas Müller, erschienen bei Einstein online (AEI Golm)

2.10 Alfvèn-Geschwindigkeit

Darunter versteht man die Geschwindigkeit einer Alfvèn-Welle, benannt nach dem schwedischen Physiker *Hanns Alfvèn* (geb. 1908), einem der Pioniere auf dem Gebiet der Magnetohydrodynamik (Nobelpreis 1970).

Die Alfvèn-Welle ist eine der **Plasmawellen**, neben der langsamen und der schnellen **magnetosonischen Welle**. Diese Form von Wellen ist in der Astrophysik wichtig für die Dynamik von magnetohydrodynamischen Jets und magnetohydrodynamischen Akkretionsflüssen.

$$v_A = \sqrt{\frac{B^2}{\rho}}$$

Wie die Gleichung zeigt, ist die Alfvèn-Geschwindigkeit v_A definiert als Wurzel aus dem Quotient aus dem Quadrat des Magnetfeldes (Formelsymbol B) über einer charakteristischen Dichte (grch. Buchstabe ρ) im System. Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass die Alfvèn-Geschwindigkeit wächst, wenn die Massendichte abfällt. Das spielt eine z. B. Rolle, wenn eine Alfvèn-Welle in ein unterdichtes Gebiet propagiert: die MHD-Welle wird dann schneller.

2.11 Alfvèn-Zahl

Eine der **charakteristischen, dimensionslosen Zahlen** der Magnetohydrodynamik (MHD), die man nutzt, um das System oder eine entsprechende Computersimulation zu beschreiben.

Sie ist definiert als Wurzel des Quotients aus dem Quadrat der Alfvèn-Geschwindigkeit V_A über dem Quadrat einer charakteristischen Geschwindigkeit V_0 im System.

2.12 Allgemeine Relativitätstheorie

Die Allgemeine Relativitätstheorie, kurz **ART** (engl. *General Relativity*, **GR**), ist eine **Theorie der Gravitation**, die die klassische Theorie des englischen Physikers und Mathematikers *Isaac Newton* (1643 - 1727) ablöste. Die ART bietet völlig neue Einsichten in die Natur der Schwerkraft und muss deshalb als revolutionär eingestuft werden: Quantentheorie und Relativitätstheorie sind die bedeutendsten physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts, und ihre Bedeutung ist bis heute für die moderne Physik zentral!

2.12.1 Neudefinition elementarer Begriffe & Grundaussagen der ART

Beide Theorien haben das **naturwissenschaftliche Weltbild** entscheidend modifiziert und geprägt: unsere Vorstellungen von Raum, Zeit, Materie und Energie wurden neu definiert. Die wesentliche Aussage der ART ist, dass jede Form von Energie (auch Materie) die Raumzeit krümmt. Die Raumzeit ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die sich aus den drei Raumdimensionen (Länge, Breite, Höhe) und der Zeitdimension zusammensetzt. Dieses **geometrische Gebilde** wird durch die Metrik bzw. das Linienelement eindeutig

festgelegt. Seine morphologischen Eigenschaften werden durch Energie und Materie verändert. Die Raumzeit ist vierdimensional; vereinfachend kann man sie sich in zwei Dimensionen wie eine dünne, dehnbare Haut vorstellen, die durch darauf befindliche Massen Dellen bekommt ('Gummimatten-Modell'). Ohne Massen hat die Haut keine Dellen, sie ist eben. Solche Raumzeiten heißen *flach*. Ein Testkörper, der nun auf eine durch Massen eingedellte Haut gelegt wird, muss unweigerlich der Krümmung folgen. Deshalb bewegt sich der Testkörper in einer gekrümmten Raumzeit oder anders gesagt: *er fällt im freien Fall*. Die Bewegungslinien heißen Geodäten und sind verschiedenen, je nachdem, ob der Testkörper eine **Ruhemasse** hat (Materie) oder nicht (Licht). Diese **geometrische Interpretation der Gravitation** löste somit den Kraftbegriff Newtons ab.

2.12.2 Albert Einstein - Pop-Ikone der Physik

Die Relativitätstheorie geht auf den deutschstämmigen Physiker *Albert Einstein* (1879 - 1955) zurück. Er entwickelte zunächst die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), die er 1905 veröffentlichte. Dies ist eine Theorie der gegeneinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssysteme (Inertialsysteme), die bereits das Kontinuum von Raum und Zeit offen legte (siehe z. B. Lorentz-Transformation). Die zentralen Aspekte der SRT sind die **Äquivalenz von Masse und Energie** ($E = mc^2$) und die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** $\boldsymbol{c}$ in **allen** Inertialsystemen. Einstein postulierte diese Konstanz und folgerte erstaunliche Effekte auf Raum und Zeit, wie die Längen-Kontraktion und Zeitdilatation, die tatsächlich experimentell bestätigt werden konnten.

In den darauf folgenden Jahren, von 1907 bis 1915, verallgemeinerte Einstein die Gleichförmigkeit der Bewegung auf Beschleunigungen. Dieser Ansatz mündete in eine neue Theorie der Gravitation, der **Allgemeinen Relativitätstheorie**, die er 1916 veröffentlichte. *Allgemein* ist sie in dem Sinne, weil die Relativbewegungen zwischen den Bezugsystemen *verallgemeinert* wurden und beliebig sein können. Die SRT hingegen gilt nur für ganz bestimmte Relativbewegungen, nämlich gleichförmig geradlinige; in diesem Sinne ist sie *speziell*.

Eine wesentliche Basis der Relativitätstheorie ist das Relativitätsprinzip. Danach sind alle zueinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssysteme völlig gleichberechtigt. Identische physikalische Experimente, die man in relativ zueinander gleichförmig bewegten Systemen durchführt, liefern gleiche Ergebnisse. Insbesondere sind relativ in Ruhe befindliche Systeme ununterscheidbar von gleichförmig geradlinig bewegten Systemen. Das Relativitätsprinzip wurde in der ART auf beschleunigte Systeme verallgemeinert. Dann heißt es Äquivalenzprinzip und besagt, dass es prinzipiell nicht möglich ist, *träge* von *schwerer Masse* zu unterscheiden. Das bedeutet, dass man nicht entscheiden kann, ob eine Masse durch eine konstante Kraft beschleunigt wird oder in einem Gravitationsfeld frei fällt. Außerdem gilt nach dem *Prinzip der allgemeinen Relativität*, dass alle Beobachter gleichberechtigt sind.

2.12.3 Anspruchsvolle Mathematik der ART

Mathematisch bedient sich die ART den Tensoren, die die bündige Vektorschreibweise Newtons ablöste und weiter verallgemeinerte. Sie sind auf geometrischen Gebilden, den *Mannigfaltigkeiten*, definiert und können physikalisch interpretiert werden (siehe dazu die Tensoren im Index). Die Tensoren sind eingebettet in den Formalismus der **Differentialgeometrie**. Nach dem Prinzip der allgemeinen Kovarianz sollten alle

Abbildung 2.7: Die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie in tensorieller Form.

Gleichungen der Physik *tensorielle Form* haben. Neben diesen Prinzipien leiteten Einstein auch das Korrespondenzprinzip, das Machsche Prinzip und das Prinzip der minimalen gravitativen Kopplung. Die Allgemeine Relativitätstheorie wird zu recht Albert Einstein zugesprochen, aber man muss vielen anderen Physikern und Mathematikern zugute halten, das ihr Denken Einstein nachhaltig beeinflusste. Die Tensoren als zwingende Objekte der ART, die erst einen koordinatenunabhängigen Zugang möglich machten, waren bereits von den Mathematikern gefunden worden. Philosophische Aspekte von Bewegung und Trägheit, die in die ART mündeten, wurden bereits vom österreichischen Physiker *Ernst Mach* (1838 - 1916) vorweggenommen. Insofern war die Zeit auch reif für eine Allgemeine Relativitätstheorie.

2.12.4 Die Feldgleichung der Gravitation

Die wichtigsten Tensoren der ART sind der Einstein-Tensor, der die Information über die gekrümmte Raumzeit enthält, und der Energie-Impuls-Tensor, der die physikalische Information über die Energieformen (wie auch Materie) enthält. Beide Tensoren werden in den fundamentalen **Einsteinschen Feldgleichungen der ART** miteinander verknüpft. Der physikalische Gehalt dieser Verknüpfung ist, dass einerseits jede Energie die Metrik krümmt und andererseits die Metrik dasjenige geometrische Gebilde festlegt, auf dem die Energie lokalisiert ist. Lakonisch formuliert: '*Die Geometrie sagt der Materie, wie sie sich bewegen soll, und die Materie diktiert der Geometrie wie sie sich zu krümmen hat.*'.

Die Feldgleichungen haben tensoriell eine sehr einfache Gestalt, wie die Gleichung 2.7 zeigt (hier *ohne* Λ-Term). Die kompakte Notation ist auch gerechtfertigt, weil sie das Wesen der Symbiose aus gekrümmter Raumzeit und Energie enthüllt. Doch die so scheinbare, mathematische Einfachheit täuscht: die Feldgleichungen der ART sind an sich 16 Gleichungen, von denen sechs aufgrund der Symmetrie der Tensoren nicht betrachtet werden müssen. Einstein-Tensor und Energie-Impuls-Tensor sind Tensoren zweiter Stufe. Jeden von ihnen kann man als 4×4 - Matrix darstellen. Die Tensorsymmetrie reduziert die daraus resultierenden $4 \times 4 = 16$ Gleichungen auf nur 10 Gleichungen. Die verbleibenden zehn Gleichungen sind miteinander gekoppelt. Zudem sind die Gleichungen partielle Differentialgleichungen, die auch noch nicht-linear sind. Die **Nichtlinearität** der Gleichungen ist ein Ausdruck der oben dargelegten rückseitigen Wechselbeziehung von Raumzeit und Energie. Die **Kopplungskonstante** der Einsteinschen Feldgleichungen (siehe Gleichung oben, Zahlenwert von 8π) kann man aus einem *Korrespondenzprinzip* ableiten: im Grenzfall schwacher Gravitationsfelder und kleiner Geschwindigkeiten gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit c muss die ART in die Newtonsche Theorie übergehen. Die Kopplungskonstante folgt dann aus einem Vergleich von Einsteinschen Feldgleichungen und **Poisson-Gleichung**. Für den Gleichungstypus, wie ihn die Feldgleichungen der ART zeigt, bietet die Mathematik keinerlei Patentrezepte, um die allgemeine Lösung zu notieren. Die Gleichungen werden deshalb vereinfacht und man betrachtet verschiedene

Sektoren der Feldgleichungen. Mal setzt man den Energie-Impuls-Tensor null und betrachtet nur Vakuumlösungen, mal setzt man bestimmte Symmetrien der Lösungen (Kugel- oder Achsensymmetrie) voraus, mal betrachtet man nur Raumzeiten konstanter Krümmung - aber auch dann findet man nur spezielle Lösungen. Die Allgemeine Relativitätstheorie birgt sicher noch viele gekrümmte Mannigfaltigkeiten, die in der Natur vorkommen, die aber bis heute niemand kennt.

Die Einsteinschen Feldgleichungen sind also ein **kompliziertes System aus zehn partiellen, nichtlinearen, gekoppelten Differentialgleichungen**. Um so erstaunlicher war es, dass bereits ein Jahr nach der Publikation der ART, im Jahr 1916, der deutsche Astrophysiker *Karl Schwarzschild* eine erste Lösung fand. Die nach ihm benannte (äußere) **Schwarzschild-Metrik** löst die Vakuumfeldgleichungen. Sie beschreibt kugelsymmetrische Raumzeiten von relativistischen Sternen und insbesondere nicht rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher.

2.12.5 Konsequenzen der ART

- ◇ **Relativität von Zeit und Länge**, wie schon von der Speziellen Relativitätstheorie antizipiert. Der Ablauf der Zeit hängt ganz allgemein in der Relativitätstheorie vom Bezugssystem ab. Insbesondere folgt in der ART eine Dehnung der Zeit bei Anwesenheit von Gravitationsfeldern. Zeit verrinnt langsamer in der Nähe von Massen, also stärkeren Gravitationsfeldern. Diese Dehnung der Zeit heißt **gravitative Zeitdilatation**.

- ◇ Energieverlust von Strahlung im Gravitationsfeld. Die Strahlung muss Arbeit gegen das Gravitationsfeld verrichten und verliert deshalb Strahlungsenergie. Weil rote Strahlung energieärmer als blaue ist und die Ursache des Energieverlusts die Gravitation ist, heißt dieser Effekt gravitative Rotverschiebung oder **Gravitationsrotverschiebung**. Dies entspricht vom Effekt her prinzipiell der gravitativen Zeitdilatation, wenn man von der Frequenz- in die Zeitdarstellung geht.

- ◇ Ablenkung von Strahlung im Gravitationsfeld. Dieses Phänomen heißt **Gravitationslinseneffekt** bzw. Gravitationsaberration (engl. *gravitational lensing*).

- ◇ relativistische Verallgemeinerung der *Binetschen Gleichung*. Die ART liefert den korrekten und beobachteten Zahlenwert für die **Periheldrehung des innersten Planeten Merkur**. Periheldrehung bezeichnet die Drehung der Apsidenlinie, also der Verbindungslinie von sonnennächsten Punkt (Perihel) mit dem sonnenfernsten Punkt (Aphel) der Merkurbahn, im Raum. Die Ellipse der Merkurbahn ist also nicht geschlossen, sondern dreht sich im Raum, so dass eine Rosettenform der Bahnbewegung rotiert. Die Ursache dieses Phänomens ist die gravitative Wechselwirkung des Merkurs mit der schweren Sonne. Die Periheldrehung gibt es auch in der Newtonschen Gravitationsphysik, aber nur die ART erklärt den exakten, gemessenen Betrag. Die Periheldrehung ist nur bei Merkur von Belang, weil er der Sonne am nächsten steht und damit der beste Indikator für relativistische Gravitation ist.

- ◇ **Emission von Gravitationswellen** von beschleunigten Massen. Auf diese Weise breiten sich Veränderungen des Gravitationsfeldes/von Krümmungen in der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit aus. Gravitationswellen wurden bisher **nicht direkt** beobachtet.

2.12.6 Vielfache experimentelle Bestätigungen

Alle diese Phänomene wurden experimentell verifiziert und gelten als glänzende Bestätigungen der ART. Erste experimentelle Erfolge konnte die ART bereits 1919 bei einer Sonnenfinsternis in Afrika erzielen, weil sie richtig die **Lichtablenkung an der Sonne** prognostizierte. Ebenfalls konnte die **Periheldrehung des Merkur** korrekt berechnet werden. Die beobachtete Diskrepanz von etwa 43 Bogensekunden pro Jahrhundert für die Verschiebung der elliptischen Planetenbahn wurde durch die ART bestens erklärt. 1993 wurde die indirekte Bestätigung der Emission von **Gravitationswellen** bei dem Binärpulsar PSR 1913+16 mit dem Nobelpreis prämiert: *Hulse* und *Taylor* konnten experimentell nachweisen, dass sich die Pulsare sukzessiv annähern, weil das Doppelsternsystem Rotationsenergie durch die Abstrahlung von Gravitationswellen verliert.

2.12.7 Einsteins Kosmos

Kosmologisch hat die ART eine Relevanz, weil sie als erste physikalische Theorie des Weltalls anzusehen ist. Die Welt ist danach vierdimensional und lokal im Allgemeinen nicht Euklidisch. Ob das Universum global Euklidisch oder nicht ist, hängt davon ab, welches Friedmann-Weltmodell vorliegt. Diese Frage ist nach wie vor Gegenstand der modernen Kosmologie. So muss der genaue Energiegehalt des Universums gemessen werden (siehe auch Missing-Mass Problem). Aktuell wird ein unendliches, offenes, expandierendes und flaches Universum indiziert und favorisiert (Messungen von Ballonexperimenten und des Mikrowellen-Satelliten WMAP). Dessen Dynamik wird von der Dunklen Energie dominiert, die neben baryonischer Materie und Dunkler Materie die gewichtigste Energieform stellt. Mathematisch beschreibt man dieses vierdimensionale Universum global mit der Robertson-Walker-Metrik. Der Materieinhalt wird mit einer relativistischen, idealen Flüssigkeit beschrieben. Die Dunkle Energie wird im kosmologischen Lambda-Term in den Feldgleichungen realisiert. Es wird in der modernen Kosmologie in Erwägung gezogen, dass die kosmologische Konstante nicht konstant ist, sondern zeitlich variieren kann. Diese Modelle heißen Quintessenzen. Die Lambda-Kosmologie und die Suche nach einer Weltformel gehörten zu Einsteins letzten Arbeiten. Einstein rechtfertigte sein Lambda damit, dass es ein seinerzeit favorisiertes Statisches Universum ermögliche. Als jedoch das expandierende Universum beobachtet wurde (Hubble-Effekt), zog Einstein sein Lambda zurück und bezeichnete es als 'die größte Eselei seines Lebens'. Moderne kosmologische Modelle benötigen ihn, weil er ein wichtiger Parameter ist, um Beobachtungen erklären zu können. Anschaulich wird das Lambda-Glied so interpretiert, dass bereits das Quantenvakuum eine Energie zur Verfügung stellt (*Vakuumpolarisationen*), die die Raumzeit krümmt. Diese Interpretation ist jedoch noch nicht gefestigt und wird im Rahmen der Quintessenz untersucht.

2.12.8 Extreme der Gravitation: kompakte Sterne

Die ART liefert eine mathematische Beschreibung für Schwarze Löcher, die in diesem Zusammenhang eine Lösung der **Vakuum-Feldgleichungen** bzw. Einstein-Maxwell Feldgleichungen darstellen. Die Gravitationsfelder dieser Kompakten Objekte sind so stark, dass die Newtonsche Theorie versagt. Andere Kompakte Objekte, wie Neutronensterne, Magnetare, Quarksterne und Gravasterne sind ebenfalls nur mit der ART korrekt zu beschreiben. Die relativistischen Korrekturen bei Weißen Zwergen sind hingegen marginal: Hier verwenden Astrophysiker häufig noch die Newtonsche Theorie, um die die

Strukturgleichungen (*Lane-Emden-Gleichung*) des kompakten Sterns abzuleiten. **Aber** die **Stabilität des Weißen Zwergs** ist nur relativistisch erklärbar. Nun ist relativistisch aber im Sinne der **speziell relativistischen Quantenmechanik** (und nicht der Allgemeinen Relativitätstheorie) zu verstehen. Denn: der Spin der Elektronen, einer wesentlichen Teilchenspezies im Innern Weißer Zwerge (neben Kohlenstoff), sorgt für den **stabilisierenden Entartungsdruck**.

2.12.9 Über die Grenzen von Einsteins größtem Wurf

Die ART ist eine **klassische Theorie**, klassisch nun im Sinne von *nicht quantisiert* zu verstehen, weil Quanteneigenschaften, wie Orts-Impuls-Unschärfe oder das Quantenvakuum ¡B¿nicht¡/B¿ eingehen. Es gibt Bereiche der Natur bzw. der Physik, wo auch die ART versagt. Man kann den Parameterraum, wo dies geschieht mit starken Gravitationsfeldern in Verbindung mit sehr kleinen, atomaren und subatomaren Raumskalen umreißen. Das führt auf die Planck-Skala.

Auch das Auftreten von Singularitäten könnte als Indiz gewertet werden, dass die Theorie modifiziert oder durch eine übergeordnete Theorie, einer Quantengravitation, ersetzt werden muss. Gemäß der **Singularitätentheoreme** von *Hawking* und *Penrose* sind Singularitäten etwas 'Natürliches' und unabhängig von der ART. Das Beispiel der Gravasterne zeigt jedoch, dass man zumindest die Singularität des Schwarzschild-Loches durch eine **reguläre Alternative** ersetzen kann. Regularität ist für viele Physiker außerordentlich attraktiv. In diesem Sinne ist die *Singularitäten-Frage* noch nicht geklärt und muss durch experimentelle und theoretische Forschung weiter erörtert werden. Dies könnte so ausgestaltet sein, dass es Astronomen gelänge, Singularitäten oder Gravasterne tatsächlich zu bestätigen oder dass Theoretikern die Formulierung einer robusten Quantengravitation glückt. Lange Zeit wurden die Stringtheorien als einziger Weg zur Quantengravitation angesehen. Die aktuelle Forschung hat in Form der Loop-Quantengravitation eine weitere Alternative gefunden. Die Loop-Quantengravitation kann als direkte Weiterentwicklung der Allgemeinen Relativitätstheorie angesehen werden, die den Konzepten der Quantenmechanik versucht gerecht zu werden. In der Beschreibung der Natur hat sich bisher weder die Stringtheorie, noch die Loop-Quantengravitation bewährt. Die Entwicklung von Bewährungsproben hat bereits begonnen und wird sicherlich in den nächsten Jahren verstärkt verfolgt werden.

2.12.10 Kein Platz für Zweifler

Eines ist jedoch klar: Behauptungen, wie '*Die Relativitätstheorie ist falsch!*' oder '*Einstein irrte!*' sind von der Hand zu weisen, unseriös und absolut anachronistisch. Die ART wurde durch viele Experimente bestens verifiziert und ist eine (im Popperschen Sinne der Wissenschaftstheorie) *bewährte Theorie*. Wie bei der Newtonschen Theorie bzw. generell bei physikalischen Theorien, gibt es auch bei der ART einen **Gültigkeitsrahmen**, der bei bestimmten Parametern (starke Felder, kleine Raumskalen) in ein Versagen der Theorie mündet. Das Versagen wird durch divergierende Größen, wie Krümmung oder Dichte, und womöglich schon durch das Auftreten von Singularitäten signalisiert. **Jede der ART übergeordnete Theorie muss aber die Allgemeine Relativität als Grenzfall enthalten**, ebenso wie die ART die Newtonsche Theorie enthält. Deshalb wird auch nach dem Auffinden einer robusten Quantengravitation die ART ihre Daseinsberechtigung behalten!

2.12.11 Lesehinweis zur Vertiefung

Außerhalb des Lexikons finden Sie einen ausführlichen Artikel zu wichtigen Objekten der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Astrophysik: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation.

2.13 Alpha-Zerfall

Eine der drei Formen von **Radioaktivität** neben Beta- und Gamma-Zerfall. Bei der Radioaktivität senden bestimmte Atomkerne (Fachbegriff: *Radionuklide*) bestimmte Materieteilchen (Elektronen, Positronen, Heliumatomkerne, auch Neutronen) oder hochenergetische, elektromagnetische Strahlung aus. Radioaktivität ist aufgrund seiner stark ionisierenden Wirkung gefährlich für Leben! Teilweise kann Radioaktivität schon mit einfachen Mitteln abgeschirmt und somit 'entschärft' werden.

2.13.1 Was genau ist nun α-Zerfall?

Die Radionuklide beim α-Zerfall sind so genannte **α-Strahler**, d. h. sie senden Heliumatomkerne, einen Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen, aus. Diese He-Kerne nennt man dann **α-Teilchen** (nicht zu verwechseln mit dem α-Männchen bei den Wölfen). Die Reaktionsgleichung lautet in allgemeiner Form für einen beliebigen Atomkern X mit der Protonenanzahl Z (Ordnungszahl des Elements) und der Atommasse A (Summe der Anzahl aus im Atomkern gebundenen Protonen und Neutronen):

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{X} + \alpha $$

Sendet der Kern X ein Alpha-Teilchen aus, so reduziert sich seine Atommasse um vier und die Ordnungszahl um zwei, d. h. es hat eine Nuklearreaktion in Form einer Umwandlung des Elements stattgefunden. Die entsprechenden Verschiebungen im Periodensystem der Elemente bzw. auf der Nuklidkarte regeln die so genannten *Soddy-Fajans-Verschiebungssätze*. Wie immer in der Physik gelten bei diesen Reaktionen **Erhaltungssätze** (z. B. für Masse, Energie und Teilchensorte), so dass das, was auf der linken Seite steht der Summe der Komponenten auf der rechten Seite entsprechen muss. Die Masse eines Alpha-Teilchens beträgt 3.7274 GeV (berücksichtige 'Massendefekt' durch Bindung der vier Nukleonen).

2.13.2 Die Ursache ist nur quantentheoretisch zu verstehen

Erst durch die Quantentheorie war es möglich, diese Form von Radioaktivität (die anderen beiden auch) zu erklären. Der **Tunneleffekt** ermöglicht es dem Alpha-Teilchen durch die Coulombbarriere des Atomkerns zu 'tunneln' und den Kern zu verlassen: der Kern emittiert Alpha-Strahlung.

Diese Strahlung ist für das Leben die gefährlichste der radioaktiven Strahlungen, weil die biologische Schädigung der schweren Alpha-Teilchen enorm ist. Zum Glück ist Alpha-Strahlung aufgrund der hohen Masse (und Ladung) der He-Atomkerne kurzreichweitig und lässt sich bereits durch ein Blatt Papier wirksam abschirmen.

2.14 AMR

In vielen Bereichen der theoretischen Astrophysik und generell in der Strömungsmechanik benutzt man die Gleichungen der **Hydrodynamik** (HD) und **Magnetohydrodynamik** (MHD). In der Astrophysik haben sie sich bewährt, um die Dynamik zahlreicher kosmischer Objekte auf dem Computer zu simulieren. Die Gleichungen können auf ganz unterschiedlichen Längenskalen eingesetzt werden, je nachdem, wie groß die betrachteten Körper sind.

Manchmal sind die Objekte sehr ausgedehnt und es interessiert die Dynamik auf vielen Skalen gleichzeitig - in ein und derselben Simulation. Ein Beispiel ist die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch in einem Aktiven Galaktischen Kern (AGN) oder die Ausbreitung eines großskaligen Jets, der vom AGN emittiert wird. Dann muss man Verfahren finden, die die Dynamik auf vielen Größenskalen abbilden können ohne die Hardwareanforderungen zu überschreiten. Diese Techniken heißen **Adaptive Gittermethoden** (engl. *adaptive mesh refinement*, **AMR**). Um dies zu verstehen, muss zunächst erläutert werden, was ein numerisches **Gitter** ist.

2.14.1 So geht es in der Praxis

In HD/MHD-Simulationen zerlegt man das zu untersuchende Gebiet (engl. *solution domain*) in kleinere Zellen. Es handelt sich um ein Verfahren der **Diskretisierung**, die notwendig ist, um überhaupt Numerik betreiben zu können. Auf jeder Zelle, die mit Ortskoordinaten im Gebiet eindeutig fixiert ist, nimmt eine physikalische Funktion bestimmte Werte an. Typische Funktionen sind in der Hydrodynamik Druck, Dichte und Temperatur, in der Magnetohydrodynamik Magnetfeld, magnetischer Druck und Alfvén-Geschwindigkeit. Sie variieren räumlich über das betrachtete Gebiet, aber auch zeitlich, wenn man sich z. B. eine bestimmte Zelle herausnimmt und deren Zeitentwicklung separat studiert. Die Dynamik steckt in der Zeitabhängigkeit. Die kleineren Zellen, im einfachsten Fall Quadrate (2D) oder Würfel (3D), formen ein (hier äquidistantes) **Gitter**. Im Beispiel handelt es sich um ein regelmäßiges, *strukturiertes Gitter*. Daneben kann man den Bereich auch in ein *unstrukturiertes Gitter* zerlegen, was man häufig bei **Finite Elemente Methoden** findet. AMR passt nun die **Feinheit des Gitters**, also die Größe der Gitterzellen, in jedem Bereich des Gitters unterschiedlich an. Das Kriterium ist, ob sich die betreffende Größe stark in einer bestimmten Region des Gitters ändert oder mehr oder weniger konstant bleibt. Nur dort wo sie sich stark ändert, muss stärker aufgelöst werden, d. h. das Gitter verfeinert werden. Diese Gitter nennt man *adaptiv*. Ein Maß für die räumliche Variation einer Größe ist der **Gradient**. Er kann als Kontrollparameter für die AMR benutzt werden. AMR ist ein numerisch effizientes Verfahren, weil es die Ressourcen der Hardware nur dort bündelt, wo Strukturen auftreten, also 'etwas Interessantes' geschieht.

2.15 anthropisches Prinzip

Dieses Prinzip, benannt nach dem altgriechischen Wort $\grave{\alpha}\nu\vartheta\rho\omega\pi\varsigma$, *anthropos* für *Mensch*, findet Anwendung in der Kosmologie und besagt verkürzt:

Wir sehen das Universum so, wie es ist, weil wir hier sind, um es zu sehen.

Ausgangspunkt des anthropischen Prinzips ist die Frage nach der Beschaffenheit des Universums. Warum ist es gerade so, wie wir es beobachten, und nicht anders? Die Antwort

liegt nach Auslegung des anthropischen Prinzips in unserer Existenz: physikalisch sind durchaus andere Realisierungen des Universums denkbar. Weil aber nur bestimmte, mögliche Universen die Existenz des Menschen zulassen, muss das Universum so sein, wie wir es beobachten, *denn wir sind hier*, um es zu beobachten.

2.15.1 Zwei Formulierungen des anthropischen Prinzips

- ◇ **schwaches anthropisches Prinzip**: *Die Bedingungen für die Entwicklung des Lebens werden nur in bestimmten Gebieten des Weltalls angetroffen.*
- ◇ **starkes anthropisches Prinzip**: *Die Bedingungen für die Entwicklung des Lebens werden nur in wenigen Universen angetroffen.*

Das schwache anthropische Prinzip besagt, dass das Universum zunächst eine Entwicklung durchmachen muss, bevor Leben entsteht. Die Entwicklung geht über die Bildung der Teilchenspezies, Atomen und Molekülen, dem Verklumpen von intergalaktischer Materie zu Galaxien aus gravitativen Instabilitäten, der Entstehung von Sternen in Galaxien, der Bildung von Planeten um einige Sterne bis hin zur Entstehung des Lebens auf ausgewählten Planeten. Dieser Prozess dauert seine Zeit, augenscheinlich so lange, wie unser Universum gebraucht hat: etwa 13.7 Milliarden Jahre. Das lokale Universum (bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 0$) erfüllt demnach erst die Bedingungen für Leben. Wie jeder weiß: Die Beobachtung stützt dies.

Das starke anthropische Prinzip ist eine Modifikation, die mit der **Viele-Welten-Theorie** aufkam. Im Rahmen einer **Quantenkosmologie** kann man Mechanismen der Quantentheorie auf kosmologische Modelle übertragen: die Erzeugung und Vernichtung von Teilchen besitze eine Analogie in der Erzeugung und Vernichtung von Universen! Dies führe gemäß *Everett* und *Wheeler* auf die Interpretationsmöglichkeit, dass nicht nur ein Universum entstehen kann, sondern viele, ein kosmisches Kommen und Gehen. Aber auch in diesem **Multiversum** könnten nur bestimmte Universen die Bedingungen für Leben erfüllen, daher die obige Formulierung des starken anthropischen Prinzips.

2.16 Antigravitation

Bezeichnung für eine Kraft oder ein Phänomen, das der Schwerkraft, der Gravitation entgegen wirkt. Die Theorien der Gravitation, wie Newtonsche Theorie und an sich auch die Relativitätstheorie sagen nichts über die Existenz von Antigravitation aus. Im Kern kann man die Gravitationskraft nicht abschirmen, weil es nur eine Form 'gravitativer Ladungen' gibt, die **Masse**. In der Elektrodynamik hingegen ist es möglich die elektrischen Kräfte abzuschirmen, wenn positive auf negative Ladungen treffen. In der Relativitätstheorie gibt es '**keine negative Ruhemasse**'!

2.16.1 Wie soll das gehen?

Zumindest hypothetisch gibt es Teilchen mit **imaginärer Masse**, die Tachyonen. Diese Teilchen bewegen sich mit Geschwindigkeiten größer als die Lichtgeschwindigkeit (was man als *superrelativistisch* bezeichnen könnte) und verstoßen damit gegen das in der Physik fundamentale **Kausalitätsprinzip**: Ursache und Wirkung können sich bei der Vermittlung

von Tachyonen vertauschen. Physiker versuchen dies zu vermeiden und sind bei Theorien, die Tachyonen hervorbringen äußerst skeptisch.

2.16.2 Bitte etwas weniger verrückt...

Es gibt jedoch eine mysteriöse Kraft, die entscheidend die Entwicklung des Universums bestimmt und die man als Antigravitation bezeichnen könnte: die **Dunkle Energie**. Sie wirkt der Gravitation entgegen ist also *repulsiv* und grundlegend anders als Materie. Im Prinzip hat sie Einstein eingeführt, als er 1917 seine Allgemeine Relativitätstheorie auf die Kosmologie anwendete. Er wollte mathematisch ein aus seiner Sicht ästhetisches **statisches Universum** rechtfertigen. Dies war jedoch nur möglich, wenn er einen weiteren Term in seinen Feldgleichungen einführte, der die Dynamik unterdrückte: den **Lambda-Term** oder auch kosmologische Konstante genannt. Eine **positive kosmologische Konstante** wirkt sich nun repulsiv aus und ist dementsprechend ein Antagonist zur (*attraktiven*) Gravitation.

2.16.3 Expansion des Universums ist antigravitativ

Mit der Entdeckung der Expansion des Universums wurde die kosmologische Konstante fallengelassen und geriet lange Zeit in Vergessenheit bis sie in den 90er Jahren wieder *en vogue* wurde, um kosmologische Daten zu erklären. Jetzt, im Jahre 2004, wird die kosmologische Konstante sogar von Supernova (Typ Ia) favorisiert, weil keine merkliche zeitliche Variabilität der Dunklen Energie nachgewiesen werden konnte (*Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512, HST-Beobachtungen).

In der Kosmologie findet man deshalb nach wie vor Modelle mit positiver kosmologischer Konstante, sogar noch mehr: die aktuellen Messungen stützen die These, dass wir in einem **Lambda-dominierten Universum** leben. Der Anteil Dunkler Energie ist sogar mit 2/3 der entscheidende Anteil.

Außerdem glaubt man, dass eine Blase Dunkler Energie, ein '**Antigravitationsvakuum**' im Innern neuer Lösungen der Einstein-Gleichungen realisiert sind, die man Gravasterne genannt hat. Das Antigravitationsvakuum stabilisiert den Gravastern und verhindert dessen Kollaps. Sie werden nun als **reguläre** Alternative zu den Schwarzen Löchern diskutiert.

2.17 Antimaterie

Antimaterie besteht aus **Antiteilchen**. Antiteilchen unterscheiden sich von 'normalen' Teilchen nur im Vorzeichen aller *additiven* Quantenzahlen. Zu den additiven Quantenzahlen gehört die **elektrische Ladung**, die Baryonenzahl, aber auch die verallgemeinerten Ladungsbegriffe wie Farbladung und schwache Hyperladung. Alle anderen Eigenschaften, wie Masse, Spin, Isospin und Lebensdauer sind identisch.

2.17.1 Kein schöner Tanz: Paarvernichtung

Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, so vernichten sie sich gegenseitig. In der Physik heißt dieser Vorgang **Paarvernichtung** oder *Annihilation*. Aus der Vernichtung der Teilchen geht elektromagnetische Vernichtungsstrahlung (*Annihilationsstrahlung*) hervor.

2.17.2 Dann lieber 'Teilchen aus dem Nichts'

Der umgekehrte Vorgang passiert jedoch auch: die **Paarerzeugung**. Dabei wandelt sich Strahlungsenergie in Materie um. Das Erstaunliche an diesem Phänomen ist, dass aus Photonen mit Ruhemasse null massebehaftete Teilchen, also Teilchen endlicher Ruhemasse, hervorgehen. Es gilt dabei immer die strenge Einhaltung der **Energieerhaltung**. Das berühmte **Masse-Energie-Äquivalent**, $E = mc^2$, das *Albert Einstein* 1905 in seiner Speziellen Relativitätstheorie (SRT) abgeleitete, kann herangezogen werden, um die Energie der Strahlung zu berechnen. Weil die Teilchen vollständig zerstrahlen, geht ihre gesamte Masse in Strahlungsenergie. Neben Energieerhaltung ist auch die **Drehimpulserhaltung** zu beachten, daher ist in der Regel für diesen Prozess ein **Rückstosskern** oder **Rückstossteilchen** vonnöten.

2.17.3 Beispiel: Elektron & Positron

Das bekannteste Beispiel, weil in der Natur häufig anzutreffen, ist die Erzeugung oder Vernichtung eines **Elektron-Positron-Paares**. Jedes dieser Teilchen hat eine Ruhemasse von 511 keV, nur unterscheiden sie sich in der elektrischen Ladung: das Elektron ist negativ, das Positron positiv geladen. Treffen diese beiden Teilchen zusammen, so entsteht die charakteristische Vernichtungsstrahlung in Form von zwei entgegengesetzt auseinander laufenden Gammaphotonen mit einer Energie von jeweils 511 keV. Elektron und Positron haben sich vernichtet. Es müssen zwei Photonen entstehen, weil neben der Energieerhaltung auch die Erhaltung von Impuls und Drehimpuls beachtet werden muss.

Die beiden Leptonen, Elektron und Positron, sind leichte Teilchen. Demzufolge wäre die Vernichtungsstrahlung aus einem Proton und einem Antiproton, die jeweils 2000fach schwerer sind als das Elektron bzw. Positron entsprechend noch hochenergetischer! In der Natur ist das sicher weniger häufig realisiert, jedoch gibt es astrophysikalische Quellen bei denen dieser Prozess in Erwägung gezogen wird. In der Teilchenphysik bzw. Hochenergiephysik werden bei hohen Energiedichten **virtuelle Paare** aus schweren Teilchen und Antiteilchen erzeugt. Die Nukleonen sind Baryonen und bestehen aus drei Quarks. Präzise gesagt nennt man sie die drei **Valenzquarks**. Sie wechselwirken durch den Austausch von Gluonen miteinander, die die starke Kraft vermitteln. Im Rahmen der *Heisenbergschen Unschärfe* der Quantentheorie können sich die Gluonen in virtuelle Paare aus Quark und Antiquark verwandeln. Dann existiert für kurze Zeit im Nukleon neben drei Valenzquarks ein so genannter **Quark-See** aus vielen Quark-Antiquark-Paaren.

2.17.4 Star Treks Pioniere

Der Quantenphysiker *Paul Dirac* (1902 - 1984) hat als erster die Existenz von Antimaterie 1928 theoretisch vorhergesagt, indem er eine speziell relativistische Erweiterung der Quantenmechanik formulierte (*Dirac-Theorie*). Dabei stellte sich heraus, dass der Spin der Teilchen eine natürliche Eigenschaft in der relativistischen Quantenmechanik ist.

In der Dirac-Theorie tauchte neben dem Elektron sein Antiteilchen, das Positron, auf. Im Speziellen war es dieses Teilchen, das später, im Jahr 1932, von *C.D. Anderson* experimentell gefunden wurde. Antiproton und Antineutron (mit entsprechendem Quarkinhalt anti-u, anti-u, anti-d bzw. anti-u, anti-d, anti-d) folgten viel später, in den Jahren 1955 und 1958.

2.17.5 Endlich Antiatome

Es ist möglich aus Antiteilchen **Antiatome** experimentell herzustellen. Dies ist jedoch sehr aufwendig, weil aus oben erläuterten Gründen die Antiatome gut von der normalen Materie abgeschirmt werden muss. Dies gelingt mit so genannten *magnetischen Fallen*. Am CERN ist es im Jahre 1995 für sehr kurze Zeit gelungen das einfachste Antiatom, nämlich **Antiwasserstoff**, herzustellen, wo ein Positron um ein negativ geladenes Antiproton 'kreist'! Die Herstellung von Antimaterie wird weiter intensiviert, um sie längere Zeit bestehen lassen zu können, beispielsweise dadurch dass ein Strahl relativistischer Teilchen auf Materie prallt, einem Prozess, wo auch Antiteilchen freigesetzt werden.

Teilchen, die ihr eigenes Antiteilchen sind, nennt man **Majorana-Teilchen**. So nimmt man vom elektrisch neutralen und sehr leichten, schwach wechselwirkenden Neutrino an, dass es ein Majorana-Teilchen ist. In Experimenten, die den *doppelten* Beta-Zerfall und die Erhaltung der Leptonenzahl untersuchen, versuchen Physiker dies nachzuweisen.

2.17.6 Antimaterie im Kosmos - na klar!

Die Frage, ob isolierte Galaxien aus Antimaterie bestehen, ist nicht ohne weiteres zu beantworten, weil die Photonen die gleichen Eigenschaften hätten, wie bei einer Galaxie mit normaler Materie. Nur die Teilchenemission der Galaxie scheint ein Weg zu sein, um darüber eine Aussage treffen zu können. Man geht davon aus, dass die Materie gegenüber der Antimaterie bei weitem überwiegt, weil ansonsten im Überlappungsgebiet eine signifikante Emission von Annihilationsstrahlung beobachtet werden müsste. Tatsächlich wird die Annihilationsstrahlung von Elektronen und Positronen als Gammaspektrallinie bei 511 keV Ruheenergie von Astronomen beobachtet. So nutzten Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astrophysik 2004 das SPI-Instrument an Bord des Gammasatelliten Integral um die Gammalinie im Zentrum der Milchstraße zu beobachten (*Churazov et al.*, astro-ph/0411351). Die Linie verriet, dass das interstellare Gas in der Sagittarius-Region etwa 7000 bis 40000 Grad heiß ist.

Im lokalen Universum beobachten wir eine Dominanz der 'normalen' Materie. Der Ursprung dieser Materie wird mit der Baryogenese beschrieben. In diesem Modell der Kosmologie wird davon ausgegangen, dass die 'normale' Materie nicht in allen Entwicklungsphasen des Universums dominant war. In einer der frühesten Stadien des Kosmos gab es vermutlich sogar fast gleich viel Materie und Antimaterie. Diese Phase heißt GUT-Ära. In dieser Epoche war es so heiß, etwa 10^{16} GeV, dass drei der vier Naturkräfte zur X-Kraft 'verschmolzen waren'. Diese Eigenschaft heißt auch GUT-Symmetrie. Die Großen Vereinheitlichten Theorien werden zugrunde gelegt, um den GUT-Kosmos zu beschreiben. Die GUT erlaubt, dass die Erhaltung der Bayonen- und Leptonenzahl verletzt werden kann. So ist es ohne weiteres möglich, dass sich über verschiedene Teilchenreaktionen ein Missverhältnis zwischen den Mengen an Materie und Antimaterie herausstellt. Es genügt bereits eine winzige **Materie-Antimaterie-Asymmetrie**, in der auf jedes Antiteilchen ein plus ein Milliardstel Teilchen kommen. Sobald die GUT-Symmetrie infolge der Abkühlung des Universums durch Expansion gebrochen wird (unterhalb etwa 2×10^{16} GeV), **gilt** die Baryonenzahlerhaltung. Dann kann das Verhältnis Materie zu Antimaterie für den ganzen Kosmos nicht mehr geändert werden! Die bis dato vorhandene Materie und Antimaterie vernichtete sich zu gleichen Anteilen gegenseitig. Die daraus hervorgehende Annihilationsstrahlung verwandelte den frühen Kosmos in ein Strahlenmeer aus Photonen. Diese **Urstrahlung** ist heute noch nachweisbar: Es

ist die kosmische Hintergrundstrahlung, die hier ihren Ursprung fand. Die Strahlung war in ihrer Bildungsphase noch 'eingeschlossen' in ein dichtes Urplasma. Anfangs bestand das Urplasma aus Quarks und Leptonen. In folgenden Entwicklungsphasen bildeten sich Baryonen, Mesonen, später Nukleonen in der primordialen Nukleosynthese und schließlich Atome in der Rekombinationsära. Erst in dieser relativ späten Entwicklungsphase des Kosmos, bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 1100$ oder 380000 Jahre nach dem Urknall, konnten die Urphotonen ihren 'Käfig' aus dichtem Plasma verlassen: Die Hintergrundstrahlung verließ die letzte Materiefläche (engl. *last scattering surface*), an der sie streute und war frei. Man spricht im Physikerjargon auch von der Entkopplung der Hintergrundstrahlung. Springen wir noch einmal an den Punkt, wo die Vernichtungsstrahlung entstand: Der geringe Anteil an Materie, der keinen passenden Antimateriepartner fand, zerstrahlte nicht und überdauerte das Inferno. So erklärt die minimale Materie-Antimaterie-Asymmetrie der GUT-Ära das Vorhandensein und die Dominanz der Materie heute, im lokalen Kosmos.

2.17.7 Antimaterie im Alltag der Physiker

Die Antimaterie ist schon lange Gegenstand der Science-Fiction Literatur, aber an sich nicht so exotisch, wie dort dargestellt wird. An Teilchenbeschleunigern ist die kurzzeitige Existenz von Antiteilchen ein alltägliches Phänomen. Erinnert sei noch an den **Warpantrieb** in der SF-Serie Star Trek und das **positronische Gehirn** des Androiden *Lt. Commander Data* bei *Star Trek - The Next Generation*. In beiden Fällen sollten erhebliche Schwierigkeiten darin bestehen, die Antimaterie von der normalen Materie abzuschirmen. Die positronischen Ströme könnten magnetisch auf Sollbahnen gehalten werden. Offensichtlich hat diese hoch entwickelte Zivilisation Mittel und Wege gefunden, dies in den Griff zu bekommen.

2.18 Apastron

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Apastron (grch. *apo*: entfernt von; grch. *astron*: Stern) ist der **fernste Punkt auf einer Bahn um einen Stern**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Zusammen mit dem Begriff Periastron ist Apastron besonders bei der Diskussion von *Doppel- und Mehrfachsternsystemen* gebräuchlich.

2.19 Apertursynthese

Ein mittlerweile weit verbreitetes Verfahren in der Radio- und optischen Astronomie zur Erhöhung der Öffnung von Teleskopen. Als **Öffnung** bezeichnet man den Durchmesser des Objektivs bei Teleskopen. Je größer die Öffnung, umso mehr Photonen (also Informationen) können von der Quelle 'aufgesammelt' werden. Das Bild der Quelle wird heller. Die Lichtstärke wird umso wichtiger, je mehr man ein Objekt vergrößert, wie jeder Hobbyastronom weiß.

Daher ist eine große Öffnung bei allen Teleskopen erstes Ziel und motiviert zum Bau von Großteleskopen!

2.19.1 Statik schiebt den Riegel vor

Aus statischen Gründen gibt es Obergrenzen für Großteleskope. Je größer die Sammelfläche für Licht oder Teilchen ist, umso schwerer ist das Objektiv und die gesamte Montierung des Teleskops. Optische Teleskope der 10-Meter-Klasse bilden eine Schwelle, die man durch neue Methoden der Spiegelkonstruktion (kleine hexagonale Einzelspiegel bilden den großen Spiegel: *multi-mirror telescope*, MMT) zu erweitern sucht. Die Einzelspiegel werden durch eine Technologie namens *Aktive Optik* in eine angemessene Passform gebracht, die derjenigen eines großen Einzelspiegels entspricht.

2.19.2 Zauberei mit vielen Teleskopen und Atomuhren

Nun kann man sich eines Tricks behelfen, der sich in der Radioastronomie schon lange bewährt hat: salopp formuliert schließt man viele Einzelteleskope zu einem synthetischen Großteleskop zusammen. Dieses Verfahren nennt man *Aperturs*ynthese und man betreibt dann **Interferometrie**.

Dabei ist es wichtig, dass die **Synchronisation** zwischen den Einzelteleskopen stimmt. Sie alle blicken an dieselbe Stelle am Himmel um die Strahlungsemission einer Quelle aufzuzeichnen. Es muss sehr genau zeitlich korreliert sein, wann welches Teleskop welche Daten aufnimmt. Dies ist der aufwendigste Teil in der Interferometrie und wird natürlich mit Computern bewerkstelligt. Das Bild einer Quelle ist also eine Überlagerung vieler Einzelbilder von Einzelteleskopen. Dadurch dass die Einzelteleskope einen räumlichen Abstand voneinander haben, besitzt das resultierende Bild eine viel **größere Auflösung**. Die 'Augen' interferometrischer Teleskope sehen viel schärfer!

2.19.3 Aktuelle Auflösungsgrenzen

Radioastronomisch reicht das in den Millibogensekundenbereich (mas) und Mikrobogensekundenbereich, was eine genaue Radiokartierung des Galaktischen Zentrums der Milchstraße ermöglicht hat. Denn dieses ist optisch durch Staub verborgen!

Gegenwärtige interferometrisch arbeitende Telekopverbände sind das VLA, VLBI und VSOP (radioastronomisch) sowie seit kurzem optisch VLTI.

2.20 Aphel

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Aphel (grch. *apo*: entfernt von; grch. *helios*: Sonne) ist der **fernste Punkt auf einer Bahn um die Sonne**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Siehe auch Perihel.

2.21 Apogäum

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Apogäum (grch. *apo*: entfernt von; grch. *geo*: Erde) ist der **fernste Punkt auf einer Bahn um die Erde**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte oder auch bei sehr präzise bestimmten Bahnen um die Erde (z. B. bei der Satellitennavigation oder **GPS**) muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Siehe auch Perigäum.

2.22 Astronomie

2.22.1 Etymologie und Geschichte

Die Astronomie (*άστρον*, *astron*, grch.: Stern, Gestirn, Himmel) ist die Stern- oder Himmelskunde und gilt als die älteste unter den Naturwissenschaften. Offenbar hat sich der denkende Mensch früh gefragt, welche Ereignisse am Himmel geschehen. Das verwundert nicht, dominiert doch schon der Lauf der Sonne, des nächsten Sterns (Entfernung: durchschnittlich etwa 150 Mio. Kilometer, eine Astronomische Einheit oder acht Lichtminuten), unseren Tagesablauf durch den Wechsel von hell und dunkel. Die Mondphasen, die hellen Planeten und das rotierende Firmament rufen auch bei blanker Unkenntnis Faszination und Erstaunen hervor. Die erwachsende Neugierde ist deshalb eine natürliche Konsequenz und mündete in ein Hinterfragen und **Erforschen des Himmels**. Zu Beginn der Menschheitsgeschichte spielte die rituelle Verehrung von Himmelsobjekten eine große Rolle. Das beobachtet man auch heute noch in Form von Rudimenten in vielen Kulturkreisen und wenigen Naturvölkern, denen die moderne Zivilisation verschlossen blieb. Unkenntnis und Unverständnis schüren Ehrfurcht und Furcht. Die Verehrung und zeremonielle Handlungen sollten die Naturkräfte besänftigen. In vielen Kulturen bildeten sich so polytheistische Religionen aus, in denen Naturgottheiten verehrt wurden und werden.

Die häufige **Beobachtung** des Himmels führte allerdings auch auf die Entdeckung von Regelmäßigkeiten und periodischer Ereignisse. Triviale Beispiele sind der Wechsel von Tag und Nacht, die Mondphasen sowie die Jahreszeiten. Damit wurde das Himmelsgeschehen vorhersagbar, was die Geburtsstunde astronomischen Wissens markiert. Wer in die Zukunft blicken kann, hat Macht. Die astronomischen Kenntnisse weniger Hüter des Wissens wurde von Anfang an auch missbraucht, um Unkundige zu beeindrucken und an sich zu binden. Die Astronomie entwickelte sich deshalb zusammen mit der **Astrologie** und den Religionen. Ursprünglich wurde auch die Sternkunde als Wissenschaft mit dem griechischen Wort *astrologia* bezeichnet. Beeindruckende Beispiele der Verschmelzung von Astronomie und Astrologie sind die ältesten Menschheitskulturen wie die Babylonier in den vor- und die Maya im nachchristlichen Jahrtausend. In beiden Kulturen nutzten Priesterastronomen geschickt ihre fortgeschrittenen Kenntnisse des Himmels. Weitere Details dieser historischen Entwicklung entnehmen Sie bitte dem Essay Der Sternenhimmel.

2.22.2 Geburtsstunde der wissenschaftlichen Beobachtung

Spätestens das **Zeitalter der Aufklärung** im 17. und 18. Jahrhundert markiert einen Wendepunkt, an dem sich die **Astronomie als Naturwissenschaft** emanzipierte. Die Erfindung des Fernrohrs im Jahr 1608 durch den Holländer *Hans Lipperhey* ermöglichte die Entdeckung bisher unsichtbarer Geschehnisse am Himmel. Ein Pionier der beobachtenden Astronomie ist *Galileo Galilei*, der das *holländische Fernrohr* benutzte. Später modifizierte *Johannes Kepler* (1571 - 1630), dieses Fernrohr, indem er als Okular die Zerstreuungslinse durch eine Sammellinse ersetzte. Dieses astronomische Fernrohr heißt *Kepler-Fernrohr*. Die damit aufkommenden experimentellen Erfolge und das Entwickeln einer wissenschaftlichen Methodik legten den Grundstein der modernen Astronomie: Wie in allen Naturwissenschaften wird auch das astronomische Weltbild durch **Experimente und Theorien** aufgebaut (Das Konzept wird in zwei weiteren Essays Die wissenschaftliche Methode und Alles graue Theorie? tief greifend behandelt). Die Experimente sind jederzeit wiederholbar, d. h. reproduzierbar und werden durch ein physikalisches Modell, einer Theorie, erklärt. In der Astronomie gibt es sozusagen ein 'Himmelslabor'. Da der irdische Wissenschaftler hier nicht viel Einflussmöglichkeiten hat spricht man bei den Experimentatoren in der Astronomie von den **Beobachtern**. Sie beobachten den Himmel mit den unterschiedlichsten Messgeräten (Detektoren), vor allem mit **Teleskopen**, und dokumentieren diese Beobachtung. Die **Theoretiker** entwickeln zu diesen Beobachtungen ein **physikalisches Modell**, das in vielen Einzelheiten die Beobachtung erklärt, indem es die Ursache(n) für das beobachtete Ereignis entlarvt. Im engeren Sinne meint man mit dem Begriff **Astronomie** heute den beobachtenden Zweig dieser Naturwissenschaft (Empirie, Praxis) und mit dem Begriff **Astrophysik** den theoretischen Zweig, der besonders nahe an der Naturwissenschaft Physik ist.

Weiterhin unterscheidet man die **Profiastronomie** von der **Amateurastronomie**: In der professionellen Astronomie forschen Berufsastronomen mit moderner Technologie wie Großteleskopen, Satellitentechnik und Supercomputern und im Rahmen großer, internationaler Kollaborationen - aus Kostengründen und zum Wissensaustausch. In der Amateurastronomie forschen versierte Hobbyastronomen mit kleinerem (aber ebenfalls vielfach modernem) Gerät. Amateurastronomen sind häufig Spezialisten für Langzeitbeobachtungen beispielsweise von Veränderlichen, für die Kometenjagd oder für die optische Astrophotographie. Aufgrund hoher Kosten und fehlender Manpower wird dieser Aufwand in der Profiastronomie kaum betrieben.

2.22.3 Disziplinen der beobachtenden Astronomie

Die Astronomie hat sich seit der Erfindung des Teleskops im 17. Jahrhundert, der Verbesserung der Detektoren und der Ausarbeitung der Relativitätstheorie und der Quantentheorie im 20. Jahrhundert enorm entwickelt. Mittlerweile unterscheidet man folgende Disziplinen der Astronomie:

- Grundsätzlich sind Beobachter an **Detektorphysik** und **Teleskopbau** interessiert. Es muss sehr präzise geklärt werden, was mit dem Signal vom Himmel (Photon oder andere Teilchen) im Detektor passiert. Denn im Prinzip wird aus dem ursprünglichen Signal ausnahmslos ein elektronisches Signal (elektrischer Stromimpuls), dass die entsprechende Information trägt. Die Photoplatten der klassischen, optischen Astronomie wurden mittlerweile in der Profiastronomie durch CCDs (engl. *charged coupled devices*) verdrängt. Ein CCD-Chip besteht aus einem lichtempfindlichen

Halbleitermaterial. Diese Fläche ist unterteilt in Pixeln, also einem Raster aus Elementen. Ein digitales Bild wie das Bild auf dem Computermonitor besteht aus einer großen Zahl von Pixeln. Je mehr Pixel es sind, umso feiner ist die Darstellung des Bildes. CCDs gibt es in jeder Digitalkamera. Dort wandeln sie auch die elektromagnetische Information die vom Objektiv kommt in elektrische Ströme um. Diese Ströme werden wieder genutzt, um das Pixelbild abzubilden z. B. auf einer Flüssigkristallanzeige (engl. *liquid cristal display*, LCD) oder einem Monitor. Die Vorteile des CCDs sind die hohe Quantenausbeute (es registriert sehr viele Photonen, wenige gehen verloren) und die digitalisierte Form der Informationsdaten. CCDs zeichnen Signale aus nahezu allen Spektralbereichen auf und werden deshalb vor allem in der Infrarot-, optischen und Röntgenastronomie als 'Kameras' eingesetzt. Ein Astronom bereitet die Information einer kosmischen Quelle einerseits als Bild auf (*Imaging*) oder als Spektrum (siehe unten: Spektroskopie).

◇ Die **Astrometrie** ist ein klassischer Zweig, der sich mit der Position und Entfernung der Gestirne beschäftigt. Diese Disziplin ist auch heute noch von großer Relevanz, folgen doch aus diesen präzisen Grunddaten neue, sekundäre Parameter. Winzige Effekte der modernen Astronomie reagieren besonders sensibel auf einen unzureichenden Grunddatenstock.

◇ Die **Spektroskopie** beschäftigt sich mit der Gewinnung der Spektren von Himmelsobjekten, also einer Intensität (alternativ: Leuchtkraft, Helligkeit, Farbindex, in der Regel ein spektraler Fluss), die über einer Wellenlänge (gleichwertig: Frequenz oder Energie) aufgetragen wird. Aus diesem charakteristischen Verlauf, das den Laien an den Kursverlauf seiner Aktie erinnern mag, folgert der Astronom charakteristische Eigenschaften der Quelle. Der Theoretiker versucht diese Spektren mit einem physikalischen Emissions- und Absorptionsmodell zu reproduzieren, das in der Regel auch die Umgebung der Quelle und den Bereich zwischen Quelle und Beobachter berücksichtigen muss. Die Anfänge der Astronomie liegen in der optischen Astronomie, also der Untersuchung von Licht aus dem Weltall. Mittlerweile bietet der moderne Teleskopbau den Astronomen die Möglichkeit aus allen Spektralbereichen der elektromagnetischen Wellen Informationen kosmischer Quellen zu empfangen. Die Strahlung, die die irdische Atmosphäre abblockt (z. B. Ultraviolett- und Röntgenstrahlung), wird in satellitengestützten Observatorien außerhalb der Erdatmosphäre gemessen. Deshalb haben sich (aufsteigend in der Strahlungsenergie) die Zweige der Radioastronomie, Infrarotastronomie, optischen Astronomie, Ultraviolettastronomie, Röntgenastronomie und Gammaastronomie ausgebildet. Originär wurden also Photonen beobachtet, aber heute beobachten Profis die Spektren sämtlicher Teilchen, die aus den Weiten des Universums zu uns gelangen. Deshalb gibt es in der modernen Astronomie auch die Neutrinoastronomie (siehe Neutrino), die TeV-Astronomie (siehe Elektronenvolt), die Hochenergieastrophysik (die sich z. B. mit Kosmischer Strahlung und Gamma Ray Bursts beschäftigt) und die Gravitationswellenastronomie. Auch wenn Gravitationswellen bisher nicht direkt nachgewiesen wurden, so ist das gerade das erklärte Ziel der aufblühenden Gravitationswellenastronomie. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt eindeutig die Existenz dieser Wellen voraus, die als 'Beben im Raum-Zeit-Gefüge' aufgefasst werden können.

Im Fachjargon spricht man bei den unterschiedlichen Spektralbereichen von den 'Fenstern der Astronomie'. Die Bezeichnung folgt einer metaphorischen Sicht, dass man durch jedes Beobachtungsfenster ins All etwas Neues vom Universum sehen kann. Die Information einer kosmischen Quelle liegt demnach in Form eines (elektromagnetischen) Multiwellenlängenspektrums und Teilchenspektren vor und kann von Astrophysikern interpretiert werden. Insgesamt muss sich auf der Grundlage des entwickelten, physikalischen Modells ein 'stimmiges Bild' aus sämtlichen Beobachtungsdaten ergeben. Erst dann darf die Quelle als verstanden deklariert werden!

- Die **Photometrie** hat zur Aufgabe die Leuchtkraft bzw. Helligkeit eines Himmelsobjektes zu messen. Nimmt man diese Helligkeit über ein gewisses Zeitintervall auf, so erhält man eine so genannte Lichtkurve. Die Form der Lichtkurve verrät bereits sehr viel über die Quelle und kann beispielsweise dazu dienen unmittelbar eine Supernova, einen Gamma Ray Burst, eine Nova, einen besonderen Typus eines veränderlichen Sterns oder eine Quasi-periodische Oszillation zu klassifizieren. Photometrische Untersuchungen bei Galaxien helfen bei der Klassifikation ihrer Morphologie in Hubble-Typen und sind somit Interessensgebiet der Galaxienentwicklung.

- In der **Polarimetrie** wird eine weitere Eigenschaft elektromagnetischer Wellen erforscht: die Feldvektoren schwingen bei manchen Quellen in bevorzugten Raumrichtungen. Diese Schwingungszustände heißen Polarisationsrichtungen und man unterscheidet linear, zirkular und elliptisch polarisiertes Licht von unpolarisiertem Licht. Sonnenlicht ist z. B. unpolarisiert, d. h. sämtliche Schwingungszustände liegen vor. Sie können durch einen Polarisationsfilter, wie einer Sonnenbrille, ausgeblendet werden: hinter die Sonnenbrille gelangt nur Strahlung einer bestimmten Polarisation. Weil durch Ausblenden einer Polarisationsrichtung auch Strahlungsintensität verloren geht, wird es hinter einer Sonnenbrille dunkler. Synchrotronstrahlung ist immer linear polarisiert. Sie entsteht, wenn elektrische Ladungen in Magnetfeldern beschleunigt werden. Die lineare Polarisationsrichtung lässt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung des Magnetfeldes am Emissionsort zu. Genau das nutzen Radioastronomen aus, um die galaktischen Magnetfelder zu kartieren. Offensichtlich sind diese Magnetfelder wichtig in der Dynamik der Galaxien und bei der Bildung von Spiralarmen in Spiralgalaxien.

  Die Polarisation der kosmischen Hintergrundstrahlung ist ebenfalls ein modernes Forschungsgebiet. Die Hintergrundstrahlung trifft bei ihrer Ausbreitung ins lokale Universum auf mittlerweile entstandene Materie. Als Streuzentren wirken vor allem die Elektronen der Protogalaxien. Aus diesen Daten erhoffen sich die Kosmologen Informationen über die Materieverteilung im frühen Universum zu erhalten.

2.22.4 Disziplinen der theoretischen Astrophysik

Den theoretischen Sektor kann man genauso feiner untergliedern. Die Teildisziplinen der Astrophysik lauten:

- Die **Himmelsmechanik** ist der klassische, theoretische Zweig der Astronomie. Auf der Grundlage einfacher geometrischer und mechanischer Gesetzmäßigkeiten versuchten die Astrophysiker der ersten Stunde die Bewegung der Gestirne, vor allem von Sonne, Mond und der Planeten, zu erklären. Der alexandrinische Astronom

und Mathematiker *Claudius Ptolemäus* (∼ 100 - 160) versuchte eine Erklärung mit geometrischen Mitteln im Rahmen eines geozentrischen Weltbildes. In diesem *Ptolemäischen Weltbild* bewegen sich alle Himmelkörper auf Kreisbahnen. Das allein konnte die komplizierten Planetenbewegungen nicht erklären, so dass Ptolemäus die so genannten *Epizykel* einführte: hier bewegen sich sich die Planeten auf Kreisbahnen, deren jeweilige Zentren ihrerseits einen Kreis um die Erde beschreiben. Diese rein geometrische Beschreibung der Planetenbewegung veröffentlichte Ptolemäus um das Jahr 150 n. Chr. in seinem astronomischen Handbuch, dem *Almagest*. Dieses Werk bildete lange Zeit die Grundlage der Astronomie, bis eine sehr exakte Beschreibung der Planetenbewegungen um die Sonne dem Astronomen *Johannes Kepler* auf *rein empirische* Weise gelang: 1609 formulierte er die ersten beiden der drei berühmten Kepler-Gesetze. Der Begriff Himmelsmechanik ist auch heute noch gebräuchlich, involviert aber dann die Newtonsche, Pseudo-Newtonsche, Post-Newtonsche oder Einsteinsche Gravitationsphysik.

◇ Kosmologie und **Kosmogonie** befassen sich mit der Entstehung und Entwicklung des Universums als Ganzes. Die Dunkle Energie entpuppt sich als die treibende Kraft, die für die Expansion des Kosmos seit dem Urknall sorgt. Das größte Rätsel der modernen Kosmologie ist, was sich genau hinter der Dunklen Energie verbirgt. Ist es eine globale Manifestation des Quantenvakuums? Triumphiert die Kosmologische Konstante über Quintessenz und Phantom-Energie?

◇ **Galaxienforschung** hat die Bildung, Verschmelzung und Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen zum Gegenstand. Typischerweise besteht eine Galaxie aus einigen hundert Milliarden Sternen und aus interstellarem Gas (interstellares Medium, ISM). Zwischen Galaxien gibt es ebenfalls Material, das intergalaktische Medium (IGM). In Galaxienhaufen ist das IGM dichter als bei 'frei stehenden' Feldgalaxien. Die Galaxien wechselwirken miteinander vornehmlich über die Gravitation. Die Gezeitenkräfte sorgen dabei für bizarre Verformungen und Verschmelzungen von Galaxien. Dabei spielt die Dunkle Materie eine wahrlich gewichtige Rolle, sorgt sie doch dafür, dass die Galaxien stärker miteinander wechselwirken als nur mit 'normaler Materie'.

◇ **Stellarphysik** befasst sich mit der Entstehung und Entwicklung von Sternen. Der Sternaufbau, thermonukleare Fusion und Zustandsgleichungen von Sternmaterie sind von besonderem Interesse und münden in ein Verständnis der Entwicklungspfade der Sterne im Hertzsprung-Russel-Diagramm. Am Ende der 'normalen Sternexistenz' stehen mitunter katastrophale Ereignisse wie Sternexplosionen (Supernovae, Hypernovae) und die Entstehung Kompakter Objekte wie z. B. Weißer Zwerge, Neutronensterne, Quarksterne oder gar Schwarzer Löcher.

◇ **Planetologie** behandelt mittels physikalischer Methoden die Bildung und weitere Entwicklung von Planeten. Unmittelbares Forschungsobjekt sind die Planeten des Sonnensystems, aber auch Planeten um andere Sterne, so genannte *Exoplaneten*, die mittlerweile entdeckt wurden. Man weiß inzwischen, dass Planeten aus Gasmassen entstehen, die sich um einen Stern angesammelt haben. Es häuft sich zunächst in protoplanetaren Scheiben (engl. *protoplanetary disks*, kurz Proplyds) an. Dies ist eine Form von Akkretionsscheiben, die im Vergleich zu den Scheiben in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und Röntgendoppelsternen relativ kalt und deutlich kleiner sind.

Schließlich fragmentieren aus der protoplanetaren Scheibe größere Klumpen, aus denen dann Planeten unterschiedlicher Größe entstehen.

Das Sonnensystem legt eine generelle Klassifikation in Gasplaneten wie Jupiter, Saturn und Uranus sowie Gesteinsplaneten (auch erdähnliche oder terrestrische Planeten genannt) wie Merkur, Venus, Erde und Mars nahe. Relikte des Proplyds sind bis heute auszumachen: dünn verteiltes, interplanetares Gas existiert nach wie vor zwischen den Planeten. Es verursacht durch Streuung von Sonnenlicht das auf der Erde sichtbare Zodiakallicht. Die Planetologie muss auch klären, wie in den anderen Bereichen unseres Sonnensystems Kometen und Planetoiden (etwas irreführend auch Asteroiden genannt) entstehen konnten. Ein Berührungspunkt zur Stellarphysik ist die Unterscheidung von Sternen und Planeten: Astronomen kennen Übergangsobjekte wie die Braunen Zwerge und M-Zwerge (siehe dazu Eintrag Spektraltyp), die sich an der Schwelle zur thermonuklearen Fusion befinden.

- ◇ **Relativistische Astrophysik** ist der Oberbegriff für sämtliche Bereiche der Astrophysik, in denen die Effekte der Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen. Werden Geschwindigkeiten betrachteter Objekte (Gasteilchen, Elementarteilchen) vergleichbar mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit, so kommt die Spezielle Relativitätstheorie zur Anwendung. Bei starken Gravitationsfeldern von kompakten Objekten wie Schwarzen Löchern und Gravitationslinsen dringt man in den Gültigkeitsbereich der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) vor. Auch Gravitationswellen und die Kosmologie sind nur mit der ART angemessen zu behandeln. Die Relativität birgt ganz erstaunliche, neue Effekte wie die Lichtablenkung in Schwerefeldern (siehe Geodäten), dynamische Raumzeiten, die expandieren können z. B. das Universum selbst oder die nahezu phantastischen Aspekte der Wurmlöcher und kollidierenden Universen (siehe Branen-Kosmologie und Ekpyrosis).

- ◇ Quantengravitation befasst sich mit starken Gravitationsfeldern in kleinen Raumdimensionen. Diese Verhältnisse spielen in den Frühphasen des Universums kurz nach dem Urknall eine Rolle und auch in der Physik der Schwarzen Löcher z. B. bei der Hawking-Strahlung (dort als *semi-klassische Quantengravitation* ohne quantisiertes Gravitationsfeld!). Die Quantengravitation versucht die erfolgreichen und bewährten Konzepte der Relativitätstheorie mit den ebenso erfolgreichen der Quantentheorie zu vereinen. Auf diesem Weg wurden neue Konzepte erarbeitet, die in vielen Aspekten Erfolg versprechend scheinen: Die Stringtheorien verfolgen eine neue Sicht auf Welt der Elementarteilchen. Sie zielt auf eine Vereinheitlichung der vier fundamentalen Naturkräfte (gravitative, elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung). Außerdem werden weitere Raumdimensionen neben den dreien der ART diskutiert (siehe Extradimensionen und Kompaktifizierung). Ein anderer Zugang zu einer Quantengravitation besteht in der Loop-Quantengravitation. In der ART ist die Raumzeit kontinuierlich und wird nur durch einige intrinsische Singularitäten 'durchbohrt'. Die Loop-Quantengravitation verfolgt eine Quantisierung der Raumzeit in submikroskopische Einheiten. Diese 'Atome der Raumzeit' sorgen damit für eine Körnung der Raumzeit, was faszinierende, neue Konsequenzen eröffnet, die auch philosophisch sehr interessant sind (ein neuer Atomismus?).

- ◇ **Astroteilchenphysik** (gerne auch **Teilchenastrophysik**) und **Hochenergieastrophysik** beschäftigen sich mit den energetischsten Phänomenen

im Kosmos. So besteht die Kosmische Strahlung aus Teilchen, die Energien bis zu unglaublichen 10^{20} eV aufweisen. Man hat die Teilchen als Protonen, Elektronen, Neutrinos und andere zwar identifiziert, rätselt aber über ihren Ursprung.

Gigantische Teilchenbeschleuniger, die irdische Anlagen bei weitem überflügeln, kennt man inzwischen auch: Beispielsweise der Crab-Pulsar, ein schnell rotierender Neutronenstern (siehe Pulsar) im Sternbild Stier beschleunigt Teilchen auf ultrarelativistische Geschwindigkeiten (Lorentz-Faktor bis 10^7!). Das macht ihn zu einer der hellsten Röntgen- und TeV-Quellen am Himmel.

Die Jets der AGN, beispielsweise von Blazaren, kommen auch als Quellen ultrahochenergetischer Leptonen und Hadronen in Betracht. Katastrophale Sternexplosionen und Verschmelzungsszenarien von kompakten Sternen setzen sekundenlange Blitze im Bereich der Gammastrahlung (GRBs) frei und stören damit sogar den irdischen Funkverkehr.

Weiterhin diskutiert man aufgrund von Erkenntnissen in der Teilchenphysik die Existenz schwerer supersymmetrischer Teilchen, die einen Anteil zur Dunklen Materie stellen könnten (*Dark SUSY*). Die moderne Generation an Teleskopen (HESS, MAGIC) vermag die hochenergetischen Teilchenschauer aus dem All zu registrieren. Es ist zu erwarten, dass die Hochenergieastrophysik ähnliche und vergleichbar erfolgreiche Wege beschreiten wird, wie die Röntgenastronomie in den 1990er Jahren.

◇ **Nebelphysik** behandelt das Zustandekommen von Emissions- und Reflexionsnebeln sowie Dunkelwolken. Prominente Beispiele sind der Orionnebel, bei dem man unmittelbar Zeuge der Sternentstehung wird: die Plejaden, einem offenen Sternhaufen, dessen Sterne in Reflexionsnebel eingebettet sind und der Pferdekopfnebel (ebenfalls im Sternbild Orion) einer Dunkelwolke aus Staub, die undurchdringlich für Strahlung optischer Wellenlängen ist.

◇ **Jetphysik** hat die Erzeugung, Dynamik und Entwicklung von Gasströmen zum Forschungsgegenstand. Astronomen beobachten Jets in vielen Systemen, sowohl als stellare Jets (*Mikrojets*) bei Protosternen, Röntgendoppelsternen und Kataklysmischen Veränderlichen, als auch als großskalige Jets (*Makrojets*) in Galaxien, vor allem den AGN. Die Theorie nutzt für diese strömenden Fluide die Gleichungen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik (MHD). Je nach kosmischen Objekten fließen Konzepte der relativistischen Astrophysik ein, so z. B. bei der Akkretion auf ein rotierendes Schwarzes Loch (allgemein relativistische MHD).

◇ Die **Strahlungsphysik** ist so fundamental in der Astronomie, dass sie in beinahe alle genannten Disziplinen Einzug hält. Es gibt Grenzfälle, wo man sie vernachlässigen darf; dann spricht man von *nicht-radiativer Astrophysik*. Im engeren Sinne meint Strahlungsphysik die Entstehung unterschiedlicher Strahlungsformen (z. B. thermische Strahlung, Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung, Comptonisierung) und die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie (Streuung, Absorption, Emission, Fluoreszenz, Reflexion).

◇ An den Randgebieten der Astrophysik zu anderen Naturwissenschaften darf man **Astrochemie** und **Exobiologie** ansiedeln. Das Weltall ist voll von komplexen Molekülen, die sich durch charakteristische Linienemission verraten. Insbesondere muss

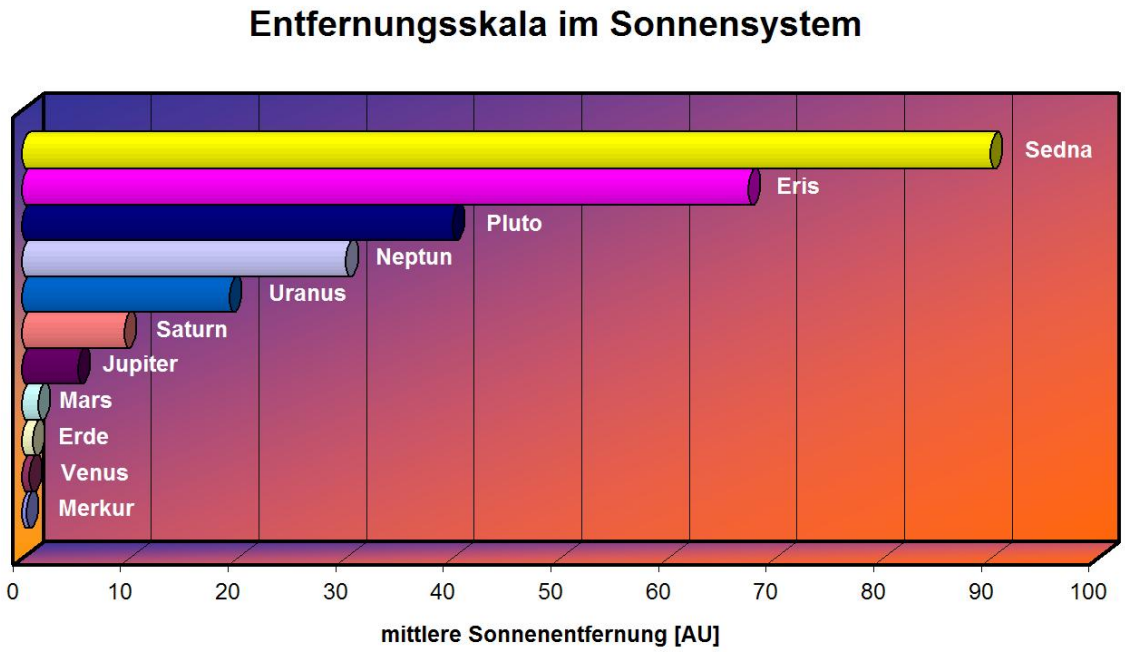

Abbildung 2.8: Entfernungsskala der Planeten im Sonnensystem.

für ihr Vorkommen eine geringe Temperatur gegeben sein. Denn die Umgebung heißer, junger Sterne (wie O- und B-Sterne) wird von UV-Strahlung durchflutet und ionisiert interstellare Gase (was zu charakteristischen HII-Regionen führt). Die **Staubastronomie** ist also eine Astronomie des kalten Universums. Erst in diesen kühlen Regionen kann ein 'chemischer Cocktail' gedeihen, der die Entstehung von Leben begünstigt. Die ganz allgemeinen Voraussetzungen für die Entwicklung von Lebensformen und deren Schicksal wird im Rahmen der Exobiologie untersucht.

Diese Themenschau zeigt: Astronomie ist mehr als ein verklärter Blick durch ein Fernrohr - Astronomie ist Grundlagenforschung an der Grenze des Denkbaren und Hochleistungstechnologie an der Grenze des Machbaren.

2.23 Astronomische Einheit

Eine typische Längeneinheit in unserem Sonnensystem, die festgelegt wurde aus dem mittleren Abstand von der Erde zur Sonne:

1 AU = 149,597870 Millionen Kilometer

Der *mittlere* Abstand muss verwendet werden, weil die Erdbahn um die Sonne eine geringe Exzentrizität aufweist, so dass es bei einem Umlauf einen sonnennächsten (**Perihel**) und sonnenfernsten Punkt (**Aphel**) gibt. Das astronomische Einheitensystem legt die *Internationale Astronomische Union* (*International Astronomical Union*, **IAU**), eine internationale Gemeinschaft von Astronomen, fest.

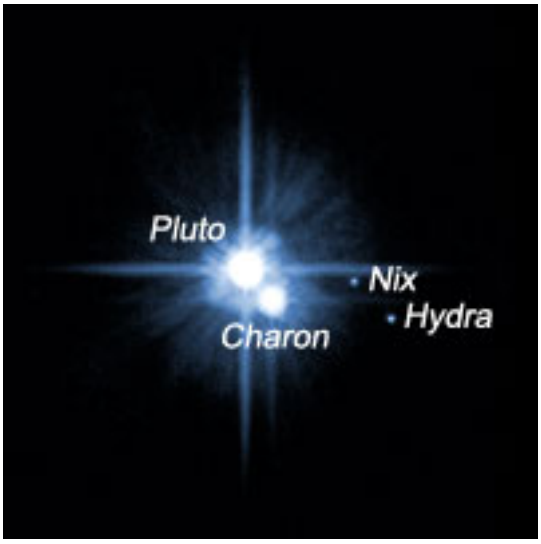

Abbildung 2.9: Pluto und seine drei Monde.

2.23.1 AU-Skala in unserem Sonnensystem

Scherzhaft könnte man sagen: Des Chemikers Gold (Elementsymbol Au), ist des Astronomen Längeneinheit. Die Astronomische Einheit ist typisch für planetare Längenskalen. Auf dieser charakteristischen Skala sind die mittleren Entfernungen der acht (!) Planeten von der Sonne (siehe Abbildungen 2.8):

- ◇ Merkur 0.4 AU
- ◇ Venus 0.7 AU
- ◇ Erde 1.0 AU (*per definitionem*)
- ◇ Mars 1.5 AU
- ◇ Jupiter 5.2 AU
- ◇ Saturn 9.5 AU
- ◇ Uranus 19.3 AU
- ◇ Neptun 30.1 AU

2.23.2 Pluto: Nix mehr Planet, dafür aber Mond Nix

Im August 2006 hat die Internationale Astronomische Union den Begriff des Planeten neu definiert. Daher gibt es nur noch acht Planeten im Sonnensystem und Pluto gehört zur neuen Klasse der **Zwergplaneten**. Pluto ist etwa 40 AU entfernt. Sein großer Mond *Charon* ist schon seit 1978 bekannt - im Jahr 2006 wurden zwei neue Monde entdeckt, die *Nix* und *Hydra* getauft wurden. Das Beobachtungsfoto 2.9, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop

Abbildung 2.10: Weltraumteleskop Hubble, kurz HST.

Hubble zeigt Pluto mit seinen drei Monden (Credit: NASA/ESA, *Weaver, Stern & the Pluto Companion Search Team* 2006).

Pluto ist zwar kein Planet mehr, dafür aber 'Klassenprimus' einer neuen, offiziellen Objektklasse: den **Trans-Neptunischen Objekten** (TNOs). In Plutos Umgebung schließt sich der so genannte **Kuiper-Ring** an, der aus vielen kleinen Objekten besteht, ähnlich dem Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Im Kuiper-Ring befindet sich ein weiterer Zwergplanet namens **Eris** und sein Mond *Dysnomia*. Beide wurden 2003 von *M.E. Brown*, *C.A. Trujillo* und *D. Rabinowitz* (Caltech, USA) entdeckt. Eris benötigt für einen Umlauf um die Sonne etwa 560 Jahre. Seine Distanz zur Sonne variiert zwischen 38 AU (Perihel) und 97 AU (Aphel).

Im Kuiper-Ring wurde im März 2004 ein recht großes, planetenartiges Objekt mit einem Durchmesser von ca. 1600 km ebenfalls von Browns Gruppe entdeckt. Der Himmelskörper ist mit etwa 90 AU mehr als doppelt so weit von der Sonne entfernt als Pluto. Deshalb ist es ein sehr kalter Ort. Die Oberflächentemperatur beträgt etwa 30 Kelvin. Der inoffizielle Name dieses Objekts ist **Sedna** (bzw. 2003 VB_{12}) und leitet sich von der Mythologie der Eskimos ab. Sedna ist eine Inuit-Gottheit, eine Meeresgöttin, die gemäß der Mythologie am Meeresgrund in einer Eishöhle lebe. Die Umlaufzeit von Sedna ist mit über 10000 Jahren gigantisch. Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop *Hubble* (siehe Foto 2.10, Credit: STScI/NASA) legen nahe, dass Sedna keinen Trabanten hat. Einen offiziellen Status als Zwergplanet hat Sedna bisher nicht bekommen. Bisweilen fassen Astronomen diese Himmelskörper unter der Bezeichnung **Kuiper-Ring-Objekte** (engl. *Kuiper belt objects*, **KBOs**) zusammen. Sedna ist ein besonders großes KBO.

Mit der Vielzahl an Objekten ist der Kuiper-Ring Quelle vieler kurzperiodischer Kometen. Durch gravitative Störungen können kleine Planetoiden dieses Reservoir verlassen und in Sonnennähe gelangen. Die langperiodischen Kometen hingegen kommen aus einem noch weiter entfernten Reservoir, der sphäroiden **Oortschen Wolke**, in einem Abstand von etwa 50 000 AU (etwa 0.8 Lj).

2.23.3 Umrechnungen:

- $\diamond$ 1 AU = 149.597870 Millionen Kilometer
- $\diamond$ 1 AU = 1.58×10^{-5} Lj
- $\diamond$ 1 AU = 4.85×10^{-6} pc

- ◇ 1 Lj = 63240 AU
- ◇ 1 pc = 206264.8 AU

2.24 asymptotisch flach

Die asymptotische Flachheit ist eine Eigenschaft von vielen *gekrümmten* Raumzeiten in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Eine Raumzeit heißt asymptotisch flach, wenn die gekrümmte Metrik für große Abstände (Radialkoordinate r gegen unendlich) in die flache Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) übergeht. Knapp gesagt, verschwindet die Krümmung im Unendlichen.

Sehr anschaulich ist dieser Übergang der Krümmung bei der Kerr-Metrik von rotierenden Schwarzen Löchern im Lexikoneintrag Kretschmann-Skalar (Abschnitt 'Kretschmann für Kerr') zu sehen: die 'zerklüfteten Berge des Krümmungsgebirges' flachen für große Radien ab (im Bild links) und werden zu 'Tälern'. Dieses Phänomen ist die asymptotische Flachheit.

2.25 Auflösungsvermögen

In der Astronomie ist das Auflösungsvermögen von astronomischen Instrumenten bedeutsam, weil es angibt, wie klein die Strukturen am Himmel sein können, die der Astronom noch abbilden kann. Je höher das Auflösungsvermögen, umso schärfer ist der Blick und umso engere Punkte können noch als getrennt wahrgenommen werden.

2.25.1 Einheit

Astronomen geben das Auflösungsvermögen im **Gradmaß** an, also in Grad (°), Bogenminuten (’), Bogensekunden (”), Millibogensekunden (mas) oder gar Mikrobogensekunden (μas). Dabei gilt:

$$1^\circ = 60\,' = 3600\,'' = 3.6 \times 10^6 \text{ mas} = 3.6 \times 10^9\ \mu\text{as}$$

2.25.2 Berechnung

Das Auflösungsvermögen eines optischen Systems hängt einerseits von der verwendeten Strahlung ab und andererseits vom Instrument - das ist wie in der Mikroskopie. Gesucht ist der minimale Winkelabstand θ, unter dem zwei Punktquellen am Himmel noch getrennt voneinander beobachtet werden können:

$$\theta = 1.22\,\frac{\lambda}{D} \sim 2.52'' \times \frac{\lambda}{100\,\text{nm}}\,\frac{1\,\text{cm}}{D}$$

Diese Gleichung folgt aus der Beugungstheorie der Optik für kreisrunde Öffnungen und gibt das theoretische Auflösungsvermögen (*Rayleigh-Kriterium*) an. Hier sind λ die **Wellenlänge** der Strahlung des Objekts, das beobachtet wird und D die **Öffnung** des Teleskops. Der Faktor 1.22 ist gerade die Nullstelle der Besselfunktion, die das Beugungsmuster hinter einer kreisrunden Öffnung (so genanntes *Fraunhofer-Beugungsmuster*) bestimmt. Überlappen sich die Beugungsmuster zu sehr, kann man die Beugungsbilder der Quellen nicht mehr voneinander trennen.

Abbildung 2.11: Auflösungsvermögen: Pluto, der Herr der Unterwelt, mit seinem Diener, Charon.

Erdgebundene Teleskope erreichen diesen theoretischen Idealwert leider nicht, weil die Turbulenzen in der Erdatmosphäre das Bild der Quelle verschmieren. Erstaunlicherweise gilt diese Gleichung auch in der Radioastronomie, obwohl hier die Detektion der Strahlung ganz anders funktioniert (Anregung eines Dipols).

2.25.3 Zahlenbeispiele

In der Optik kann man folgende Auflösungsvermögen für unterschiedliche optische Beobachtungsinstrumente angeben:

- ◇ Menschliches Auge: unterhalb einer halben Bogenminute bzw. 25”
- ◇ Historisches Fernrohr *Galileo Galileis* (um 1600): 3”
- ◇ Moderne, erdgebundene Teleskope: wenige Zehntel Bogensekunden mit adaptiver Optik. Das *Seeing*, also die turbulenten Bewegungen in der Atmosphäre, begrenzen die Auflösung. Der Lichtstrahl 'springt' auf der Detektorfläche durch zufällige Brechungs- und Beugungseffekte in der Atmosphäre hin und her (siehe auch Laserleitstern).
- ◇ Weltraumteleskope wie Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) erreichen die höchste Auflösung im optischen Bereich der Strahlung, nämlich etwa 0.05” oder 50 mas.

(Die Angabe entspricht dem scheinbaren Abstand zweier Bildpunkte, der vom jeweiligen Instrument gerade noch getrennt werden kann.)

2.25.4 Scharfer Blick auf Pluto

Eine Demonstration des ungeheueren Auflösungsvermögens des HST zeigt das Foto 2.11: Hier sieht man Pluto, der vormals am weitesten entfernte Planet, der mittlerweile zur Gattung der Zwergplaneten gehört. Der schwächere Lichtpunkt rechts ist Plutos größter Mond Charon. Die beiden Scheiben der Himmelsobjekte wurden klar voneinander getrennt und haben einen Abstand am Himmel von nur 0.9 Bogensekunden. Dies entspricht in gewohnten Längeneinheiten knapp 20000 Kilometern. Die Beobachtung zeigt eindrucksvoll, wie sehr sich Pluto und Charon ähneln und dass Pluto etwa den doppelten Durchmesser von Charon aufweist (Credit: *Albrecht et al.* 1994, ESA/ESO/NASA).

2.25.5 Weltmeister Radioastronomie

Die Technik im Radiobereich ist schon weiter vorangeschritten. Hier nutzt man Verfahren der Aperturs ynthese und schaltet die Sammelleistung von Einzelteleskopen (engl. *single dish*) zusammen. In der **Radiointerferometrie** gelingt dann eine Auflösung von kosmischen Radioquellen (z. B. Galaktisches Zentrum, Radiojets von Aktiven Galaktischen Kernen) bis in den Mikrobogensekundenbereich hinein! So schafft das Very Large Array bei der höchsten Frequenz von 43 GHz eine Auflösung von 40 mas. Mit VLBI, also einem Zusammenschluss vieler Radioteleskope weltweit, lässt sich das zur Auflösung von **Mikrobogensekunden** steigern.

Die optischen Teleskope eifern der Aperturs ynthese der Radioastronomie nach. Es war gerade das Primärziel des VLT-Projekts die vier Teleskope der 8m-Klasse (und ein paar kleinere Hilfsteleskope) zusammenzukoppeln, um **optische Interfermetrie mit hoher Auflösung** zu betreiben. Dies läuft unter dem Begriff VLTI und ermöglicht erdgebunden Teleskopen, mit dem HST zu konkurrieren: Das Auflösungsvermögen liegt dann auch im Millibogensekundenbereich.

2.26 Axion

Das Axion ist hypothetisches Elementarteilchen. In der Sprache der Teilchenphysiker ist es ein pseudo-skalares Spin-0 Boson, das 1977 im Rahmen des **Peccei-Quinn-Modells** eingeführt wurde, um die Brechung einer zusätzlichen chiralen Symmetrie, der Peccei-Quinn-Symmetrie, zu erklären. Das mag sich für den Laien schlimm anhören, aber es tut nicht weh.

2.26.1 Warum schon wieder eine neue Symmetrie?

Mit dieser neuen Symmetrie würde das so genannte *Theta-Problem* gelöst: Im Experiment findet man ein sehr kleines elektrisches Dipolmoment des Neutrons, das mit einem Winkelparameter Theta skaliert. Es stellt sich heraus, dass Theta sehr klein, nahe null ist, obwohl es theoretisch sehr viel größere Werte annehmen könnte. Das Peccei-Quinn-Modell erklärt nun diese Kleinheit, dafür handelt man sich allerdings das Axion ein, das bisher noch nicht nachgewiesen werden konnte. Sollte es existieren, gibt es jedoch starke Restriktionen für die Eigenschaften des Axions. Man nimmt an, dass das Axion dem Pion sehr ähnlich ist. Es werden **Axion-Pion-Oszillationen** angenommen, die es dem Axion ermöglichen in Pionen zu konvertieren (und umgekehrt). Der Hauptzerfallskanal (98.8%) von dem neutralen Pion sind zwei Gammaquanten. Dies legt nahe, dass für das Axion ähnliche Feynman-Diagramme existieren. In der Tat nimmt man auch **Axion-Photon-Oszillationen** an, wo sich ein Axion unter dem Einfluss eines Magnetfeldes in zwei Photonen umwandelt:

$$a \rightarrow \gamma\gamma$$

Dieser **Primakoff-Effekt** dient als hauptsächlicher Mechanismus, um zu versuchen, Axionen nachzuweisen.

2.26.2 Axionen von der Sonne?

In der Sonne sollten unter obigen Prämissen **solare Axionen** aus dem Photonenbad im Innern der Sonne erzeugt werden. Dabei übernehmen die Axionen im Wesentlichen die thermische

Energieverteilung der Photonen, die erwartungsgemäß bei etwa 4 keV ihr Maximum annimmt. Mithilfe von *Axion-Helioskopen* versucht man diese nachzuweisen, was bisher nicht gelang.

2.26.3 Axionen von anderen kosmischen Quellen?

Daneben erwartet man auch andere kosmische Quellen von Axionen bzw. axionen-induzierten Photonen, wie Supernovae, Rote Riesen bzw. Sterne generell und das Galaktische Halo der Milchstraße. Diese potenziellen Quellen geben Beschränkungen für die **Axionmasse**: die berühmte Supernova SN 1987a in der Großen Magellanschen Wolke liefert einen Maximalwert von 10^{-3} eV aus den Breiten empfangener Neutrinos. Hingegen legt die Kosmologie nahe, dass die Axionmasse nicht unterhalb von etwa 10^{-6} eV liegen darf, damit nicht die kritische Dichte des Universums überschritten wird und die kosmische Expansion umgekehrt wird.

2.26.4 Masse des Axions

Insgesamt ergibt sich also aus rein astrophysikalischen Überlegungen ein **Massenbereich für das Axion** von 10^{-6} und 10^{-3} eV. Es handelt sich also um ein sehr leichtes Teilchen. In signifikanter Zahl wäre das Axion jedoch von kosmologischem Interesse, weil es in Form hadronischer kalter Dunkler Materie zur Masse des Universums beitragen könnte.

Bei der Emission axion-induzierter Photonen aus dem Galaktischen Halo ist bei angenommenem Mittelwert für die Axionmasse Strahlung im Bereich der Mikro- und Radiowellen zu erwarten:

$$\nu_{\mathrm{ph}} \approx 2 \times \frac{m_{\mathrm{a}}}{10^{-5}\ \mathrm{eV}} \mathrm{GHz}.$$

2.26.5 Axion nix SUSY!

Um Verwechslungen auszuschließen, sei darauf hingewiesen, dass das Axion **kein SUSY-Teilchen** ist!

2.27 AXP

Das Akronym steht für ***A****ccreting* ***X****-ray* ***P****ulsars*, also akkretierende Röntgenpulsare. Unter dem Begriff Röntgendoppelstern befindet sich eine zusammenhängende Beschreibung im Kontext zu anderen Typen akkretierende kompakten Objekte.

3 Lexikon B

3.1 Balbus-Hawley-Instabilität

Die Balbus-Hawley-Instabilität ist eine Instabilität, die eine entscheidende Rolle in der Dynamik von schwach magnetisierten Akkretionsflüssen spielt. Sie ist ein sehr **effizienter Mechanismus für den Drehimpulstransport** (nach außen) und damit überhaupt der Grund, dass das Material auf das zentrale, gravitierende Objekt einfallen kann. Benannt wurde die Instabilität nach den Astrophysikern *Steve Balbus* und *John Hawley*, die sie 1991 entdeckt haben. Alternativ wird auch die Bezeichnung **magnetische Rotationsinstabilität** (MRI) verwendet - unter diesem Eintrag gibt es auch eine detaillierte Beschreibung der Instabilität.

3.2 Bardeen-Beobachter

Die alternative und historisch bedingte Bezeichnung für den *Zero Angular Momentum Observer*, den ZAMO.

3.3 Baryogenese

Baryogenese kennzeichnet im Rahmen der Kosmologie eine Entwicklungsphase im frühen Universum, in der die baryonische Materie entstanden ist. *Baryonische Materie* ist der physikalische Begriff für die gewöhnliche Materie, aus der wir und unsere Umgebung bestehen, also z. B. Protonen und Neutronen.

3.3.1 Am Anfang von allem

Kurz nach dem Urknall befand sich das Universum in der Planck-Ära, in der kaum physikalische Aussagen gemacht werden können. Alle Kräfte waren in dieser Phase zur **Urkraft** vereint. Schließlich spaltete sich die Urkraft auf, als das Universum gerade mal 10^{-43} Sekunden (Planck-Zeit) alt war. Ursache für diese spontane Symmetriebrechung war die Abkühlung infolge der Expansion des Universums. 'Kühl' ist kein besonders treffender Begriff: Die Urkraft zerfiel beim Unterschreiten der Planck-Temperatur von 10^{32} Kelvin in zwei neue Kräfte, die Gravitation und die X-Kraft. Die X-Kraft wird von den Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) prognostiziert. Diese Kraft ist assoziiert mit bestimmten äußerst schweren Austauschteilchen, den X-Bosonen und Y-Bosonen. Mit typischen Massen um 10^{16} GeV sind diese Teilchen sehr massereich. Ihre Existenz markiert in der Kosmologie die **GUT-Ära**, die sich an die Planck-Ära anschloss. Baryogenese-Ära und GUT-Ära bezeichnen also dieselbe Entwicklungsphase des Universums.

3.3.2 Weitere Naturkräfte betreten die kosmische Bühne

Mit der weiteren Ausdehnung des Kosmos wurde es zunehmend kälter und es ereignete sich der nächste Phasenübergang: Hierbei 'fror' die elektroschwache Kraft und die starke Kraft aus. Dieser Übergang bei etwa 2×10^{16} GeV bzw. einer Temperatur von 10^{29} Kelvin bedeutete auch das Ende der massereichen X- und Y-Bosonen: Diese Teilchen mussten in Quarks und Leptonen zerfallen. Damit war auch die Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen zerstört. Aus diesen Zerfällen resultierten Myriaden von Quarks, Antiquarks, Leptonen und deren Antiteilchen.

3.3.3 Kleines Missverhältnis, große Wirkung!

Doch lagen am Ende der Zerfälle Materie und Antimaterie nicht in gleichen Mengen vor. Es gab eine geringe **Materie-Antimaterie-Asymmetrie**: Auf jedes Antiteilchen kamen ein plus ein Milliardstel Teilchen. Dieses extrem geringe Missverhältnis reicht aber schon aus, um die Existenz der heute beobachtbaren 'normalen' Materie und die fast verschwindende Existenz von Antimaterie im Kosmos zu erklären. Was geschah mit den primordialen Vorräten an Materie und Antimaterie? Nun, Materie verträgt sich nicht mit ihrer korrespondierenden Antimaterie. Kommen sie sich zu nahe, zerstrahlen sie in hochenergetische Photonen. Hochenergetisch deshalb, weil schon geringe Ruhemassen der Teilchen (z. B. Elektronen und Positronen mit je 511 keV) ausreichen, um durch den großen Faktor c^2 in der berühmten Gleichung $E = mc^2$, eine hohe Energie der Vernichtungsstrahlung zu erhalten. Diese **Annihilation** setzte auch im frühen Kosmos am Ende der GUT-Ära ein und verwandelte das Universum in ein 'Strahlenmeer'. Die Strahlung war allerdings noch an die dichte Materie gekoppelt. Sie war gefangen im dichten Urgas. Neben den unzähligen Photonen blieb aufgrund der Asymmetrie ein kleiner Teil von Materie übrig. Nach der Zerstrahlung kamen auf jedes Teilchen eine Milliarde Lichtteilchen! Das Konglomerat aus Materieteilchen und Lichtteilchen befand sich danach in einer langen Phase im **thermischen Gleichgewicht**. Deshalb kann dem Materie-Photonen-Gas eine wohl definierte Temperatur zugeordnet werden.

3.3.4 Endlich Atomkerne & Atome!

Mit der weiteren Ausdehnung des Universums wurde es kühler und die Materie unterlag weiteren Phasenübergängen: die Quarks, die am Ende der GUT-Ära entstanden verloren ihre Freiheit und hadronisierten in der Hadronen-Ära. Die Hadronen, wie Proton und Neutron, verschmolzen zu leichten Atomkernen während der **primordialen Nukleosynthese**. Schließlich war das Universum kalt genug, dass die Elektronen von den positiv geladenen Atomkernen eingefangen und dauerhaft gebunden werden konnten: Es entstanden neutrale Atome in dieser Rekombinationära. Erst in dieser Phase wurden die Photonen aus ihrem 'Materiekäfig' entlassen: Die Lichtteilchen entkoppelten sich von den Materieteilchen und durchfluteten das Universum: Das dichte Urplasma lichtete sich, es wurde hell. Die entkoppelte Strahlung beobachtet man heute noch, etwa 13 Milliarden Jahre nach ihrer Erzeugung: es ist die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie ist der gewichtigste Zeuge dafür, dass sich das hier umrissene Szenario abgespielt hat und das es einen **heißen Urknall** (engl. *Hot Big Bang*, HBB) gab.

3.3.5 Erste Sterne, erste Galaxien, Leben

Der Begriff Baryogenese bezeichnet also die Ausbildung von baryonischer Materie. Sie war in den folgenden kosmischen Entwicklungsphasen - der **Strukturbildung** - die Saat für Objekte, die daraus 'kondensierten': für erste Sterne, Galaxien, Planeten, Leben und am Ende der Kette, den Menschen. In ähnlicher Weise lassen sich für die letztgenannten Bildungsphasen die Begriffe Stellargenese, Galaktogenese, Planetogenese, Biogenese und Anthropogenese ersinnen - doch ist keines davon ist in der Kosmologie gebräuchlich.

3.4 Baryonen

Baryonen sind eine Unterklasse der Hadronen und bestehen aus drei Quarks. Der Begriff Baryon leitet sich vom Griechischen *βαρύς*, *barys* ab, was übersetzt 'schwer' bedeutet. Die bekanntesten Vertreter der Baryonen sind die beiden Nukleonen Proton und Neutron. Sie haben den Quarkgehalt uud bzw. udd.

Alle Baryonen sind Fermionen, weil die Spins ihrer Konstituenten zu halbzahligen Spins koppeln.

Eine exotische und besonders schwere Form der Baryonen sind die Hyperonen.

3.5 baryonische Materie

Ein Ausdruck, der vor allem in der Kosmologie gebräuchlich ist und zur Unterscheidung der unterschiedlichen Formen von Energien im Universum dient. Baryonische Materie setzt sich aus Quarks und Leptonen zusammen; eigentlich ist der Begriff 'baryonisch' hier nicht präzise (vergleiche auch Hadronen). Die Kosmologen meinen also damit die uns vertraute Form der Materie, aus der wir selbst bestehen.

3.5.1 Anteil baryonischer Materie

Es gibt aber auch andere Energieformen im Kosmos, wie Dunkle Materie und Dunkle Energie, deren physikalische Natur jedoch noch nicht entschlüsselt ist. Ihre Anteile überwiegen deutlich im Kosmos: Dunkle Energie macht etwa 74% aus, die Dunkle Materie 22% und die baryonische Materie steuert nur 4% bei. Diese Anteile bestätigen *unabhängig voneinander* verschiedene Messverfahren der modernen, experimentellen Kosmologie, wie z. B. die primordiale Nukleosynthese, die kosmische Hintergrundstrahlung, extrem weit entfernte Supernova-Explosionen vom Typ Ia und die großräumige Verteilung der Galaxien im Kosmos.

3.5.2 Rätselhafter Kosmos!

Diese Anteile bereiten den Physikern großes Kopfzerbrechen. Denn mit anderen Worten bedeuten sie: Die Zusammensetzung des Universums ist zum größten Teil völlig unverstanden!

3.6 Bekenstein-Hawking-Entropie

Die Bekenstein-Hawking-Entropie bezeichnet einen Entropiebegriff, den man im Rahmen einer Thermodynamik bei Schwarzen Löchern definiert hat. Diese Ableitung gelang *Stephen*

Hawking und wurde 1973 in der Publikation *The Four Laws of Black Holes Mechanics* veröffentlicht. Da er Bezug nahm auf *Jacob D. Bekensteins* Doktorarbeit (1972), wurde ihnen zu Ehren das Entropie-Analogon bei Schwarzen Löchern so genannt.

3.6.1 Fläche des Horizonts Schwarzer Löcher

In der Berechnung taucht eine Größe auf, die mit der kugelförmigen Oberfläche des Ereignishorizonts assoziiert werden kann:

$$\begin{aligned} A_{\mathrm{H}}(M,\,a) &= 4\pi\left[(r_{\mathrm{H}}^{+})^2 + a^2\right] \\ &= 8\pi\,\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2}\left(\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2} + \sqrt{\left(\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{M\mathrm{c}}\right)^2}\right) \\ &= 4\pi\,R_{\mathrm{S}}\,r_{\mathrm{H}}^{+}. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Dabei haben die Ereignishorizonte einen Radius, der gleich dem Schwarzschild-Radius R_{S} ist (nicht-rotierender Fall) oder der gleich dem äußeren Horizont r_{H}^{+} ist (rotierender Fall):

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{S}}(M) &= 2\mathrm{G}M/\mathrm{c}^2 \\ r_{\mathrm{H}}^{+}(M,\,a) &= \frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2} + \sqrt{\left(\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{M\mathrm{c}}\right)^2}. \end{aligned}$$

Die Oberfläche hängt im Allgemeinen sowohl von der Masse M als auch dem Drehimpuls J des Schwarzen Loches ab, so dass Schwarzschild-Lösung und Kerr-Lösung in dieser Hinsicht differieren müssen. Anschaulich ist das auch klar, denn der Radius des äußeren Horizonts r_{H}^{+} wächst mit zunehmender Masse und abnehmendem Drehimpuls (Kerr-Löcher sind bei gleicher Masse kleiner als statische Schwarzschild-Löcher).

3.6.2 Entropiebegriff Schwarzer Löcher

Verschmelzen zwei Schwarze Löcher, so zeigt eine kurze Rechnung, dass die Oberfläche des neuen Horizontes größer ist, als die Summe der Flächeninhalte der einzelnen, kollidierenden Schwarzen Löcher. Das gilt auch bei den Entropien zweier verschmelzender Systeme. Die Entropie wird als proportional zu der Horizontoberfläche angenommen und führt zusammen mit dem Begriff der **Hawking-Temperatur** auf Analoga zu den vier Hauptsätzen der klassischen Thermodynamik. Für ein elektrisch neutrales, rotierendes Schwarzes Loch gilt:

$$\begin{aligned} S_{\mathrm{H}}(M,\,a) &= \frac{\mathrm{k_B c}^3}{4\mathrm{G}\hbar}\,A_{\mathrm{H}}(M,\,a) \\ &= \frac{2\pi\mathrm{k_B c}}{\hbar}\,M\,\left(\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2} + \sqrt{\left(\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2}\right)^2 - \left(\frac{J}{M\mathrm{c}}\right)^2}\right). \end{aligned}$$

Die Gleichung oben zeigt gerade wie man die Bekenstein-Hawking-Entropie aus der Oberfläche des Horizonts A_H berechnet. Wie die Oberfläche von Masse und Drehimpuls abhängt, zeigt Gleichung (3.1) in diesem Eintrag. Setzt man ein statisches, d. h. nicht

rotierendes Schwarzes Loch voraus ($a = J/Mc = 0$) folgt eine reine Massenabhängigkeit: eine **quadratische Skalierung mit der Masse**:

$$\begin{aligned} S_{\mathrm{H}}(M,\, a=0) &= \frac{\mathrm{k_B c^3}}{4\hbar \mathrm{G}}\, A_{\mathrm{H}}(M,\, a=0) \\ &= \frac{4\pi \mathrm{G k_B}}{\hbar \mathrm{c}} M^2 \\ &\approx 1.05 \times 10^{77}\ \mathrm{k_B}\ \left(\frac{M}{\mathrm{M_\odot}}\right)^2 \\ &\approx 4.42 \times 10^{10}\ \mathrm{k_B}\ \left(\frac{M\mathrm{c}^2}{1\ \mathrm{TeV}}\right)^2 \end{aligned}$$

3.6.3 Entropien in Zahlenbeispielen

Einsetzen typischer Skalen der Astrophysik (eine Sonnenmasse) und Teilchenphysik (1 TeV) zeigt, dass die stellaren Schwarzen Löcher gigantische Entropien aufweisen, während Minilöcher, die in modernen Teilchenbeschleunigern entstehen könnten, moderate Bekenstein-Hawking Entropien haben. Bei supermassereichen Schwarzen Löcher erwartet man entsprechend noch höhere Entropien. Diese Zahlenwerte sind rätselhaft, denn die Größenordnung von $10^{77}\ k_B$ für ein stellares Schwarzes Loch passt gar nicht zu der wesentlich kleineren Entropie des Vorläufersterns. Dieses Missverhältnis nennt man Entropie-Paradox Schwarzer Löcher oder auch *Informationsverlustparadoxon.*

3.6.4 Anlass für eine legendäre Wette

Dieses Paradoxon stand im Sommer 2004 im Fokus der Weltöffentlichkeit: Auf der Konferenz GR17 in Dublin, einer Zusammenkunft der führenden Relativisten und Gravitationsforscher der Welt, gab Hawking unter großem Medieninteresse bekannt, dass er sich geirrt habe und Schwarze Löcher nicht Information vernichten können. Damit gab er eine Wette verloren, die er mit seinen Wissenschaftskollegen *Kip S. Thorne* und *John Preskill* vor dreißig Jahren abgeschlossen hat. Vor allem Preskill, ein Quantentheoretiker, hielt an einer Erhaltung der Information fest - und bekam nun nach langer Zeit Recht. Thorne ist noch indefinit und möchte sich dem komplizierten Problem widmen. Auch unter Experten ist die Frage des Informationsverlusts umstritten und bedarf weiterer Analysen.

3.6.5 Entropien anderer Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Gravasterne als reguläre Alternative *ohne* Horizont lösen dieses Paradox, weil sie kleinere Entropien haben. Denn die Gravastern-Entropie wächst nur linear mit der Masse. Allerdings müssten sich die Astrophysiker dann vom Konzept Schwarzes Loch verabschieden.

3.6.6 Literatur:

- ◇ Dissertation von *J.D. Bekenstein*, Princeton University (1972)
- ◇ Originalpapier von *Bardeen, Carter & Hawking*, **The Four Laws of Black Holes Mechanics**, Commun. Math. Phys. 31, 1973, 161 - 170

◇ *Mazur & Mottola* 2001, Papier **Gravitational condensate stars: An alternative to black holes**, gr-qc/0109035

3.7 Beobachter

Die Rolle des Beobachters ist ein unverzichtbares Element in den Naturwissenschaften - vielleicht sogar das Wichtigste an den Naturwissenschaften überhaupt. Es muss zunächst einmal ein Phänomen in der Natur beobachtet werden, das man dann naturwissenschaftlich hinterfragen kann.

3.7.1 Ein äußerst erfolgreiches Wechselspiel

Damit ist es noch nicht getan. Der Erfolg der Naturwissenschaften gründet sich vor allem auf dem Zusammenspiel von **Theorie und Experiment**. Eine Beobachtung kann nämlich in Form eines mathematischen Modells verstanden werden. Für Details zur wissenschaftlichen Methodik und wie weit sie generell trägt, sei auf meinen Web-Essay Die wissenschaftliche Methode verwiesen. Außerdem gibt es einen ausführlichen Essay zum Theoriebegriff mit dem Titel Alles graue Theorie?.

Im engeren Sinne sind die Beobachter der Physik damit beschäftigt, Datenmaterial aus der Natur zu sammeln. Das heißt, sie führen ein Experiment unter Laborbedingungen (also wohlbekannten Bedingungen) durch und protokollieren präzise die Beobachtung. Beobachter entwickeln Beobachtungsapparaturen, so genannte **Detektoren**, die es ihnen erleichtern Daten zu sammeln. In der Astronomie heißen die Experimentatoren prinzipiell Beobachter. Sie nehmen einen Sonderstatus unter den Experimentatoren ein, weil sie ihr Experiment nicht im Labor präparieren und keinen Einfluss darauf nehmen können. Vielmehr ist der gesamte Kosmos ihr 'Labor' und die astronomischen Beobachter entwerfen und bauen die Detektoren der Astronomie: die **Teleskope**. Sie sammeln eine Fülle an Beobachtungsdaten mittels unterschiedlicher Informationsträger (vor allem Photonen, aber auch Neutrinos, Kosmische Strahlung und andere Teilchen), werten sie aus und bereiten sie auf. Die **theoretischen Astrophysiker** entwickeln physikalische Modelle für das Zustandekommen der Beobachtungsdaten. Ihre Werkzeuge sind die mathematischen Rechenvorschriften und in stark zunehmendem Maße die **Computer**. Am Ende steht ein Verständnis der Beobachtung, also ein wachsendes Verständnis für die Phänomene, die in der Natur beobachtet werden können. Der Astrophysiker strebt nach einem Verständnis des Kosmos als Ganzes sowie seiner Teile, z. B. der Sterne und Galaxien.

3.7.2 Wissenschaftliche Revolutionen des 20. Jahrhunderts

Im 20. Jahrhundert hat sich ein zweifacher Wandel für die Rolle des Beobachters ergeben. Einsteins Relativitätstheorie hat die Beobachtung als subjektiven bzw. relativen Akt entlarvt. Es hängt vom **Bezugssystem** (siehe auch Inertialsystem) ab, also von Ort und Bewegungszustand des Beobachters, was er beobachtet und wie er es beobachtet. Mittlerweile wurden viele **relativistische Beobachter** definiert, die sich bei bestimmten Fragestellungen bewährt haben. So kennt man in der Allgemeinen Relativitätstheorie z. B. den FFO, den FIDO, den LNRF und den ZAMO. Extreme Bedingungen wie die starke Gravitation eines Schwarzen Loches machen deutlich, wie sehr die Beobachtung vom Standpunkt abhängen kann. So unterscheidet sich die Geschichte, die ein entfernter Beobachter wahrnimmt deutlich

von derjenigen, die ein einfallender Beobachter wahrnimmt z. B. aufgrund der Zeitdilatation! Das Zwillingsparadoxon ist ein anderes Extrembeispiel dafür, wie unterschiedlich die Beobachtungen in verschiedenen Bezugssystemen sein können.

Die zweite große physikalische Theorie des 20. Jahrhunderts, die Quantentheorie, hat dem Beobachter auf andere Weise einen Sonderstatus verpasst. Die quantenmechanischen Beobachter sind selbst ein Teil des Experiments und beeinflussen dessen Ausgang, also die Messung! Damit verlor der Beobachter seine Rolle des Außenstehenden. Diese Rolle hat er nur im Makrokosmos. Der quantenmechanische Beobachter ist nicht Präparator, er ist Manipulator.

Beide Theorien, Relativitätstheorie und Quantentheorie, haben es der Physik erschwert, die Beobachtungen sachlich zu interpretieren. Experimente unter fixen Laborbedingungen sind nur eingeschränkt möglich und die Reproduzierbarkeit eines Versuchs ist ebenfalls - zumindest in der Quantenphysik - nicht immer gewährleistet.

3.8 Beta-Zerfall

Eine der drei Formen von **Radioaktivität** neben Alpha- und Gamma-Zerfall. Bei der Radioaktivität senden bestimmte Atomkerne (Fachbegriff: *Radionuklide*) bestimmte Materieteilchen (Elektronen, Positronen, Heliumatomkerne, auch Neutronen) oder hochenergetische, elektromagnetische Strahlung aus. Radioaktivität ist aufgrund seiner stark ionisierenden Wirkung gefährlich für Leben! Teilweise kann Radioaktivität schon mit einfachen Mitteln abgeschirmt und somit 'entschärft' werden.

3.8.1 Was genau ist nun β-Zerfall?

- ◇ Beim β^--Zerfall zerfällt ein (gebundenes) Neutron im Atomkern in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino (beachte Leptonenzahlerhaltung!). Hier identifiziert man die Elektronen mit der Beta-Strahlung.
- ◇ Beim β^+-Zerfall zerfällt ein (gebundenes!) Proton im Atomkern in ein Neutron, ein Positron (dem Antiteilchen des Elektrons) und ein Elektron-Neutrino.

Diese Vorgänge lassen sich in diesen zwei Zerfallsgleichungen zusammenfassen:

$$\begin{aligned} \beta^-: \quad n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\ \beta^+: \quad p &\rightarrow n + e^+ + \nu_e \end{aligned}$$

Die β-Strahlung hat eine höhere Reichweite als die Alpha-Strahlung, kann aber bereits durch ein dünnes Aluminiumblech abgeschirmt werden. Gefährlich ist diese Strahlung wie alle Formen von Radioaktivität dennoch!

3.8.2 Schwach, aber oho!

Erst durch die Quantentheorie bzw. Quantenfeldtheorie der schwachen Wechselwirkung war diese Form der Radioaktivität berechenbar und erklärbar. Bei der schwachen Kraft werden ebenfalls Botenteilchen (*Eichbosonen*) ausgetauscht. In beiden Formen des β-Zerfalls ändern sie die innere Struktur von Neutron bzw. Proton. Zur Erinnerung: Protonen und Neutronen sind die Teilchen, die sich im Atomkern befinden. Daher heißen sie Nukleonen. Präzise gesagt

gibt es ein positiv und ein negativ geladenes W-Teilchen, die die schwache Kraft vermitteln. Werden sie ausgetauscht, so verändern sie den Quarkgehalt der Nukleonen entsprechend den Erhaltungssätzen der elektrischen Ladung etc. folgend. Die W-Teilchen nennt man in der Theorie der schwachen Wechselwirkung auch geladene Ströme (W^+ und W^-). Daneben existiert noch der neutrale Strom (Z-Teilchen Z^0), dessen Zerfall *experimentell* die Anzahl der drei Leptonengenerationen verrät.

3.8.3 Neutronisierung von Sternen

Der β-Zerfall kann auch in umgekehrter Reaktionsrichtung ablaufen:

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

Dieser **inverse β-Zerfall** ist besonders wichtig bei extrem hohen Zentraldichten im Innern von Sternen, ab etwa 1.14×10^9 g cm^{-3}. Praktisch ist dies nur bei den Kompakten Objekten von Relevanz, weil 'normale' Hauptreihensterne oder Protosterne diese Dichtendomäne nicht erreichen. Insbesondere findet der inverse β-Zerfall im Innern von Weißen Zwergen und vor allem Neutronensternen statt.

3.9 Bezugssystem

In der Physik werden die aus der Sicht eines Beobachters beschrieben. Der Beobachter kann das physikalische Studienobjekt 'aus der Ferne' betrachten (*Laborsystem*) oder er kann sich mit dem Studienobjekt bewegen (*Ruhesystem*). Als Bezugs- oder Referenzsystem gibt es dabei vielfältige Möglichkeiten. Zwischen diesen Systemen vermitteln mathematische Operationen, die man *Transformationen* nennt.

Viele Details und Beispiele für Bezugssysteme werden in den Einträgen Beobachter und Inertialsystem vorgestellt.

3.10 Bianchi-Identitäten

Die Tensoren der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) haben wie viele physikalische Tensoren bestimmte Symmetrieeigenschaften. Mit Symmetrie meint man in diesem Zusammenhang, dass eine oder mehrere Komponenten im Tensor als andere Komponenten identisch wieder auftauchen. Diese Eigenschaften sind sehr nützlich, weil man im Tensorkalkül der ART immer an sämtlichen Komponenten der Tensoren interessiert ist, um beispielsweise die Einsteinschen Feldgleichungen umzuformulieren. Bekannte Symmetrien erleichtern den Rechenaufwand, weil man aus ihnen schnell andere Komponenten ableiten kann. Typisch ist bei Tensoren zweiter Stufe, dass sie sich nicht verändern, wenn man ihre beiden Indizes vertauscht. In der Darstellung als Matrix wird klar, dass dies eine Vertauschung von Spalten und Zeilen ist. Die Symmetrie ist dann eine Spiegelsymmetrie zur Matrixdiagonalen.

3.10.1 Formen von Bianchi-Identitäten

- ◇ **algebraische Identitäten**: Hier zeigen sich Symmetrien von Tensoren, wenn man ihre Indizes vertauscht und Summen oder Differenzen bildet.

- ◇ **differentielle Identitäten**: Hierbei sind die Verknüpfungsrelationen komplizierter und enthalten **Ableitungen** (*Differentiationen*).

Eine besondere Symmetrieeigenschaft von Raumzeiten bewerkstelligen die Isometrien. Man kann durchaus die Killing-Gleichung, also verschwindende Lie-Ableitung des metrischen Tensors, als differentielle Identität auffassen.

Die Bianchi-Identitäten sind nun ebenfalls differentielle Identitäten, die für den Riemann-Tensor R gelten. Die Ableitungen, die hier eine Rolle spielen, sind die **kovarianten Ableitungen**, die man mit dem Differentialoperator *Nabla* (als Symbol ein auf einer Ecke stehendes, gleichseitiges Dreieck: ∇) notiert. Der Krümmungstensor ist im Prinzip die linke Seite der Einsteinschen Feldgleichungen und von zentraler Bedeutung für die ART. Unter Verwendung dieses Tensors 4. Stufe lauten die Bianchi-Identitäten

$$\nabla_\kappa R_{\nu\sigma\lambda\mu} + \nabla_\mu R_{\nu\sigma\kappa\lambda} + \nabla_\lambda R_{\nu\sigma\mu\kappa} = 0$$

oder in Kurzschreibweise:

$$R_{\nu\sigma[\kappa\lambda;\mu]} = 0.$$

Der Riemann-Tensor ist ein Tensor 4. Stufe und kann durch einmaliges 'Überschieben' des metrischen Tensors (*Verjüngen* oder *Kontrahieren* genannt) in den Ricci-Tensor und durch zweimaliges Verjüngen in den **Ricci-Skalar** (skalare Krümmung) überführt werden. Wendet man dies unter Kenntnis der Bianchi-Identitäten an, so erhält man die **kontrahierten Bianchi-Identitäten**:

$$\nabla_\nu G_\mu{}^\nu = 0$$

Weil der Einstein-Tensor eng mit dem Riemann-Tensor und dessen Kontraktionen zusammenhängt, gelingt eine äußerst kompakte Notation, die vier Gleichungen mit je vier Termen bündelt. Diese vier Gleichungen nennt man auch **differentielle Bindungen**.

3.10.2 Geometrische Interpretation der Energieerhaltung in der Physik!

Die Bianchi-Identitäten sind jedoch weit mehr als eine Rechenhilfe. Sie sind Ausfluss eines tiefsinnigen, geometrischen Sachverhalts, den der französische Mathematiker *Elie Joseph Cartan* (1869 - 1951) folgendermaßen formulierte: '*Der Rand eines Randes ist null.*'

$$\partial\partial = 0$$

Dieses elementare Prinzip der Topologie sorgt dafür, dass der *Einstein-Tensor divergenzfrei* ist, wie es die kontrahierten Bianchi-Identitäten wiedergeben. Die Folge dieser Eigenschaft ist für die Physik von essentieller Bedeutung: sie mündet in den relativistischen Energieerhaltungssatz: die Divergenzfreiheit des Energie-Impuls-Tensors:

$$G^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0 \;\rightsquigarrow\; T^{\mu\nu}{}_{;\nu} = 0.$$

Das führt auf zwei wichtige Prinzipien, die die Physik in vielfältiger Weise beherrschen: **Energieerhaltung und Impulserhaltung**. Prosaisch umschrieben sind die Quellen (des Gravitationsfeldes) *automatisch* erhalten. In der Differentialgeometrie kann man zeigen, dass jede glatte Riemannsche Mannigfaltigkeit die Bianchi-Identitäten erfüllt. Damit hat die Energieerhaltung als physikalisches Prinzip eine geometrische Erklärung erfahren!

Historisch war es so, dass *Albert Einstein* bei der Entwicklung seiner ART die Arbeiten des italienischen Mathematikers *Luigi Bianchi* (1856 -1928) zu den *Nicht-Euklidischen Geometrien* nutzte. Die nach ihm benannten Bianchi-Identitäten fanden *Gregorio Ricci-Curbastro* (1853 - 1925) 1889 und er selbst 1902 unabhängig voneinander. Der deutsche Mathematiker *Hermann Klaus Hugo Weyl* (1885 - 1955) konnte die Identitäten 1917 aus *Emmy Noethers* Theorem abgeleiten. Das **Noether-Theorem** stellt einen Zusammenhang zwischen einer Symmetrie und assoziierter Erhaltungsgröße her.

3.10.3 Buchtipp

◇ Eine sehr empfehlenswerte Darstellung zum letztgenannten Aspekt, Energieerhaltung und Geometrie, befindet sich in Misner, Thorne & Wheeler: *Gravitation*, Kapitel 15

3.11 Big Bang

Ein populärer Begriff für den Anfang des Universums, der von dem Kosmologen *Fred Hoyle* 1949 eingeführt wurde und eigentlich als Abwertung (*big bang*: dt. 'großer Knall') des Urknall-Modells zu verstehen sein sollte.

3.11.1 Säulen der Urknall-Theorie

Nun, es ist eigentlich keine 'Theorie', sondern eher ein Modell bzw. Szenario, das mit Theorien wie der Allgemeinen Relativitätstheorie oder der Quantenfeldtheorie beschrieben wird. In den letzten Jahrzehnten hat sich das Urknall-Modell als äußerst erfolgreiche Erklärung für die Entstehung des Kosmos bewährt. Zwar gibt es - wie Hoyle seinerzeit - auch heute noch Gegner dieses Modells, doch überwiegen die Fürsprecher unter den Experten, weil die Indizien eine sehr klare Sprache sprechen. Der Urknall ist ein heißer Anfang des Universums in einem sehr kleinen Raumbereich, der so genannten Urknall-Singularität. Aus diesem Grund spricht man in der Fachwelt auch vom *hot big bang* (HBB). Der Urknall beschreibt, wie alles anfing, woher Materie, Strahlung, Sterne und Galaxien - sowie in letzter Konsequenz Planeten und schließlich Menschen kommen.

Zeugen des Urknalls sind die Fluchtbewegung der Galaxien gemäß des Hubble-Gesetzes, die kosmische Hintergrundstrahlung, sehr weit entfernte Sternexplosionen vom Typ Supernova Ia, die großräumige Verteilung der Galaxienhaufen und die primordiale Nukleosynthese.

3.11.2 Was war vor dem Urknall?

Paradoxerweise liefert das Urknall-Modell keinen Grund für den Urknall selbst, sondern beschreibt **nur die Folgen** des Urknalls! Lange Zeit galt eine Frage der Form '*Was war vor dem Urknall?*' als inakzeptabel, da doch mit dem Urknall auch die Zeit an sich erst entstand. Mittlerweile ist die o.g. Frage auch in der Kosmologie populär geworden. Sicher ist die Ursache des Urknalls bislang Spekulation. Doch einen möglichen Grund könnte das Ekpyrotische Modell angeben, in dem ganze Universen miteinander kollidieren (*Steinhardt & Turok*, 2001). Eine experimentelle Bestätigung wird jedoch außerordentlich schwierig, wenn nicht sogar unmöglich sein.

3.11.3 Big...

Der Big Bang ist das bekannteste 'Big...' der Kosmologie. Weitere folgen unterhalb dieses Eintrags. Mehr Details zum Big Bang unter dem Eintrag Urknall.

3.12 Big Bounce

Dieser 'große Aufprall' ist ein klassisches Modell der Kosmologie und stammt von *Priester & Blome* (1991). Hauptzielsetzung in diesem Szenario ist es, die pathologische Singularität des kanonischen Urknall-Modells zu vermeiden. Der Ansatz ist, dass das Universum anfangs aus einem Zustand ohne Materie bestand und homogen sowie isotrop war. Zunächst hatte es eine **unendliche Ausdehnung**. Dieses instabile Gebilde kontrahierte und unterlag dann einem Phasenübergang, einer spontanen Symmetriebrechung, so dass infolgedessen Materie erzeugt wurde.

Das Big Bounce-Modell stellt eine Lösung der materiefreien Friedmann-Gleichungen der relativistischen Kosmologie dar, nämlich diejenige mit positiven Krümmungsparameter, $k = 1$. Es handelt sich um eine kugelsymmetrische Metrik. Das Szenario startet mit unendlich ausgedehntem Volumen, kontrahiert auf ein **Minimalvolumen**, Radius etwa 10^{-25} cm, und expandiert dann wieder ('bounce'). Die Phase vor dem Minimaldurchgang heißt **vakuumdominiert**, die danach **materiedominiert**, weil hier der Übergang zum **Materie- und Strahlungskosmos** einsetzt. Das hochenergetische Quantenvakuum im Big-Bounce-Modell ist umstritten, weil es ein oberes Limit für sämtliche Energiedichten markiert und in der vakuumdominierten Phase konstant war.

Eine neu gefundene Theorie der Quantengravitation, die Loop-Quantengravitation (LQG), basiert auf einer neuartigen Physik, nämlich einer quantisierten Raumzeit auf der Planck-Skala; ihre Konzepte münden jedoch auch in ein Big-Bounce-Szenario, das von der quantisierten Raumzeit bewerkstelligt wird (Arbeiten von *Bojowald* et al., AEI Golm).

3.13 Big Crunch

Das 'Große Knirschen' bezeichnet einen erneuten Zusammenfall des Universums, der durch ein Zuviel an Materie bzw. Energieinhalt hervorgerufen werden könnte. Der Big Crunch kann jedoch auch durch ein zeitlich variables Quintessenz-Feld oder im Ekpyrosis-Modell durch das zeitlich variable Radion-Feld ausgelöst werden. Die Quintessenz-Modelle prognostizieren einen Kollaps des Universums auf Zeitskalen von etwa 20 Milliarden Jahren.

Die aktuellen Messungen sprechen jedoch für ein flaches, ewig expandierendes Universum, das entweder im Big Whimper oder im Big Rip endet.

3.14 Big Rip

Die neuste Bezeichnung unter den 'Big...' der Kosmologie. Sie wurde im Rahmen der Phantom-Energie-Modelle (*Caldwell, Kamionkowski & Weinberg*, 2003) entwickelt und beschreibt das Ende des Universums im völligen Zerreißen von allem, was sich in ihm befindet: Galaxienhaufen, Galaxien, Milchstraße, Sonnensystem, Erde, Atome, Atomkerne und Elementarteilchen! Interessanterweise verläuft dieser Zerfall sukzessiv von 'außen nach innen': der Beobachtungshorizont schrumpft immer mehr, so dass ein beobachtender

Astronom der Apokalypse zusehen kann! So kann er das Verschwinden fernen Galaxien zuerst beobachten, dann das seiner Heimatgalaxie und schließlich das der Sonne, der Erde und sein eigenes Verschwinden.

3.14.1 Exotische Energieform zerreißt das All!

Ursache für den Big Rip ist das Anwachsen der Phantom-Energiedichte über alle Massen in endlicher Zeit. Phantom-Energie ist die bizarrste Form von Dunkle Energie mit einem Parameter der Zustandsgleichung unterhalb von -1.

3.14.2 Wie lange haben wir noch bis zum totalen Aufriss?

Auf welcher Zeitskala der Big Rip zu erwarten ist, hängt von der genauen Zustandsgleichung der Dunklen Energie ab, den man bislang nur mit den WMAP-Daten zwischen -1.22 bis -0.78 beschränken kann. Werte oberhalb von -1 entsprechen den Quintessenz-Modellen **ohne Big Rip**, ein Wert von exakt -1 entspricht der kosmologische Konstante. Bei einem w-Parameter von -1.2 und dem aktuellen Wert des Hubble-Konstanten von 73 km/s/Mpc (nach WMAP3; 72 km/s/Mpc nach *Freedman et al.*, 2001) bleiben noch **etwa 50 Milliarden Jahre bis zum Big Rip**. Das erste Viertel des Alters des Universums ist damit verstrichen.

3.14.3 Beruhigende Worte

Ob sich der Big Rip tatsächlich ereignen wird, ist aufgrund der Messfehler in den Beobachtungsdaten unklar.

3.15 Big Whimper

Das 'Große Wimmern' ist das Szenario vom kalten Ende des Universums. Es kühlt langsam aus, weil es ewig expandiert. Physikalisch gesehen liegt das daran, weil der Energieinhalt zu klein ist, als dass die (beobachtete) Expansion gestoppt oder gar wieder umgekehrt werden könnte. Am Ende dieses Szenarios steht ein trostloses Universum, angefüllt mit Schwarzen Zwergen, Schwarzen Löchern, Kälte und Dunkelheit.

Dramatischer als dieser Kältetod ist der Zerreißtod im Big Rip. Der Hitzetod im Big Crunch lässt auch kaum Überlebenschancen, so dass in jedem Fall ein 'Großes Jammern' angesagt zu sein scheint.

3.16 Birkhoff-Theorem

Dieses Theorem ist relevant für die Allgemeine Relativitätstheorie (ART). Es besagt, dass jede **sphärisch symmetrische** Raumzeit notwendigerweise **statisch** ist, wenn sie

- ◇ Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der ART im **Vakuum**,
- ◇ Lösung der **Einstein-Maxwell-Feldgleichungen** (siehe dazu Maxwell-Tensor)

ist. Anwendung findet diese Theorem unmittelbar auf die Schwarzschild-Lösung und die Reissner-Nordstrøm-Lösung. Eine wesentliche Folge des Theorems ist, dass eine pulsierende, kugelsymmetrische Konfiguration **keine Gravitationswellen** aussenden kann!

Ein weiteres, wesentliches Theorem der ART ist das Robinson-Theorem.

3.17 Blandford-Payne-Szenario

Das Blandford-Payne-Szenario, benannt nach den Pionieren, die den Effekt 1982 vorschlugen (*Blandford & Payne*, MNRAS 199, 883, 1982), beschreibt, wie es durch magnetische Prozesse in einem Akkretionsfluss zu einem ausfließenden Materiestrom kommen kann.

3.17.1 Magnetfelder von akkretierten Plasmen

Ein Akkretionsfluss in der Nähe eines kompakten Objekts ist heiß, typischerweise einige Millionen Grad und mehr. Dementsprechend liegt das einfallende Material nicht mehr in molekularer oder atomarer Form vor, sondern wird ionisiert. Dieses Akkretionsplasma besteht vor allem aus Ionen (verschiedener Elemente) und aus Elektronen. Eine Folge ist, dass die bewegten elektrischen Ladungen Magnetfelder induzieren: der Akkretionsfluss wird von Magnetfeldlinien durchsetzt. Typisch ist die Konfiguration einer rotierenden **magnetisierten Akkretionsscheibe**. Da die Magnetfeldlinien an das Plasma gekoppelt sind ('eingefrorener Fluss'), rotiert mit der Scheibe ein Vielzahl von Magnetfeldlinien, das man insgesamt als *Magnetosphäre* bezeichnet.

3.17.2 Produktion eines Scheibenwinds

Das Magnetfeld vermag Plasmateilchen aus der Scheibenoberfläche herauszuziehen - genau das passiert auch auf der Sonnenoberfläche und produziert einen Strom von Teilchen: den Sonnenwind. Analog verhält es sich bei der Akkretionsscheibe, nur dass Astrophysiker hier vom **Scheibenwind** sprechen. Typische Ausfließgeschwindigkeiten sind vergleichbar mit der Keplergeschwindigkeit am betreffenden Scheibenradius. Diese wiederum fällt mit der inversen Quadratwurzel im Abstand ab: die Windgeschwindigkeiten sind größer bei kleinen Radien und können sogar vergleichbar mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit werden, falls die Scheibe sehr nah um ein Schwarzes Loch rotiert.

3.17.3 Energiespender: rotierende und magnetisierte Scheibe

Der Wind wird von der rotierenden Scheibe und ihrem magnetischen Druck angetrieben. Die Astrophysiker sprechen hier von **zentrifugal getriebenen Ausflüssen**. Dem gegenüber steht der Blandford-Znajek-Mechanismus, der die Rotationsenergie eines Schwarzen Loches anzapft. Das Blandford-Payne-Szenario erfordert (im Unterschied zum Blandford-Znajek-Mechanismus) **nicht** die Existenz eines Schwarzen Loches, sondern nur ein rotierenden, magnetisiertes Plasma.

3.17.4 Was treibt den Jet?

Blandford-Payne-Szenario und Blandford-Znajek-Mechanismus sind zwei Prozesse, die zur Erzeugung von Jets in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und Röntgendoppelsternen mit Schwarzem Loch (BHXBs) diskutiert werden. Der ist Jet das Resultat, wenn der Wind beispielsweise durch magnetische Lorentz-Kräfte oder durch den Strahlungsdruck heißer Umgebungsquellen gebündelt wird (*Kollimation*).

Möglicherweise können Radioastronomen bald durch hochaufgelöste VLBI-Beobachtungen klären, welcher Mechanismus in der jeweiligen Jetquelle operiert. Denn mm-VLBI erreicht räumliche Auflösungen von wenigen bis einigen zehn Schwarzschildradien in AGN wie z. B.

M87 (z. B. *Krichbaum et al.*, astro-ph/0611288). Die bebachteten Strukturen an der Jetbasis würden den Mechanismus verraten, weil der Blandford-Znajek-Mechanismus 'einen schmale Jetfuß macht', wohingegen das Blandford-Payne-Szenario eine breite Jetbasis haben würde (etwa einige hundert Gravitationsradien).

3.18 Blandford-Znajek-Mechanismus

Der Blandford-Znajek-Mechanismus (BZM) wurde benannt nach den Astrophysikern *R.D. Blandford* und *R.L. Znajek*, die diesen Prozess 1977 vorschlugen. Der BZM ermöglicht die **Extraktion von Rotationsenergie** eines rotierenden Schwarzen Loches (beschrieben durch die Kerr-Lösung) auf elektromagnetischem Wege.

3.18.1 Gravitomagnetismus

Dieser Effekt ist besonders relevant, wenn Magnetfelder des Plasmas im Akkretionsflusses in die Ergosphäre des rotierenden Loches geraten. Hier geschieht der Frame-Dragging-Effekt, der besagt, dass alles mit dem Loch rotieren muss. Denn ein rotierendes ist rotierender Raum! Das kann in der Allgemeinen Relativitätstheorie sehr elegant durch ein so genanntes *gravitomagnetisches Feld* beschrieben werden - ein Formalismus, der auf den Relativitätstheoretiker *John A. Wheeler* zurückgeht, der auch *Richard Feynman* und *Kip Thorne* ausbildete. Zu diesem Feld gehört auch eine gravitomagnetische Kraft, die alles mit sich reißt, auch die Magnetfelder. Die Morphologie der Magnetfelder wird durch diese Korotation schlauchförmig (*dominant toroidal*), so dass eine **achsensymmetrische, torusförmige Magnetosphäre** ausgebildet wird.

3.18.2 Paarbildung in der Ergosphäre

Die damit einhergehende Verstärkung des Magnetfeldes nennt man den **gravitomagnetischen Dynamo**. Wird die erreichte Feldstärke groß genug, kann in einer Kaskade ein **leptonisches Paarplasma** aus Elektronen und Positronen erzeugt werden. Die Teilchen erhalten einen Kick durch die gravitomagnetische Kraft und können die Ergosphäre verlassen. Sie folgen dabei je nach elektrischer Ladung den lokalen Magnetfeldlinien. Da in der Ergosphäre Zustände negativer Energie möglich sind - so erscheinen sie einem Beobachter im Unendlichen - kann dem Schwarzen Loch auf diese Weise elektromagnetisch Rotationsenergie entzogen werden. Der BZM senkt also den Kerr-Parameter a herab, aber die Akkretion kann ihn wieder erhöhen, weil sie dem Loch durch Materieeinfall Drehimpuls wieder hinzufügt.

Der Blandford-Znajek-Mechanismus ist von besonderer Relevanz für die Magnetohydrodynamik in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), die Akkretion auf rotierende supermassereiche Schwarze Löcher und insbesondere für die Erzeugung leptonischer, extragalaktischer Jets. Mithilfe des Membran-Paradigmas kann man eine andere Perspektive auf elektromagnetische Wechselwirkungen mit dem Ereignishorizont Schwarzer Löcher erhalten.

3.18.3 Alternative von Roger Penrose

Neben diesem Mechanismus, der auf die Beteiligung von elektrischen und magnetischen Feldern angewiesen ist, gibt es einen weiteren klassischen Prozess in der Ergosphärenphysik,

der dem rotierenden Loch Rotationsenergie entziehen kann: der Penrose-Prozess. Hier ist die Wechselwirkung in der Magnetosphäre unbedeutend, wichtig ist nur, dass Teilchen in die Ergosphäre eintreten und dort zerfallen.

3.19 Blauverschiebung

Begrifflich ist die Blauverschiebung der Gegenpart zur Rotverschiebung. Es ist ein Begriff aus der **Spektroskopie**, in der man Spektrallinien von Atomkernen, Atomen und Molekülen untersucht. Diese können in Absorption oder Emission auftreten, je nachdem, ob Energie aufgenommen oder abgegeben wird. Die Energie wird elektromagnetisch in Form von Photonen ausgetauscht, ist also **gequantelt** (siehe Quant, Quantentheorie). Photonen besitzen eine wohl definierte Frequenz bzw. Wellenlänge.

3.19.1 Raumzeit und Bewegung formen eine Linie

Wo sich die Spektrallinien im Spektrum befinden, hängt nicht nur von den Einzelheiten des Quantenübergangs, des Quantensprungs, ab, sondern auch vom **Bewegungszustand** der Strahlungsquelle relativ zum Beobachter/Detektor und auch von der **Krümmung der Raumzeit**.

Befindet man sich im Ruhesystem (Relativgeschwindigkeit null zwischen Emitter und Beobachter) des Emitters, so misst man die Spektrallinie bei ihrer *Ruhewellenlänge*. Nun kann aber auch eine **Relativbewegung** zwischen Strahlungsquelle und Detektor vorliegen. Wesentlich ist nur diejenige Geschwindigkeitskomponente, die in Richtung des Detektors zeigt (Geschwindigkeit ist ein Vektor). Diese Komponente heißt **Radialgeschwindigkeit**. Ihr Betrag ist die Relativgeschwindigkeit zwischen Emitter und Detektor.

3.19.2 Blau- vs. Rotverschiebung - Antagonisten der Spektroskopie

Bewegt sich die Strahlungsquelle auf den Beobachter zu, so wird die Spektrallinie zu kleineren Wellenlängen hin verschoben. Dies ist gerade die **Blauverschiebung**, weil die Linie zum blauen Teil des Spektrums verschoben wird. Anschaulich kann man sich vorstellen, wie die elektromagnetische Welle gestaucht wird. Bewegt sich die Strahlungsquelle vom Beobachter weg, so wird die Spektrallinie zu größeren, roten Wellenlängen hin verschoben. Die Welle wird gewissermaßen auseinander gezogen. Dies nennt man **Rotverschiebung**.

Die ganze atomare und molekulare Welt ist aufgrund der Thermodynamik in Bewegung. Bei endlicher Temperatur bewegen sich diese Strahler geringfügig um eine Ruhelage. Spektrallinien haben deshalb eine **natürliche Breite** aufgrund atomarer Bewegung und Molekularbewegung, weil sie sich relativ zum Detektor immer ein wenig vor und zurück bewegen. Dieses Phänomen nennen Physiker **thermische Dopplerverbreiterung**. Die Ruhewellenlänge ist also nicht beliebig scharf! Das kann sie zudem auch aufgrund der **Heisenbergschen Unschärfe** der Quantentheorie nicht sein.

3.19.3 Viele Teilchen, viele Freiheiten

Die Molekülspektroskopie ist komplizierter, weil die Atome im Molekül zusätzliche *rotatorische und vibratorische Freiheitgrade* haben, d. h. sie können gegeneinander schwingen und sich umeinander drehen. Als simples Beispiel möge ein zweiatomiges Molekül dienen,

das man sich wie eine Hantel vorstellen kann. Diese Hantel kann im Allgemeinen um drei Raumachsen rotieren. Der Freiheitsgrad mit der 'Hantelstange' als Rotationsachse fällt heraus, weil er das zweiatomige System invariant lässt. Die beiden anderen Rotationsmoden können über den Austausch von *Rotonen*, den Quanten der Rotationsbewegung, angeregt werden. Die Vibronen werden ausgetauscht, wenn die beiden Atome gegeneinander entlang der 'Hantelstange' schwingen. Diese zusätzlichen Freiheitsgrade äußern sich in komplexeren Molekülspektren und eng benachbarten Spektrallinien, weil der Energieaustausch durch Rotonen und Vibronen sehr klein ist. Besonders charakteristisch sind die *Rotationsbanden*.

3.19.4 So schnell wie das Licht...

Der oben vorgestellte klassische Doppler-Effekt wird bei Relativgeschwindigkeiten, die vergleichbar werden mit der Lichtgeschwindigkeit durch die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) modifiziert.

3.19.5 Schwerkraft zieht an der Linie

Befindet sich nun die Strahlungsquelle im Gravitationsfeld einer Masse (oder allgemeiner gesprochen einer Energie) so findet eine Rotverschiebung statt, die vom Gravitationsfeld verursacht wird: die **Gravitationsrotverschiebung** oder gravitative Rotverschiebung. Die Beschreibung dieses Effekts gelingt mit der Allgemeine Relativitätstheorie. Hier definiert man eine relativistische Verallgemeinerung des klassischen Dopplerfaktors, die man **generalisierter Dopplerfaktor**, g-Faktor oder Rotverschiebungsfaktor nennt. In diesen Faktor gehen die **Metrik**, vor dessen Hintergrund die Strahlung propagiert und das **Geschwindigkeitsfeld des Emitters**, formuliert in einem geeigneten Koordinatensystem (z.B der ZAMO bei Schwarzen Löchern), ein.

3.19.6 Expandierender Kosmos zerrt an der Lichtwelle

Die **kosmologische Rotverschiebung**, also die Rotverschiebung der Strahlung sehr weit entfernter, extragalaktischer Strahlungsquellen, rührt daher, weil das Universum expandiert. Sein gesamter Inhalt, auch Galaxien, befindet sich auf dem Hintergrund einer in alle Richtungen (isotrop) expandierenden Raumzeit. Dies beschreibt man mit der Robertson-Walker-Metrik. Das berühmteste Beispiel kosmologisch rotverschobener Strahlung ist die Hintergrundstrahlung. Sie ist das 'Echo des Urknalls' und verließ in der Rekombinationsära - lokal noch als heiße Strahlung des expandierenden Feuerballs - die 'Oberfläche des letzten Streuakts' (engl. *last scattering surface*).

Eine **kosmologische Blauverschiebung** wird *nicht* beobachtet. In der Theorie ist dieser Effekt dennoch möglich, nämlich dann, wenn wir in einem *kollabierendem Universum* leben würden. Diese Form der kollabierenden Raumzeit existiert als eine Realisierung der dynamischen Friedmann-Weltmodelle.

3.19.7 Blaue Brüder

Blauverschiebung gibt es nur als lokalen Effekt in unmittelbarer Nachbarschaft: die **Andromedagalaxie** in der Lokalen Gruppe bewegt sich auf die Milchstraße zu. Ihre Strahlungsemission wird durch die Bewegung blauer als sie intrinsisch ist.

Speziell relativistische Blauverschiebung in Form von Vorwärts-**Beaming** ist wichtig bei leuchtenden, signifikant geneigten Standardakkretionsscheibe um Schwarze Löcher. Die physikalische Ursache dafür liegt in einer hohen, relativistischen Geschwindigkeit des emittierenden Scheibenplasmas in Richtung Beobachter. Der g-Faktor wird in diesem Fall deutlich größer als 1. Weil er auch in höherer Potenz in den detektierten Strahlungsfluss eingeht, sorgt diese Blauverschiebung für ein besonders helles Emissionsgebiet auf der Standardscheibe. Bei kleinen Neigungen (*face-on disk*) verschwindet es, weil dann keine Relativbewegung zwischen emittierendem Plasma und Beobachter vorliegt.

3.19.8 Ein Blick in rasende Strahlen

Bei relativistischen Jets ist diese Blauverschiebung von ähnlicher Relevanz, wenn der Jet eine Bewegungskomponente zum Beobachter hat. *Per definitionem* ist dies bei den Blazaren gegeben, einem sehr leuchtkräftigen Typus von Aktiven Galaktischen Kernen. Die Elektronen im Jetplasma strahlen typischerweise Synchrotronstrahlung und Bremsstrahlung ab, die diesen Effekten unterliegt.

3.20 Blazar

Dies ist ein weiterer Vertreter der Aktiven Galaktischen Kerne, und sie gehören hier zu den spektakulärsten und stärksten Repräsentanten. Die Wirtsgalaxien sind ausschließlich **elliptischen** Hubble-Typs, was im klassischen Modell der Galaxienentwicklung bedeutet, dass es sich um alte Sternensysteme handelt, die aus der Verschmelzung (jüngerer) Spiralgalaxien hervorgegangen sind.

3.20.1 Eigenschaften dieser Höllenmaschinen

Blazare haben einen ausgeprägten, kompakten Radiokern und zeigen Emission von Gammastrahlung bis in den Bereich von TeV! In der Gammaleuchtkraft übertreffen sie sogar die leuchtkräftigen Quasare! Sie sind über den gesamten Spektralbereich sehr variabel auf kurzen Zeitskalen (Tage!). Die Emissionsregion muss entsprechend sehr klein sein und nur wenige Lichttage im Durchmesser haben. Zur Einordnung: ein Lichttag entspricht etwa 173 AU, wobei die Bahn des Zwergplaneten Pluto bei etwa 40 AU ist. Der variable, innerste Bereich von Blazaren ist also bereits auf der Längenskala unseres Planetensystems!

Blazare besitzen ausgeprägte Jets. Per definitionem schaut der Beobachter bei Blazaren in den Jetstrahl mehr oder weniger hinein. Diese Jets sind also schwach geneigt (Inklinationswinkel etwa kleiner als 15 Grad) und aus diesem Grund sieht man meist nur einen einseitigen Jet. Dadurch dass sich das Jetplasma mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegt, wird die Strahlung in Bewegungsrichtung kollimiert. Dies bezeichnet man als Vorwärts-**Beaming** (siehe Blauverschiebung). Als Folge sieht der Beobachter durch diesen Effekt der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) eine intensivere Emission des Jetstrahls der auf die Erde zeigt und eine unterdrückte Emission des Jetstrahls, der von der Erde wegzeigt (*Back Beaming*).

3.20.2 Schneller als das Licht - nicht wirklich

Als weiterer speziell relativistischer Effekt tritt die (scheinbare!) **Überlichtgeschwindigkeit** (engl. *superluminal motion*) auf. Man kann leicht mit den Methoden der SRT zeigen, dass die beobachtete Geschwindigkeit von Jetstrukturen die Lichtgeschwindigkeit um ein Vielfaches überschreiten kann. So misst man bei einigen Blazaren Geschwindigkeiten von Emissionsknoten (helle Gebilde im Jetstrahl) von 10c oder mehr! Dies kommt durch die spezielle Orientierung des Jets relativ zum Beobachter zustande. Intrinsisch bewegt sich der Jet natürlich relativistisch korrekt mit zwar sehr hohen, jedoch Unterlichtgeschwindigkeiten.

3.20.3 Ein Kamel von einem Spektrum

Die Blazar-Spektren zeigen oft einen 'Doppelhöcker' (*Brown et al.*: 'double humped'), der auf **Synchrotron-Selbstabsorption (SSA)** (siehe dazu Synchrotronstrahlung) zurückzuführen ist. Die TeV-Emission entstammt in einem *konservativen Modell* dem Prozess der Comptonisierung von der UV-Emission der Standardscheibe. In einem *nicht-konservativen Modell*, dem so genannten **Proton Blazar Modell** (*Mannheim et al.*) wird hingegen angenommen, dass im Jet Protonen (als hadronische Komponente neben den leptonischen Elektronen) auf ultra-relativistische Geschwindigkeiten beschleunigt werden können. Schocks im Jetplasma sollen über den Mechanismus der Fermi-Beschleunigung die Protonen auf diese Geschwindigkeiten bringen. Bei diesen hohen Protonenergien können nun über p-p-Kollisionen und p-γ-Reaktionen (Photonen des Hintergrunds, des Jets, der Scheibe) Pionen erzeugt werden, die unter den Bedingungen eines optisch dünnen Jets in Myonen und Myon-Neutrinos zerfallen. Die Myonen zerfallen weiter und erzeugen so auch Elektron-Neutrinos, so dass beide Vertreter dieser Leptonen im Verhältnis 2:1 (Myonenspezies zu Elektronspezies) gebildet werden. Dieses Verhältnis wird durch **Neutrinooszillation** auf 1:1 verschoben. Sollten diese Prozesse tatsächlich in den Blazar-Jets oder AGN-Jets im allgemeinen ablaufen, so sind AGN-Jets starke Neutrinoemitter und zwar mit Neutrinoenergien im Bereich von 1 bis 100 TeV! Man nennt sie UHE-Neutrinos, für ultra-hochenergetische (engl. *ultra-high energetic*) Neutrinos. Dieser Prüfstein wird von der nächsten Generation Neutrinodetektoren getestet werden: als Detektormaterial werden Eis (AMANDA, ICECUBE) oder Wasser (BAIKAL, NESTOR, ANTARES) genutzt. In diesen Medien werden wenn Neutrinos einfallen Myonen induziert, die zunächst höhere Geschwindigkeiten im Medium haben als Licht. Dann geschieht das optische Analogon des akustischen Überschallknalls: die Myonen emittieren Cerenkov-Strahlung, dessen Einhüllende einen Machschen Kegel bildet. Die Cerenkov-Photonen treffen lichtempfindliche Detektoren (engl. *photomultiplier tubes*, kurz PMTs) am Boden des Eis- oder Wasservolumens und werden so nachgewiesen. Die Beobachter können nun mit vielen PMTs die Myonen-Spur rekonstruieren (*likelyhood Analyse*) und um einen Versatz die Richtung am Himmel lokalisieren, aus der die UHE-Neutrinos (*ultra-high energetic*) kamen. Ein sicherer Nachweis von UHE-Neutrinos aus AGN wäre spektakulär!

3.20.4 Gigantische zentrale Motoren: superschwere Löcher

Die supermassereichen Schwarzen Löcher im Zentrum der Blazare gehören zu den größten überhaupt, wie Messungen der stellaren Geschwindigkeitsdispersion anhand des Kalzium Tripletts kürzlich ergeben haben (*Barth et al., 2002*): So besitzt der Blazar Markarian 501 ein Schwarzes Loch im Innern, das eine Masse von 0.9 bis 3.4 Milliarden Sonnenmassen aufweist!

3.20.5 Blazar Distanzrekord

Der am weitesten bisher detektierte Blazar im TeV-Bereich heißt H 1426+428 und hat eine Rotverschiebung von $z = 0.129$ (*Aharonian et al.* 2002).

3.20.6 Blaue Quasare

Man kennt eine weitere Klasse von Objekten, die man mittlerweile eher den Blazaren zuordnet: die *Blauen Quasare* (*blue quasars*), kurz **BQs** genannt. BQs zeigen intensive, breite Emissionslinien, ein 'flaches, hartes' und ein 'steiles, weiches' Röntgenspektrum (flach/steil bezieht sich auf die Steigungen der spektralen Äste; hart/weich auf die Energie der Strahlung). Gemäß *Georganopoulos* (2000) handelt es sich bei den BQs um 'verstellte' Blazare.

In eine ähnliche Richtung zielen die **Unifikationsabsichten** von *Boettchen & Dermer* (2001), die den früheren Blazar-Unterklassen,

- ◇ FSRQs (*flat spectrum radio quasars*), also radio-lauten Quasaren mit flachem Spektrum,
- ◇ LBLs (*low-frequency peaked BL Lac Objects*), also BL Lac Objekten, die bei kleinen Frequenzen ausgeprägt sind
- ◇ und HBLs *high-frequency peaked BL Lac Objects*, also BL Lac Objekten, die bei hohen Frequenzen ausgeprägt sind, folgendes Entwicklungsschema zuordnen: wie unter anderem die **Abnahme der Akkretionsrate** nahe legt, sind die Klassen über den Entwicklungspfad FSRQ nach LBL nach HBL verknüpft. Demzufolge sind FSRQs ältere und HBLs jüngere Blazare. Zukünftige Beobachtungen sollen diese These stützen.

Weitere prominente Vertreter der Blazare sind Markarian 421, Mrk 501, W Comae, 3C 279 und GB1428+4217 ($z = 4.72$).

3.21 BL Lac Objekt

Dies ist einer der vielen Typen Aktiver Galaktischer Kerne (AGN). BL Lacs sind etwas lichtschwächer als die Quasare. Astronomen bezeichnen sie (seltener) auch als *Lacertiden*. Sie wurden 1929 optisch von *Hoffmeister* im Sternbild *Eidechse* (lat. *Lacertae*, daher die Abkürzung Lac) entdeckt und von ihm wegen ihrer hohen optischen Variabilität als **Veränderlicher Stern** klassifiziert. Aus diesem Grund haben Sie das Präfix BL erhalten, da man die Veränderlichen Sterne alphabetisch aufsteigend indiziert.

3.21.1 Praktisch extragalaktisch

Erst viel später stellte sich heraus, dass es sich tatsächlich um **extragalaktische Objekte** handelt, die nur sternartig erscheinen. *Oke* und *Gunn* konnten 1974 aus dem Spektrum mithilfe des Doppler-Effekts die Entfernung zu knapp einer Milliarde Lichtjahre ableiten! Es sind also eigene Sternsysteme wie die Milchstraße.

3.21.2 Alter Trick: Aus Schwankung folgt Größe

Aus der Variabilität lässt sich bestimmen, dass die Emissionsregion nur eine Ausdehnung von wenigen Lichttagen (einige hundert AU) hat. Der AGN-Typus BL Lac ist in Wirtsgalaxien des elliptischen Hubble-Typs beheimatet. Wie die Blazare handelt es sich also um alte Galaxien.

3.21.3 Weitere Merkmale

Spektrale Eigenschaften sind starke Blauhelligkeit, **Abwesenheit optischer Emissions- und Absorptionslinien** sowie maximale Abstrahlung im Infrarot und Xγ-Bereich und hohe Radiohelligkeit. Die Nicht-Existenz von Linien deutet auf eine **fehlende Gasscheibe** hin, was für elliptische Galaxien typisch ist: im Laufe ihrer langen Entwicklung wurde hier Gas fast vollständig aufgebraucht. Die Wirtsgalaxien dieser AGN sind - konsistent zur obigen Aussage - ausschließlich elliptischen Typs. **Jets lassen sich nicht nachweisen!** Mittlerweile kennt man neben dem Prototyp BL Lac einige hundert BL Lac Objekte, wie zum Beispiel PKS 2155-304.

3.22 Bogenminute

Die Bogenminute ist eine Einheit, um die Größe von Winkeln im **Gradmaß** anzugeben. Wie bei den Zeiteinheiten Stunde, Minute und Sekunde nutzt man zur Angabe von Winkeln im Gradmaß das *Sexagesimalsystem*. Deshalb hat das Winkelgrad 60 Bogenminuten und die Bogenminute 60 Bogensekunden. Entsprechend ergeben 3600 Bogensekunden genau ein Grad. Die Symbole, um diese Einheiten abzukürzen sind ° für das Grad, **'** für die Bogenminute und **"** für die Bogensekunde.

In der Astronomie ist die Bogenminute generell relevant für die Angabe von Winkeln - besonders gebräuchlich ist die Bogensekunde als Einheit bei der **scheinbare Größe** von Himmelsobjekten. Auch das **Auflösungsvermögen** von Teleskopen wird im Gradmaß angegeben.

3.23 Bogensekunde

Die Bogensekunde ist eine Einheit, um die Größe von Winkeln im **Gradmaß** anzugeben. Wie bei den Zeiteinheiten Stunde, Minute und Sekunde nutzt man zur Angabe von Winkeln im Gradmaß das *Sexagesimalsystem*. Deshalb hat das Winkelgrad 60 Bogenminuten und die Bogenminute 60 Bogensekunden. Entsprechend ergeben 3600 Bogensekunden genau ein Grad. Die Symbole, um diese Einheiten abzukürzen sind ° für das Grad, **'** für die Bogenminute und **"** für die Bogensekunde.

In der Astronomie ist die Bogensekunde generell relevant für die Angabe von Winkeln - besonders gebräuchlich ist die Bogensekunde als Einheit bei der **scheinbare Größe** von Himmelobjekten. Auch das **Auflösungsvermögen** von Teleskopen wird im Gradmaß angegeben, z. B. in Bogensekunden, Millibogensekunden (Tausendstel Bogensekunden; *milliarcseconds*, **mas**) oder Mikrobogensekunden (Millionstel Bogensekunden; *microarcseconds*, μ**as**).

3.24 Bosonen

Bosonen sind nach dem indischen Physiker *Satenda Nath Bose* benannt und bezeichnen alle Teilchen mit **ganzzahligem** Spin (Eigendrehimpuls).

3.24.1 Spin, der Entscheider

Spin ist ein Freiheitsgrad der Teilchen, der erst mit der relativistischen Quantenmechanik erklärt werden konnte. Dies entdeckte der Quantenphysiker *Paul Dirac*. Anschaulich ist der Spin mit der Hilfsvorstellung verbunden wird, dass das Teilchen um die eigene Achse rotiert. Letztendlich lag diese Vorstellung nahe, weil ebenso wie der klassisch bekannte **Bahndrehimpuls** der Spin (wie im Übrigen auch Isospin und schwacher Isospin) einer **quantenmechanischen Drehimpuls-Algebra** gehorchen. Alle Drehimpulse genügen diesen bestimmten mathematischen Relationen. Die Anschaulichkeit für die Eigenschaft Spin geht jedoch sicherlich - wie in vielen Bereichen der Quantentheorie - verloren, wenn man sich die Wellenfunktion dieses Teilchens mit Spin vergegenwärtigt.

3.24.2 Andere Teilchen, andere Sitten

Die Bosonen unterscheiden sich fundamental von den Teilchen mit **halbzahligem Spin**, den **Fermionen**, wie das **Spin-Statistik-Theorem** belegt. Bosonen können in beliebiger Zahl einen einzigen Quantenzustand bevölkern. Deshalb können Bosonen komplett den Grundzustand, also den niederenergetischsten Quantenzustand besetzen. Dieses Phänomen heißt **Bose-Einstein-Kondensation**. Fermionen hingegen müssen sich in mindestens einer Quanteneigenschaft (Quantenzahl) z. B. dem Spin unterscheiden (Pauli Prinzip). Dieser grundsätzliche Unterschied zwischen beiden Teilchensorten ist wiederum entscheidend für die Ordnung in der Natur und begründet, dass das Periodensystem der Elemente (PSE) nur so sein kann, wie wir es in der Natur beobachten.

3.24.3 Willkommen im Bosonen-Zoo

In der Natur realisierte Bosonen können nur den Spin 0 (**skalares Boson**), Spin 1 (**Vektorboson**) oder Spin 2 (**Tensorboson**) haben. Bekannte Beispiele für Bosonen sind das skalare Higgs-Teilchen, das vektorielle **Photon** (das Austauschteilchen der Quantenelektrodynamik) und als Tensorboson, das noch nie experimentell nachgewiesene **Graviton**, das Eichboson der Quantengravitation. Für das Graviton gibt es nur von theoretischer Seite Hinweise für seine Existenz, wie die Stringtheorien nahe legen.

Helium-4 (Gesamtspin 0) ist ein klassisches Paradebeispiel für ein Bose-System. Das Bose-Einstein-Kondensat (BEK) wurde hier bei tiefen Temperaturen detailliert untersucht.

3.25 Bosonenstern

Bosonensterne (engl. *boson stars*, **BS**) sind kompakte Objekte, die nur aus Skalarfeldern (siehe skalare Bosonen) zusammengesetzt sind. Salopp könnte man von *Bosonenbällen* sprechen. In der theoretischen Astrophysik werden Modelle solcher Sterne (die durchaus viel schwerer als massereiche Sterne werden können) diskutiert. Eventuell könnten Bosonensterne als Alternative zu Schwarzen Löchern existieren. Astronomen sind daran interessiert, das Wesen der kompakten Objekte auf der Grundlage von Beobachtungen zu entschlüsseln. Sie wollen herausfinden, ob es beispielsweise ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern, ein Schwarzes Loch oder ein Bosonenstern ist, was sie da beobachten. Daher ist die Physik der Bosonensterne nach wie vor ein aktuelles Forschungsfeld.

Die grundsätzliche Idee ist, physikalische Modelle von Bosonensternen zu entwickeln, daraus Vorhersagen über Masse oder Radius beispielsweise zu machen und diese Prognosen an der astronomischen Beobachtung zu testen. Falls alles passt, wäre die Existenz von Bosonensternen nicht auszuschließen.

3.25.1 Physik im Bosonenstern

Die Skalarfelder im Bosonenstern können miteinander wechselwirken oder wechselwirkungsfrei behandelt werden; sie können auch komplexwertig oder reell sein - daraus resultieren unterschiedliche Eigenschaften der Bosonensterne. Im Prinzip bestehen Bosonensterne aus **Bose-Einstein-Kondensaten**. Zur Beschreibung dieser Objekte muss die Quantentheorie verwendet werden. Genauer gesagt spielt die Quantenstatistik eine Rolle, die sich zur Beschreibung so genannter *Bosegase* eignet.

Die Theorie skalarer Felder involviert als Bewegungsgleichung des Feldes die Klein-Gordon-Gleichung; koppelt man diese nun an die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie so resultiert ein Gleichungssystem mit der Bezeichnung **Einstein-Klein-Gordon-Gleichungen**, die die Dynamik von Bosonensternen relativistisch und feldtheoretisch beschreibt.

Es gibt in der Literatur auch nicht-relativistische Zugänge, die Bosonenphysik und Newtonsche Gravitation nutzen.

3.25.2 Entstehung

Die Theorie skalarer Felder wird intensiv in der modernen Kosmologie ausgenutzt (siehe z. B. Inflaton, Cosmon, Radion). Skalarfelder gibt es tatsächlich in der Natur, so dass der Gravitationskollaps einer Bosonenwolke zu einem Bosonenstern plausibel erscheint. Als Entstehungskriterium kann trotz Quanteneffekte das **klassische Jeans-Kriterium** verwendet werden. Ein kugelsymmetrischer Bosonenstern kann sich durch einen dissipationsfreien Prozess bilden, der *Gravitationskühlung* (engl. *gravitational cooling*) getauft wurde (*Seidel* & *Suen* 1994). Der Prozess meint, dass ein stellares System dichter wird, indem sich Konstituenten (ohne Zusammenstöße) zu größeren Radien bewegen. Dieser Effekt geschieht im Prinzip auch bei der Entstehung von Kugelsternhaufen, die einzelne Sterne zu höheren Bahnen schicken oder sogar 'herauskicken' und dabei im Zentrum eine hohe Sterndichte annehmen - das Charakteristikum von Kugelsternhaufen. Bei gravitationsgekühlten Bosonensternen werden entsprechend Skalarfelder ausgesandt.

3.25.3 Stabilität

Die Stabilität des Bosonenstern gewährleistet in erster Linie ein fundamentales Prinzip der Quantenphysik: die **Heisenbergsche Unschärfe**. Im Gegensatz zu Fermionen unterliegen Bosonen *nicht* dem Pauli-Prinzip. D.h. beliebig viele Bosonen können sich im *gleichen* Zustand (gleichen Energieniveau) aufhalten. Ist dies der Grundzustand, der bei tiefen Temperaturen erreicht wird, so ist gerade das *Bose-Einstein-Kondensat* realisiert.

Die Heisenbergsche Unschärferelation besagt auch, dass nicht alle Bosonen innerhalb ihrer *Compton-Wellenlänge* (siehe Gleichung für λ_C unter Planck-Skala) lokalisiert sein können. Damit stellt Heisenbergs Prinzip einen Druck zur Verfügung, der weitere Kompression des Bosonensterns verbietet.

Falls Wechselwirkung zwischen den Bosonen zugelassen wird, so wirkt auch die abstoßende Kraft zwischen ihnen stabilisierend auf den Bosonenstern.

Eine weitere Aussage zur Stabilität und Zeitabhängigkeit von Bosonensternen macht Derricks Theorem.

3.25.4 Fall 1: Bosonenstern ohne Selbstwechselwirkung

Die einfachste Realisierung eines Bosonensterns ist ein massereiches Klein-Gordon-Feld ohne Selbstwechselwirkung. In diesem Fall reicht die Massenskala dieses speziellen Bosonensterns von 0 bis $M_{\max}$ mit

$$M_{\max} = 0.633\,\frac{M_{\mathrm{Pl}}^2}{m_{\mathrm{bos}}} \simeq 8.46\times 10^{-10}\left(\frac{1\,\mathrm{eV}}{m_{\mathrm{bos}}}\right)\,\mathrm{M}_\odot,$$

wobei M_{Pl} die Planck-Masse und m_{bos} die Bosonenmasse sind. Die Maximalmasse hängt *nur* von der Masse der Bosonen ab: Je schwerer das Boson, desto kleiner die Maximalmasse. Wie am Ausdruck in Einheiten der Sonnenmasse abzulesen ist, ist die Maximalmasse verglichen mit typischen Sternmassen viel zu wenig. Nur extrem massearme Bosonen würden hier stellare Massen liefern, weshalb man hier auch von *Mini-Bosonensternen* (engl. *mini-boson stars*) spricht. Die Obergrenze $M_{\max}$ heißt in der Literatur auch **Kaup-Grenze** (nach *D.J. Kaup* 1968).

3.25.5 Fall 2: Bosonenstern mit Selbstwechselwirkung

Lässt man eine Selbstwechselwirkung zwischen den Skalarfeldern zu, so wird es für die Astrophysik schon interessanter. In der Theorie skalarer Felder kann die Bosonen-Selbstwechselwirkung durch einen Term $\propto \Phi^4$ im Lagrangian umgesetzt werden (*Colpi et al.* 1986). In diesem Fall kann der Bosonenstern so schwer werden wie ein Neutronenstern, d. h. stellare Massen ereichen:

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \sqrt{\frac{\lambda}{8\pi^3}}\,\frac{M_{\mathrm{Pl}}^3}{m_{\mathrm{bos}}^2} \simeq 0.1\sqrt{\lambda}\left(\frac{1\,\mathrm{GeV}}{m_{\mathrm{bos}}}\right)^2\,\mathrm{M}_\odot \\ R_{\mathrm{eff}} &= \sqrt{\frac{\lambda\pi}{8}}\,\frac{M_{\mathrm{Pl}}}{m_{\mathrm{bos}}^2} \simeq 1.51\sqrt{\lambda}\left(\frac{1\,\mathrm{GeV}}{m_{\mathrm{bos}}}\right)^2\,\mathrm{km} \end{aligned}$$

Der Parameter λ gewichtet den Φ^4-Term. Ist λ groß, so ist die Selbstwechselwirkung zwischen den Bosonen stark. Die Selbstwechselwirkung stabilisiert den Bosonenball.

In der zweiten Zeile ist der **Effektivradius des Bosonensterns** R_{eff} angegeben - allerdings in der Näherung Newtonscher Gravitation. Interessanterweise hängt dieser Bosonensternradius nur von der Bosonenmasse, aber nicht von der Bosonen*stern*masse ab. Mit anderen Worten: ein stellarer Bosonenstern ist genauso groß wie ein supermassereicher Bosonenstern!

3.25.6 Fall 3: rotierende Bosonensterne

Es gibt sogar **rotierende Bosonensterne**, bei denen der Drehimpuls quantisiert ist. Erstaunlichweise gilt hier die Quantisierung für ein makroskopisches Objekt! Im Gegensatz zur Kugelgestalt des statischen Bosonensterns, wird der rotierende Bosonenstern zu einem Torus

(was zumindest aus Symmetriegründen plausibel erscheint). Die Rotation ist differenziell und nicht uniform. Die rotierenden Lösungen der Einstein-Klein-Gordon-Gleichungen ähneln sehr den rotierenden Neutronensternen, nur dass auch die skalare Feldtheorie eingebettet wurde.

3.25.7 Gibt es Bosonensterne - falls ja, wo?

Die astrophysikalisch spannende Frage nach diesen theoretischen Vorbetrachtungen ist, ob im Kosmos Bosonensterne tatsächlich existieren. Gibt es gute Bosonensternkandidaten? Leisten es Bosonensternmodelle andere kompakte Objekte, wie Neutronensterne oder Schwarze Löcher zu ersetzen?

Wir betrachten als Beispiel die schwersten beobachteten supermassereichen Schwarzen Löcher: die elliptische Zentralgalaxie im Virgo-Haufen, M87, enthält ein Loch mit etwa 3 Milliarden Sonnenmassen. Setzen wir dies als Maximalmasse eines Bosonensterns mit Selbstwechselwirkung oben bei $M_{\max}$ ein, so können wir $(\lambda)^{1/2}(1\ \mathrm{GeV}/\mathrm{m}_{bos})^2$ bestimmen und wiederum in R_{eff} einsetzen. So folgt $R_{\mathrm{eff}} \sim 303$ AU. Aufgrund der Massenunabhängigkeit von R_{eff} wäre dieser Wert auch der Radius des Bosonenstern, falls sich ein solcher bei Sgr A*, im Zentrum der Milchstraße, befinden würde. Beobachtungen besagen jedoch, dass Sgr A* kleiner als 60 AU sein muss, so dass in diesem Fall ein Bosonenstern (zumindest in diesem einfachen Bosonensternmodell) ausgeschlossen sein muss. Ähnliches gilt für die superschweren, kompakten und dunklen Objekte in Aktiven Galaktischen Kernen, für die etwa $R \leq 7$ AU gilt. Damit müssen supermassereiche Schwarze Löcher als kompakte, dunkle Objekte in den Zentren von Galaxien favorisiert werden (nach *Bilic* 2007). Dennoch mögen im ein oder anderen Fall Bosonensterne in Frage kommen. Weiterhin werden alternativ zu Bosonensterne die **Fermionensterne** diskutiert. In der Community der Astronomen werden Schwarze Löcher im Allgemeinen favorisiert.

3.25.8 Quellen & wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ *Kaup, D.J.*: Klein-Gordon Geon, Phys. Rev. 172, 1331, 1968
- ◇ *Colpi et al.*: Boson stars: Gravitational equilibria of self-interacting scalar fields, Phys. Rev. Lett. 57, 2485, 1986
- ◇ *Seidel, E.* & *Suen, W.-M.*: Formation of solitonic stars through gravitational cooling, Phys. Rev. Lett. 72, 2516, 1994
- ◇ *Jetzer, P.*: Boson stars, Phys. Rep. 220, 163, 1992
- ◇ *Schunck, F.E.* & *Mielke, E.W*: General relativistic boson stars, Class. Quant. Grav. 20, R301, 2003
- ◇ *Bilic, N.*: Black-Hole Phenomenology, Lecture Notes at Dubrovnik Summer School, *Proceedings of Science* (P2GC) 004, 2007; Preprint: gr-qc/0109035

3.26 Boyer-Lindquist-Koordinaten

Mit diesem Koordinatensystem beschreiben Astrophysiker und Relativitätstheoretiker üblicherweise **rotierende Schwarze Löcher**, also die Kerr-Lösung. Diese Koordinaten sind *pseudo-sphärisch* und zeigen, dass die Kerr-Geometrie asymptotisch flach ist.

3.26.1 Spezialkoordinaten verraten Eigenschaften der rotierenden Raumzeit

Die Kerr-Lösung wird eindeutig charakterisiert durch die beiden Parameter Masse M und spezifischen Drehimpuls a. Das Linienelement der Kerr-Metrik enthält in der *Boyer-Lindquist-Form* einige typische Funktionen:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \rho\sqrt{\Delta}/\Sigma, \\
\Delta &= r^2 - 2Mr + a^2, \\
\rho^2 &= r^2 + a^2\cos^2\theta, \\
\Sigma^2 &= (r^2+a^2)^2 - a^2\Delta\sin^2\theta, \\
\omega &= 2aMr/\Sigma^2, \\
\tilde{\omega} &= \Sigma\sin\theta/\rho.
\end{aligned}$$

Sie haben den folgenden physikalischen Gehalt: α kennzeichnet üblicherweise die Lapse-Funktion, die am Ereignishorizont null wird. Der damit verbundene allgemein relativistische Effekt heißt Gravitationsrotverschiebung bzw. gravitative Zeitdilatation. Δ ist eine Funktion, die aus einer Eichfreiheit der Kerr-Geometrie heraus gewählt werden kann und ebenfalls an **innerem Horizont** (siehe auch Cauchy-Fläche) und **äußerem Horizont** (dem Ereignishorizont) verschwindet; man könnte diese Funktion Horizontfunktion nennen, weil sie die Horizonte festlegt. ρ ist ein verallgemeinerter Radius mit Winkelabhängigkeit. Σ ist eine Hilfsfunktion, die für verschwindenden Drehimpuls a (Schwarzschild-Lösung) in das Quadrat der Radialkoordinate übergeht. ω heißt Frame-Dragging-Frequenz oder Drehimpulspotential. Diese Funktion hat einen sehr steilen Gradienten, d. h. sie fällt mit der dritten Potenz im Radius ab und hat daher nur eine besondere Signifikanz in unmittelbarer Nähe zum Horizont. Dort ist sie ein Maß für die **Rotation der Raumzeit** und aller Objekte, die sich dort befinden. Ihr Wert am Horizont entspricht der maximalen Rotationsfrequenz. Das rotierende Loch zwingt allen Objekten diese Rotationsfrequenz am äußeren Horizont auf. Schließlich bezeichnet $\tilde{\omega}$ den Zylinderradius, weil das 2π-fache dieser Größe gerade der Umfang eines Zylindermantels ist, dessen Symmetrieachse gerade mit der Rotationsachse des Loches zusammenfällt.

3.26.2 Vor- und Nachteile der Boyer-Lindquist-Koordinaten

Die Boyer-Lindquist-Koordinaten haben den Vorteil, dass die Kerr-Raumzeit eine mathematisch recht einfach Gestalt hat: der metrische Tensor der nicht-diagonalen Kerr-Lösung hat in Boyer-Lindquist-Form *nur einen* so genannten Kreuzterm im Linienelement (nämlich $g_{t\Phi}$).

Aber die Boyer-Lindquist-Koordinaten weisen auch **pathologische Eigenschaften** auf, denn sie enthalten zwei Koordinatensingularitäten: Eine befindet sich auf der Rotations- bzw. Symmetrieachse der Kerr-Geometrie bei verschwindendem Poloidalwinkel ($\theta = 0$). Die andere markiert die beiden Horizonte, $\mathbf{r}_-$ und $\mathbf{r}_+$, mit der Bedingung $\Delta = 0$. Letztere Eigenschaft macht sich dadurch bemerkbar, dass die Komponente $\mathbf{g}_{rr}$ des metrischen Tensors in Boyer-Lindquist-Form an beiden Horizonten gegen unendlich divergiert. Beide Koordinatensingularitäten verschwinden bei Einführung neuer Koordinaten, die so genannten **Horizont-angepassten Koordinaten**, wie beispielsweise den Kerr-Schild-Koordinaten im Falle der Kerr-Metrik.

3.26.3 Originalpublikation

◇ Boyer, R. H. & Lindquist, R. W., *J. Math. Phys.* **8**, 265, 1967

3.27 Bran

Eine Bran (engl. *brane*), genauer gesagt eine **p-Bran**, ist gemäß der Stringtheorien ein schwingungsfähiges Objekt mit der Dimension p. Die Bezeichnung geht auf *Paul Townsend* zurück und ist an das Wort Membran (engl. *membrane*) angelehnt.

3.27.1 Branen haben unterschiedliche Dimension

Brane sind Verallgemeinerungen von Strings, die historisch zuerst gefunden wurden. Daraus resultierte auch etymologisch der Name *Stringtheorien*. Die Dimension p legt verschiedene Objekte fest. Ist $p = 0$, so handelt es sich um ein **Punktteilchen** (**0-Bran**), p = 1 entspricht einem eindimensionalen Faden, dem eigentlichen **String** (oder **1-Bran**), bei p = 2 handelt sich um eine zweidimensionale Fläche (**2-Bran**), die man **Membran** nennt. Ebenso gibt es noch höherdimensionale Branen, 3-Branen etc.

3.27.2 Branen als Teilchen oder als Schwarzes Loch

Die Branen repräsentieren die uns bekannten Teilchen des Standardmodells und darüber hinaus viele, die noch nicht entdeckt wurden, insbesondere wenn Branen in der Supersymmetrie (SUSY) betrachtet werden. Von einem übergeordneten Standpunkt sollten die p-Branen endlich *Demokrits* postulierten 'Atome' (*atomos*, grch.: 'unteilbar'), den unteilbaren, fundamentalen Konstituenten der Materie, entsprechen. Branen können aber auch ganze stellare Objekte, wie klassische Schwarze Löcher beschreiben. Branen dienen als Verallgemeinerung des punktförmigen Schwarzen Loches: dieses identifiziert man gerade mit einer 0-Brane. Die erste Generalisierung als 1-Brane nennt man **Schwarzen String** (engl. *black string*), die zweite als 2-Brane heißt **Schwarze Brane** (engl. *black brane*). Je nach angenommenen Wirkungsfunktional bzw. Lagrangedichte (Einstein-Hilbert-Lagrangian, Einstein-Maxwell-Lagrangian etc.) kann man Branen-Verallgemeinerungen der klassischen Schwarzschild-Lösung (ungeladen, statisch), Reissner-Nordstrøm-Lösung (geladen, statisch) oder Kerr-Newman-Lösung (geladen, rotierend) auffinden.

3.27.3 Auch Strings halten den Rand

Bei offenen Strings kann man *Randbedingungen* an dessen Enden stellen und sie in bestimmter Weise fixieren. Analog zur ***D**irichlet*-Randbedingung in der klassischen Elektrodynamik nannten die Stringtheoretiker sie daher **D-Branen**.

Bei den **Dp-Branen** sind die Enden des Strings auf einer oder möglicherweise verschiedenen p-dimensionalen D-Branen lokalisiert.

Schließlich bezeichnet die **M-Brane** die Branen der M-Theorie, die sich aus Strings (1-Branen) und p-Branen konstituieren.

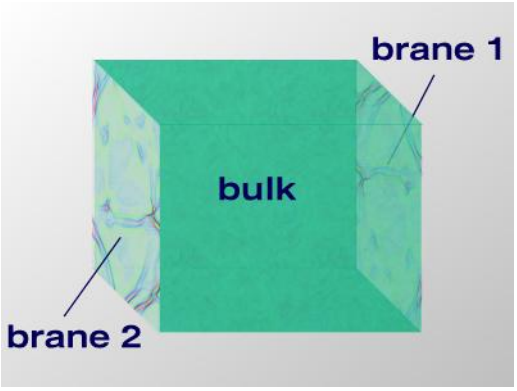

Abbildung 3.1: System aus Bulk und 2 Branen.

3.27.4 Ein ganzer Kosmos auf der Bran

Das theoretische Konzept mit Branen nennt man umfassend als **Branenwelt** (engl. *brane world*) oder auch *Brane World Scenario*. Dieser Formalismus hat alle Stringtheorien durchdrungen. In der **Branen-Kosmologie** werden die Branen im Rahmen der relativistischen Kosmologie angewendet und erweitern deutlich die Konzepte der (vierdimensionalen) Standardkosmologie. Wie von den Stringtheorien gefordert, wird die Existenz von Extradimensionen angenommen. Die Branen sind typischerweise dreidimensional (3-Bran) und bilden *Hyperflächen* im höherdimensionalen **Bulk** (engl., gesprochen 'balk'); siehe Illustration 3.1. Die Branen können auf dieser Bulk-Geometrie *statisch fixiert* sein, wie in den Randall-Sundrum-Modellen oder durch die Vermittlung eines Skalarfeldes gegeneinander schwingen. Diese **Branendynamik** kommt durch die Wechselwirkung mit dem Bulk-Skalarfeld zustande. Im Ekpyrotischen Szenario und dem Zyklischen Universum heißt dieses Feld Radion. Die Dynamik geht dabei soweit, dass die Branen kollidieren können, was kosmologisch mit dem Urknall interpretiert wird. Damit liefern Ekpyrosis und Zyklisches Modell erstmals eine **Ursache für den Big Bang**. Der Grund sei nichts weniger gewesen, als eine Weltenkollision!

3.27.5 Vortrag im Wissensportal

- ◇ Eine Einführung in die Kosmologie mit Branen: An introduction to Brane World Cosmology, Stand März 2004.

3.28 Brans-Dicke-Theorie

Die Brans-Dicke-Theorie ist eine alternative Gravitationstheorie und gehört zur Klasse der **Skalar-Tensor-Theorien** (engl. *scalar-tensor theories*). Sie unterscheidet sich von der Allgemeinen Relativitätstheorie dadurch, dass es neben einem metrischen Tensor ein zusätzliches Skalarfeld gibt, das an den Krümmungsskalar (= *Ricci-Skalar*, siehe auch Ricci-Tensor) koppelt.

3.28.1 Wozu eine kompliziertere Gravitationstheorie?

Die Brans-Dicke-Theorie ist in der Tat komplizierter als die ART, weil zusätzliche Terme auftreten. Was sie leisten kann ist, dass sie bei entsprechender Variation des Skalarfelds eine **veränderliche Gravitationskonstante** generiert. Die Newtonsche Gravitationskonstante ist zwar im Allgemeinen eine *fundamentale Naturkonstante*, aber falls eine Veränderlichkeit entdeckt würde, wäre das mit der Brans-Dicke-Theorie erklärbar. Es ist nicht klar, ob in frühen Entwicklungsphasen des Universums di Gravitationskonstante einen anderen Zahlenwert hatte.

3.29 Brauner Zwerg

Braune Zwerge (engl. *brown dwarfs*) sind Zwitterobjekte zwischen Planeten und Sternen, die nicht massereich genug sind, um dauerhaft thermonukleare Fusionsprozesse im Innern ablaufen zu lassen. Die kritische Masse, um Wasserstoffbrennen (die pp-Kette) zu zünden liegt bei **0.08 Sonnenmassen** oder 84 Jupitermassen. Aus diesem Grund nennen die Astronomen Braune Zwerge im Fachjargon auch 'Jupiters'. Die Zentraltemperatur liegt entsprechend der geringen Masse unterhalb von etwa 10 Mio. Kelvin. Erstmals wurden Braune Zwerge 1995 entdeckt.

3.29.1 Herausforderung an die Beobachtung

Braune Zwerge sind außerordentlich schwer nachzuweisen, weil sie - dadurch dass Fusionsprozesse unterbleiben - eine geringe Leuchtkraft haben. Aus **Kontraktion** (ebenso wie große Planeten, wie Jupiter) gewinnen sie Energie, die im **roten** bzw. **infraroten** Spektralbereich abgestrahlt wird. Ebenso wie die Weißen Zwerge werden diese sehr kleinen Objekte durch den *fermionischen Entartungsdruck* der Elektronen stabilisiert. Diese nur von der Dichte abhängige Druckkomponente wird in Sternen aufgrund des Pauli-Prinzips der Quantentheorie etabliert. Im Unterschied zu den Weißen Zwergen handelt es sich bei den Braunen Zwergen um **Protosterne** und nicht um 'tote Sterne'. Damit ähneln sie eher den T-Tauri-Sternen, die Vorhauptreihensterne (siehe Hauptreihe) sind und ebenso instabile Brennphasen für Wasserstoff aufweisen.

Als Indikator für einen Braunen Zwerg verwenden die Astronomen die **Lithium-Linie** bei 670.8 nm: Lithium fusioniert bei Objekten, die schwerer sind als 0.065 Sonnenmassen und ist so spektroskopisch nicht mehr nachweisbar, wenn es als Brennstoff erschöpft ist. Detektiert man also die Lithium-Linie, so weiß man, dass das Objekt leichter ist als 0.065 Sonnenmassen: es ist ein Brauner Zwerg!

In jungen Braunen Zwergen (z. B. in der *Chamäleon-Wolke* und ρ *Ophiuchi*) kann man sogar **Emission von Röntgenstrahlung** beobachten. Dies wird durch die Existenz von *Dynamos* erklärt, die eine starke Magnetosphäre aufbauen. Dieses Phänomen kennt man auch von Jupiter, dessen Magnetosphäre mit dem VLA eindrucksvoll bei 20 cm Wellenlänge zu beobachten ist. Man hat mit dem Infrarotsatelliten **ISO** im Sternentstehungsgebiet ρ *Ophiuchi* etwa 30 junge Braune Zwerge entdeckt, die ein Alter von nur einer Million Jahre haben. Sie haben alle Massen an der Nachweisgrenze von ca. 50 Jupitermassen.

3.29.2 Bekannte Vertreter Brauner Zwerge

- ◇ *Teide 1*, ein Brauner Zwerg in den Plejaden (das Siebengestirn im Sternbild *Stier*), benannt nach dem Teide-Observatorium auf Teneriffa. Er gehört zu den kühlsten und leuchtschwächsten Kandidaten mit einer Masse von nur 0.03 Sonnenmassen (oder 30 Jupitermassen). Der Spektraltyp ist dM9 (Kalzium- und Titan-Linien).
- ◇ *PLL 15*, einem Übergangsobjekt mit 0.078 Sonnenmassen.
- ◇ *BD +4°4048B*, einer schwachen Komponente eines nahen (5.8 pc) Doppelsterns. Das Objekt wurde von *Biesbroeck* 1940 entdeckt, hat eine visuelle Helligkeit von 18.5 mag und eine Masse von 0.08 Sonnenmassen.
- ◇ Die Begleiter des Sterns *LHS 1070*. Sie gehören zu den lichtschwächsten Sternen innerhalb von 20 pc und haben eine Entfernung von 7.4 pc. Ihre Massen wurden zu 0.07 und 0.08 Sonnenmassen bestimmt (*Leinert et al.*, 2001).

3.29.3 Dunkle Materie

Braune Zwerge sind aufgrund ihrer schwachen Leuchtkraft hochgehandelte Favoriten für die **baryonische Dunkle Materie**. Wie die aktuellen Messwerte des Infrarotsatelliten WMAP belegen, ist der Anteil baryonischer Dunkler Materie gering und kosmologisch irrelevant. Viel wichtiger sind die anderen Energieformen, wie nicht-baryonische Dunkle Materie (Neutrinos, WIMPs, supersymmetrische Teilchen und Axionen) und vor allem die Dunkle Energie. Braune Zwerge könnten zusammen mit einer signifikanten Zahl extrasolarer Planeten zur Lösung des Missing mass Problems im Universum beitragen.

3.29.4 Auch im All gibt's MACHOs

Astronomen vermuten eine hohe Anzahl von Braunen Zwergen in den Halos von Galaxien und rechnen sie daher den **MACHOs**, den *Massive Compact Halo Objects*, zu. Durch so genannte **Microlensing Ereignisse** kann man sie indirekt im Halo der Milchstraße messen: gehen diese massiven Objekte vor der Sichtlinie eines hellen Sterns vorbei, so steigt dessen Helligkeit aufgrund des Gravitationslinseneffekts, den die Strahlung erleidet, kurzfristig an. Dieser Anstieg ist sehr charakteristisch, so dass man aus dessen Dauer die Masse der Gravitationslinse (des linsenden Objekts) bestimmen kann. Von 1990 bis 1993 wurden mit MACHO (*Massive Compact Halo Object*) in den USA und Australien, EROS (*Expérience de Recherche d'Objets Sombre*) in Frankreich und OGLE (*Optical Gravitational Lens Experiment*) in Polen und den USA drei Mikrolinsen-Ereignisse gemessen. Die Experimente kommen auf Massen zwischen 0.12 und 1.0 Sonnenmassen und favorisieren Braune Zwerge gegenüber einem neuen Typen von veränderlichem Stern. Wenn diese These stimmt, muss noch geklärt werden, warum gerade im Halo so viele Braune Zwerge entstanden sind und deren Formation in der Galaktischen Scheibe unterdrückt ist.

3.30 Brill-Wellen

Brill-Wellen sind eine spezielle Form reiner Gravitationswellen und Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen im Vakuum. Sie sind benannt nach *Dieter Brill*, der 1959 diese Wellen eingehend untersuchte und zeigen konnte, dass diese Konfiguration reiner

Gravitationswellen eine positive Masse (gemessen im Unendlichen) haben kann. Aus diesem Grund sind sie nicht nur ein Artefakt des Koordinatensystems, sondern können ein reales, physikalisches System bilden.

3.30.1 Ein Gezitter in der Raumzeit

Die Energie dieser Wellen ist in der propagierenden Raumkrümmung gespeichert. Mathematisch beschreibt man sie mit einem **axialsymmetrischen Linienelement** (siehe dazu auch Raumzeit). Je nach Energiedichte bzw. Intensität dieser Welle handelt es sich - bei kleinen Intensitäten - lediglich um linear propagierende Wellen in einer flachen Raumzeit, die einen geglätteten, flachen Raum hinterlassen. Diese Wellen nennt man **subkritische Brill-Wellen**. Bei sehr hoher Intensität handelt es sich um einen **Kollaps ohne Materie** von reinen Gravitationswellen zu einem Schwarzen Loch. Diese Wellen heißen **superkritische Brill-Wellen**. Bei noch höheren Energiedichten können die Brill-Wellen von Anfang an Schwarze Löcher bilden.

3.30.2 Wo laufen'se denn?

Da es sich um Vakuumlösungen der Feldgleichungen handelt, sind Brill-Wellen **materiefreie** Systeme, so dass bei deren numerischer Behandlung auf relativistische Hydrodynamik verzichtet werden kann. Eine interessante Eigenschaft der Brill-Wellen ist, dass deren **Gravitationsenergie nicht klassisch lokalisiert** werden kann: An jedem Punkt der Raumzeit sieht ein Beobachter nur eine (flache) Minkowski-Raumzeit, weil überall Vakuum herrscht. Nur in einer asymptotisch flach Region weit entfernt von der Quelle kann man die Gravitationsenergie als Gravitationsfeld interpretieren, das man nicht von dem einer Materiekonfiguration unterscheiden kann.

3.30.3 Kollaps zum Loch

Astrophysikalisch relevant sind diese noch theoretischen Gebilde, weil sie Schwarze Löcher bilden können - wie es scheint auf der **ganzen Massenskala**, von TeV bis 10^{10} Sonnenmassen. Da dies nicht mal Materie bedarf, könnten dies erste Kondensationskeime für Galaxien in der Frühgeschichte des Universums sein. Gravitationswellendetektoren (Geo 600, LISA, LIGO, LISM etc.) könnten über diese Spekulation bald Klarheit verschaffen.

3.31 Bulk

Bulk (gesprochen 'balk') ist eigentlich eine englische Vokabel, die u. a. mit 'Größe' oder 'Hauptteil' übersetzt werden kann. In der modernen Physik ist Bulk ein Fachbegriff, der bei den **Branenmodellen** auftaucht. Bulk meint einen **höherdimensionalen Raum**. Neben den uns vertrauten drei Raumdimensionen (3D) Länge, Breite und Höhe gibt es in den *Bulk-Branen-Systemen* weitere Raumdimensionen, die **Extradimensionen** genannt werden. Wie viele es davon gibt, hängt vom jeweiligen Modell ab.

3.31.1 Ursprung von Bulk und Bran

Die Terminologie mit Branen und Bulk kommt aus den Stringtheorien (10D) bzw. der M-Theorie (11D). Diese Theorien kommen nicht ohne Extradimensionen aus. Die offensichtliche

Tatsache, dass wir in unserer Alltagswelt keine Extradimensionen antreffen, wird mit der **Kompaktifizierung** erklärt. Demzufolge treten die Zusatzdimensionen erst bei sehr kleinen Abständen (Mikrometer und weniger) in Erscheinung.

3.31.2 Grundidee

Bulk bezeichnet also eine Art 'Überraum' in dem eine oder mehrere Branen als 'Unterräume' liegen (siehe zum Thema auch Subraum). Die grundsätzliche Idee ist, dass wir mit unserer 'niedrigdimensionalen' Welt auf einer Bran (genauer *3-Bran*) 'leben'. Die Teilchen und Felder des Standardmodells der Teilchenphysik 'leben' auf dieser Bran. Die Gravitation hingegen kann mehr: sie 'lebt' auch im Bulk. Im Feldlinienbild wird die Gravitation im 'Überraum' 'ausgedünnt' und tritt deshalb *auf der Bran* schwächer in Erscheinung. Dieses Konzept löst sehr elegant das Hierarchieproblem!

3.31.3 Prominente Szenarien mit Bulk

Wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie (4D) können Bulk und Bran mit einer Raumzeit beschrieben werden. Im Fall des Bulks hat die entsprechende Metrik jedoch mehr Dimensionen; die Erweiterungen des Linienelements erfolgen jedoch lediglich durch weitere Terme entsprechend den Zusatzdimensionen (z. B. Terme mit dx_1^2, dx_2^2, dx_3^2 für den vertrauten 3D-Raum und ein Term mit dy^2 für eine weitere Extradimension).

Das System aus Bulk und Branen kann nun sehr unterschiedliche Eigenschaften haben: die Bulkmetrik kann flach oder gekrümmt sein; die Anzahl der Extradimensionen kann variieren; es kann mehrere Branen geben (z. B. ein *Zwei-Bran-System*). So sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Branenmodellen vorgeschlagen worden. Zu den bekanntesten gehören das **ADD-Szenario**, die **Randall-Sundrum-Modelle**, das **DGP-Szenario** und das **Zyklische Universum**.

4 Lexikon C

4.1 Carter-Konstante

Konstanten der Bewegung sind beim Betrachten von physikalischen Systemen von großem Interesse. Ihre Existenz vereinfacht die mathematische Behandlung des Problems sehr. Meist ergibt sich die Konstanz einer physikalischen Größe aus den Symmetrien des Systems, wie das *Noether-Theorem* fordert.

4.1.1 Eine spezielle Konstante der Kerr-Raumzeit

Eine Diskussion der Symmetrien einer Raumzeit, die im Zusammenhang mithilfe der Isometrien eine elegante Formulierung gewinnt, ist immer von Vorteil, auch bei den Raumzeiten Schwarzer Löcher. Für eine spezielle Metrik, der Kerr-Metrik, die rotierende Massen und rotierende Schwarze Löcher gut beschreibt, ergeben sich vier Erhaltungsgrößen (oder Integrale der Bewegung). Die Gesamtenergie aus der Symmetrie Stationarität, der Drehimpuls aus der Axialsymmetrie, die Masse und die so genannte Carter-Konstante. Diese **4. Konstante der Bewegung** ist spezifisch für die Raumzeit rotierender Schwarzer Löcher und mit dem transversalen Impuls der Teilchen assoziiert.

4.1.2 Dazu verwendet man die Konstanten

Ihre Existenz sichert eine elegante Lösung der Geodätengleichung in der Kerr-Metrik über die Bewegungsintegrale. *Brandon Carter* fand diese Konstante 1968 aus der Separabilität der Hamilton-Jacobi-Gleichung. Ihm zu Ehren trägt sie diesen Namen. Der Hamilton-Jacobi-Formalismus ist ein mathematischer Zugang, der bereits in der klassischen Mechanik angewendet wurde und auf Variationsverfahren des Wirkungsfunktionals beruht. Das Wirkungsfunktional wird für physikalisch realisierte Bahnen minimiert!

4.1.3 Vom rotierenden Loch zum rotierenden Stern

Ob ein Analogon für die Carter-Konstante in der Metrik rotierender Neutronensterne existiert, ist eine offene Frage. Im August 2000 wurde die exakte (Vier-Parameter) Lösung für den Außenraum der Metrik rotierender Neutronensterne gefunden (*Manko et al.* 2000). Die metrischen Funktionen lassen sich mithilfe gebrochen rationaler Funktionen recht einfach formulieren. Die wesentlichen physikalischen Parameter dieser Lösung sind Masse des Neutronensterns, Drehimpuls, magnetisches Dipolmoment und Massen-Quadrupolmoment.

4.2 Casimir-Effekt

Der Casimir-Effekt ist nach dem Physiker *Hendrick B.G. Casimir* benannt, der diesen Effekt 1948 berechnet hat. Der Effekt besagt, dass zwei parallel ausgerichtete Metallplatten sich im Vakuum anziehen!

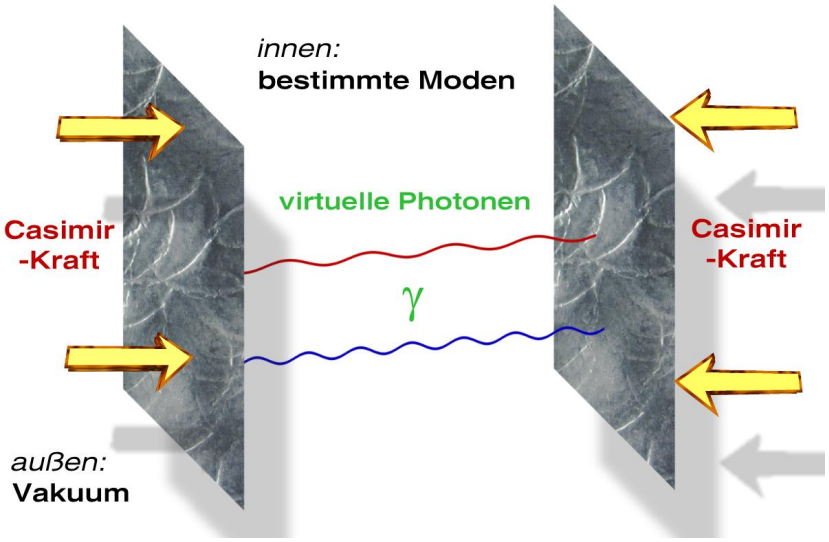

Abbildung 4.1: Klassischer Casimir-Effekt zwischen zwei Metallplatten.

4.2.1 Wer schiebt denn da?

Hinter diesen fast wie Zauberei anmutenden Effekt steckt als Erklärung 'handfeste' Quantentheorie: das Quantenvakuum ist nicht völlig leer. Das elektromagnetische Feld besitzt ebenfalls eine **Nullpunktsenergie** (oder **Vakuumfluktuationen**) und entsprechend **Schwingungsmoden** (oder Wellenfunktion) zu diesen Energieeigenwerten. Im Vakuum zwischen den Metallplatten können jedoch **nicht alle** freien Schwingungsmoden (Schwingungsfrequenzen) existieren: durch den endlichen Abstand zwischen den metallenen Platten werden diejenigen Schwingungsmoden 'ausgeblendet', deren Vielfaches der Wellenlänge nicht mit dem Plattenabstand übereinstimmt (siehe Grafik 4.1). Um das zu zeigen, löst man quantenmechanisch die Schrödinger-Gleichung in einem Kasten und findet für diese Anordnung paralleler Platten weniger Schwingungsmoden als im Fall ohne Platten. Anschaulich würden Schwingungsmoden die nicht in einem Knoten auf den Plattenoberfläche enden Ladungen in den Platten verschieben, also elektrische Ströme erzeugen. Die Voraussetzung, dass es sich um ungeladene **Metall**platten handeln soll ist wesentlich, weil nur sie das elektromagnetische Feld zwischen den Platten reflektieren können. Anders formuliert können zwischen den Leiterplatten nur **virtuelle** Photonen bestimmter Frequenz entstehen.

Die Folge dieses Defizits an Schwingungsmoden innerhalb der Platten gegenüber dem Bereich außerhalb der Plattenanordnung ist ein **Quantendruck** bzw. eine **Casimir-Kraft** von außen, der die Platten zusammenbringt. Damit ist der Casimir-Effekt ein makroskopischer Beleg der mikroskopischen Quantenfluktuationen!

4.2.2 Varianten der Casimir-Experimente

Experimentell wurde der Casimir-Effekt 1997 von dem amerikanischen Physiker *Steve Lamoreaux* mit einer geringfügig anderen Versuchsanordnung, nämlich einer Metallplatte vor einem Metallkugelsegment im Distanzbereich von 0.6 bis 6 Mikrometern verifiziert,

d. h. tatsächlich gemessen! Mit dieser Anordnung konnte Lamoreaux die exakt parallele Ausrichtung der Platten umgehen, die im ursprünglichen Ansatz nötig gewesen wäre. Er verwendete ein Torsionspendel und piezo-elektrische Druckmesser, um die Casimir-Kraft zu messen. Im betrachteten Bereich betrug sie etwa 10 nN (Nanonewton), also einer Gewichtskraft wie sie eine Masse von einem Mikrogramm auf eine Unterlage ausübt.

Als Variante des klassischen Casimir-Effekts stellt sich eine Anordnung dar, wo Atomkerne in den 'Fermi-See' der Neutronen eintauchen. Die Casimir-Kräfte könnten für eine Umordnung der Atomkerne sorgen oder die Bewegung der Neutronen im Fermi-See beeinflussen, was eine Relevanz in der Kruste eines Neutronensterns oder eines Quarksterns haben könnte.

Ein anderes Beispiel sind die Fußballmoleküle C-60 (Gattung der Fullerene), die eingetaucht in den Fermi-See von Elektronen (beispielsweise in flüssiges Quecksilber) ein ähnlichen Effekt zeigen sollten (*Wirzba & Bulgac* 2001).

4.2.3 wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ *Lamoreaux, S.*: Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range, Physical Review Letters **78**, 5, 1997

- ◇ *Wirzba, A. & Bulgac, A.*: Casimir Interaction among Objects Immersed in a Fermionic Environment, Physical Review Letters **87**, 120404, 2001

4.3 Cauchy-Fläche

Die Cauchy-Fläche oder **Cauchy-Horizont** ist eine besondere Fläche, die im Verständnis Schwarzer Löcher eine Rolle spielt. Man definiert sie wie folgt: *Eine Cauchy-Fläche ist eine Hyperfläche einer Raumzeit, die eine kausale Kurve exakt nur einmal schneiden kann.*

4.3.1 Bitte im Klartext!

Dies bedarf sicher einiger Erklärungen: Eine Raumzeit ist eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit, die eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) ist. Eine Hyperfläche zu diesem 4D-Gebilde ist deshalb dreidimensional. Im ADM-Formalismus wird die Raumzeit beispielsweise in Hyperflächen zerlegt, um numerische Relativitätstheorie betreiben zu können (3+1 Split). Mit der oben genannten **kausalen Kurve** meint man eine Weltlinie, also eine Kurve in der Raumzeit, die beispielsweise ein Beobachter oder ein Materieteilchen zurücklegt. Kausale Kurven sind aber nicht in die Vergangenheit fortzusetzen! Die Bedingung des 'Einmalschneidens' bedeutet also anschaulich, dass Cauchy-Flächen *nur in einer Richtung durchlässig* sind.

4.3.2 Mehr Horizonte beim Loch

Der Bezug zu Schwarzen Löchern ist der Folgende: Betrachtet man die Kerr-Lösung, die die rotierende Raumzeit Schwarzer Löcher beschreibt, so findet man beim Nullsetzen des Delta-Potentials in Boyer-Lindquist-Koordinaten im Allgemeinen zwei Lösungen dieser quadratischen Gleichung:

$$r_{\mathrm{H}}^{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}$$

Die eine bezeichnet man mit r_+ und kann gerade mit dem Ereignishorizont, dem **äußeren Horizont** Schwarzer Löcher, identifiziert werden. Die andere Lösung, r_+, ist der **innere Horizont** und besagte Cauchy-Fläche.

4.3.3 Seltsame Effekte am Cauchy-Horizont

Gelangt nun ein Beobachter auf einer Geodäte hinter den Cauchy-Horizont, so wird er Zeuge, wie die gesamte Geschichte der Außenwelt in Zeitraffer abläuft. Denn er erreicht eine **Region unendlicher Blauverschiebung**. Dummerweise wird er dann auch von einem energetisch betrachtet unendlichen Strahlungsblitz getroffen.

Eine seltsame Eigenschaft von Cauchy-Horizonten ist, dass sie singulär werden, wenn sie durch Objekte, die sie passieren, gestört werden. Cauchy-Horizonte sind **singuläre Nullhyperflächen**. Diese seltsamen Eigenschaften deuten darauf hin, dass hier die Domäne einer Quantengravitation beginnt.

4.3.4 Literatur:

- ◇ Chandrasekhar, S.: The Mathematical Theory of Black Holes (1983), S.214
- ◇ Townsend, P.K.: Black Holes (1997), Preprint: gr-qc/9707012

4.4 Cepheiden

In der Astronomie kennt man Sterne, die regelmäßig ihre Helligkeit verändern. Ein spezielle Klasse dieser so genannten Veränderlichen sind die *Cepheiden*.

4.4.1 Periodisches Ausdehnen und Zusammenziehen dirigiert die Sternhelligkeit

Der Prototyp der Cepheiden heißt genau gesagt *Delta-Cephei* und befindet sich im Sternbild *Cepheus* (auch *Kepheus*). Diese Sterne wurden 1912 von der Astronomin *Henrietta S. Leavitt* entdeckt. Ebenso wie die RR Lyrae Sterne sind die *Cepheiden* Pulsationsveränderliche, die eine charakteristische **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung** aufweisen. D.h. man kennt automatisch aus der Messung der Helligkeitsvariationsperiode die absolute Leuchtkraft. Mit der beobachteten Leuchtkraft, der scheinbaren Helligkeit, folgt über das Distanzmodul die Entfernung. Daher sind *Cepheiden* sehr gute Standardkerzen: sie sind **gute Entfernungsindikatoren** bis knapp zum Virgo-Galaxienhaufen (Entfernung 23 Mpc) und dienen so auch der Entfernungsbestimmung extragalaktischer Systeme.

Da sie intrinsisch viel heller sind als RR Lyrae Sterne, kann man sie auch bei viel größeren Entfernungen als Distanzmesser verwenden. *Cepheiden* werden in klassische **Typ-I-Cepheiden** (vergleichbar *Delta-Cephei*) und **Typ-II-Cepheiden** (eher wie *W Virginis Sterne*) unterschieden: Typ-I ist ebenso Population I, also jüngere Sterne, die sich in der galaktischen Scheibe befinden. Dagegen findet man Typ-II nur in den galaktischen Halos, in den Kugelsternhaufen, wie auch die RR Lyrae Sterne.

4.4.2 Ursachen im Sterninnern

Alle diese Pulsationsveränderliche findet man im Hertzsprung-Russell-Diagramm auf dem **Instabilitätsast**, oberhalb der Hauptreihe. Die Brennphasen sind auf diesem Ast instabil,

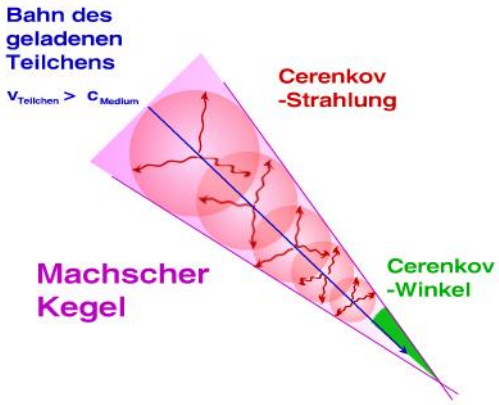

Abbildung 4.2: Mach-Kegel der Cerenkov-Strahlung eines relativistischen, geladenen Teilchens.

so dass die Zustandsgrößen des Sterns und schließlich auch seine Helligkeit variieren.

Die Pulsation der Cepheiden kann modelliert werden, indem man eine stehende Schallwelle annimmt die durch das Sterninnere propagiert und am Kern sowie der Sternoberfläche reflektiert wird. Die Schallgeschwindigkeit ist generell abhängig von der Temperatur und der Masse der Spezies, die sie überträgt. Infolgedessen variiert die Schallgeschwindigkeit im Sterninnern. Diese einfachen Modelle führen bereits auf simple Perioden-Leuchtkraft-Beziehungen, die mit Cepheidenbeobachtungen verglichen werden können.

4.5 Cerenkov-Strahlung

Diese besondere Form der Strahlung ist das **optische Analogon** zum akustischen Überschallknall, den jeder von Düsenjets kennt, die sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegen. Bei einer Geschwindigkeit von 1 Mach (einfacher Schallgeschwindigkeit in Luft) bzw. einer Machzahl von 1 wird die 'Schallmauer durchbrochen' und ein Überschallknall breitet sich gut hörbar aus. Die nacheinander entlang der Flugrichtung emittierten kugelförmigen Schallwellen bilden als Einhüllende im Raum einen Kegel, den **Machschen Kegel**. Dieser hat einen umso kleineren Öffnungswinkel, je schneller sich das Objekt mit *supersonischen* Geschwindigkeiten (d. h. schneller als der Schall) durch die Luft bewegt – siehe Abbildung 4.2.

4.5.1 Vom Schall zu Licht

Ein vergleichbares Phänomen tritt ein, wenn ein relativistisches, geladenes Teilchen ein transparentes Medium wie Wasser oder Eis durchläuft und eine höhere Geschwindigkeit hat, als die des Lichtes in diesem Medium. Dann emittiert es (analog zum obigen Beispiel der Kugelschallwellen) die Cerenkov-Strahlung. Auch hier bildet sich als Einhüllende der Machsche Kegel aus. Die Abstrahlung unter einem konstantem Winkel, dem **Cerenkov-Winkel** θ_C, hängt nur von der Teilchengeschwindigkeit v und der Mediumlichtgeschwindigkeit c_m ab: $\cos\theta_C = c_m/v = c/(nv)$ mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c und dem Brechungsindex n. In Wasser liegt der Cerenkov-Winkel für relativistische Myonen bei etwa

40 Grad. Ebenso lässt sich abschätzen wie viele Cerenkov-Photonen im Mittel pro Wegstrecke emittiert werden. Typische Werte sind 200 Photonen/cm.

4.5.2 Ausnutzung in der Teilchendetektion

Das Phänomen der Cerenkov-Strahlung nutzt man bei Hochenergieastrophysik aus, um hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos zu messen. Das funktioniert auch bei Neutrino-Teleskopen: die Neutrinos durchqueren Materie bekanntermaßen ohne erhebliche Wechselwirkungen einzugehen, daher nennt man sie gerade *schwach wechselwirkende* Teilchen (siehe auch bei den 'schweren Brüdern', den WIMPs). Es gibt jedoch eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie mit den Nukleonen der Atomkerne kollidieren und aus diesem Prozess Myonen hervorgehen. Es gibt in den Nukleon-Neutrino-Stößen zwei Möglichkeiten, wie die Sache ausgehen kann. Die Teilchenphysiker sprechen hier von zwei Zerfallskanälen: den einen nennt man **NC** für *neutral current*, weil hier keine geladenen Teilchen entstehen, nur wieder neue Neutrinos; den anderen - hier wesentlichen Kanal - nennt man **CC** für *charged current*, weil hier geladene Teilchen erzeugt werden: die *Myonen*. Aus Gründen der Leptonenzahlerhaltung muss bei diesen neutrino-induzierten Myonen das einlaufende Neutrino von der Myon-Familie, also ein Myon-Neutrino, sein. Zwischen den beiden Teilchenspuren von Neutrino und Myon gibt es einen leichten Versatz, der von der Neutrinoenergie E abhängt. Die mittlere Winkelabweichung beträgt (1.5 Grad)/$(E/TeV)^{1/2}$, also 1.5 Grad für ein 1 TeV-Myon-Neutrino und bereits ganze 47 Grad für ein 1 GeV-Myon-Neutrino. Je schneller ('relativistischer') sich also das Neutrino bewegt, umso geringer ist der Versatz der sekundären Reaktionsprodukte! Diese Kenntnis dient natürlich der Rekonstruktion des Ortes der Neutrino-Emitter. Ein aktuelles, brisantes Forschungsgebiet ist die UHE-Neutrinoastronomie, die ultra-hochenergetische (*ultra-high energetic*, kurz UHE) Neutrinos sucht, die extragalaktische Quellen, wie die AGN (vor allem Blazare), galaktische Quellen wie Mikroquasare oder (langzeitige) Gamma Ray Burster emittiert haben könnten.

4.5.3 Teilchenjagd am Südpol

In der Antarktis wird das riesige Eisschild als Detektormaterial und Cerenkov-Medium benutzt. Das *Antarctic Muon And Neutrino Detector Array* AMANDA nutzt einen 1 km^3 Eisblock, auf dessen Boden, 3 km tief im Eis eine Reihe von lichtempfindlichen Detektoren (*photomultiplier tubes*, PMTs) angeordnet wurden. Je nachdem wie die Detektoren ansprechen, lässt sich die Myon und schließlich die Neutrinospur rekonstruieren. Schließlich deutet diese Spur auf die kosmische Quelle am Himmel. Probleme bereitet das Rauschen **atmosphärischer Myonen**, die bereits in der Erdatmosphäre und nicht im Eis gebildet wurden. Sie sind auch in der Regel **nicht neutrino-induziert**, sondern bilden sich durch die Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung (bestehend aus einem Konglomerat aus Protonen, Alphateilchen, Elektronen etc.). Ebenso problematisch sind sekundäre Cerenkov-Emitter entlang der Myonenspur aus weiteren Zerfallsprodukten von Myonen. Erst die Reduktion der Messdaten von diesen Störeffekten wird eine sichere Lokalisierung der kosmischen Quelle gestatten.

4.5.4 Quellen

- ◇ AMANDA-Kollaboration in Mainz

◇ Dirk Pandel, Diplomarbeit, 1996

4.6 Chandrasekhar-Grenze

Die Chandrasekhar-Grenze markiert die charakteristische Massengrenze für kompakte, stellare Objekte von etwa **1.4587 Sonnenmassen** (mit einer geringfügigen Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung):

$$M_{\mathrm{Ch}} = 1.4587 \times \left(\frac{2}{\mu_{\mathrm{e}}}\right)^2 M_{\odot}$$

Die Bezeichnung wurde zu Ehren des indischen Astrophysikers *Subrahmanyan Chandrasekhar* (1910 - 1995) gewählt, der realistische Sternmodelle mit idealen Fermigasen bereits 1935 berechnet hat. Chandrasekhar gilt als einer der großen Relativisten und theoretischen Astrophysiker. 1983 erhielt er den Nobelpreis für Physik für seine Arbeit auf dem Gebiet des Sternaufbaus und der Sternentwicklung. Sein Buch *The Mathematical Theory of Black Holes* (1983) ist bis heute ein wichtiger Grundpfeiler der relativistischen Astrophysik und der Theorie der Schwarzen Löcher. Der amerikanische Röntgensatellit **Chandra** wurde ihm zu Ehren so getauft.

4.6.1 Ganz schön dicht

Diese Massendomäne kompakter Objekte ist gerade typisch für Weiße Zwerge, der kompakten Endkonfiguration eines massearmen Sterns, wie der Sonne. Das Elektronengas im Innern des Sterns wird erst bei hohen Dichten relativistisch, ab etwa 10^6 g cm^{-3}. In normalen Sternen ist das nicht gegeben. Erst wenn er am Ende seiner stellaren Entwicklung im Gravitationskollaps kollabiert, kann der kompakte Kern im Innern ein relativistisches Elektronengas bilden. Die Objekte nahe an der Chandrasekhar-Grenzmasse sind daher typischerweise Weiße Zwerge. Aber auch viel leichteren Braunen Zwerge werden durch den Entartungsdruck stabilisiert.

4.6.2 Wenn Quanten drücken

Nein, hier drückt nicht der Schuh, sondern es sind quantenmechanische Teilchen, die sich gegen weitere Kompression wehren. Doch oberhalb der Chandrasekhar-Masse, kann der Stern nicht mehr durch den **Entartungsdruck relativistischer Elektronen** im hydrostatischen Gleichgewicht gehalten werden und muss zu einem noch kompakteren Objekt kollabieren, beispielsweise einem Neutronenstern, Magnetar, Quarkstern oder bei sehr großer Überschreitung der Massengrenze zu einem stellaren Schwarzen Loch (oder zu alternativen Objekten wie Gravasternen oder Holosternen?).

4.6.3 Quantenstatistik: Fermionen sind ungesellig

Es folgt nun eine kurze Skizzierung, wie man auf den Zahlenwert der Chandrasekhar-Grenze kommt. Erst die *Fermi-Dirac-Statistik* für Fermionen (Spin1/2-Teilchen), die 1926 entdeckt wurde, ermöglicht eine Beschreibung des Innern kompakter Objekte, die jedoch noch aus Elektronen, Nukleonen und Atomkernen bestehen. Anschaulich gesprochen kann man ein ideales Fermigas nicht beliebig komprimieren: das Pauli-Prinzip verbietet, dass Fermionen (wie Elekronen oder Neutronen) einen gleichen Quantenzustand besetzen können. Anders

gesagt, setzen die Fermionen bei Kompression des Fermigases einen Druck entgegen, den Entartungsdruck der Elektronen. Der Entartungsdruck kann durch Integration über die Impulskugel von Impuls null bis zum Fermi-Impuls berechnet werden. Der Gravitationskollaps wird daher unterhalb der Chandrasekhar-Grenze gestoppt: es bildet sich eine stabile, stellare, aber kompakte Konfiguration aus: ein Weißer Zwerg.

Mathematisch geht man von der Bedingung für hydrostatisches Gleichgewicht aus und setzt eine polytropische Zustandsgleichung an. Die Einführung dimensionsloser Variablen führt dann auf die *Lane-Emden-Gleichung*, die fundamental ist in der Stellarphysik und numerisch gelöst werden kann. Die bekannten Gleichungen für Masse und Radius eines Sterns führen auf **Masse-Radius-Beziehungen** für entartete Sterne, die noch vom Polytropenindex n abhängen. Nun kann man zwei Regime unterscheiden:

- ◇ den nicht-relativistischen Fall $n = 3/2$
- ◇ und den relativistischen Fall $n = 3$.

4.6.4 Eine Frage der Zusammensetzung

Der letzte Fall für relativistische Elektronen, der typischerweise für Dichten größer als 10^6 g cm^{-3} erfüllt ist, zeigt **keine Abhängigkeit** mehr vom Radius bzw. von der Zentraldichte, sondern nur eine schwache Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung. Sie wird parametrisiert durch den Parameter Y_e:

$$\frac{1}{\mu_\mathrm{e}} \equiv Y_\mathrm{e} = \sum_i \frac{Z_i X_i}{A_i},$$

dabei gilt

$$\sum_i X_i = 1.$$

Eine realistische Annahme aus der Kenntnis thermonuklearer Fusionsprozesse im Innern massearmer Sterne ist, dass infolge des Wasserstoffbrennens (siehe pp-Kette) und des CNO-Zyklus der kompakte Sternkern zu gleichen Teilen (Parameter X_i) aus Helium, Kohlenstoff und Sauerstoff besteht. Das führt gerade auf einen Parameter für die chemische Zusammensetzung von $\mathrm{Y}_e = 0.5$ (wobei Z_i die Kernladungs- oder Ordnungszahl und A_i die Atommasse des Elements i bezeichnet). Bei diesem Zahlenwert kommt man auf die Chandrasekhar-Grenze, die dann bei 1.4587 Sonnenmassen liegt (siehe erste Abbildung). Diese Massengrenze kann durch starre Rotation des Weißen Zwergs nicht wesentlich verändert werden: die Zentrifugalkraft hat demnach keinen gravierenden Effekt in der Gleichung für hydrostatisches Gleichgewicht.

Die Weißen Zwerge befinden sich gerade am **relativistischen Limit**, so dass die eigentlich zu verwendenden *Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichungen* für das Innere des Weißen Zwergs nur eine kleine Korrektur bringen. Die Newtonsche Näherung reicht also aus.

4.6.5 Es geht noch dichter

Das Chandrasekhar-Modell erfährt eine Korrektur bei sehr hohen Zentraldichten ab 1.14 $\times$ 10^9 g cm^{-3}. Dann setzt der **inverse Beta-Zerfall** ein. Dies wird ausführlich bei den Neutronensternen diskutiert, weil hier diese Reaktionen von höherer Relevanz sind.

Hamada und *Salpeter* haben 1961 Korrekturen zur Chandrasekhar-Theorie entarteter, relativistischer Sterne angebracht, die für ein Fermigas aus Elektronen und Atomkernen bis zu Dichten von etwa 10^{11} g cm^{-3} gelten. Die Elektronen sind dabei homogen in einem Ionengitter verteilt und wechselwirken miteinander über die klassische **Coulomb-Wechselwirkung**. Außerdem wechselwirken die Spins der Elektronen untereinander und können Energie austauschen. Daraus konnten sie die **niedrigstmögliche Grenzmasse** auf 1.015 Sonnenmassen bestimmen, ein Wert, der 1971 von *Baym, Pethick* und *Sutherland* im Wesentlichen bestätigt wurde.

4.6.6 Kohlenstoff-Sauerstoff- und Eisen-Zwerge

Die Hipparcos-Mission hat die Daten einiger Weißer Zwerge enthüllt, die sich in visuellen Binären befinden: die Masse folgt aus dem Dritten Kepler-Gesetz; der Radius kann aus dem gemessenen Fluss bei bekannter Distanz abgeleitet werden. Damit sind Masse-Radius-Beziehungen messbar! Legt man die obige Theorie zugrunde, zeigt sich, dass Weiße Zwerge im Wesentlichen entweder aus Kohlenstoff und Sauerstoff (*CO-Zwerge*, wie **Sirius B** und **40 Eri B**) oder großteils aus einem Eisen-Kern bestehen (*Fe-Zwerge*, **Procyon B**, **EG 50**, **GD 140**). Letztgenannte sind wesentlich kompakter und haben kleinere Radien. Die Anreicherung mit Eisen stellt die Theorie der Sternentwicklung auf eine harte Probe, weil massearme Vorläufersterne (wie die Sonne), aus denen Weiße Zwerge hervorgehen, eigentlich **gar kein Eisen** in ihrem Innern fusionieren können!

4.6.7 Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze?

2006 wurde ein Weißer Zwerg entdeckt, der vermutlich die Chandrasekhar-Grenze überschreitet. Das könnte funktionieren, falls der Zwerg außerordentlich schnell rotiert. Einzelheiten hierzu werden unter dem Eintrag Supernova, Abschnitt *Zweifel an der Standardkerze SN Ia* vorgestellt.

4.7 Chaplygin-Gas

Das Chaplygin-Gas (CG) ist eine sehr ungewöhnliche Zustandsgleichung einer Flüssigkeit. Sie wurde ursprünglich von dem russischen Physiker *Sergey Chaplygin* schon 1904 eingeführt, um in der **Aerodynamik** die Kräfte auf Flugzeugtragflächen zu beschreiben. Um 1940 wurde Chaplygins Ansatz nochmals in der Aerodynamik eingesetzt. Erst 2001 entdeckten russische Forscher die Tauglichkeit des Chaplygin-Gases in der **Kosmologie** (*Kamenshchik et al.* 2001). Diese Disziplin wird bisweilen als **Chaplygin-Kosmologie** bezeichnet.

4.7.1 Ein Gas mit vielen Gesichtern

Das Chaplygin-Gas wird in seiner ursprünglichen Form durch die folgende Zustandsgleichung beschrieben:

$$p = -\frac{A}{\rho},\ A > 0.$$

Darin ist p der Flüssigkeitsdruck, ρ die Flüssigkeitsdichte (beide im Ruhesystem der Flüssigkeit) und A ist eine positive Konstante. Betrachten wir folgende Grenzfälle: Bei $\rho \gg A$ wird der Quotient A/ρ klein, d. h. wir haben es mit einer Art Staub ($p = 0$) zu tun. Bei $\rho \ll A$

wird der Quotient A/ρ groß und der Druck p insbesondere negativ und groß. Das ist eine Art extreme Form Dunkler Energie, die verwandt ist mit der Phantom-Energie. Die Theoretiker nennen das ein 'Phantom-Chaplygin-Gas'. Es verletzt die starke Energiebedingung.

4.7.2 Kosmologie mit Chaplygin-Gas

Beschreibt man nun den Materieinhalt im Universum mit einem CG, so führt dessen Zustandsgleichung dazu, dass im frühen Kosmos sich das Chaplygin-Gas wie Staub (w-Parameter $w = 0$) verhält; in späten Entwicklungsphasen hingegen ändert es sein Verhalten: dann ist es vergleichbar mit einer idealen Flüssigkeit mit *negativem* Druck. Mit anderen Worten: Das CG verhält sich mal wie Dunkle Materie und mal wie Dunkle Energie - es eignet sich damit zur **einheitlichen Beschreibung von Dunkler Materie und Dunkler Energie!** Insbesondere handelt es sich dabei um eine dynamische Ersatzform von Dunkler Energie und kann somit als Alternative zu Quintessenzen (so auch der Titel des Kamenshchik-Papiers) aufgefasst werden. Dabei ist in diesem Ansatz **kein Skalarfeld** involviert, die ja sonst weit verbreitet in der Kosmologie sind (siehe z. B. Cosmon, Radion, Inflaton).

4.7.3 Verallgemeinerungen der Zustandsgleichung

Kamenshchik und seine Kollegen haben die fast hundert Jahre zuvor gefundene Zustandsgleichung verallgemeinert und einen Exponenten α eingeführt. Dann resultiert das **verallgemeinerte Chaplygin-Gas** (engl. *generalized Chaplygin gas*, GCG):

$$p = -\frac{A}{\rho^\alpha},\ A > 0,\ 0 \leq \alpha \leq 1.$$

Der Parameter α liegt zwischen 0 und 1 – ein häufig betrachteter Fall ist $\alpha = 1/3$.

Die großräumige Struktur des Universums weist offensichtlich Inhomogenitäten auf, wie astronomische Beobachtungen zeigen. Deshalb scheint es erstrebenswert, die eine Phase des Chaplygin-Gases, nämlich drucklosen Staub ($p = 0$, also auch $w = 0$), durch eine Materieform mit Druck zu ersetzen. Tatsächlich ist es möglich, eine solche Verallgemeinerung in Gestalt eines **inhomogenen Chaplygin-Gases** einzuführen (*Bilic et al.* 2002). Das gelingt durch Berücksichtigung eines neuen Potentialterms im Lagrange-Fuktional.

Das Chaplygin-Gas birgt auch eine interessante Anwendung in der Physik kompakter Objekte, weil man die Blase Dunkler Energie im Innern von Gravasternen mit einem Chaplygin-Gas auffüllen kann. Dieser kompakte Stern wird **Chaplygin-Gravastern** genannt.

4.7.4 Vor- und Nachteile des Chaplygin-Gases

Der Vorteil des CG-Modells ist, dass es ebenfalls die astronomisch beobachtete **beschleunigte Expansion** des Universums zu erklären vermag. Eine weitere gute Eigenschaft ist, dass Dunkle Materie und Dunkle Energie vereinheitlicht werden - Physiker halten ja generell viel von Vereinheitlichung.

Den Preis, den man dafür zahlt ist, dass man eine sehr seltsame Zustandsgleichung physikalisch ernst nehmen muss. Das wird nicht jedem Astrophysiker leicht fallen.

4.7.5 Tests & Fürsprecher

Das Chaplygin-Gas ist eine dynamische Energieform, die insbesondere eine **Zunahme der kosmologischen Konstante** vorhersagt. Sollte das beobachtet werden, würde das zumindest dem CG-Modell Zulauf verschaffen.

Unter gewissen Voraussetzungen folgt die CG-Zustandsgleichung auch im Rahmen der Stringtheorien.

4.7.6 Papiere

- ◇ *Kamenshchik, A., Moschella, U. & Pasquier, V.*: An alternative to quintessence, Phys. Lett. **B 511**, 265, 2001; als Preprint gr-qc/0103004
- ◇ *Bilic, N, Tupper, G.B. & Viollier, R.D.*: Unification of dark matter and dark energy: the inhomogeneous Chaplygin gas, Phys. Lett. **B 535**, 17, 2002

4.8 Chiralität

Die Chiralität oder **Händigkeit** (grch. *cheir*: Hand) ist eine Eigenschaft von Elementarteilchen, also in der Sprache der Teilchenphysiker eine Quantenzahl. Für masselose Teilchen ist die Chiralität identisch mit der Helizität, also der Projektion des Spinvektors des Teilchens auf die Bewegungsrichtung (Definition über das Skalarprodukt). Für masselose Teilchen bleibt die Chiralität erhalten. Eine **Erhaltungsgröße** ist auf eine Symmetrie zurückzuführen (*Noether-Theorem*), die man hier **chirale Symmetrie** nennt.

4.8.1 Wozu eine Links-Rechts-Symmetrie?

Diese Symmetrie bezieht sich auf die Lagrangedichte der Quantenchromodynamik (QCD). Offensichtlich ist diese chirale Symmetrie gebrochen, denn wir beobachten ebenso massebehaftete Teilchen. Im **Peccei-Quinn-Modell** (1977) nimmt man daher - analog zum Higgs-Mechanismus - weitere Higgs-Felder an, die gerade die chirale Symmetrie spontan brechen: die **pseudoskalaren Axionen**. Dieses Teilchen ist ein Favorit für die hadronische kalte Dunkle Materie, wurde aber bisher *nicht* experimentell nachgewiesen.

4.9 Christoffel-Symbol

Das Christoffel-Symbol heißt auch *Levi-Civita-Zusammenhang* (engl. *Levi-Civita connection*) oder affiner/metrischer Zusammenhang. Es ist eine mathematische Größe in der Differentialgeometrie und insbesondere in der **Allgemeinen Relativitätstheorie** (ART). Das Christoffel-Symbol eignet sich, um die **Krümmung** einer Raumzeit ausrechnen zu können.

4.9.1 Berechnung

Der Levi-Civita-Zusammenhang ist im Prinzip eine Summe von partiellen Ableitungen der Metrik, wie die folgende Definitionsgleichung zeigt:

$$\Gamma^{\kappa}_{\lambda\mu} = \left\{ \begin{matrix} \kappa \\ \lambda\mu \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{\kappa\nu} (\partial_\lambda g_{\nu\mu} + \partial_\mu g_{\nu\lambda} - \partial_\nu g_{\lambda\mu}).$$

Die Gleichheit der Klassen von affinen und metrischen Geodäten einer pseudo-Riemannschen Mannigfaltigkeit erfordert zwingend das Verschwinden der kovarianten Ableitung des metrischen Tensors (siehe auch Linienelement). Dann ist der metrische Zusammenhang notwendigerweise symmetrisch, d. h. für die Gleichung oben, dass Vertauschen der Indizes λ und μ bei Γ den Levi-Civita-Zusammenhang nicht verändern.

4.9.2 Christoffel-Symbole in der Praxis

Die Berechnung der Christoffel-Symbole ist erforderlich, wenn man die Einsteinschen Feldgleichungen einer beliebigen Metrik, wie z. B. die Schwarzschild-Lösung oder die Kerr-Lösung in der ART formulieren möchte. Man kann sagen, dass die Christoffel-Symbole der ART die Rolle der Newtonschen Gravitationskraft übernehmen. Die Christoffel-Symbole enthalten *erste* Ableitungen der Metrik. Der Riemannschen Krümmungstensor berechnet sich wiederum aus ersten Ableitungen der Christoffel-Symbole, d. h. er enthält *zweite* Ableitungen der Metrik. Aus dem Riemann-Tensor berechnet man durch Verjüngung schließlich den Einstein-Tensor und folgert so die Feldgleichungen - nun spezifiziert auf eine bestimmte Metrik. Die Krümmungseigenschaften und die Dynamik der Raumzeit stecken in dieser fundamentalen Gleichung der Einsteinschen Gravitation.

4.9.3 Torsionsfreiheit

Die Symmetrie der Christoffel-Symbole hat weitere Konsequenzen, wie man an der Definition des Torsionstensors (in dem Eintrag dort) betrachtet. Der Torsionstensor ist ein Tensor vom Typ (1,2), der aus einer Differenz von Christoffel-Symbolen - die selbst **keine Tensoren** sind! - gebildet wird. Bei einem symmetrischen Zusammenhang verschwindet dieser Torsionstensor. Mit anderen Worten: Einsteins ART ist eine **torsionsfreie** Gravitation!

4.9.4 Gravitation mit Torsion

Die Torsionsfreiheit wird in manchen alternativen Gravitationstheorien aufgegeben. Einstein hat 1928 selbst in der Theorie vom **Fernparallelismus** einen solchen Ansatz gewählt, um Gravitation und Elektromagnetismus in einer neuen Feldtheorie zu vereinheitlichen. Er scheiterte zwar, aber in der modernen Gravitationsforschung werden weiterhin solche Gravitationstheorien mit Torsion unter der Bezeichnung **fernparallele Gravitation** (engl. *teleparallel gravity*) erforscht. Eine Übersicht der Themen in der aktuellen Gravitationsforschung wird im Lexikoneintrag Gravitation vorgestellt.

4.10 CMB

Ein englisches Akronym, das *cosmic microwave background* bedeutet, manchmal auch als **CMBR** zu lesen, dann bedeutet es *cosmic microwave background radiation*. Damit bezeichnet man die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung oder Drei-Kelvin-Strahlung.

4.11 CNO-Zyklus

Ein wesentlicher Mechanismus zur Energiegewinnung aus thermonuklearer Fusion (siehe diesen Link für Details) in massearmen bis mittelschweren Sternen. In der Sonne ist

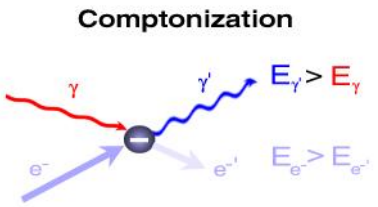

Abbildung 4.3: Comptonisierung.

der CNO-Zyklus (auch *Bethe-Weizsäcker-Zyklus* genannt) nur marginal relevant. Die Kernfusionsreaktionen beim CNO-Zyklus sind **heterogen**, d. h. es verschmelzen immer Kerne unterschiedlicher Elemente miteinander.

4.12 Comptonisierung

Unter Comptonisierung versteht man einen speziellen Vorgang, bei dem Strahlung durch Streung an einem Teilchen Energie gewinnt.

4.12.1 Etwas genauer gesagt...

Comptonisierung (engl. *Comptonization*) ist ein weit verbreiteter Begriff in der Astronomie und ist ein Ersatzwort für **inverse Compton-Streuung** (oft kurz IC). Etwas komplizierter formuliert als zu Beginn wird aus niederenergetischer Strahlung durch die Streuung an hochenergetischen Teilchen (z. B. ultrarelativistischen Elektronen) hochenergetische Strahlung. Man beschreibt Comptonisierung mathematisch mit einer komplizierten Integro-Differentialgleichung, der **Kompaneets-Gleichung**, die man numerisch für vorgegebene Elektronenverteilungen, Eingangsstrahlung und Geometrien lösen muss. Numerische Comptonisierung ist ein außerordentlich kompliziertes Gebiet der theoretischen Astrophysik. Lösungen findet man dabei nur durch starke Vereinfachungen oder Ausnutzung von Symmetrien.

4.12.2 Bezug zur Astrophysik

Der Comptonisierungsprozess spielt vor allem bei der Akkretion auf stellare Schwarze Löcher in Röntgendoppelsternen und supermassereiche Schwarze Löcher in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) eine gewichtige Rolle. In einer heißen Korona, die sich vermutlich sehr nahe am Ereignishorizont des Loches befindet, treffen weiche 'Saat-Photonen' der kalten Standardscheibe oder weiche Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMBR) auf heiße, ultrarelativistische Elektronen. Dabei werden sie zu hohen Energien (Röntgen- oder Gammaquanten) hin gestreut und kühlen auf diese Weise das heiße Plasma der Korona. Man sagt, die niederenergetische Eingangsstrahlung der Umgebung wurde *Comptonisiert*. Die Abbildung 4.3 illustriert schematisch den Streuakt. Links laufen ein hochenergetisches ('heißes') Elektron und ein niederenergetisches Photon (rot dargestellt) ein. Im Zentrum ereignet sich die inverse Compton-Streuung. Danach laufen rechts ein hochenergetisches Photon (blau dargestellt) und ein niederenergetisches ('gekühltes') Elektron aus.

4.12.3 Comptonisierte Spektren

Im Spektrum offenbart sich dieser Strahlungsprozess als **breites Kontinuum** vom keV- bis in den MeV-Bereich (oder mehr) hinein. Zu hohen Energien gibt es im Spektrum einen **charakteristischen, exponentiellen Abfall** (engl. *exponential cut-off*), aus dessen Lage man direkt die Plasmatemperatur der Korona ableiten kann!

Die Dynamik und Morphologie von Akkretionsflüssen wird entscheidend geprägt von **Magnetfeldern**. Das Plasma in Akkretionsscheiben lässt sich wie eine geladene Flüssigkeit beschreiben. Das ist die Domäne der Magnetohydrodynamik, einer elektrodynamischen Erweiterung der *Navier-Stokes Gleichungen* der Hydrodynamik. Magnetfelder sind in heißen Quellen allgegenwärtig: Sie werden vom Plasma mitgeschleppt, deformiert und befinden sich auch vor dem galaktischen Hintergrund. Deshalb kommt es zur Emission von Synchrotronstrahlung, wenn geladene Spezies des Plasmas in Magnetfeldern beschleunigt werden. Diese Strahlung hat einen Bezug zur Comptonisierung. Denn auch die Synchrotronstrahlung kann die erforderlichen Saatphotonen stellen, die Comptonisiert werden. Wenn an dem Plasma, das die Synchrotronstrahlung emittiert *selbst* die Comptonisierung stattfindet, spricht man von **Synchrotron Selbst-Comptonisierung** (engl. *synchrotron self-compton*, **SSC**). Im Spektrum lässt sich das identifizieren, weil neben dem charakteristischen, niederenergetischen 'Synchrotronbuckel' ein hochenergetischer 'Comptonisierungsbuckel' auftritt. Diese Spektren beobachtet man insbesondere bei einigen Jets von AGN. Der Synchrotronbuckel befindet sich hier im Radiobereich, während man den Comptonisierungsbuckel im Röntgenbereich beobachtet.

Wie angedeutet, spielen die heißen Elektronen die Rolle der Streuzentren für die Comptonisierung in der Korona. Interessant ist die Frage, welche Ansätze für die **Elektronenverteilungen** gemacht werden können. Elektronenverteilungen geben die Anzahl der Elektronen - die *Häufigkeit* - über ihrer Geschwindigkeit oder besser ihrer Energie wider. In der klassischen Gastheorie kennt man die *Maxwell-Verteilung*. Sie ordnet jedem Geschwindigkeitswert eine bestimmte Anzahl an Gasteilchen zu. Typischerweise steigt die Maxwell-Verteilung steil an, fällt wieder ab und zeigt einen langen aber flachen Ausläufer der Verteilung bei hohen Geschwindigkeiten/Energien: den 'Maxwell-Schwanz' (engl. *Maxwellian tail*). Die Elektronen in der Korona verhalten sich bei den typischen, hohen Koronatemperaturen von 10^5 bis 10^7 Kelvin nicht mehr wie ein klassisches Maxwell-Gas. Sie sind sehr schnell, d. h. *relativistisch*. Ist die Elektronenverteilung **thermisch** beschreibt man sie mit einer relativistischen Maxwell-Verteilung. Die Emission dieser Verteilung heißt in der Astrophysik **Zyklotronstrahlung** (engl. *cyclotron radiation*). Ist die Elektronenverteilung **nicht-thermisch** und ultrarelativistisch, verwendet man Potenzgesetze, die bei kleinen und hohen Energien abgeschnitten werden. Erst diese nicht-thermische Emission ist die **Synchrotronstrahlung** (engl. *synchrotron radiation*).

In kosmischen Quellen findet man häufig beide Strahlungsformen. Solche Modelle werden für das **Zentrum der Milchstraße** angewendet, um die Beobachtungsdaten verschiedener Spektralbereich anzupassen. Bei der kompakten Radioquelle Sgr A* befindet sich ein supermassereiches Schwarzes Loch von drei bis vier Millionen Sonnenmassen. Es wird kaum mit Gas versorgt, um zu akkretieren. Deshalb ist der Strahlungsfluss stark unterdrückt - eine große Herausforderung für die Theoretiker.

4.13 Cosmon

Dies ist die Interpretation des skalaren Feldes der Quintessenz als sehr leichtes Teilchen. Man findet es auch eingedeutscht unter der Bezeichnung *Kosmon*.

4.14 C-Prozess

Der C-Prozess, meist eher **Kohlenstoff-Brennen** genannt, ist ein wichtiger Mechanismus zur Energiegewinnung aus thermonuklearer Fusion (siehe diesen Link für Details) in mittelschweren Sternen ab etwa vier Sonnenmassen.

Das C bezieht sich auf das Element Kohlenstoff, das bei diesen Reaktionen fusioniert wird. Die Asche dieser Prozesse sind im Wesentlichen Sauerstoff (O), Natrium (Na), Neon (Ne) und Magnesium (Mg).

5 Lexikon D

5.1 Deep Fields

Die extrem lang belichteten Fotos von Himmelsarealen heißen im Jargon **deep fields** (dt. wörtlich: 'tiefe Felder'), weil durch die lange Belichtungszeit extrem weit entfernte und dunkle Objekte - in der Regel Galaxien - auf dem Foto zum Vorschein kommen. Gelegentlich liest man den deutschen Begriff *Tiefenfeldbeobachtungen* als Übersetzung von *deep fields* oder *deep field observations*.

5.1.1 Technische Finessen

Das Himmelsfeld, das mit den Teleskopen fotografiert wird, ist typischerweise so groß, wie die Fläche des Vollmondes (etwa Bruchteile von bis einige Quadratgrad). Das Areal muss gut ausgewählt werden, so dürfen z. B. keine hellen Sterne im Vordergrund (engl. *foreground stars*) stören, weil das zur Überbelichtung führen würde. Der ebenfalls strahlende *Hintergrund* (engl. *background*) muss gut bekannt sein, damit der Astronom die Leuchtkraft der ihn interessierenden Quelle richtig einordnet. Typischerweise wird eine astronomische Deep-Field-Quelle erst interessant, wenn die Belichtungszeit einige Tage überschreitet. Der Astronom kann jedoch nicht ununterbrochen sein Teleskop bei solch langen Zeiten auf die Quelle richten. Deshalb werden in einem gewissen Zeitabstand Einzelaufnahmen vom immer wieder gleichen Himmelsfeld gemacht, die hinterher mittels Computersoftware zu einem einzigen Deep Field kombiniert werden. Dabei betragen die Einzelbelichtungszeiten nur wenige Stunden.

5.1.2 HDF-N: Die Mutter aller deep fields

Die Deep-Field-Beobachtungen sind ein sehr modernes und aktives Feld der Astronomie und werden **in allen Wellenlängenbereichen** der elektromagnetischen Strahlung betrieben. Begonnen hat es im Optischen mit dem Weltraumteleskop *Hubble*. Im Januar 1996 wurde das Ergebnis von zehn aufeinander folgenden Beobachtungsnächten (vom 18. bis 28. Dezember 1995) präsentiert: das *Hubble Deep Field - North, HDF-N*, siehe Foto 5.1 (Credit: *Robert Williams and the Hubble Deep Field Team* STScI/NASA 1996). Dieses HDF-N besteht aus 276 Einzelbildern, die im *Großen Wagen* (ziemlich genauer oberhalb des Punktes, wo die Deichsel an den Wagen angreift) aufgenommen wurden. Somit erklärt sich das Attribut *North*, weil es sich um ein Deep Field am Nordhimmel handelt. Diese Bilder wurden zu einem einzigen Deep Field zusammengefügt. Das Schöne an dem Bild ist, dass die **Tiefe des Alls in Echtfarben** abbildet wird, so wie sie sich unserem Auge darstellen würde, wenn wir so lange belichten und so scharf gucken könnten.

5.1.3 Und was sehen wir?

Das All ist bunt! Keine tiefe Schwärze, sondern ein farbfrohes Gewimmel von Galaxien in den unterschiedlichsten Entwicklungszuständen breitet sich vor dem faszinierten Betrachter

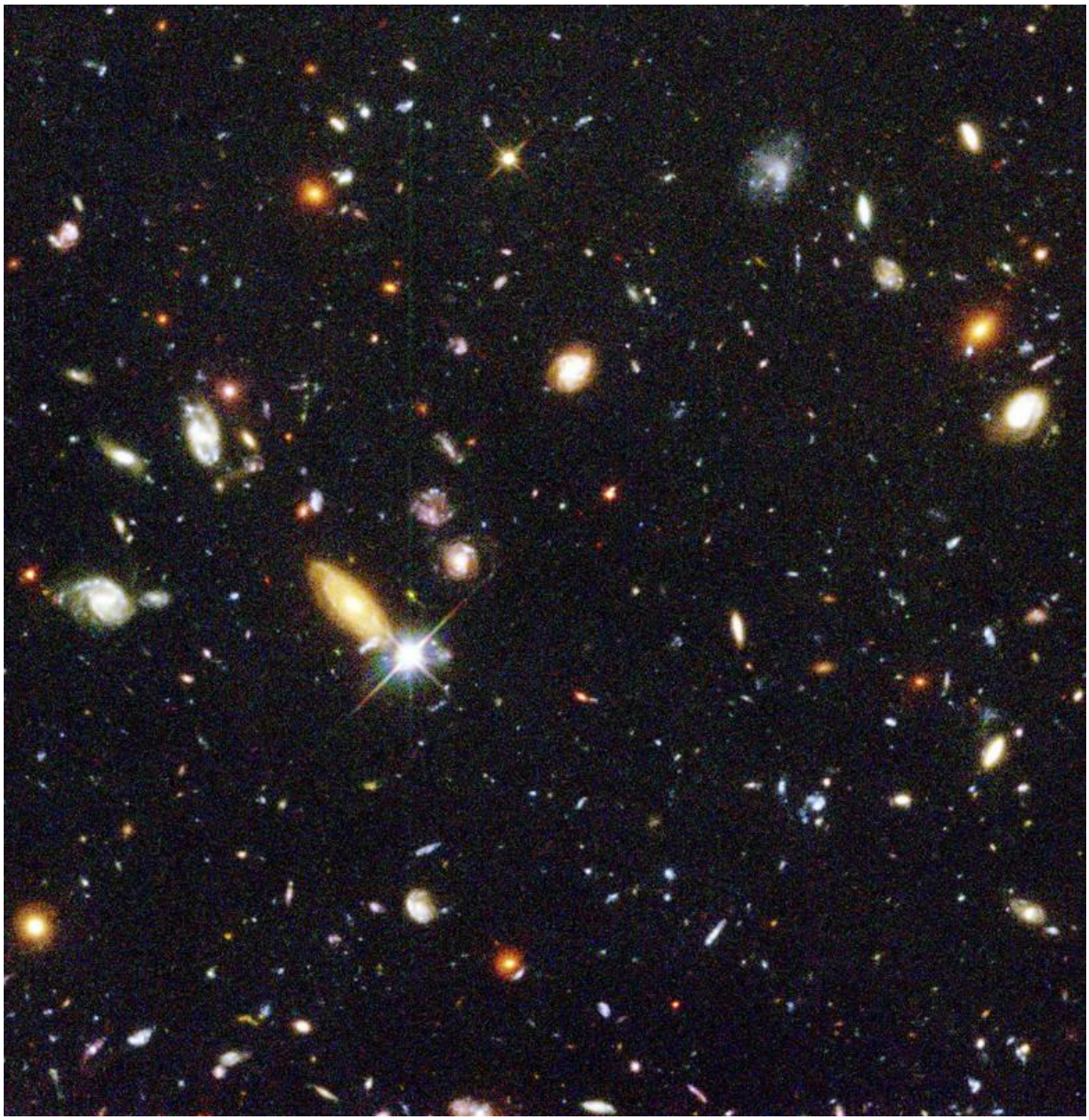

Abbildung 5.1: Hubble Deep Field - North von 1996.

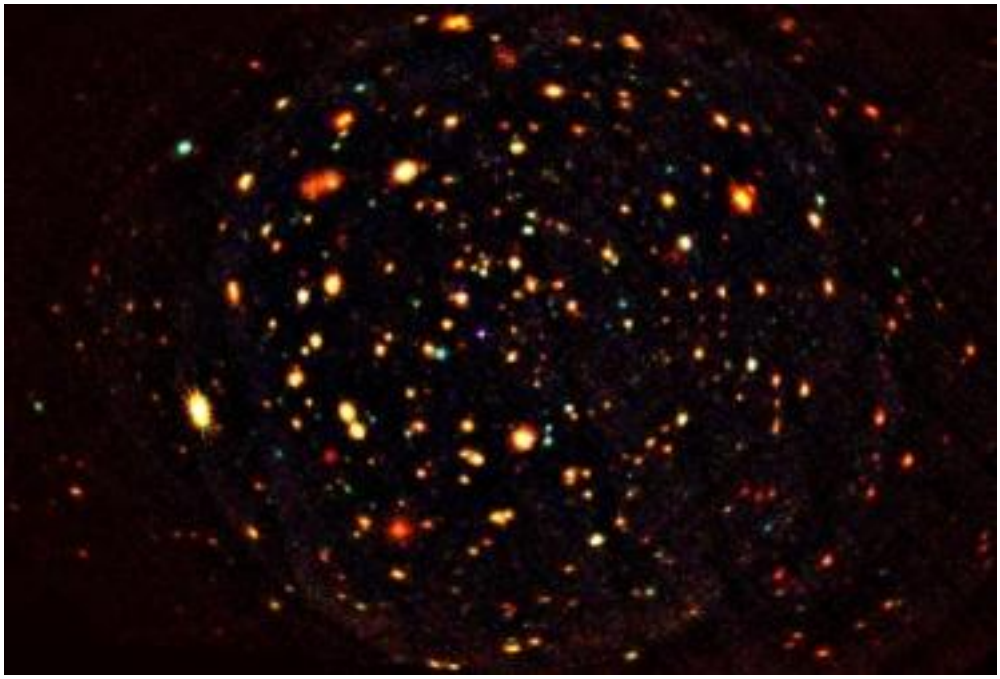

Abbildung 5.2: Lockman Hole Deep Field 2005.

aus! Das HDF-N enthält (gemäß Auswahlkriterium) kaum Vordergrundsterne, sondern nur Galaxien. Ihre Farben verraten etwas über ihre Natur und Entfernung, denn aufgrund der kosmologischen Rotverschiebung rötet und verdunkelt sich die Strahlung mit zunehmender Entfernung wegen der Expansion des Universums.

Der Informationsgehalt von Deep Fields ist für Astronomen von unschätzbarem Wert, weil sie aus der Analyse der Einzelspektren einer jeden Quelle im Bild sich ein **Bild vom Kosmos in 3D** machen können. So folgt (mit etwas Glück und viel Können) für jede Galaxie die Leuchtkraft (Aktivität), Zusammensetzung (Metallizität), Morphologie (Hubble-Typ), Sternentstehungsrate etc. in unterschiedlichen Epochen, also Entfernungen. Die Astronomen betreiben mit diesen Daten Kosmologie und erforschen die **Strukturbildung** im Universum. Eine Schlüsselfrage lautet: Wie sind Galaxien überhaupt entstanden?

5.1.4 Harte Strahlung verrät Lochwachstum

Eine brisante Forschungsfrage, die mit Deep Fields untersucht wird, ist die Entstehung und Entwicklung von supermassereichen Schwarzen Löchern (SMBHs), von denen es mindestens ein Exemplar im Zentrum einer (fast) jeden Galaxie gibt. In der Nähe Schwarzer Löcher geht es turbulent und hochenergetisch zu. Deshalb nutzen die Astronomen hier Strahlung mit sehr hoher Energie, nämlich Röntgenstrahlung (einige wenige bis einige zehn keV).

Das Foto 5.2 zeigt ein Deep Field, gewonnen aus Röntgenstrahlung, die mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton eine Woche lang aufgesammelt wurde. Damit wir es betrachten können, muss jeder 'Röntgenfarbe' eine der Grundfarben zugeordnet werden - sonst wäre das Foto für uns unsichtbar! Es ist in der Röntgenastronomie weit verbreitet den Energiebereich der Strahlung von 0.5-2 keV rot, von 2-4.5 keV grün und von 4.5-10

keV blau darzustellen. Das Foto ist das so genannte *Lockman Hole X-ray Deep Field*, ein Deep Field im Röntgenbereich, das im Himmelsfeld des Lockman Hole aufgenommen wurde (Credit: *Günther Hasinger et al.* 2005, ESA/XMM-Newton). Das Lockman Hole zeichnet sich durch besondere Transparenz aus, weil das intergalaktische Gas in dieser Blickrichtung dünn verteilt ist (deshalb *hole*, dt. 'Loch'). Astrophysiker beschreiben das so, dass die Säulendichte von neutralem Wasserstoff (HI) im Lockman Hole besonders niedrig ist, $N_{\mathrm{H}} \sim 5.7 \times 10^{17}$ cm^{-2}. Diese Entdeckung hat der Astronom *Felix Lockman* 1986 gemacht.

5.1.5 Verdanken Menschen ihre Existenz Schwarzen Löchern?

Die bunten Quellen sind vor allem Aktive Galaktische Kerne (AGN), etwa hundert Stück, deren extreme Leuchtkraft von zentralen superschweren Löchern gespeist wird. Dadurch dass die AGN unterschiedliche Entfernungen haben und Rotverschiebungen bis zu $z \sim 4$ erreichen, sehen wir hier SMBHs in ganz unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Wir blicken daher etwa 12 Mrd. Jahre in die Vergangenheit und sehen den frühen Kosmos, in dem es weder Erde, noch unsere Sonne gab! Röntgen-Deep-Fields verraten somit etwas über das Lochwachstum (engl. *black hole growth*) und den Entwicklungszusammenhang zwischen Galaxie und zentralem Loch. Eine aktuell diskutierte Frage ist z. B. was zuerst da war: die Galaxie oder das Loch? Diese Frage kursiert auch als Huhn-Ei-Problem (engl. *hen-egg problem*), weil hier genauso wenig klar ist, wer zuerst da war. Klar ist: es handelt sich um einen ganz gravierenden Fall von Lochfraß.

5.1.6 Ambitionierte Großprojekte

Deep Fields helfen diese kosmologischen Fragen der Strukturbildung zu lösen. Astronomen versuchen dabei sämtliche Möglichkeiten auszuschöpfen und bündeln daher sowohl ihre technischen, als auch ihre finanziellen Ressourcen. In modernen, internationalen Großprojekten findet eine weltumspannende Zusammenarbeit statt. Astronomen knöpfen sich ein ausgewähltes Himmelsfeld vor und blicken salopp gesagt mit allem darauf, was sie haben! Eines dieser Projekte ist COSMOS, bei dem die Weltraumteleskope XMM und Chandra (beide Röntgen), Hubble (optisch), Spitzer (Infrarot) und GALEX (UV, geplant) sowie verschiedene, erdgebundene Teleskope Beobachtungsdaten von einem zwei Quadratgrad großen Himmelsfeld sammeln. Die Datenmenge ist immens, so befinden sich z. B. zwei Millionen Galaxien im Deep Field. Der erste Schwung der Datenflut wird zurzeit analysiert und interpretiert.

5.1.7 Weblinks

- ◇ Hubble Deep Field - North auf der Website des Weltraumteleskops Hubble: noch mehr Bild- und Informationsmaterial
- ◇ Das internationale COSMOS-Projekt am CalTech und XMM-COSMOS am MPE (Projektkoordinator: *Günther Hasinger*)

5.2 Derricks Theorem

Nein, dieses Theorem besagt nicht, dass grundsätzlich Harry den Wagen vorfährt. Es handelt sich nicht um eine Krimiseriengesetzmäßigkeit, sondern um seriöse Skalarfeldtheorie. Damit

niemand im Dunkeln tappert, hier die Kernaussage des Derrick-Theorems (nach *G.H. Derrick* 1964):

Es gibt keine stabilen, zeitunabhängigen Skalarfeldlösungen in einer flachen 4D Raumzeit

Schon eine zeitabhängige Phase im (komplexwertigen) Skalarfeld kann dieses Theorem umgehen. Diese Regel kann bei Stabilitätsbetrachtungen von **Bosonensternen** in der Astrophysik kompakter Objekte verwendet werden.

5.3 de-Sitter-Kosmos

Ein relativistisches Modell des ganzen Universums, das wichtig ist für die Kosmologie. Das de-Sitter-Universum ist dynamisch, aber **materiefreie** und wurde von dem holländischen Astronom *Willem de Sitter* bereits im Jahr 1917 entwickelt. Dieser Kosmos ist flach und hat eine **positive kosmologische Konstante**.

5.3.1 Zum Pionier

Willem de Sitter (1872 - 1934) studierte Mathematik in Groningen in den Niederlanden. Später arbeitete er dort im astronomischen Labor. Kurz vor der Jahrhundertwende war er am Cape-Observatorium in Süd-Afrika und ab 1908 Professor für Astronomie an der Universität Leiden. 1919 wurde er Direktor an der Sternwarte Leiden. Wir verdanken de Sitter Arbeiten zur Sternverteilung in der Milchstraße und vor allem das de-Sitter-Universum aus dem Jahr 1917 - im gleichen Jahr erfand Einstein die kosmologische Konstante Λ. Kollege de Sitter, der mit Einstein zu dieser Zeit Kontakt pflegte, hat ein dynamisches Konkurrenz-Modell zu Einsteins statischem Universum vorgelegt. 1932 publizierten beide ein neues Modell, das **Einstein-de-Sitter-Universum**.

5.3.2 Weit weg von der Wirklichkeit

Materiefreiheit ist natürlich eine schlechte Eigenschaft, um das reale Universum beschreiben zu wollen, wissen die Astronomen doch um große Mengen an baryonischer Materie, Dunkler Materie und darüber hinaus von der Dunklen Energie. Aufgrund dieser Eigenschaft verstößt der de-Sitter-Kosmos gegen das Machsche Prinzip. Dennoch ist das de-Sitter-Universum gerade für die theoretische Kosmologie von Interesse. Denn in diesem dynamischen Universum lässt sich gut die Expansion am Modell studieren. Diese Ausdehnung wird getrieben von der kosmologischen Konstante (Einsteins Lambda-Term, Λ), die man hier als eine mögliche Form der Dunklen Energie verstehen kann.

5.3.3 Lösung der Einstein-Gleichungen

Unter dem Gesichtspunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das de-Sitter-Universum eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen *mit* Lambda-Term, aber *verschwindendem* Energie-Impuls-Tensor. Es handelt sich also eigentlich um eine Raumzeit, die auch mit der Bezeichnung *de-Sitter-Lösung* versehen wird. Wenn man nun ein realistischeres Modell aufstellen möchte, so kann man z. B. den Energie-Impuls-Tensor wieder berücksichtigen und die Materie im Kosmos durch eine ideale Flüssigkeit beschreiben. Dann resultieren deutlich kompliziertere Lösungen, die auch anders genannt werden, nämlich Friedmann-Weltmodelle (siehe dort für eine detaillierte Beschreibung).

5.3.4 de-Sitter & Anti-de-Sitter

Die kosmologische Konstante darf im de-Sitter-Modell unterschiedliches Vorzeichen annehmen. Bei positiver kosmologischer Konstante spricht man von der de-Sitter-Raumzeit; bei negativem Vorzeichen der kosmologischen Konstante hingegen von der **Anti-de-Sitter-Raumzeit** (AdS) auf. Diese Energieform, eine 'negative Λ-Flüssigkeit', ist im Gegensatz zur Dunklen Energie anziehend (*attraktiv*). In den Randall-Sundrum-Modellen verwendet man sogar eine höherdimensionale Welt mit fünf Dimensionen. Das Universum dort ist ein fünfdimensionaler Anti-de-Sitter-Raum (AdS_5).

5.3.5 Literaturquelle

- ◇ Website: MacTutor History of Mathematics archive, University of St. Andrews, Scotland; darin die Biographie von W. de Sitter

5.4 DGP-Szenario

Das DGP-Szenario ist ein Branenmodell, das nach den Erfindern ***D**vali*, ***G**abadadze* und ***P**orrati* benannt wurde. Wie in allen Branenmodellen, wird eine höherdimensionale Welt, der so genannte **Bulk** angenommen, d. h. es gibt räumliche Extradimensionen.

5.4.1 Motivation von mehr Raum

Die Motivation für einen solch verwegen anmutenden Vorschlag ist die beobachtete Eigenschaft der Gravitation, dass sie viel schwächer ist, als die anderen drei physikalischen Grundkräfte (elektromagnetische Kraft, schwache Kraft, starke Kraft). Dieses Phänomen wird mit dem Begriff **Hierarchieproblem** betitelt. Das Problem kann dadurch gelöst werden, dass man mehr Raumdimensionen einführt und dass man annimmt, dass nur die Gravitation in diesen Bulk kommen kann, nicht jedoch die anderen Naturkräfte. Freilich handelt man sich mit der eleganten Lösung etwas vollkommen Neues ein: mehr Raum! Leider wird dieses Szenario nicht die schlechte Wohnungssituation in Großstädten entschärfen können, weil Mieter Objekte des Standardmodells sind.

5.4.2 Eigenschaften des DGP-Modells

Sowohl Bran als auch Bulk haben im DGP-Szenario den Charakter der Minkowski-Metrik, d. h. die Raumzeiten sind **flach**, wie in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Der entscheidende Unterschied ist, dass die Welt der SRT vierdimensional (4D) ist, aber der Bulk im DGP-Modell 5D ist - es gibt also **eine Extradimension mehr**. Die Raumzeit der Bran ist hingegen 4D wie in der SRT, weil die Bran (eine *3-Bran*) ein Unterraum des Bulks ist. Die Extradimension ist von der Größe her **unendlich** ausgedehnt, d. h. sie ist **nicht kompaktifiziert**. Die 4D-kosmologische Konstante wurde vereinfachend null gesetzt.

5.4.3 Was leistet das DGP-Modell?

Dieses Bulk-Branenmodell gewährleistet den Übergang zur gewöhnlichen Newtonschen Gravitation in 4D auf der Bran. Genauer gesagt vermitteln bei *kleinen* Abständen die 4D-Gravitonen, die in diesem Szenario auftreten, das klassische 4D-Newton-Potential mit

dem charakteristischen 1/r-Abfall. Bei *großen* Abständen hingegen wird ein entsprechend modifiziertes 5D-Potential bedeutsam, das mit $1/r^2$ skaliert. Das DGP-Modell sagt also voraus, dass eine **modifizierte Gravitation** (engl. *modified gravity*) bei großen Längenskalen einsetzt.

5.4.4 Bei welcher Längenskala verändert sich die Gravitation?

Die Übergangslängenskala r_0 ist im Modell ein freier Parameter und hängt von der 5D-Planck-Masse (im Bulk) und der 4D-Planck-Masse (auf der Bran) ab. Die klassische (4D-)Planckskala liegt bei etwa 10^{19} GeV. Nimmt man für den Bulk eine *reduzierte* Planckskala von 1 TeV an, so liegt die Übergangslängenskala gerade im Bereich der Größe des Sonnensystems ($r_0 \sim 10^{15}$ cm). Das würde bedeuten, dass für kosmisch deutlich größere Distanzen, die einige 10 bis 100 Astronomische Einheiten deutlich übersteigen, die Modifikation des Newtonschen Gravitationspotentials zu einem $1/r^2$-Verhalten auftreten sollte. Das wird astronomisch jedoch nicht beobachtet! Entsprechend muss man (im Rahmen dieses speziellen Modells) schließen, dass die Übergangslängenskala um viele Größenordnungen größer bzw. die 5D-Planck-Masse entsprechend deutlich kleiner sein muss, als die TeV-Skala - vielleicht um das 100 bis 1000fache.

Alternativ dazu ist denkbar eine Kompaktifizierung der Extradimensionen zuzulassen. Das geschieht beispielsweise im ADD-Szenario, und es zeigt sich, dass dann eine reduzierte Planck-Skala im TeV-Bereich möglich wäre.

5.4.5 weitere Branenmodelle

Neben dem DGP-Modell gibt es weitere Branenmodelle in der modernen Hochenergiephysik. In jedes Modell gehen unterschiedliche Eigenschaften des Bulk-Branen-Systems und Voraussetzungen ein. Prominente Modelle sind das **ADD-Szenario**, die **Randall-Sundrum-Modelle** und das **Zyklische Universum**.

5.4.6 Originalveröffentlichungen

- ◇ *Dvali, G., Gabadadze, G. & Porrati, M.*: Metastable gravitons and infinite volume extra dimensions, Phys. Lett. **B 484**, 112, 2000
- ◇ *Dvali, G., Gabadadze, G. & Porrati, M.*: 4D gravity on a brane in 5D Minkowski space, Phys. Lett. **B 485**, 208, 2000

5.5 Diffeomorphismus

Von speziellem Interesse unter den Morphismen ist in der theoretischen Physik der **Diffeomorphismus**. Dieser spezielle Homomorphismus ist invertierbar und eine 'glatte' Abbildung.

5.5.1 Einsteins Theorie braucht keine Bühne

Was hat das mit Physik zu tun? Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) diktiert **Diffeomorphismusinvarianz**. Eine treffende und anschauliche Übersetzung dieser Eigenschaft ist **Hintergrundunabhängigkeit**. Ein 'Hintergrund' ist eine nicht-dynamische,

also statische, Struktur, auf der die physikalischen Objekte agieren (siehe auch Hintergrundmetrik). In diesem Sinne ist Hintergrund die *Bühne der Physik*. Die knappe Aussage der ART ist nun, dass es diese statische Bühne nicht gibt! Es ist **nicht** von Belang, *wo* die physikalischen Objekte in einer Raumzeit lokalisiert sind (absolute Positionierung), sondern *wie* sie relativ zueinander stehen (relationale Positionierung). Der Diffeomorphismus bewerkstelligt gerade mathematisch eine 'Verschiebung' der dynamischen, physikalischen Objekte. Die gerade beschriebene Unabhängigkeit (Invarianz) von dieser Verschiebung mündet gerade in die Diffeomorphismusinvarianz (engl. Abkürzung *diff-invariance*). Alle allgemein relativistischen Theorien sind notwendig diffeomorphismusinvariant.

5.5.2 Bezug zur Loop-Quantengravitation

Diese Eigenschaft ist eine wichtige Voraussetzung für die Loop-Quantengravitation (LQG). Weil sie die Konzepte von Quantenmechanik und ART zu vereinen sucht, geht auch die Hintergrundunabhängigkeit wesentlich ein. Damit unterscheidet sie sich deutlich von dem kanonischen Zugang in den Quantenfeldtheorien (QED, QCD etc.) und den Stringtheorien. Denn in beiden Fällen agieren die dynamischen Objekte, die (Eich-)**Felder** *vor* einem Hintergrund. Man kann sagen, dass die konzeptionellen Implikationen der ART in diesen Theorien nicht richtig verinnerlicht sind.

Einer der Pioniere auf dem Gebiet der LQG, der theoretische Physiker *Carlo Rovelli*, drückt es so aus:

'Pictorially, GR is not physics over a stage, it is the dynamical theory of the stage itself.', Übersetzung: 'Anschaulich ist die ART nicht die Physik auf einer Bühne, sondern eine dynamische Theorie der Bühne selbst'.

5.6 differenzielle Rotation

Rotation ist eine wichtige Eigenschaft von Himmelskörpern. Spiralgalaxien rotieren, Sterne rotieren, Planeten rotieren um ihr Zentralgestirn, so auch die Erde um die Sonne, sogar Schwarze Löcher rotieren (Kerr-Lösung).

5.6.1 Drehimpuls in der klassischen Mechanik

Physikalisch ausgedrückt hat ein Körper, der rotiert, **Drehimpuls**. Allgemein berechnet man den Drehimpuls $\mathbf{J}$ in der klassischen Mechanik (unquantisiert, unrelativistisch) mittels des Vektorprodukts aus dem radialen Abstand $\mathbf{r}$ des Teilchens zum Drehzentrum mit dem Impuls des rotierenden Teilchens $\mathbf{p}$: $\mathbf{J} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m\mathbf{v}$. Im letzten Schritt wurde ausgenutzt, dass der Impuls eines Teilchens das Produkt aus Masse m und Geschwindigkeit $\mathbf{v}$ ist.

5.6.2 Rotationsformen

Vergleicht man nun das Rotationsverhalten von Probeteilchen um ein Drehzentrum, so lässt sich unterschiedliches Rotationsverhalten charakterisieren, die in Abbildung 5.3 vorgestellt werden. Zu Beginn, also vor der Rotation, mögen Testteilchen auf einer Linie liegen. Dann setzen zwei unterschiedliche Rotationstypen ein (links gegenüber rechts unten).

Eine **differenzielle Rotation** ist zu unterscheiden von der **starren Rotation**. Bei der starren Rotation rotieren Punkte (Testteilchen in der Abb.) mit verschiedenem

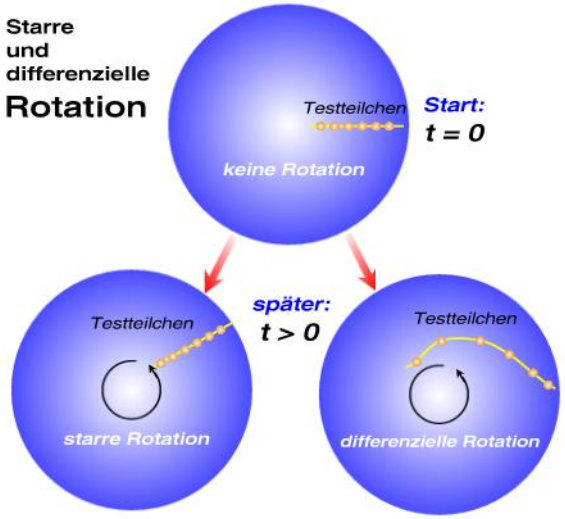

Abbildung 5.3: Starre vs. differenzielle Rotation.

Abstand zum Drehzentrum mit *gleicher* Winkelgeschwindigkeit, also auf einer immer gleich bleibenden Verbindungslinie (mathematisch: die radiale Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ist konstant). Das ist in der Abbildung links unten dargestellt. Die Winkelgeschwindigkeit entspricht übrigens dem Quotienten aus Umlaufgeschwindigkeit und Radius der Bahn. Winkel- und Umlaufgeschwindigkeit sind nicht dasselbe!

Bei der differenziellen Rotation rotieren Punkte verschiedenen Abstands mit *unterschiedlicher* Winkelgeschwindigkeit (die radiale Ableitung der Winkelgeschwindigkeit ist abhängig vom Abstand, Radius). Das ist in der Abbildung recht unten zu sehen. Verständlich wird der Unterschied im Rotationsverhalten anhand von Beispielen: Eine starre Rotation erfüllen alle starren Festkörper (daher der Name), weil sie nicht deformierbar sind, z. B. ein Karussell. Eine differenzielle Rotation ist in einer Kepler-Scheibe, also beispielsweise bei den Planeten im Sonnensystem gegeben. Die Winkelgeschwindigkeit von Merkur ist höher, als die der Erde.

5.6.3 Bezug zu Akkretion und MHD

Differenzielle Rotation ist eine wesentliche Voraussetzung, damit die magnetische Rotationsinstabilität (MRI) funktioniert. Die MRI ist ein wichtiger Mechanismus, der in der Magnetohydrodynamik von Akkretionsflüssen auftritt.

5.7 Distanzmodul

Eine wichtige Relation in der Astronomie, die die Entfernung eines leuchtenden Objekts, beispielsweise eines Sterns, in Bezug setzt zu dessen Helligkeit (dort finden sich weitere Details zum Entfernungsmodul).

Bei ermittelter Distanz r aus Entfernungsbestimmungsmethoden, folgt die **absolute Helligkeit** M daher direkt aus bekannter (weil beobachteter) **scheinbarer Helligkeit** m.

Die Formel lautet:

$$m - M = -2.5 \ \log \frac{F(r)}{F(10)} = 5 \ \log \frac{r}{10\text{pc}}.$$

5.7.1 wichtige Anwendung: Entfernungsbestimmung

Oder umgekehrt, wie es bei Cepheiden, RR Lyrae Sternen, Supernovae Typ Ia oder anderen Standardkerzen gemacht wird: aus beobachteter, scheinbarer Helligkeit m und aus theoretischen Sternmodellen fixierten absoluten Helligkeiten M folgt die Entfernung! Diese letzte Anwendung ist besonders wichtig in der Vermessung des Universums, der *Kosmometrie*. Die Kenntnis der Entfernung kosmischer Quellen ist für die Astronomen von großem Wert, weil andere physikalische Größen häufig von der Entfernung abhängen.

5.7.2 Beispiel: Sonne

Wer einmal mit der Gleichung 'spielen' mag, sei dazu eingeladen, die scheinbare visuelle Helligkeit der Sonne, m_V = -26.7^{mag}, und ihre absolute visuelle Helligkeit, M_V = 4.87^{mag}, einzusetzen, um den Abstand der Sonne zur Erde zu berechnen. Und siehe da: das Ergebnis sind gerade etwa 150 Millionen Kilometer oder **eine Astronomische Einheit**.

5.7.3 Kosmologie

Bei sehr großen Entfernungen muss das oben formulierte Distanzmodul mit den Methoden der relativistischen Kosmologie verallgemeinert werden. Zusätzlich gehen dann in die Formel die kosmologischen Parameter ein, die das jeweilige Friedmann-Weltmodell festlegen. Ein gut geeigneter Entfernungsbegriff ist dann die so genannte Leuchtkraftdistanz.

5.8 Dodekaeder-Universum

Ein relativ neues, aber hypothetisches kosmologisches Modell für ein **geschlossenes** Universum, das von *Luminet et al.* 2003 in der Zeitschrift Nature vorgestellt wurde (astro-ph/0310253). Es handelt sich um ein alternatives Modell zur konventionellen Kosmologie (flacher Euklidischer Kosmos), das allerdings mit Beobachtungsdaten des Mikrowellensatelliten WMAP verträglich ist.

5.8.1 Eigenschaften des 'Fußball-Universums'

Das Dodekaeder-Universum ist nicht flach, sondern besizt eine positive Krümmung ($k = +1$). Der totale Dichteparameter ist deshalb ebenfalls knapp oberhalb von 1, weicht mit einem angenommenen Wert von 1.013 im Dodekaeder-Raum jedoch nur wenig vom flachen Universum ab. Bisher können die Beobachtungen der Hintergrundstrahlung dieses Szenario nicht ausschließen.

Das Dodekaeder-Universum besteht aus 120 Pentagon-Dodekaedern, die eine **Hypersphäre** bilden. Die Hypersphäre ist die 3D-Oberfläche einer 4D-Kugel. Das Pentagon-Dodekaeder ist ein dreidimensionales, fußballähnliches Gebilde, das sich aus 12 Pentagonen (Fünfecken) zusammensetzt, wie die Abbildung 5.4 illustriert. Einen Zwölfflächner bezeichnet man generell als Dodekaeder. Das Ganze hat einen historischen Bezug, denn das Dodekaeder

Abbildung 5.4: 12 Pentagone konstituieren einen Dodekaeder.

gehört zu den fünf **Platonischen Körpern**, konvexen, geometrischen Körpern, die sich aus regelmäßigen Polygonen (Vielecken) konstituieren.

Die Ausbreitung von Dichtewellen im Dodekaeder-Universum ist bisher mit den Messdaten aus der Hintergrundstrahlung verträglich. Die charakteristische Struktur von Obertönen in der Strahlungsverteilung der Drei-Kelvin-Strahlung kann deshalb durch ein offenes oder geschlossenes Euklidisches Universum (Krümmung null) oder ein geschlossenes Dodekaeder-Universum (positive Krümmung) erklärt werden.

5.8.2 Fußball oder Horn?

Eine noch neuere Alternative eines Universums mit negativer Krümmung (*hyperbolisches Universum*) ist das Horn-Universum (*Aurich et al.* 2004).

5.8.3 Aktuelle Entwicklungen

Luminets Forschergruppe hat mittlerweile darüber berichtet, welche Verteilungen auf den Polarisationskarten der Hintergrundstrahlung zu erwarten sind, wenn das Universum eine nicht-triviale Topologie hat (astro-ph/0601433). Bislang sind das nur Hypothesen, die auf theoretischer Basis stehen, aber noch nicht beobachtet wurden. Die Kosmologen hoffen, dass der neue Satellit PLANCK, der 2008 starten soll und die Hintergrundstrahlung in noch größerem Detail vermessen wird, baldige Klärung darüber bringen wird, in welchem Universum wir denn nun tatsächlich leben.

Eine detaillierte Beschreibung zu den topologischen Aspekten des Universums befindet sich unter dem Eintrag Topologie.

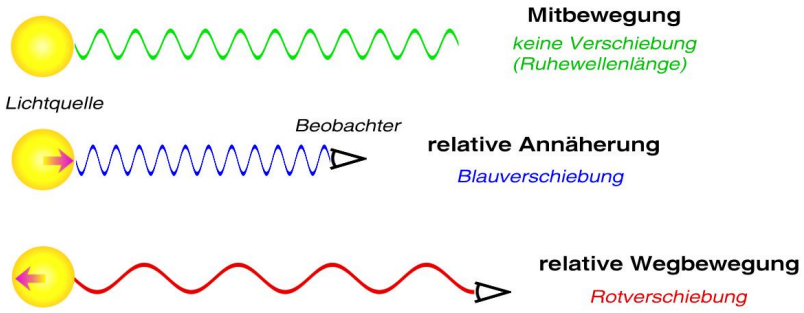

Abbildung 5.5: Doppler-Blauverschiebung und Doppler-Rotverschiebung einer Lichtwelle.

5.9 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt gehört zu den wichtigsten Phänomenen in der Physik. Es handelt sich um einen Effekt, der mathematisch beschreibt, wie sich die Wellenlänge eine Welle verändert, wenn sich der Wellenerreger oder der Wellenempfänger bewegen. Vertraut ist uns dieser Effekt im Alltag, wenn sich die Tonhöhe einer relativ zu uns bewegten Schallquelle verändert, z. B. das Martinshorn eines Rettungswagens oder das Motorengeräusch in der Formel-1. Der Doppler-Effekt tritt allerdings nicht nur **bei akustischen Wellen** auf, sondern vor allem auch **bei elektromagnetischen Wellen** - das macht ihn bedeutsam für die Astronomie.

5.9.1 Namenspate

Der Doppler-Effekt wurde nach dem österreichischen Physiker und Mathematiker *Christian Johann Doppler* (1803 - 1853) benannt. Er veröffentlichte 1842 bei der Böhmischen Gesellschaft der Wissenschaften in Prag das Papier *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger Gestirne des Himmels*. Darin modellierte Doppler das Licht fälschlicherweise als longitudinale Welle - bereits 1821 hatte *A.J. Fresnel* (1788 - 1827) behauptet, dass Licht eine *transversale* Welle sei. Wie wir heute wissen, hatte Fresnel Recht, doch die wesentliche Aussage von Dopplers Arbeit bleibt bestehen. Doppler machte darüber hinaus den bemerkenswerten und weitsichtigen Kommentar, dass Astronomen den von ihm entdeckten Effekt benutzen werden, um die Bewegung und Entfernung der Sterne zu messen - er sollte Recht behalten.

5.9.2 akustischer Doppler-Effekt

Schallwellen breiten sich in einem Medium, z. B. Luft oder Wasser, mit der Schallgeschwindigkeit aus. Die empfangene Frequenz erhöht sich bzw. die empfangene Wellenlänge verkürzt sich, wenn sich die Schallquelle auf den Empfänger zu bewegt. Die sich ausbreitende Welle wird anschaulich gewissermaßen gestaucht. Entfernt sich die Schallquelle, passiert das genaue Gegenteil, denn die empfangene Frequenz wird niedriger bzw. die empfangene Wellenlänge wird erhöht. Dann wird die sich fortpflanzende Welle anschaulich gesprochen gedehnt.

5.9.3 Doppler-Effekt bei Licht

Bei dem Doppler-Effekt von elektromagnetischer Strahlung verhält es sich ein bisschen anders: Licht benötigt kein Medium um sich auszubreiten und kann sich sogar im Vakuum fortpflanzen. Aus diesem Grund empfangen Astronomen überhaupt elektromagnetische Signale kosmischer Quellen. *Albert Einstein* hat bei der Begründung seiner Spezielle Relativitätstheorie 1905 gefordert, dass Licht sich immer gleich schnell ausbreitet - **unabhängig** von dem Bewegungszustand der Lichtquelle! Diese experimentell verifizierte Forderung heißt **Postulat von der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit *c***. Es hat gravierende Konsequenzen für unser Verständnis von Raum und Zeit. Offensichtlich ist der Doppler-Effekt von Licht völlig anders, als derjenige akustischer Wellen, deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit ja variieren kann.

Phänomenologisch bleibt das oben Gesagte erhalten: Die empfangene Lichtfrequenz ν_{obs} erhöht sich bzw. die empfangene Wellenlänge verkürzt sich, wenn sich die Lichtquelle mit der Relativgeschwindigkeit v auf den Beobachter zu bewegt. Weil dies einer Veränderung der Lichtfarbe mit der emittierten Frequenz ν_{em} zum Blauen hin entspricht, nennen Physiker diesen Effekt **Blauverschiebung**.

Entfernt sich die Lichtquelle, wird die empfangene Strahlungsfrequenz kleiner bzw. die empfangene Lichtwellenlänge wird größer. Die Physiker sprechen dann von einer **Rotverschiebung**, genauer einer Doppler-Rotverschiebung. Die beiden Fälle fasst Abbildung 5.5 zusammen. Quantitativ berechnet man das mit den Gleichungen für den speziell relativistischen Doppler-Effekt:

$$\begin{aligned} \nu_{\mathrm{obs}} &= \sqrt{\tfrac{1+v/\mathrm{c}}{1-v/\mathrm{c}}}\,\nu_{\mathrm{em}} \quad \text{Doppler–Blauverschiebung } (\nu_{\mathrm{obs}} > \nu_{\mathrm{em}}) \\ \nu_{\mathrm{obs}} &= \sqrt{\tfrac{1-v/\mathrm{c}}{1+v/\mathrm{c}}}\,\nu_{\mathrm{em}} \quad \text{Doppler–Rotverschiebung } (\nu_{\mathrm{obs}} < \nu_{\mathrm{em}}) \end{aligned}$$

5.9.4 Der Doppler-Faktor

Physiker schreiben diese Gleichungen gerne noch kompakter und benutzen dazu den Lorentz-Faktor γ ist und die in der Relativitätstheorie übliche auf die Vakuumlichtgeschwindigkeit normierte Geschwindigkeit $\beta = v/\mathrm{c}$. Umschreiben und zusammenfassen der beiden Gleichungen oben führt zur Gleichung:

$$D_{\pm} = 1/[\gamma\,(1 \pm \beta)] = \nu_{\mathrm{obs}}/\nu_{\mathrm{em}}.$$

Hierin ist D der **Doppler-Faktor**. Das Pluszeichen gilt für eine Doppler-Rotverschiebung und das Minuszeichen für eine Doppler-Blauverschiebung.

Der Doppler-Faktor kann in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) verallgemeinert werden und heißt dann oft nicht mehr D, sondern g-Faktor g, Rotverschiebungsfaktor oder relativistisch verallgemeinerter Doppler-Faktor (siehe auch *A. Müller: The Onset of General Relativity: gravitationally redshifted emission lines*, Astron. Nachr. 327, 1024, 2006; ePrint: astro-ph/0610791).

Der Doppler-Faktor bzw. g-Faktor ist von grundlegender Bedeutung in der Strahlungsphysik, weil er einerseits das Maß dafür ist, wie die **Strahlungsenergie** vom Ruhesystem ins Beobachtersystem verschoben wird und weil er andererseits in hoher Potenz den **Strahlungsfluss**, also die gemessene Intensität der Doppler-verschobenen Strahlung, beeinflusst. Generell ist das Verhältnis aus spektraler Strahlungsintensität I_ν

und dritter Potenz der Frequenz ν - beide betrachtet im *gleichen* Bezugssystem - eine **Invariante**. Daraus folgt die folgende, sehr nützliche Gleichung, um vom Ruhesystem auf das Beobachtersystem zu transformieren:

$$\begin{aligned} I_\nu/\nu^3 &= const \\ \Rightarrow I_{\nu,\mathrm{obs}}/\nu^3_{\mathrm{obs}} &= I_{\nu,\mathrm{em}}/\nu^3_{\mathrm{em}} \\ \Leftrightarrow I_{\nu,\mathrm{obs}} &= D^3\, I_{\nu,\mathrm{em}} \end{aligned}$$

5.9.5 Vorsicht: drei Arten der Rotverschiebung!

Die Rotverschiebung involviert eine Reihe von Missverständnissen. Die oben erläuterte Doppler-Rotverschiebung darf auf gar keinen Fall mit der **kosmologischen Rotverschiebung** verwechselt werden! Hintergrund ist, dass die Rotverschiebung als Verschiebung im Spektrum ganz unterschiedliche physikalische Ursachen haben kann. Bei der Doppler-Rotverschiebung ist die Ursache eine Bewegung, genauer gesagt eine Relativbewegung, die zu einer Entfernung zwischen Emitter und Beobachter führt. Es gibt aber noch zwei weitere Formen der Rotverschiebung, die nur mit Einsteins ART zu verstehen sind. Da ist zunächst die kosmologische Rotverschiebung. Sie beruht darauf, dass sich eine Raumzeit ausdehnt. Genau das geschieht mit unserem Universum: der ganze Raum (präzise: die Raumzeit) expandiert, so dass auch die darin enthaltenen Lichtwellen auseinander gezogen werden. Das geschieht beispielsweise mit der kosmischen Hintergrundstrahlung seitdem sie sich in der Rekombinationsepoche (vor gut 13 Mrd. Jahren) ausbreitet. Entsprechend entfernen sich auch die Galaxien voneinander, weil sich das Universum immer mehr vergrößert - das geschieht sogar **beschleunigt**, weil die Dunkle Energie den Kosmos auseinander treibt.

Es wäre nun **völlig falsch** die kosmologischen Rotverschiebungen zu benutzen, um kosmische Fluchtgeschwindigkeiten von weit entfernten Galaxien auszurechnen. Dass das keinen Sinn macht, erkennt man schnell daran, dass für weit entfernte Systeme diese Fluchtgeschwindigkeit die nach Einstein nicht überschreitbare Vakuumlichtgeschwindigkeit übersteigt. Solche Rechnungen machen keinen Sinn, zumal ein Geschwindigkeitsbegriff für ein sich ausdehnendes Raumzeitgitter von zweifelhaftem Wert wäre.

Die letzte Form der Rotverschiebung ist die **Gravitationsrotverschiebung**. Sie ist auch nur mit Einsteins ART zu verstehen. Licht verliert nämlich Energie, wenn es in einem Gravitationsfeld ausbreitet. In der Sprache Einsteins ist Schwerkraft eine *gekrümmte Raumzeit* und Licht folgt hier ausgezeichneten Bahnen, den so genannten Nullgeodäten. Anschaulich argumentiert kämpfen die Lichtwellen wie eine startende Rakete mit der Gravitation und verlieren Energie. Während einer Rakete der Treibstoff ausgeht, bedeutet Energieverlust für Photonen eine Verschiebung zum Roten hin. In diesem Fall spricht der Physiker von einer Gravitationsrotverschiebung, weil die Ursache der Rotverschiebung die Gravitation ist. Extrem wird dieser Effekt bei einem Schwarzes Loch: am Ereignishorizont haben die Lichtwellen all ihre Energie und Intensität an die Gravitation verloren. Das verleiht dem Loch die charakteristische Schwärze.

Im Allgemeinen ist eine beobachtete Rotverschiebung die Summe aus diesen drei Rotverschiebungen, also Doppler-Rotverschiebung, Gravitationsrotverschiebung und kosmologische Rotverschiebung. Das erschwert natürlich die Arbeit des Astronomen, und er benötigt weitere Informationen über den Emitter, um die Gewichtung der Rotverschiebungen herauszufinden.

5.9.6 Beispiele aus der Astronomie

- ◇ Mit der **Doppler-Whobbling-Methode** bestimmen Planetenjäger die Relativgeschwindigkeiten von Sternen entlang der Sichtlinie (so genannte *Radialgeschwindigkeit*) und können aus dem Hin- und Herpendeln eines Sterns indirekt auf einen extrasolaren Planeten schließen - ohne ihn direkt zu beobachten! Über die Kepler-Gesetze gelingt sogar eine Massenbestimmung des Planeten (bei bekannten Sternparametern).

- ◇ Die **Geschwindigkeiten eines Sternenwinds** bestimmen die Astronomen bequem mit der Doppler-Blauverschiebung.

- ◇ Die Wellenlängen der Spektrallinien verschiedener Elemente und Moleküle kennen die Astronomen aus Untersuchungen im Labor. Sie kennen also die Wellenlängen der Übergänge im Ruhesystem. Beobachten sie nun die gleiche spektrale Signatur bei einer kosmischen Quelle, so folgen bei Kenntnis der zugrunde liegenden Physik, die Eigenschaften des Emitters, z. B. sein Bewegungszustand, das Temperaturmilieu (Doppler-Verbreiterung) oder - bei hohen Entfernung - die kosmologische Rotverschiebung. Bei relativistisch verbreiterten **Eisenlinien**, die in der Nähe Schwarzer Löcher ausgesandt werden, können alle drei Rotverschiebungen relevant sein.

- ◇ Das historische Paradebeispiel ist die Entdeckungsgeschichte der **Quasare**: Das Spektrum dieser Form leuchtkräftiger Aktiver Galaktischer Kerne wurde erst verstanden, als der Astronom *Maarten Schmidt* die Emissionslinien als hohe kosmologische Rotverschiebungen (nicht Doppler-Rotverschiebung!) deutete. Das entlarvte die Quasare als extrem weit entfernte, extragalaktische Objekte des jungen Universums.

- ◇ Die **Jets** von kompakten Objekten bewegen sich in der Regel mit relativistischen Geschwindigkeiten. Die Strahlung der Jets wird somit vom speziell relativistischen Doppler-Effekt beeinflusst. Ein extremes Beispiel sind die Jets der **Blazare**, die auf den Beobachter zeigen und stark blauverschoben sind.

5.9.7 Faustformel für blauverschobene, relativistische Jets

Für das letztgenannte Beispiel benutzen Astronomen eine knappe Schreibweise, in die der Jet unter beliebigen Winkeln orientiert sein kann. Der relativistische Jet möge mit einem Neigungswinkel i (*Inklination*) auf den Beobachter zeigen. Dieser Winkel sei so definiert, dass i=0° bedeute, dass der Jetstrahl genau auf den Beobachter zeige und $i = 90°$, dass der Jetstrahl senkrecht zur Sichtrichtung sei (keine Geschwindigkeitskomponente in Richtung Beobachter). Der Doppler-Faktor D für Blauverschiebung der Jetemission berechnet sich dann gemäß dieser Gleichung:

$$D = 1/[\gamma\,(1 - \beta\,\cos i)].$$

Anschaulich projiziert der Kosinus den Jetgeschwindigkeitsvektor auf die Blickrichtung.

5.9.8 longitudinaler und transversaler Doppler-Effekt

Anhand der letzten Gleichung ist ein interessantes Phänomen zu zeigen: Selbst wenn der Jet nicht auf den Beobachter zeigt (i=90°) gibt es einen Doppler-Effekt! Denn der erste Term in der Klammer ('1') bleibt bestehen. Es bleibt eine Abhängigkeit vom Lorentz-Faktor, der wiederum eine Funktion des Geschwindigkeitsfelds des Jets ist. Die Bewegungen im Jet tragen immer noch zu einem Doppler-Effekt bei, obwohl relativ zum Beobachter gar keine Relativgeschwindigkeit vorliegt! Dieser resultierende Doppler-Effekt für diesen Spezialfall heißt **transversaler, speziell relativistischer Doppler-Effekt**, weil der Doppler-Effekt hier senkrecht (d. h. *transversal*) zur Blickrichtung auftritt. Dieser Beitrag wird nur bei relativistischen Geschwindigkeiten bedeutsam - bei kleinen Geschwindigkeiten gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit wird $\gamma \sim 1$ und somit $D \sim 1$ und schließlich $\nu_{\mathrm{obs}} \sim \nu_{\mathrm{em}}$. Dieser Ausdruck kann für die ART verallgemeinert werden. Dann skaliert der Doppler-Faktor mit der Lapse-Funktion.

Demgegenüber wird der Doppler-Effekt mit Geschwindigkeitskomponente des Emitters in Blickrichtung **longitudinaler Doppler-Effekt** genannt.

5.9.9 Literaturquelle

- ◇ Website: MacTutor History of Mathematics archive, University of St. Andrews, Scotland; darin die Biographie von C.J. Doppler

5.10 Drei-Kelvin-Strahlung

Eine alternative Bezeichnung für die **kosmische Hintergrundstrahlung**. 1965 stellten *A.A. Penzias* und *R.W. Wilson* fest, das aus dem Weltraum eine gleichmäßig in alle Raumrichtungen verteilte (*isotrope*) elektromagnetische Strahlung im Bereich der *Mikrowellen* zu detektieren ist.

5.10.1 Viele Wellenlängen, aber eine Temperatur

Diese Strahlungsverteilung entspricht einer exakten **Planck-Kurve**. Damit kann sie einem Schwarzen Strahler (Wärmestrahler) mit einer bestimmten Temperatur zugeordnet werden: Sie beträgt 2.7 Kelvin, also fast drei Kelvin, was den Namen *3K-Strahlung* rechtfertigt. Die Messung wurde so interpretiert, dass sie nicht irdischen, sondern kosmischen Ursprungs sei.

5.10.2 Relikt des heißen Urknalls

1929 gelang den amerikanischen Astronomen *Vesto Melvin Slipher* und *Edwin Powell Hubble* die Messung der Fluchtbewegung einiger Galaxien. Dieser so genannte Hubble-Effekt untermauert daher die These eines expandierenden Universums. Diese Beobachtung an Galaxien und die isotrope Drei-Kelvin-Strahlung sind die beiden gewichtigsten Argumente für den heißen Urknall (siehe dort für sämtliche Belege des Urknalls). Gemäß dieser Interpretation wurde die Drei-Kelvin-Strahlung vom *expandierenden Feuerball* emittiert, dem jungen, heißen Universum, als die Strahlung von der Materie entkoppelte. Dies geschah bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ und wird Rekombinationsära in der Kosmologie genannt. Mit der weiteren Expansion des Universums kühlte der Feuerball aus und erreichte schließlich die im lokalen Universum ($z = 0$) beobachtbare Temperatur von

knapp drei Kelvin. Die sich ausdehnende Raumzeit kühlte die anfangs heiße Urstrahlung auf fast den absoluten Nullpunkt ab.

5.10.3 Klarer Fall von Gammel-Licht

Eine kosmologische Rotverschiebung von etwa 1100 entspricht einer Epoche von etwa 400000 Jahren nach den Urknall. Damit ist die die kosmische Hintergrundstrahlung das älteste Signal, das Menschen jemals aufgezeichnet haben!

5.10.4 Substruktur in der 3K-Strahlung

Mittlerweile wurden die Beobachtungsmethoden verfeinert: die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (engl. *cosmic microwave background radiation*, **CMBR**) wurde mit Ballonen (BOOMERANG, MAXIMA) und Satelliten (COBE, WMAP, ab 2008: PLANCK) beobachtet. Dabei stellte sich heraus, dass die Verteilung **geringfügige Anisotropien** auf der Skala von einigen Mikrokelvin (10^{-6} Kelvin) aufweist. Diese wurden so interpretiert, das der Hintergrundstrahlung bereits erste Informationen von **jungen Galaxien** aufgeprägt wurden. Sie machen sich als Temperaturfluktuation in der Verteilung der Hintergrundstrahlung am Himmel bemerkbar. Weitere Einzelheiten werden im Eintrag Hintergrundstrahlung vorgestellt.

5.11 Dunkle Energie

5.11.1 Einführung: Licht & Materie

Um diesen Begriff erklären zu können, muss weiter ausgeholt werden: Betrachtet der Mensch seine Umwelt, so ist er umgeben von Licht und Materie. Die Physik entwickelt sehr überzeugende Modelle, was man sich unter Licht und Materie vorstellen muss: Licht ist elektromagnetische Strahlung. Seit der klassischen Elektrodynamik, die im 19. Jahrhundert entdeckt wurde, ist das bekannt. Mit den Methoden der Quantentheorie wurde die Quantisierung des Lichts in Photonen entdeckt. Materie hingegen ist aus äußerst kleinen Teilchen aufgebaut, den Quarks und Leptonen. Die starke Kraft hält die Quarks zusammen, so dass sie Bausteine komplexerer Teilchen werden. So bestehen Protonen und Neutronen, die Teilchen im Atomkern, aus je drei Quarks. Die Materie in unserem alltäglichen Umfeld besteht ausschließlich aus Quarks und Leptonen. Sie ist baryonisch - wie die Physiker sagen. Anmerkung: Präziser wäre es, Materie in eine hadronische und eine leptonische Form zu klassifizieren.

5.11.2 Noch eine Zutat: Dunkle Materie

Als ob diese Physik von Licht und Materie nicht schon kompliziert genug wäre, entdeckten die Astronomen die Notwendigkeit einer Materieform, die nicht (oder sehr schwach) leuchtet. Sie bekam den Namen Dunkle Materie. Anfang des 20. Jahrhunderts wurde anhand der Rotation von Galaxien erkannt, dass die leuchtende Materie (Sterne, Gas und Staub) nicht ausreicht, um das Rotationsverhalten zu erklären. Seither können Astronomen immer wieder bestätigen, dass es Dunkle Materie geben muss. Kandidaten für Dunkle Materie sind schwere Teilchen, die nicht oder kaum elektromagnetisch strahlen und nur schwach wechselwirken. Diese Teilchenklasse heißt WIMPs (engl. *weakly interacting*

Abbildung 5.6: Λ und andere Formen Dunkler Energie.

heavy particles). Weitere Materieformen, die zur Dunklen Materie beitragen könnten, sind supersymmetrische Teilchen. Bislang wurde zwar keines gesichert nachgewiesen oder experimentell in Teilchenbeschleunigern hergestellt, aber es gibt ein paar Hinweise aus der Hochenergiephysik und Stringtheorie, dass die Supersymmetrie in der Natur eine Rolle spielt.

5.11.3 Und endlich: Dunkle Energie

Kommen wir nun über den Umweg des (halbwegs) Bekannten zum völlig Unbekannten, zur Dunklen Energie. Die Bezeichnung *Dunkle Energie* (engl. *dark energy*) wurde von dem Kosmologen *Michael S. Turner* (Universität Chicago, USA) im Jahr 1990 erfunden. Dunkle Energie meint eine Energieform im Universum, die weder baryonischer Natur ist, noch mit der Dunklen Materie identifiziert werden kann. Sie ist dunkel, weil sie sich nicht durch elektromagnetische Strahlung bemerkbar macht. Die Dunkle Energie tritt dadurch in Erscheinung, dass sie die **Dynamik des Universums** signifikant beeinflusst. Die Dunkle Energie sorgt für die kosmische Expansion! Wir wissen von der Dunklen Energie, weil die sichtbaren Objekte im Universum (Galaxien, Strahlung) die Expansion anzeigen und indirekt auf etwa Dunkles schließen lassen. Die Methoden der Astronomie erlauben es sogar, die Anteile der baryonischen und Dunklen Materie mit demjenigen der Dunklen Energie zu vergleichen. Das Resultat ist, sie mit **über zwei Dritteln** den größten Anteil ausmacht: Dunkle Energie dominiert das (späte) Universum!

5.11.4 Formen von Dunkler Energie

Die Dunkle Energie ist demnach ein wichtiger physikalischer Bestandteil der modernen kosmologischen Modelle. Es ist allerdings nicht klar, worum es sich genau bei der Dunklen Energie physikalisch handelt: Die physikalische Natur der Dunklen Energie ist unklar! Es wurden bisher verschiedene Quellen für Dunkle Energie vorgeschlagen:

kosmologische Konstante Λ

Die historisch zuerst entdeckte Form, die man im Nachhinein als Dunkle Energie bezeichnen muss, wurde von *Albert Einstein* (1879 - 1955) im Jahr 1917 vorgeschlagen. Er führte in den Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) den so genannten **Lambda-Terme** (manchmal auch Λ-Glied genannt) ein. Dieses Lambda erweiterte die rechte Seite der Feldgleichung dort, wo der Energie-Impuls-Tensor steht. Dieser kosmologische Parameter beeinflusst die Dynamik des Kosmos, je nachdem ob er positiv, negativ oder null ist. Ein

negativer Wert von Λ macht sich als *kosmische Anziehung (Attraktion)* bemerkbar und lässt das Universum in sich zusammenfallen ('Anti-de-Sitter'). Dieses negative Λ wirkt also in Richtung der Gravitation. Ein positiver Wert von Λ wird Dunkle Energie genannt. Er wirkt in der Form einer Antigravitation, was man auch als *kosmische Abstoßung (Repulsion)* bezeichnet. Bei verschwindendem Λ wird die Dynamik des Kosmos nur durch die darin enthaltene Materie bestimmt. Einstein führte den Lambda-Term ein, um das damals von ihm aus ästhetischen Gründen favorisierte statische Universum physikalisch zu erklären. Der amerikanische Astronom *Edwin Hubble* fand jedoch 1929, dass die Galaxien einer Fluchtbewegung unterliegen und sich das Universum ausdehnt. Dieser Hubble-Effekt widerlegte schlagartig das Modell eines statischen Universums, so dass Einstein sein kosmologisches Lambda verwarf. Er bezeichnete diese Idee als seine 'größte Eselei'.

In der Folgezeit stellte sich jedoch heraus, dass man das kosmologische Λ nicht ohne weiteres verschwinden lassen konnte, wie besonders der belgische Kosmologe *Abbè Georges Lemaître* (1894 - 1966) erkannte. So fand es unter der Bezeichnung kosmologische Konstante Einzug in die moderne Kosmologie. Bis heute ist sie unverzichtbar! Denn auch mit Lambda-Term als Ingredienz kann man kosmologische Gleichungen finden, in denen das Universum expandiert. Die globale Beschreibung des dynamischen Kosmos gelingt in der relativistischen Kosmologie mit den Friedmann-Weltmodellen. Es handelt sich um Modell-Universen, die mathematisch gut verstanden sind. Ein Friedmann-Universum ist eine Lösung der Friedmann-Gleichung, die man aus den Feldgleichungen der ART mit dem Energie-Impuls-Tensor einer idealen Flüssigkeit plus Lambda-Term für Raumzeiten konstanter Krümmung erhält. Warum geht ein Kosmologe so vor? Die Materie im Kosmos kann man näherungsweise wie eine strömende, nicht wechselwirkende Flüssigkeit beschreiben. So folgt, dass der Energie-Impuls-Tensor einer idealen Flüssigkeit geeignet ist. Der Ansatz einer konstanten Krümmung ergibt sich aus der Erfüllung des kosmologischen Prinzips: Kein Punkt im Universum ist einem anderen gegenüber ausgezeichnet. Die Universen mit nicht verschwindendem Lambda sind Bestandteil der so genannten **Λ-Kosmologie**.

Astronomen messen den Materiegehalt des Universums und dessen Expansionsgeschwindigkeit z. B. anhand von sehr weit entfernten Sternexplosionen. Es handelt sich dabei um hochrotverschobene Supernovae (SN) vom Typ Ia, also extrem weit entfernte, explodierende Weiße Zwerge. Im Rahmen des *Supernova Cosmology Project* (SCP) wurde dabei erstmals 1998 beobachtet, dass die **Ausdehnung des Universums sogar beschleunigt** wird (*Perlmutter et al.*, publiziert 1999)! Es liegt also keine konstante Expansionsgeschwindigkeit (siehe auch Hubble-Konstante) vor, was als eine der wichtigsten Entdeckungen in der Kosmologie gewertet werden muss.

Die Sternexplosionen gestatten auch zu beurteilen, ob sich über kosmologisch gesehen sehr lange Zeiten (Mrd. Jahre!) die unterschiedlichen Energieformen im Universum zeitlich verändern. So haben die **Permanenz-Messungen der Dunklen Energie** an SN Ia ergeben, dass Einsteins kosmologische Konstante favorisiert werden muss (*Riess et al.* 2004). Sie hat einen w-Parameter von $w = -1$. Das bestätigen neuere Messungen an einer Gruppe von 24 SN Ia, die mit dem Weltraumteleskop Hubble beobachtet wurden. Fünf davon zeigt die Abbildung 5.7: die Wirtsgalaxien vor den Sternexplosionen (untere Reihe) und nach den Explosionen mit hell aufleuchtenden SN Ia (Credit: Pressemitteilung NASA/ESA, STScI, *A. G. Riess*, November 2006). Die neuen Supernovadaten geben sogar noch strengere Auflagen für die Dunkle Energie: sie muss schon vor neun Milliarden Jahren konstant gewesen sein. Damit erscheinen die zeitlich veränderlichen Formen Dunkler Energie nicht bevorzugt.

Diese Resultate konnten von dem aktuellen Supernova-Survey **ESSENCE** (***E****quation of*

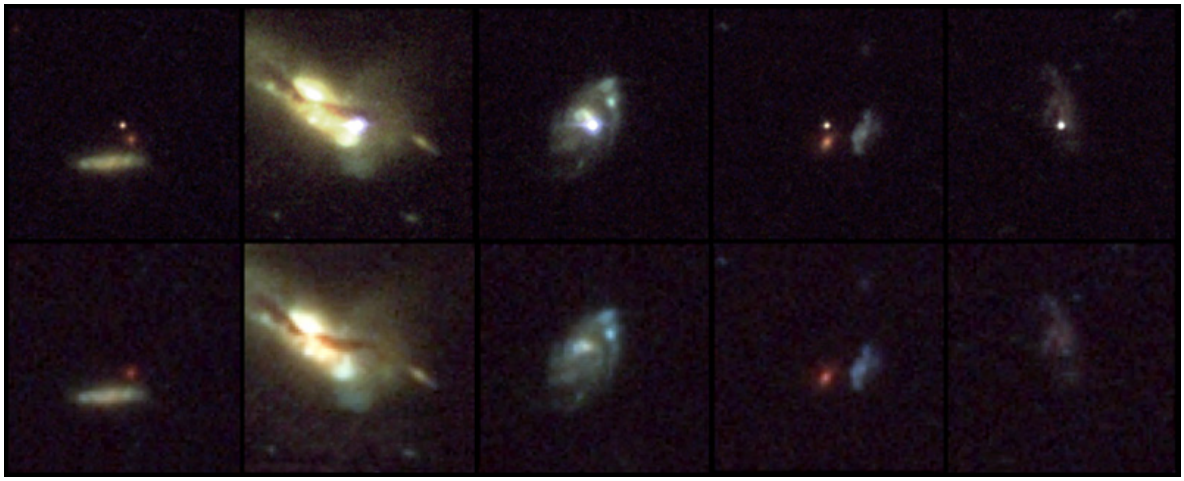

Abbildung 5.7: 5 SN Ia in verschiedenen Wirtsgalaxien, beobachtet mit HST 2006.

***S**tate: **S**up**E**r**N**ovae trace **C**osmic **E**xpansion*) 2007 bestätigt werden: 60 SN Typ Ia mit einer maximalen Rotverschiebung bis $z \sim 1$ wurden analysiert. Unter der Annahme eines flachen Universums und unter Berücksichtigung der Beschränkungen für baryonische Materie folgt aus diesen Beobachtungen ebenfalls $w = -1.05$ und $\Omega_{\mathrm{m}} = 0.274$ (*Wood-Vasey et al.* 2007, astro-ph/0701041; *Miknaitis et al.* 2007, astro-ph/0701043; erscheinen in ApJ). Damit ist ESSENCE konsistent mit den zuvor veröffentlichten Resultaten des *SuperNova Legacy Surveys* (SNLS, *Perlmutter et al.*). Kombiniert man beide Surveys so folgt: $w = -1.07$ und $\Omega_{\mathrm{m}} = 0.267$. Die Beweislast für Einsteins statischen w-Parameter ($w = -1$; $w' = 0$) ist derzeit erdrückend!

Das Universum hat nach derzeitigem Kenntnisstand in der Epoche $0 < z < 1$ einen Übergang von **abgebremster Ausdehnung** in eine **beschleunigte Ausdehnung** durchlaufen. Das illustriert sehr gut die rote Kurve im Diagramm von der WMAP-Website, das unter dem Eintrag Friedmann-Weltmodell besprochen wird. Genau diesen 'kosmischen Umschwung' wollen die Supernovaforscher nachweisen. Und sie wollen noch mehr: sie würden gerne die Permanenz der Dunklen Energie auch für deutlich größere kosmologische Rotverschiebungen testen. Leider kommt den Astronomen dabei eine Eigenschaft der Supernovae Typ Ia in die Quere, aus der sie auch ihren Nutzen ziehen: die ziemlich konstante, intrinsische Helligkeit. Sie hat nämlich den Nachteil, dass SN Ia nicht beliebig weit beobachtbar sind - zumindest mit dem aktuellen Stand der Teleskoptechnologie. Derzeit ist bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1.5$ Schluss! Vielleicht ist bei dieser Problematik schon eine Lösung in Sicht: Bei den (langzeitigen) Gammastrahlenausbrüchen wurden Relationen gefunden, die es erlauben könnten **GRBs als Standardkerzen** zu nutzen! Denn die so genannte *Firmani-Relation* (erklärt unter Eintrag Gamma Ray Burst) erlaubt Rückschlüsse auf z. GRBs könnten dann die SN Ia ablösen, weil sie durch ihre noch größere Leuchtkraft bis $z \sim 6$ und mehr beobachtbar sind!

Kosmologen nutzen bei diesen kosmologischen Untersuchungen nicht nur Sternexplosionen, sondern auch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der großräumigen Anordnungen der Galaxienhaufen auf der Gpc-Skala aus. Alle drei unabhängigen Methoden liefern übereinstimmende Ergebnisse und ermöglichen zusammengenommen eine

sehr genaue Messung der kosmologischen Parameter. Die Analysen der kosmologischen Modelle zeigen, dass es im Kosmos eine Dunkle Energie gibt. Die physikalische Natur des Λ-Terms ist aber nach wie vor unklar. Es wurde vorgeschlagen, dass sich die **Energiedichte des Quantenvakuums** in Form einer kosmologischen Konstante manifestiere. Verfolgt man diesen Ansatz, so findet man in den Quantenfeldtheorien eine Abhängigkeit der Vakuumenergiedichte in der vierten Potenz der Energie. Physiker nennen das eine *Ultraviolettdivergenz* oder *Ultraviolettkatastrophe*, weil bei hohen Energien die Vakuumenergiedichte 'ins Unendliche wächst'. Typischerweise schneiden die Physiker deshalb die Energie bei der (klassischen) Planck-Skala, bei etwa 10^{19} GeV, ab. Die Konsequenz ist, dass die Vakuumenergiedichte endlich bleibt und einen maximalen Wert von 10^{92} g cm^{-3} nicht überschreitet. Solche theoretischen Maßnahmen retten leider die Beobachtung nicht: Denn die astronomische Beobachtung liefert eine kritische Dichte von etwa 10^{-29} g cm^{-3}. Das heißt zwischen Theorie und Experiment liegt ein gigantischer Unterschied von etwa **120 Größenordnungen**! Das zur beobachteten, kritischen Dichte gehörige Λ ist sehr klein, aber nicht null und beträgt etwa $(10^{-3}$ eV$)^4$!

Quintessenzen

Aus dieser Hypothese von einer Verbindung zum Quantenvakuum erwächst demnach ein fundamentales Skalenproblem, wenn man von einer kosmologischen Konstante ausgeht. Die Problematik führte auf die Idee, sich von der Konstanz (Zeitunabhängigkeit) zu verabschieden und eine **zeitabhängige Dunkle Energie** in Erwägung zu ziehen. Diese neue Form Dunkler Energie bekam auch einen neuen Namen: Quintessenz. Eine solche zeitabhängige Dunkle Energie kann besser an die Beobachtungen angepasst werden und löst auch das so genannte **Koinzidenzproblem**, nämlich dass sie im lokalen Universum gerade von der Größenordnung der gewöhnlichen und Dunklen Materie ist. Mit dieser variablen Dunklen Energie kann auch der w-Parameter andere Werte als -1 annehmen. Typische Quintessenz-Modelle liefern einen Wert von $w = -1/3$ (vergleiche Diagramm 5.8).

topologische Defekte

Eine weitere Form Dunkler Energie sind die topologischen Defekte mit einem w-Parameter von -2/3. Es handelt sich dabei um 'Fehlstellen', die Relikte einer vorangegangenen, spontanen Symmetriebrechung sind. In den Defekten selbst ist allerdings noch die volle Symmetrie erhalten. Bisher gibt es keinerlei Evidenz seitens astronomischer Beobachtung für topologische Defekte, aber sie können auch nicht als additive Form Dunkler Energie ausgeschlossen werden.

Phantom-Energie

Die Phantom-Energie (*Caldwell et al., 2003*) ist eine Erscheinungsform Dunkler Energie mit besonders drastischen Konsequenzen: der w-Parameter ist noch kleiner als bei der Kosmologischen Konstante und unterschreitet daher den Wert von -1. Dann führt die Entwicklung des Universums in den Big Rip, den totalen Zerriss von allem, was sich darin befindet - von der makroskopischen bis zur subatomaren Skala! Wann sich der Big Rip ereignet, hängt vom genauen Zahlenwert des w-Parameters ab. Bei w = -1.2 bleiben noch etwa 50 Milliarden Jahre, demnach etwa das 10fache des jetzigen Alters der Erde... Neuste Analysen zeigen allerdings dass mit der Phantom-Energie eine Produktion ultrahochenergetischer

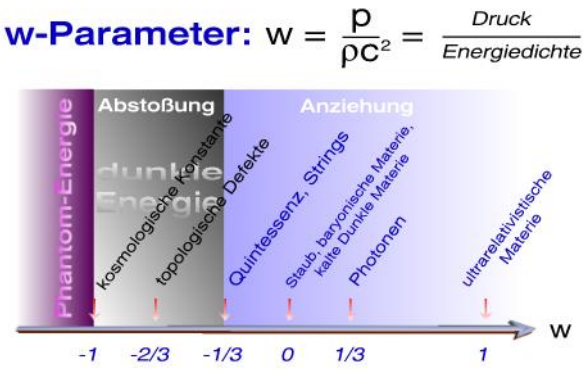

Abbildung 5.8: w-Parameter der Zustandsgleichungen verschiedener kosmischer Ingredienzen.

Teilchen einhergeht, die nicht in der kosmischen Strahlung beobachtet wurden (*Bean et al.* 2005).

Chaplygin-Gas

Das Chaplygin-Gas (siehe dort für Details) wurde bereits 1904 erfunden und 2001 als möglicher Antrieb der kosmischen Expansion vorgeschlagen (*Kamenshchik et al.* 2001). Es handelt sich um eine exotische Flüssigkeit mit einer sehr ungewöhnlichen Zustandsgleichung. Dieses Gas ist ein **Verwandlungskünstler**, weil es als Staub, Dunkle Materie oder Dunkle Energie (z. B. Quintessenz) in Erscheinung treten kann. Damit eignet es sich, um in frühen Entwicklungsepochen des Universums als Staub zu fungieren und in späten als Ersatz der Dunklen Energie. Diese Energieform ist zwar konsistent mit Beobachtungsdaten der experimentellen Kosmologie, aber sie polarisiert die Physikergemeinde aufgrund der mysteriösen Zustandsgleichung.

ohne Dunkle Energie

Die simpelste Lösung wäre, dass man etwas, was man nicht versteht, einfach verschwinden lässt. Geht's auch ohne Dunkle Energie? Ja, zumindest wird auch diese Variante diskutiert. Die Idee ist, dass die beobachtete, kosmische Expansion nicht etwa durch eine Dunkle Energie getrieben wird, sondern durch Dichteschwankungen in der Materie (*Kolb et al.* 2005; astro-ph/0506534). Wie weit dieser Vorschlag trägt ist unklar - das Gros der Kosmologen favorisiert allerdings eine Existenz der Dunklen Energie.

5.11.5 Inhalt bestimmt Zukunft

Die Abbildung oben zeigt sämtliche Materieformen, deren Existenz im Universum nachgewiesen ist oder aktuell diskutiert wird. Der w-Parameter eignet sich zur Unterscheidung und Klassifizierung der Materie anhand ihrer Zustandsgleichung.

Das Schicksal des Universums hängt also von seinem Materieinhalt (bzw. präzise formuliert von den Massen- und Energiedichten) ab. Ist genug Materie vorhanden, so gewinnt die Gravitationskraft über die expansiven Kräfte. Als Folge davon wird die Expansion irgendwann aufhören und das Universum wieder kollabieren. Dieses Szenario nennt man Big Crunch

('Großes Knirschen'). Es ist sogar denkbar, dass wieder ein singulärer Zustand erreicht wird und es wieder zu einem Urknall (dem Big Bang) kommt. Dieses periodische Szenario von Expansion und Kollaps nennt man **pulsierendes Universum**.

Ist jedoch zuwenig Materie vorhanden, so wird die Expansion nie aufgehalten werden können: Das Universum wird langsam auskühlen und als **kaltes Universum** enden. Dieses Szenario kennt man unter der Bezeichnung Big Whimper ('Großes Wimmern'). Es ist nach aktueller Einschätzung das wahrscheinlichste Ende des Kosmos.

Zwischen diesen beiden Extremen ist ein besonderer Zustand, wo ein kritischer Materieinhalt - oder bezogen auf das Volumen des Universums - eine **kritische Dichte** liegt. Rechnerisch kann man einen Wert für diese kritische Dichte tatsächlich ableiten, wenn man die bereits erwähnten Friedmann-Gleichungen untersucht. Diese folgen wiederum als Bewegungsgleichungen des Kosmos aus den Einsteinschen Feldgleichungen mit dem Ansatz der so genannten Robertson-Walker Metrik. Die kritische Dichte hängt dann wiederum - so stellt sich heraus - nur von Konstanten und der Hubble-Konstanten ab, die man mittlerweile sehr genau messen kann (aktueller Zahlenwert laut WMAP3: $H_0 = 73$ km s^{-1} Mpc^{-1}).

5.11.6 Zusammensetzung des Kosmos

Die Kosmologen verwenden gerne dimensionslose Größen, die sie mit dem letzten Buchstaben des griechischen Alphabets Omega bezeichnen und **Dichteparameter** nennen. Omega ist gerade der Quotient von beobachtetem Materieinhalt zu kritischem Materieinhalt. Beide Größen folgen nun aus der Beobachtung: Die Hubble-Konstante bestimmt die kritische Dichte; die beobachtete Materie bestimmt sich aus der Beobachtung leuchtender Materie, nur indirekt ableitbarer Dunkler Materie und dem Anteil Dunkler Energie. Es ist in der modernen Kosmologie üblich, die einzelnen Anteile für Omega mit einem Index zu versehen, je nachdem um welche Materieform es sich handelt (siehe dazu auch unter dem Eintrag Friedmann-Weltmodelle):

- ◇ Index B oder b bestimmt den Anteil baryonischer Materie. Das ist im Prinzip die 'gewöhnliche' Materie, die uns umgibt, z. B. Atome.

- ◇ Index *HDM* steht für *Hot Dark Matter*, also heiße Dunkle Materie. Unter 'heiß' versteht man in diesem Zusammenhang, dass sich diese Materie im Zeitalter der Galaxienentstehung mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegte, also Geschwindigkeiten, die vergleichbar sind mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Dazu zählen beispielsweise die Neutrinos.

- ◇ Index *CDM* steht für *Cold Dark Matter*, also kalte Dunkle Materie. 'Kalt' bedeutet entsprechend, dass sich die Materie nicht-relativistisch bewegte, als die Galaxien entstanden.

- ◇ Index m steht für Materie (engl. *matter*). Kosmologen fassen hier die Anteile baryonischer, kalter Dunkler und heißer Dunkler Materie zusammen. Das ist die am häufigsten zu lesende Variante.

- ◇ Schließlich steht der griechische Großbuchstabe Lambda Λ als Index für den Anteil der mysteriösen Dunklen Energie, die sich in ihrer Natur fundamental von den anderen Konstituenten der Materiedichte unterscheidet.

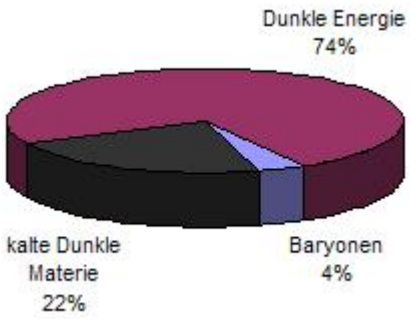

Abbildung 5.9: Anteile der Energieformen im Universum.

Die Messergebnisse für die Dichteparameter der einzelnen Spezies wurden vor allem durch Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (*Cosmic Microwave Background*, CMB) von Ballon-Experimenten (BOOMERANG, MAXIMA) und Infrarot- bzw. Mikrowellensatelliten (COBE, WMAP, künftig PLANCK) gemacht. Die Daten von weit entfernten Supernovae Typ Ia sind unabhängige Messobjekte. Hintergrundstrahlung und SN Ia zusammen ergeben sehr präzise Messresultate und eine sehr genaue Vorstellung von der Zusammensetzung des Universums. Die **Beiträge zu 'kosmischen Materieformen'** wurden durch aktuelle Messungen des Mikrowellen-Satelliten WMAP korrigiert zu (Stand März 2006, Quelle *WMAP Homepage*; siehe Abbildung 5.9)

- ◇ gewöhnliche Materie (Baryonen): 4%
- ◇ Heiße Dunkle Materie (HDM): irrelevant (in Spuren),
- ◇ Kalte Dunkle Materie (CDM): 22%,
- ◇ Dunkle Energie (Λ): 74%.

Der Anteil der Dunklen Energie dominiert eindeutig! Auch Beobachtungen des so genannten 'Lyman-α-Waldes' - charakteristische Absorptionslinien von Wasserstoff - im Spektrum von Quasaren, die schweren Galaxienhaufen, die als Gravitationslinsen fungieren und die Supernovae vom Typ Ia bestätigen die dominante Rolle der kosmologischen Konstante. Die einzelnen Dichteparameter kann man aufsummieren und laut Friedmannscher Theorie muss diese Summe gleich 1 sein. Das beobachtete Ergebnis liegt nahe 1, so dass der Dichteparameter für die Krümmung (Omega mit Index k) verschwinden muss. Anders gesagt: Wir leben also in einem **flachen Universum**, das von einer **Lambda-CDM Kosmologie** bestimmt wird (Kürzel flat ΛCDM). In einem flachen Kosmos gelten auch auf der großen Skala die Sätze der ebenen Geometrie, die *Euklidische Geometrie*.

5.11.7 Streuung zerstreut die Zuversicht?

Anfang 2004 kamen jedoch Zweifel an den Anteilen der kosmischen Ingredienzen auf, weil der **Sunyaev-Zel'dovich Effekt** einen stärkeren Einfluss haben könnte, als bislang angenommen. In diesem Streuprozess werden die CMB-Photonen an heißen Elektronen des Clustergases (dem heißen Umgebungsgas der Galaxienhaufen) gestreut. Diese Compton-Streuung verfälscht dann die Informationen, die die Hintergrundstrahlung ins lokale

Universum bis zum irdischen Beobachter trägt. Es ist allerdings nicht anzunehmen, dass die Streuung völlig das Konzept der Dunklen Energie zunichte macht! Die genauen Einflüsse müssen jedoch geprüft werden. Das ist aktuelle kosmologische Forschung.

5.11.8 Resümee

Die Natur der Dunklen Energie ist nach wie vor rätselhaft. Erst assoziierten die Kosmologen mit ihr (wie beschrieben) das Quantenvakuum. Physikalisch gesehen ist das eine brillante Idee, denn das 'fein verteilte, überall anzutreffende Nichts' würde sich in diesem Szenario erst auf den ganz großen, kosmologischen Distanzen bemerkbar machen und als dynamisch relevant für den Kosmos entpuppen. Auf der kleinen Skala, z. B. in unserem Sonnensystem, gibt es das Quantenvakuum natürlich auch, aber die Längenskala ist zu klein, als dass das Quantenvakuum dynamisch relevant für das Sonnensystem und die Bewegung der Planeten wäre. (Aus dem gleichen Grund darf man bei der Beschreibung der Planeten mit den Kepler-Gesetzen die Expansion des Universums getrost vernachlässigen!) Das Quantenvakuum darf wohl als die bislang beste Hypothese für die physikalische Natur der Dunklen Energie gewertet werden. Leider führt diese qualitativ hervorragende Idee in ein quantitatives Desaster in Form eines Skalenproblems von 120 Größenordnungen.

Die Bezeichnung *Dunkle* ***Energie*** ist wohl etwas irreführend: Man kann nicht argumentieren, dass diese Energieform in jedem Fall gemäß des Masse-Energie-Äquivalents $E = mc^2$ den Raum krümmt. Nur für ein negatives Lambda hat man eine 'kosmische Anziehung' in Richtung der Gravitation. Die Beobachtungen sprechen jedoch für ein positives Λ, für die Ausdehnung des Universums.

Die Dunkle Energie kann jedoch sehr unterschiedliche Erscheinungsformen haben: als Cosmon (*Wetterich*, Universität Heidelberg, 1987), als Radion im Ekpyrotischen Modell bzw. Zyklischen Universum (*Khoury et al.* 2001; *Steinhardt & Turok* 2001), als Spintessenz (*Boyle et al.*, 2001), als kompaktifizierte Extradimensionen (*Giddings*, 2003) oder als Phantom-Energie (*Caldwell et al.*, 2003). Alle diese Modelle involvieren ein Skalarfeld, das an die relativistische Gravitation koppelt, d. h. Gravitation und Skalarfeld wechselwirken miteinander. Welches Modell und welche Interpretation für unser Universum tatsächlich zutrifft, müssen Messdaten zeigen. Bisher sind alle genannten Spekulationen im Bereich des Möglichen - wenn auch die ersten Permanenzmessungen an Dunkler Energie Einsteins konstantes Λ nahe legen (*Wang & Tegmark* 2004, astro-ph/0403292; *Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512; ESSENCE, s. o.).

2006 wurde die Konstanz der Dunklen Energie erneut erschüttert: aktuelle Messresultate anhand von weit entfernten Gammastrahlenausbrüchen (GRBs) legen nahe, dass die Dunkle Energie doch variabel sein solle (*Schaefer et al.*, Nature online, 2006). Dieses Resultat basiert auf 52 GRBs, die entstanden, als sehr massereiche Sterne explodierten und zu einem stellaren Schwarzen Loch wurden. Die Explosionen ereigneten sich, als der Kosmos rund 1.5 Mrd. Jahre alt war und wurden aufgrund ihrer hohen Entfernung erst vor kurzem mit Satelliten beobachtet. Der charakteristische Verlauf der Lichtkurve, also die Abnahme der Helligkeit mit der Zeit, sowie die Maximalhelligkeit des Ausbruchs wiesen dabei auf eine zeitabhängige Dunkle Energie hin. Nach Einschätzung der Fachkollegen ist Schaefers Resultat strittig, weil die Explosionen der ersten Sterne im Kosmos und ihre stellare Umgebung noch nicht gut genug verstanden sind. Weiterhin ist problematisch, dass Schaefer zur Auswertung der Daten sowohl sehr weit entfernte, als auch relativ nahe GRBs benutzte - eine Pauschalbehandlung, die vielleicht nicht in Ordnung ist.

Die vielfältigen Ergebnisse zeigen, dass Eigenschaften der Dunklen Energie und ihr Einfluss

auf das Universum kontrovers diskutiert werden und weiterhin spannende Neuigkeiten und Überraschungen zu erwarten sind.

5.11.9 Dunkle Energie in der Stellarphysik

Das Konzept der Dunklen Energie wurde - der Kosmologie entlehnt - im Jahr 2001 auch für einen neuen Typus kompakter Objekte übernommen: Gravasterne. Sie haben im Innern an sich ein Vakuum, das jedoch ein Reservoir von Dunkler Energie birgt. Es handelt sich dabei um ein **gravitatives Analog zur Bose-Einstein-Kondensation**. Diese ('de Sitter'-) Blase stellt nach außen einen (isotropen) Druck zur Verfügung, der eine dünne Materieschicht stabilisiert. Die Schicht besteht aus ultra-kalter Materie, die als relativistische, ideale Flüssigkeit beschrieben werden kann. Im Gravitationskollaps eines massereichen Vorläufersterns oder eines Sternhaufens, könnte sich diese Materiekonfiguration ausbilden, ohne dass ein Horizont entsteht: Die Entweichgeschwindigkeit bleibt bei Gravasternen **unterhalb der Lichtgeschwindigkeit**. Sie sind nicht so schwarz wie die Schwarzen Löcher. Ob es Gravasterne und Schwarze Löcher tatsächlich in der Natur gibt, wie es astrophysikalische Modelle vorsehen, muss noch gezeigt werden!

Wenn es wirklich Gravasterne geben sollte und unser Universum nach aktuellen Messungen zum größten Teil auch aus Dunkler Energie besteht, so haben wir es grundsätzlich in unserem Universum mit einer Substanz zu tun, die äußerst rätselhaft ist. Diese seltsame Energieform bestimmt demnach im Wesentlichen die Entwicklung des Universums und damit auch unser Schicksal!

5.11.10 Jagd auf Dunkle Energie mit eRosita

Um dem Geheimnis der Dunklen Energie mit astronomischen Beobachtungen auf die Spur zu kommen, entwickelt das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik zusammen mit weiteren Partnern aus Wissenschaft und Industrie ein neues Röntgenteleskop. Dieses Teleskop namens eRosita (engl. Akronym für ***e**xtended **Ro**entgen **S**urvey with an **I**maging **T**elescope **A**rray*) ist der Nachfolger der erfolgreichen ROSAT-Mission und wird voraussichtlich 2011 starten. Dieses Instrument kombiniert in idealer Weise Sammelfläche, Gesichtsfeld und Auflösungsvermögen und wird neue Maßstäbe in der Röntgenastronomie setzen. Zur Analyse der Dunklen Energie wird die Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen ausgewertet (siehe dazu Urknall, Abschnitt '5. Zeuge').

5.11.11 Fazit

Die moderne, relativistische Kosmologie bietet gute Ansätze und Interpretationen für die Dunkle Energie. Die astronomischen Beobachtungen werden weiterhin Beschränkungen auferlegen, die uns nach und nach der Lösung dieses Rätsels näher bringen werden. Es ist nicht untertrieben zu sagen, dass die Dunkle Energie eines der größten Geheimnisse der Physik ist.

Expansion hin oder her - schließen wir die Diskussion der Dunklen Energie mit ihrer geringen praktischen Bedeutung:

If the universe is expanding, why can't I find a parking space?
Übersetzung: 'Wenn das Universum expandiert, warum kann ich keinen Parkplatz finden?'
(Woody Allen)

5.11.12 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: Einsteins Universum - Das Geheimnis der Dunklen Energie, November 2005
- ◇ eRosita-Website am MPE

5.12 Dunkle Materie

Unter dieser Sammelbezeichnung versteht man jede Materieform im Universum, die nur sehr schwach leuchtet, so dass man sie schwierig mit herkömmlichen Methoden der Astronomie beobachten kann. Im engeren Sinne meinen die Astronomen sogar Materie, die gar nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirkt und damit eine völlig andere Materieform darstellt, als die, die uns umgibt und aus der wir selbst bestehen.

5.12.1 Weshalb denkt man sich sowas aus?

Motiviert ist die Dunkle Materie (engl. *dark matter*, DM) durch die rätselhaften astronomischen Messdaten in der Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen. Schon 1932 beobachtete *Jan Hendrik Oort* Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in der Milchstraße und spekuliert über die Existenz von 'nebulöser, dunkler Materie' (*Oort, J.H.*, Bulletin of the Astronomical Institues of the Netherlands 6, 249, 1932). Auch *Fritz Zwicky* stellte 1933 zusätzliche Beschleunigungen der Bewegung von Galaxien innerhalb von Galaxienhaufen fest (*Zwicky, Fritz*, Helv. Phys. Acta 110, 6, 1933). Innerhalb einer Galaxie, z. B. in der Kinematik der rotierenden, galaktischen Scheibe, gab es ebenfalls seltsame Abweichungen. So bemerkten Astronomen Anfang der 1980er Jahre, dass die Rotationskurven der galaktischen Scheibe in vielen Galaxien ein anomales Profil zeigen (*Bosma, A.*, AJ 86, 1791, 1981; *Rubin et al.* ApJ 261, 439, 1982): sie fallen nach außen zu größeren Radien gar nicht ab, wie man es mit der Newtonschen Gravitation erwarten würde. Die heute favorisierte Lösung besteht darin, dass neben der sichtbaren, leuchtenden Materie die Existenz einer zusätzlichen Materieform, eben der **Dunklen Materie**, gefordert wird. Sie erklärt die erreichten Geschwindigkeiten der Sterne und Gaswolken in der Galaxie (die so genannte *Geschwindigkeitsdispersion*). In Galaxienhaufen machen die sichtbaren Sterne nur 1% der gesamten Haufenmasse aus, etwa 90% liegen in Form der Dunklen Materie vor, der Rest ist intergalaktisches Gas. Die Dunkle Materie könnte das bekannte Missing-Mass-Problem lösen.

Auch auf der großen kosmologischen Skala (engl. *large scale structure*, LSS) bestimmt die Dunkle Materie die Dynamik. Vor allem dominiert jedoch die Dunkle Energie (engl. *dark energy*, DE) die Kosmodynamik: sie sorgt durch ihren antigravitativen Einfluss für die Expansion des Universums.

5.12.2 Physikalische Natur der Dunklen Materie

Aber die Natur der Dunklen Materie ist Gegenstand aktueller Forschung. Astronomen unterschieden anfangs die *baryonische* von der *nicht-baryonischen* Dunkler Materie. Baryonische Materie ist aus Baryonen, also im Prinzip **Quarks** zusammengesetzt. Im Gegensatz zu den Mesonen, die aus Quark und zugehörigem Antiquark (siehe Antimaterie) bestehen, sind die Baryonen (bestehend aus drei Quarks) recht stabil und langlebig. Die bekanntesten Baryonen sind das Proton und das Neutron, die man unter der Bezeichnung Nukleonen subsumiert. Sie konstituieren die Atomkerne der Elemente. Daneben spielen die

Elektronen eine vergleichbar wichtige Rolle. Sie gehören zur Klasse der Leptonen, weisen keine weitere Substruktur auf und sind punktförmig. Die uns umgebende Materie wird durch das Standardmodell der Teilchenphysik sehr gut beschrieben.

5.12.3 Baryonische Dunkle Materie

Zur baryonischen Dunklen Materie zählt man zum Beispiel Planeten. Schon in unserem Sonnensystem sind von der Sonne weit entfernte Planeten und Zwergplaneten schwer zu entdecken, wie die jüngsten Fälle zeigen. Deutlich komplizierter wird es wenn die Planeten um andere Sterne kreisen. Solche extrasolaren Planeten werden vielfach übersehen, und Astronomen kennen aktuell etwa 200 Stück.

Auch die Braunen Zwerge zählen zur baryonischen Dunklen Materie. Diese intermediären Objekte zwischen Planet und Stern leuchten besonders kräftig im Infrarot. Vermutlich ist die Zahl der Planeten und Braunen Zwerge aber zu gering, als dass sie einen entscheidenden Anteil an der gesamten (baryonischen und nicht-baryonischen) Dunklen Materie hätten.

Im Halo von Galaxien befinden sich Objekte, die man MACHOs, ***Ma**ssive **C**ompact **H**alo **O**bjects*, nennt. Sie sorgen dafür, dass es regelmäßig zu Mikrolinsen-Ereignissen (engl. *microlensing events*) kommt. Dabei zieht ein MACHO direkt auf der Sichtlinie vor einem Stern im Halo vorbei und sorgt durch einen Gravitationslinseneffekt für einen kurzzeitigen Helligkeitsanstieg des Sterns. Die Lichtkurve ist symmetrisch und kann relativ einfach von anderen veränderlichen Sternen unterschieden werden. Als MACHO-Kandidaten kommen die bereits genannten Vertreter der baryonischen Dunklen Materie in Frage: Braune Zwerge, Planeten oder leuchtschwache M-Sterne (*M-Zwerge*, *M* meint den Spektraltyp).

Natürlich sind auch die Schwarzen Löcher im Kosmos ein großes Reservoir Dunkler Materie. Hinter den Ereignishorizonten aller Schwarzen Löcher des Universums befinden sich vermutlich viele Trilliarden Sonnenmassen. Man zählt sie zwar zur baryonischen Materie hinzu, die Natur dieser kompakten Masseform ist im Detail jedoch völlig unklar: Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass die Masse eines Schwarzen Loches in einer intrinsischen punkt- (Schwarzschild-Lösung) oder ringförmigen (Kerr-Lösung) Singularität steckt!

5.12.4 Nicht-baryonische Dunkle Materie

Neutrinos & WIMPs

Nicht-baryonische Materie ist eher exotischer Natur und Gegenstand der Teilchenphysik. Eigentlich meint der Begriff Dunkle Materie im engeren Sinne nur die nicht-baryonische Form. Die Physiker zählen viele Elementarteilchen zu dieser mysteriösen Materieform, und zwar Teilchen, die sie bereits nachgewiesen haben oder die sie im Rahmen eines theoretischen Modells fordern. Populär sind beispielsweise die Neutrinos, von denen man mittlerweile sicher weiß, dass sie eine endliche Masse haben. Allerdings sind die Neutrinomassen äußerst gering, wie die Superkamiokande-Experimente in Japan gezeigt haben. Neutrinos sind zwar extrem zahlreich im Kosmos, doch tragen sie insgesamt nicht signifikant zur nicht-baryonischen Dunklen Materie bei (vergleiche aktuelle WMAP-Daten). Da sind die großen Brüder der schwach wechselwirkenden Neutrinos schon viel interessanter, nämlich die ebenfalls schwach wechselwirkenden WIMPS (engl. Akronym für ***W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles*, also schwach wechselwirkende, massive Teilchen).

SUSY-Kandidaten

Eine populäre Theorie der Elementarteilchenphysik und der Stringtheorien ist die **Supersymmetrie** (SUSY). Die SUSY sagt einen ganzen 'Zoo' neuer Teilchen voraus! Sie werden übersichtlich mittels Quantenzahlen (Spin, Ladung etc.) sortiert. Zu den bekannten Teilchen des Standardmodells kommen neue Teilchen, die so genannten **supersymmetrischen Partner** hinzu. So postulieren die SUSY-Theoretiker beispielsweise das *Photino* als supersymmetrischen Partner des Photons oder das *Neutralino* als Partner für das Neutrino. Es gibt viele weitere Superpartner zu bereits verifizierten Teilchen des Standardmodells. Allerdings gibt es bisher **für keines dieser SUSY-Teilchen experimentelle Evidenz**. Besonders interessant als Kandidat für die nicht-baryonische Dunkle Materie ist ein SUSY-Teilchen, das Neutralino, das bei diversen astronomischen Beobachtungen in Erwägung gezogen wird. Die Hinweise darauf sind jedoch recht schwach.

Weitere Kandidaten

Das **Axion** ist ein weiterer Kandidat und wurde aus einer Brechung der *Peccei-Quinn-Symmetrie* der Lagrangedichte der Quantenchromodynamik als massives Goldstone-Boson abgeleitet. Es weist vermutlich eine sehr geringe Masse von 10^{-5} eV auf und ist ein **CDM-Kandidat**, der bislang vergeblich gesucht wurde.

5.12.5 kalte und heiße Dunkle Materie

Es gibt eine weitere Nomenklatur für Dunkle Materie: Kosmologen unterscheiden heiße Dunkle Materie (engl. *Hot Dark Matter*, **HDM**) und kalte Dunkle Materie (engl. *Cold Dark Matter*, **CDM**). 'Heiß' bedeutet, dass sich der Kandidat im Zeitalter der Galaxienentstehung mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegte, also Geschwindigkeiten, die vergleichbar sind mit der Lichtgeschwindigkeit; 'kalt' bedeutet entsprechend, dass er sich nicht-relativistisch bewegte. Ein Beispiel für die HDM sind die Neutrinos.

5.12.6 Eine Welt ohne Dunkle Materie?

Es gibt auch alternative Modelle, die ohne Dunkle Materie auskommen. Eine solche Theorie ist **MOND** (und deren relativistische Erweiterung TeVeS), die jedoch auch eine alternative Gravitationstheorie neben der Einsteinschen Theorie darstellt. MOND ist ein unkonventioneller Ansatz. Die meisten Astrophysiker favorisieren die ART mit Dunkle Materie.

5.12.7 3D-Kartographie der Dunklen Materie

Die Existenz der Dunklen Materie wird durch aktuelle Beobachtungen gefestigt. So hat ein Team internationaler Astronomen unter Beteiligung des MPEs die dreidimensionale Verteilung der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt bestimmt (*Massey et al.* Nature 445, 286, 2007).

Die Astronomen wählten für diese Analyse ein sehr gut untersuchtes Himmelsareal, das **COSMOS-Feld**, aus. COSMOS steht für *Cosmic Evolution Survey*. Hier führt eine große Kollaboration internationaler Astronomen Tiefenfeldbeobachtungen in ganz unterschiedlichen Spektralbereichen durch. Im COSMOS-Feld haben etwa 500000 Galaxien Platz - das ist der größte Volumen, das Astronomen bislang analysiert haben!

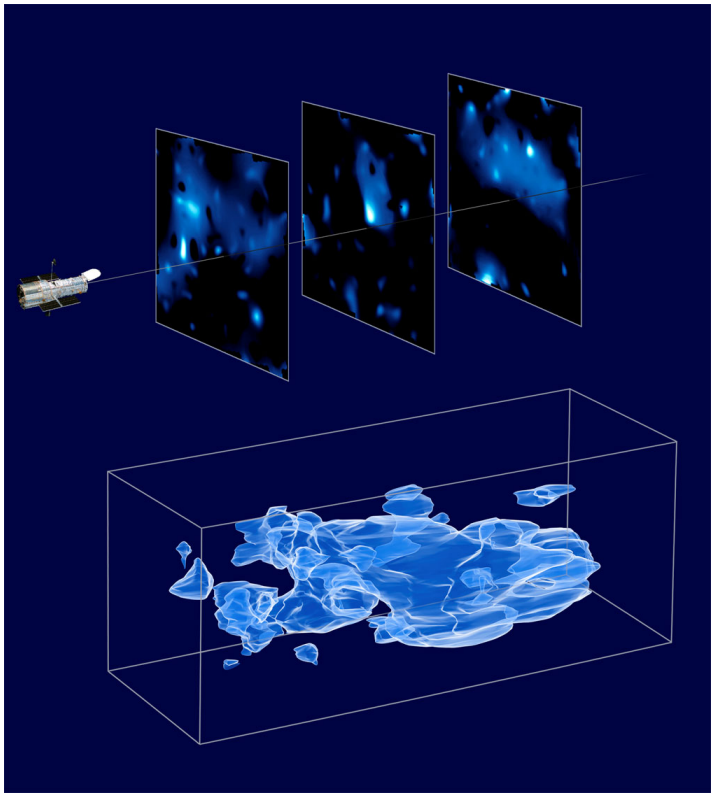

Abbildung 5.10: 3D-Karte der Dunklen Materie in einem Himmelsausschnitt.

Zur Kartographierung der Dunkle Materie nutzten die Astronomen den **Gravitationslinseneffekt** aus: durch den Einfluss von normaler baryonischer Materie *und* Dunkler Materie wird Licht von Hintergrundquellen abgelenkt. Auf diese Weise verrät sich die Dunkle Materie indirekt. Der Gravitationslinseneffekt wurde im Himmelsfeld mit dem Weltraumteleskop Hubble (HST) bestimmt. Um nun nur den Anteil der Dunklen Materie zu bestimmen, muss der Einfluss der normalen Materie herausgerechnet werden. Das gelingt dadurch, dass zusätzlich die Röntgendaten im COSMOS-Feld benutzt werden, die mit dem europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton gesammelt wurden (*Hasinger et al.* ApJS COSMOS Special Issue, 2007). Die Röntgenstrahlung stammt gerade von heißem Gas, sodass aus den Röntgendaten direkt die normale, baryonische Materie bestimmt werden kann. Nun zieht man die Verteilung der normalen Materie (XMM-Daten) von der Verteilung der normalen plus Dunklen Materie (HST-Daten) ab, und findet die dreidimensionale Verteilung der Dunklen Materie, wie sie in der Abbildung 5.10 dargestellt wird (Credit: NASA/ESA, *Massey, CalTech; Finoguenov, MPE*). Von links nach rechts nimmt die kosmologische Rotverschiebung zu, so dass rechts weiter entfernte Strukturen zu sehen sind, die entsprechend zu früheren Zeiten im Universum vorgeherrscht haben. Zu früheren kosmologischen Epochen (im Bild rechts) war die Dunkle Materie relativ gleichmäßig verteilt. Im Laufe der Entwicklung des Universums bildeten sich jedoch durch die Wirkung der Gravitation **Klumpen aus Dunkler Materie** - sind im Bild links gut sichtbar. Die Astronomen sehen durch diese Beobachtungen die Modelle der kosmologischen Strukturbildung bestätigt. Denn in den konzentrierten Bereichen von Dunkler Materie sammelte sich auch die normale Materie. Schließlich entstanden daraus die Galaxien und Galaxienhaufen. Beobachtungen wie diese helfen demnach zu verstehen, wie sich das Universum entwickelt und welche Rolle dabei die Dunkle Materie gespielt hat.

5.12.8 Galaktischer Gasdiebstahl: Die Großen sind die Bösen

Unser heimischer Galaxienhaufen, die Lokale Gruppe, wird dominiert von der Milchstraße und der Andromedagalaxie M31, weil sie am meisten auf die Waage bringen. Doch es gibt auch **kleine Zwerggalaxien**, die die massereichen Galaxien umkreisen wie Bienen den Honig. Drei dieser kleinen Begleitgalaxien sind *Draco*, *Ursa Minor* und *Andromeda IX*, die allesamt extrem leuchtschwach sind. Erst 2006 wurden neue Zwerggalaxien dieser Gattung (engl. *dwarf spheroidals*, dSphs) entdeckt (*Belokurov et al.* 2006; *Zucker et al.* 2006). Einige von ihnen sind uns so nah wie die Magellanschen Wolken ($\sim$ 50 kpc), aber bei weitem nicht so hell. Seltsamerweise werden diese 'dunklen Minigalaxien' von Dunkler Materie dominiert. Sie enthalten kaum normales, leuchtendes Gas. Woher kommt das?

Einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieser Frage haben neue **Simulationen der Dynamik in Galaxienhaufen** geliefert (*Mayer et al.* Nature 445, 738, 2007; astro-ph/0702495). Sie demonstrieren, dass die Zwerggalaxien nicht immer so dunkel waren. Auch die Minigalaxien waren vor langer Zeit reich an leuchtendem Gas. Doch ihnen wurde zum Verhängnis, dass sie in die Nähe größerer Galaxien (wie Milchstraße und Andromeda) kamen. Vor etwa zehn Milliarden Jahren verloren sie einen großen Anteil der baryonischen, leuchtenden Materie durch die **Gezeitenwechselwirkung** mit den großen Nachbargalaxien. Dabei kam den Galaxienriesen die *kosmische Ultraviolett-Hintergrundstrahlung* zu Hilfe: Sie heizte das Gas in den Zwerggalaxien so sehr auf, dass es nur locker gebunden und leicht zu stibitzen war. Bei der Dunklen Materie blieb die UV-Strahlung wirkungslos, sodass die Dunkle Materie in den Zwergen verblieb. Die Quelle der UV-Hintergrundstrahlung sind Quasare und massereiche,

jungen Sterne (*Haardt & Madau* 1996). Ohne Gas, keine Sterne - Deshalb stoppte vor etwa 10 Mrd. Jahren auch Sternentstehung in Zwerggalaxien. Was heute noch sichtbar ist, ist eine kleine Ansammlung von Sternen (*stellare Komponente*), die eingebettet ist in einen Halo Dunkler Materie.

Die Vorhersage der Simulationen (N-Körper plus SPH) ist: *alle* massereichen Galaxien sollten von ein paar Satellitengalaxien umkreist werden, die dominiert werden von Dunkler Materie. Viele Zwerggalaxien werden noch vermisst. Dieses **Missing-Satellites-Problem** (*Moore et al.* 1999) könnte durch die Existenz einiger dieser dunklen Zwerggalaxien gelöst werden. Der Computer hat uns so gezeigt, wie aus kleinen Strahlemännern unglückselige Schattengestalten werden.

5.12.9 Unbekannter Goliath

Die dominante Rolle in der Kosmologie spielt die **Dunkle Energie**. Über zwei Drittel macht ihren Anteil an den kosmischen Energieformen aus. Die uns vertraute, gewöhnliche (baryonische) Materie, bestehend vor allem aus Protonen und Neutronen, ist mit einem Anteil von nur 4% eindeutig schwächer vertreten und eher ein fast irrelevanter Nebeneffekt. Frei nach Astrophysiker Harald Lesch, Universitätssternwarte München: '*Wir sind ein Dreckeffekt!*' Lassen wir den kosmischen Staubsauger lieber in der galaktischen Abstellkammer.

6 Lexikon E

6.1 Eddington-Finkelstein-Koordinaten

Es handelt sich um ein geeignetes Koordinatensystem, dass die Koordinatensingularität nicht rotierender Schwarzer Löcher beseitigt.

6.1.1 Das Problem

Das Linienelement der Schwarzschild-Lösung, die statische Schwarze Löcher beschreibt, hat in seiner historisch ursprünglichen Form ('Schwarzschild-Koordinaten') eine Unzulänglichkeit: Nur für eine unendliche Koordinatenzeit würde dort der Ereignishorizont erreicht werden. Diese Schwarzschildsche Koordinatenzeit wäre daher nur für einen weit entfernten Beobachter sinnvoll, da dies seiner Eigenzeit entsprechen würde. Tatsächlich erreicht ein radial einfallender Testkörper aber in *endlicher* Zeit den Horizont, weshalb sich eine Koordinatentransformation zum Studium dieses Problems anbietet.

6.1.2 Die Lösung: eine Koordinatentransformation

Sir Arthur Eddington (1924) und später *David Finkelstein* (1958) haben nun die später nach ihnen benannten Eddington-Finkelstein-Koordinaten eingeführt. Die Transformationsvorschrift lautet:

$$v = t + r + 2M \ \log(r - 2M)$$

Die neue Zeitkoordinate t enthält die alte Zeitkoordinate t, hängt aber auch von der Radialkoordinate r ab (M ist die Lochmasse).

In dieser neuen Koordinatenzeit werden die einfallenden radialen Nullgeodäten zu Geraden. Dies liefert dann die Eddington-Finkelstein-Form der Schwarzschild-Lösung, die mathematisch die **analytische Erweiterung** der klassischen Schwarzschild-Lösung ist. Die Lösung in Eddington-Finkelstein-Koordinaten ist allerdings *nicht mehr zeitsymmetrisch*! Eine zeitumgekehrte Lösung findet man durch Einführen einer weiteren Zeitkoordinate, was radial auslaufende Geodäten zu Geraden macht. In diesem Sinne unterscheidet man die Schwarzschild-Lösung in *avancierten und retardierten Eddington-Finkelstein-Koordinaten.* Die folgende Gleichung stellt das Linienelement der Schwarzschild-Lösung in der avancierten Eddington-Finkelstein-Form dar:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dv^2 - 2dv \ dr - r^2 \left(d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \ d\Phi^2\right).$$

Wie man sieht, handelt man sich durch die Transformation einen Kreuzterm zwischen Zeit- und Radialkoordinate ein. Der metrische Tensor besitzt also zwei Nebendiagonalelemente.

6.1.3 Trennung durch Horizont

Man kann zeigen, dass die Fläche bei $r = 2\,M$ (Schwarzschildradius, in geometrisierten Einheiten), die Funktion einer semipermeablen Membran zukommt, die für die avancierte Lösung nach innen und für die retardierte Lösung nach außen für Teilchen durchlässig ist! Aus diesem Grund heißt diese Fläche Ereignishorizont, da sie die Grenze aller Ereignisse darstellt, die außen noch beobachtbar sind. Die 'inneren Ereignisse' innerhalb $r = 2\,M$ bleiben also **jedem äußeren Beobachter** verborgen.

6.2 Eddington-Leuchtkraft

Eddington-Leuchtkraft und Eddington-Akkretionsrate sind bedeutende Größen in der **Akkretionsphysik**. Sie dienen dazu, um das Vermögen einer Quelle einzuschätzen, um Materie aufzusammeln und die bei der Akkretion freiwerdende Gravitationsenergie in Form elektromagnetischer Wellen abzustrahlen. Insoweit benötigen Astrophysiker die Eddington-Grenze, um die Strahlungsleistung und das Akkretionsverhalten von Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) wie die Quasare und Seyfertgalaxien einerseits, aber auch den Röntgendoppelsternen und Protosternen andererseits beurteilen zu können. Mit der Eddington-Relation kann auch die Masse des Materie aufsammelnden Objekts, des so genannten *Akkretors*, abgeschätzt werden.

6.2.1 Eddington-Limit: Strahlung kann den Einfall stoppen

Bei der Ableitung dieser charakteristischen Größe der Akkretionsphysik beginnt man bei der **Eddington-Leuchtkraft**. Die Eddington-Leuchtkraft ist diejenige Leuchtkraft, bei der der nach außen gerichtet Strahlungsdruck auf ein Volumenelement im Akkretionsfluss gerade so groß wird wie der nach innen gerichtete Gravitationsdruck. Mit anderen Worten: Eine Quelle mit einer Leuchtkraft oberhalb des Eddington-Limits bläst die Materie in der Umgebung mit der Strahlung weg und bremst oder unterbindet gar die Akkretion. Wenn der Grenzfall gerade erfüllt ist, sprechen die Astronomen von einer *Quelle am Eddington-Limit*. Ist die Leuchtkraft sogar noch größer, so sprechen sie von einer *super-Eddington-Quelle*. Entsprechend gibt es auch die *sub-Eddington-Quellen*, bei denen die Leuchtkraft unter der Eddington-Grenze liegt.

6.2.2 Und so wird's berechnet

Eine Berechnung aus dem Druckgleichgewicht von Strahlungs- und Gravitationsdruck führt auf die Gleichung für die Eddington-Leuchtkraft:

$$L_{\mathrm{Edd}} = \frac{4\pi G M \mathrm{m_p} c}{\sigma_{\mathrm{T}}} \approx 1.3 \times 10^{46}\,\mathrm{erg\,s^{-1}} \left(\frac{M}{10^8\,\mathrm{M_\odot}}\right). \tag{6.1}$$

Hier sind G = 6.672 $\times$ 10^{-8} $\mathrm{cm^3\ g^{-1}\ s^{-2}}$ die Gravitationskonstante, M die Masse des Akkretors, z. B. eines Schwarzen Lochs oder eines Neutronensterns, $\mathrm{m_p}$ = 1.6726231 $\times$ 10^{-24} g bezeichnet die Protonenmasse, weil vor allem diese schweren Teilchen den Gravitationsdruck in einem Volumenelement des Stroms ausmachen, c = 29979245800 $\mathrm{cm\ s^{-1}}$ ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit, σ_T ist der Wirkungsquerschnitt der Thomson-Streuung (Zahlenwert: 6.6524 $\times$ 10^{-25} $\mathrm{cm^2}$), da der Strahlungsdruck auf das Volumenelement besonders durch Streuung der Photonen an den Elektronen hervorgerufen wird. Dabei ist erg eine

sehr gebräuchliche Einheit im cgs-System für die Energie. Astrophysiker bevorzugen die Verwendung von erg gegenüber Joule.

6.2.3 physikalische Bedeutung

Diese erste Gleichung lädt zur Diskussion ein: Sie besagt, dass - wie man intuitiv erwarten würde - ein Akkretor größerer Masse eine größere Leuchtkraft erzeugt. Das ist plausibel, hat doch eine schwere Masse ein tieferes Gravitationspotential als eine leichte Masse. Akkretion ist nicht anderes als das Umwandeln von Gravitationsenergie in Strahlungsenergie. Plakativ gesagt, leuchtet ein akkretierender AGN heller als ein Neutronenstern. Das deckt sich auch glücklicherweise mit den astronomischen Beobachtungen.

6.2.4 Effizienz und Eddington-Akkretionsrate

Die Leuchtkraft mit der Dimension Energie/Zeit kann über eine Größe namens Effizienz (in folgender Gleichung ϵ) an eine Akkretionsrate mit der Dimension, Masse pro Zeit, koppeln. Die Effizienz macht eine Aussage darüber, wie effizient die akkretierte Masse in Strahlung umgewandelt werden kann. Ein typischer, empirischer Wert für die Effizienz ist 10% (bei schnell rotierenden Löchern kann er auch bei 42% liegen!). Korrigiert man um einen Faktor c^2 wird aus der Masse eine Energie und aus der Leuchtkraft eine Akkretionsrate: Aus der **Eddington-Leuchtkraft** wird so die **Eddington-Akkretionsrate**:

$$\dot{M}_{\mathrm{Edd}} \approx 20\,\mathrm{M}_\odot\,\mathrm{yr}^{-1}\,\left(\frac{0.1}{\epsilon}\frac{L}{10^{47}\,\mathrm{erg\,s}^{-1}}\right).$$

Diese fundamentale Gleichung der Akkretionsphysik sagt aus, dass der leuchtkräftigere von zwei Quasaren auch eine höhere Akkretionsrate aufweisen muss **und** - aufgrund der ersten Gleichung (6.1) - dass der Akkretor des leuchtkräftigeren Quasars auch massereicher ist.

In den Gleichungen wurden typische Zahlenwerte für AGN zugrunde gelegt. Theoretische Astrophysiker benutzen meist das cgs-System und geben deshalb Energien nicht in Joule, sondern in erg an. Die Gleichungen besagen nun, dass ein Quasar, bei dem Astronomen eine Leuchtkraft von 10^{47} erg/s beobachten gemäß Eddingtons Argument ein supermassereiches Schwarzes Loch von 100 Mio. bis einer Mrd. Sonnenmassen beherbergen muss!

6.2.5 Einheitliche Sicht auf Materieaufsammler

Wie im Lexikoneintrag Akkretion besprochen wird, kann man ein vereinheitlichendes Schema vieler akkretierender Quellen schaffen, indem man beobachtete Akkretionsraten in Einheiten der Eddington-Akkretionsrate ausdrückt. Das ermöglicht die reizvolle, globale Sichtweise, dass man stellare und supermassereiche Schwarze Löcher vergleichen kann. Es stellt sich heraus, dass die Quellen zwischen verschiedenen Akkretionszuständen wechseln. Ein Musterbeispiel ist der Röntgendoppelstern Cyg X-1.

6.2.6 Natur mit Kontrollfunktion

Im Prinzip ist die Eddington-Leuchtkraft ein schönes Beispiel, wie die Natur Prozesse von selbst regelt. Denn eine hohe Akkretionsrate bewirkt eine hohe Leuchtkraft. Wird jedoch die Eddington-Leuchtkraft überschritten, sinkt automatisch die Akkretionsrate durch den angestiegenen Strahlungsdruck, so dass die Leuchtkraft wieder sinkt und sub-Eddington wird. Man kann sagen, dass akkretierende Objekte selbstregulierend - *autoregulativ* - sind.

6.3 Effektivtemperatur

Diese Zustandsgröße für Sterne legt eindeutig seinen Spektraltyp fest. So weisen O-Sterne eine höhere Effektivtemperatur auf, als F-Sterne oder die Sonne.

6.3.1 Sterne sind Wärmestrahler

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

Dies Gleichung für die Effektivtemperatur leitet sich von dem T^4-Gesetz der Planck-Strahler (Wärmestrahler) für einen Stern ab. Die Intensität des Schwarzen Körpers möge dabei derjenigen genügen, die der Stern an seiner Oberfläche abstrahlt. Diese folgt aus der **Leuchtkraft** L des Sterns über seiner Oberfläche, also dem 4π-fachen des Quadrats des **Sternradius** R. Die vierte Wurzel aus diesem Quotienten liefert gerade die Effektivtemperatur T_{eff} (das Symbol σ kennzeichnet dabei die *Stefan-Boltzmann-Konstante*, 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4}).

6.3.2 So liest man direkt an diesem einfachen Zusammenhang ab, dass

- ◇ bei gleicher Größe (gleichem Sternradius) der heißere Stern der leuchtkräftigere ist,
- ◇ bei gleicher Temperatur (d. h. gleichem Spektraltyp) der kleinere Stern der leuchtschwächere ist.

Die letzte Aussage ist gerade die Grundlage der Yerkes-Leuchtkraftklassen, eine Unterscheidung der Sterne in Zwerge und Riesen.

Anhand des fundamentalen Hertzsprung-Russell-Diagramms der Sterne lassen sich diese Verhältnisse hervorragend illustrieren.

6.4 Eichtheorie

Eichtheorien (engl. *gauge theory*) bilden ein allgemeines Konzept zur Beschreibung von Symmetrien in den Quantenfeldtheorien der vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik mithilfe der Gruppentheorie.

6.4.1 Aus Symmetrien werden Teilchen

Die *Erhaltung der lokalen Eichsymmetrie* erfordert Eichfelder oder **Eichbosonen**, die als bosonische Austauschteilchen der jeweiligen Wechselwirkung interpretiert werden. Gruppentheoretisch bezeichnet man sie als Erzeuger oder *Generatoren*. Die Eichbosonen haben in jeder bestimmten Quantenfeldtheorie ihren eigenen Namen bekommen: In der Quantenchromodynamik (QCD) heißen sie Gluonen; in der Quantenelektrodynamik (QED) sind es die Photonen; in der elektroschwachen Theorie sind es W^+-, W^-- und Z-Teilchen (manchmal mit dem Oberbegriff Weakonen versehen).

6.4.2 geometrische Interpretation und Loops

Die Eichtheorien konnten mithilfe der **Loop-Zustände** *geometrisch* gedeutet werden (*Gambini & Trias*, 1981 und 1986). Eine Anwendung dieses Konzepts auf eine Quantengravitation mündete in die Loop-Quantengravitation (*Rovelli & Smolin*, 1988 und 1990). Loops (dt. Schleifen) sind dabei die fundamentalen Einheiten in einer quantisierten Raumzeit.

6.4.3 Lagrangedichte & Feldgleichungen

Prinzipiell nutzt man - wie schon einfach in der klassischen Elektrodynamik beispielhaft gezeigt werden kann - eine **Eichfreiheit** einer Theorie aus, um die Symmetrie zu erhalten. Mit *Symmetrie* ist hier die Symmetrie der **Lagrangedichte** gemeint. Die Lagrangedichte (*Lagrangian*) legt die Dynamik einer Quantenfeldtheorie fest, weil aus ihr die Bewegungsgleichungen der Theorie, die so genannten Feldgleichungen nach einer bestimmten mathematischen Prozedur folgen. Diese Gleichungen sind dann *forminvariant* unter den *Eichtransformationen*.

6.5 Einstein-Ring

Diese kreisförmige Erscheinung wird durch eine **Gravitationslinse** hervorgerufen und kann nur mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) erklärt werden.

6.5.1 Der Visionär Einstein

Nach Einsteins Theorie vermag Masse (bzw. generell Energie) elektromagnetische Strahlung abzulenken. In der Sprache der ART bewegt sich das Licht auf der Nullgeodäte der entsprechenden gekrümmten Raumzeit, die die Masse gemäß der Einsteinschen Feldgleichungen diktiert.

Albert Einstein spekulierte bereits 1936 in einer Veröffentlichung in der Fachzeitschrift *Science* über die Möglichkeit, dass eine Ansammlung hoher Masse, das Licht dahinter liegender Objekte wie eine Linse ablenken könnte, so dass **Mehrfachbilder** ein und desselben Objekts entstehen könne. Der Einstein-Ring entsteht unter einer ganz besonderen Konstellation, nämlich wenn Hintergrundquelle, Linse und Beobachter auf einer Linie liegen. Nur dann wird das Bild in ein charakteristisch rundes Gebilde verzerrt.

Einstein war sich darüber im Klaren, dass der Effekt freilich winzig sei, und kaum eine Chance bestünde, diesen Verzerrungseffekt direkt zu beobachten. Einstein schrieb:

Of course, there is no hope of observing this phenomenon directly.

Doch Einsteins Linsen-Idee sollte sich Jahrzehnte später als sehr weitsichtig entpuppen, denn 1988 entdeckten Radioastronomen mit dem VLA genau die Struktur, die Einstein vorhergesagt hatte! Diese Entdeckung bei der Radioquelle 4C 05.51 zeigt das beobachtete Radiofoto 6.1 bei einer Wellenlänge von 2.0 cm bzw. 15 GHz (Credit: *Hewitt & Turner*, NRAO/VLA 1988).

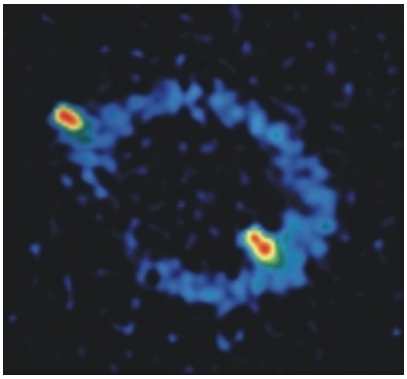

Abbildung 6.1: Der erste Einstein-Ring, beobachtet 1988 mit dem VLA.

6.5.2 Ein Zoo von Einstein-Ringen und Mehrfachbildern

In vielen beobachteten Abbildungen von Galaxienhaufen machen sich die Gravitationslinsen auch als charakteristische **fadenförmige Strukturen** bemerkbar. Dies sind stark verzerrte und auseinander gezogene Bilder einzelner Galaxien.

Mittlerweile entdecken die Astronomen sehr häufig Einstein-Ringe, auch in anderen Wellenlängenbereichen. Einen Ring sieht man zum Beispiel beim Quasar 1938+666. Eine typische Konstellation ist, dass ein massereicher Galaxienhaufen, das Licht dahinter liegender Objekte, beispielsweise eines Quasars, ablenkt. Nicht immer sind dabei die exakten Konstellationsbedingungen für den Einstein-Ring realisiert, so dass dann Mehrfachbilder (ohne Ring) entstehen. Beim Quasar QSO 0957+561 kommt durch den Gravitationslinseneffekt ein doppeltes Abbild ein und desselben Quasars zustande. Beim Quasar 1422+231 mit der hohen Rotverschiebung $z = 3.62$ beobachteten Astronomen sogar vier Quasarbilder, die durch eine massereiche elliptische Galaxie im Vordergrund gelinst werden. Dabei ist es möglich, dass die Mehrfachbilder das so genannte **Einstein-Kreuz** bilden, wie im Falle des Quasars QSO 2237+0305 in einer Entfernung von 8 Mrd. Lj oder $z = 1.7$. Hier bildeten sich vier Bilder des Quasars, die einen maximalen Abstand von 1.6än der Himmelssphäre haben.

6.5.3 Linsen im Mini-Format

In so genannten Mikrolinsen sind die Linsen massearme, stellare Objekte. Hier reicht die Auflösung nicht aus, um die Verzerrung abzubilden. Allerdings kommt es während eines Linsenereignisses zu einem charakteristischen, symmetrischen Helligkeitsanstieg. Dieses Verfahren wird genutzt, um massearme, leuchtschwache Objekte im dunklen Halo von Galaxien, auch bei der Milchstraße, nachzuweisen. Die Astronomen waren sprachlich erfinderisch und nennen solche Objekte **MACHOs** (engl. *massive compact halo objects*; also: *massive, kompakte Halo-Objekte*). Sie vermuten, dass es sich dabei vor allem um Braune Zwerge und M-Sterne handelt.

6.5.4 Pionier-Papiere

◇ Einstein, A., *Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field*, Science **84**, 506-507, 1936

◇ Hewitt, J.N. et al., *Unusual radio source MG1131+0456 - A possible Einstein ring*, Nature **333**, 537-540, 1988

6.6 Einstein-Rosen-Brücke

Die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) bieten eine Fülle von Lösungen an, zu denen auch die Kruskal-Lösung gehört. Sie kann als eine spezielle Form eines Schwarzen Loches aufgefasst werden.

6.6.1 Schwarzes trifft auf Weißes Loch

Das Studium der Kruskal-Raumzeit offenbart eine interessante Topologie: es gibt eine Vergangenheits- und eine Zukunftssingularität, in denen die Geodäten enden können. Je nach Wahl der Zeitkoordinate kann die Kruskal-Mannigfaltigkeit als zwei in der zeitlichen Entwicklung verschiedene Schwarzschild-Mannigfaltigkeiten gedacht werden. Entweder diese beiden Raumzeiten vereinigen sich beim Schwarzschild-Radius $r = 2\text{m}$ (Radius des Ereignishorizonts eines statischen Lochs) oder sie sind getrennt. Diese Morphologie erfährt eine interessante Interpretation als ein System aus einem Schwarzen Loch (retardierte Komponente) und einem Weißen Loch (avancierte Komponente), das aber zeitlich instabil ist. Der temporäre Raumzeitkanal zwischen den Schwarzschild-Mannigfaltigkeiten heißt **Einstein-Rosen-Brücke**.

6.6.2 Nur Science-Fiction?

Es ist vorstellbar, aber spekulativ, dass dieser Kanal verschiedene Universen verbinden könnte, weil die Feldgleichungen die globale Topologie *nicht* festlegen. Diese Idee wurde dankbar in der Science-Fiction-Literatur wie bei *Contact* von *Carl Sagan* aufgenommen. So soll die Einstein-Rosen-Brücke in Wurmlöchern existieren, aber für all das gibt es keine Belege in der Astronomie: Keinerlei astronomische Beobachtung legt ein Wurmloch nahe! Sie gelten nach wie vor als hypothetisch. Für die theoretische Analyse von Einstein-Rosen-Brücken und Wurmlöchern eignen sich die so genannten Penrose-Diagramme, die in der ART häufig benutzt werden.

6.7 Einstein-Tensor

Der Einstein-Tensor ist einer der wesentlichen Tensoren in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Er ist gerade die linke Seite der Einsteinschen Feldgleichungen, während die rechte Seite im Vakuumfall verschwindet, im allgemeinen Fall jedoch gleich dem Energie-Impuls-Tensor plus Lambda-Term (siehe kosmologische Konstante) ist.

6.7.1 Wir basteln uns einen Einstein-Tensor

Der Einstein-Tensor setzt sich tensoriell aus dem Ricci-Tensor (2. Stufe) und dessen Verjüngung, dem **Ricci-Skalar** (Tensor 0. Stufe), zusammen:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R.$$

Der Ricci-Tensor selbst ist ebenfalls eine Verjüngung des Riemann-Tensors (4.Stufe). Das rechtfertigt auch die Bezeichnung *Einsteinscher Krümmungstensor*. Der Riemann-Tensor besteht wiederum aus partiellen Ableitungen der Christoffel-Symbole, die selbst Ableitungen der Metrik sind. Das klingt kompliziert, daher noch einmal die Vorgehensweise bei bekannter Metrik (= Raumzeit):

- ◇ die Ableitungen des metrischen Tensors liefern die Christoffel-Symbole;
- ◇ die Ableitung der Christoffel-Symbole bilden den Riemann-Tensor 4. Stufe;
- ◇ die Verjüngung des Riemann-Tensors und die weitere Verjüngung des daraus folgenden Ricci-Tensors zum Ricci-Skalar konstituieren zusammen mit dem metrischen Tensor den Einstein-Tensor.

6.7.2 Im Einstein-Tensor steckt verbogener Raum (und verbogene Zeit)

Der Einstein-Tensor enthält also die ganze Information über die Raumzeit und wird durch kompliziertes Verschachteln der metrischen Koeffizienten erzeugt.

6.8 Eisenlinie

Die etwas laxe Formulierung Eisenlinie, meint (in der Physik) generell gesprochen eine Spektrallinie des Elements Eisen (Elementsymbol *Fe*, lat. *ferrum*). Davon gibt es natürlich viele in ganz unterschiedlichen physikalischen Bereichen (Atomphysik, Kernphysik etc.), je nachdem welche Teilchen den elektromagnetischen Übergang bewerkstelligen. Wir betrachten im Folgenden elektronische Übergänge, d. h. die Strahlungsemission ist eine Folge davon, dass ein Elektron von einer Atomschale auf die andere wechselt. Die Atomhaupt- und unterschalen (*Orbitale*) unterscheiden sich darin, dass die Elektronen unterschiedliche Energien haben. Die Energie des emittierten Photons passt genau zu dem Energieunterschied der Atomschalen zwischen denen der elektronische Übergang stattfindet.

6.8.1 Linie von Atom vs. Ion

Die Eisenlinie gibt es streng genommen gar nicht, weil im Eisenatom eine ganze Reihe von Übergängen möglich sind. Ein neutrales Eisenatom (in astronomischer Notation **FeI**, siehe dazu auch Metall) hat 26 Elektronen. Eisen kann jedoch auch ionisiert werden, so dass einige Elektronen in den Schalen fehlen. Die Ionisation kann eine Folge von Stößen zwischen den Atomen sein, wie sie besonders heftig bei hohen Temperaturen stattfinden (*Stoßionisation*). Die Ionisation findet auch durch ein elektromagnetisches Strahlungsfeld ausreichender Energie statt (*Photoionisation*).

Durch Ionisation entstehen Eisenionen, die nur noch 25, 24,..., 3, 2 oder nur ein Elektron in der Atomhülle haben. Je nach Anzahl spricht man von wasserstoffartigem (engl. *H-like*) Eisen bei einem Elektron, heliumartigen (engl. *He-like*) Eisen bei zwei Elektronen, lithiumartigen (engl. *Li-like*) Eisen bei drei Elektronen in den Schalen etc. Da das Coulomb-Potential von der elektrischen Ladung abhängt, verschieben sich die Ionisierungsenergien mit dem Ionisationsgrad. Es ist deshalb klar, dass es einen ganzen Zoo von Eisenlinien gibt, je nachdem in welchem Ion der Übergang stattfindet und je nachdem von welcher Unterschale zu welcher Unterschale der Übergang stattfindet. In der Spektroskopie wird das durch eine exakte Nomenklatur festgelegt.

6.8.2 Fe Kα - Werkzeug der Röntgenastronomie

In der Astronomie, im Speziellen in der Röntgenastronomie, sind Röntgenemissionslinien von großem Interesse. Astronomen beobachten sie in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und Röntgendoppelsternen (siehe auch Galaktischer Schwarz-Loch Kandidat, GBHC, und Mikroquasare).

Prominente, weil besonders starke Emissionslinien von neutralem Eisen sind die Fe Kα- und Fe Kβ-Linien: Die Fe Kβ-Linie liegt bei einer Ruheenergie von 7.06 keV (eigentlich sind es zwei dicht benachbarte Linien bei 7.057 und 7.058 keV). Die hier wesentlich zu diskutierende Emissionslinie von neutralem Eisen ist jedoch die Fe Kα-Linie bei einer Ruheenergie des emittierenden Plasmas von 6.4 keV (ebenfalls an sich zwei Linien bei 6.405 und 6.391 keV). Sie ist deshalb so wichtig, weil ihre Fluoreszenzausbeute sehr groß ist und sie die neutrale Fe Kβ-Linie etwa um einen Faktor 8 übertrifft! Der Energiebereich von keV macht klar, dass diese Linien im elektromagnetischen Spektrum in der Domäne der Röntgenstrahlung liegen.

6.8.3 Erzeugung durch Fluoreszenz

Diese Emissionslinien werden über den Mechanismus der *Fluoreszenz* gebildet. Der Fluoreszenzmechanismus erfordert eine räumliche Nähe von kaltem und sehr heißem Material. Die heiße Quelle wird Korona genannt und liefert die hochenergetische Primärstrahlung (ebenfalls Röntgenstrahlung). Sie bestrahlt die kalte Materie, die sich typischerweise in einer geometrisch dünnen (d. h. flachen) und optisch dicken ('undurchsichtigen') Akkretionsscheibe ansammelt. Diese Scheibe nennen Akkretionsphysiker die Standardscheibe (*Shakura-Sunyaev Disk*, SSD). An der ionisierten Schicht wird ein Großteil der harten Röntgenstrahlung reflektiert, was sich in Röntgenspektren in einem breiten Reflektionsbuckel bei 20 bis 30 keV niederschlägt. Man könnte sagen, dass das die 'Antwort auf das koronale Inputspektrum' ist. Astronomen beobachten dies sowohl in Röntgendoppelsternen, die einen Neutronenstern oder ein stellares Schwarzes Loch als Akkretor enthalten können, als auch in AGN, wie den Seyfertgalaxien oder Quasaren (besonders bei Typ 1). In den Zentren der Galaxien ist es allerdings immer ein superschweres Schwarzes Loch, das akkretiert.

6.8.4 Höllenfeuer

Die Strahlung kommt aus der innersten Region des akkretierenden Systems, wo sehr hohe Temperaturen (10^5 bis 10^7 Kelvin, je nach Akkretionsrate und Masse des Akkretors) herrschen. Daher ist das Akkretionsmaterial bereits teilweise ionisiert und geht im Zentrum des Systems in ein Plasma über. Neben anderen chemischen Elementen befindet sich auch Eisen in der Akkretionsscheibe. Nachfolgend sei beispielhaft der Fall der starken Kα-Linie

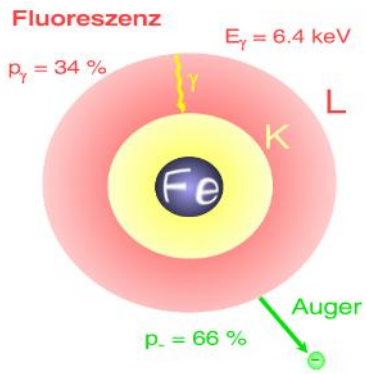

Abbildung 6.2: Fluoreszenzübergang der Eisenemissionslinie im Röntgenbereich.

neutralen Eisens skizziert. Eisen absorbiert ab einer Schwellenenergie von 7.1 keV die harte Primärstrahlung der Korona. Durch die Absorption eines Röntgenphotons wurde ein 1s-Elektron (dem Grundzustand im Eisenatom) in ein höheres, freies Energieniveau befördert. Nun können zwei Prozesse stattfinden (Abbildung 6.2):

- Entweder kann durch Fluoreszenz ein Übergang von der L- zur K-Schale ein Röntgenphoton der Ruheenergie von 6.4 keV emittieren. Dies geschieht mit einer Wahrscheinlichkeit von 34 %.
- Oder im konkurrierenden Prozess, dem **Auger-Effekt**, kann das Plasma mit weiteren heißen Elektronen angereichert werden. Es kommt zur Emission von *Auger-Elektronen*. Dieser Prozess ist mit 66 % dominant.

Diese Eisenlinie kann aus den Röntgenbeobachtungen bei plausiblen physikalischen Annahmen für das Kontinuum ('hartes Potenzgesetz mit cut-off'), das aus Comptonisierung entstand, im Spektrum extrahiert werden.

6.8.5 Form der Linie ist der Schlüssel

Das Profil der Eisenlinie hat eine sonderbare Form, weil sie durch **relativistische Effekte** 'verbogen' wird:

- **Beaming**,
- Gravitationsrotverschiebung
- und **Doppler-Effekt**.

Forward Beaming (dt. 'Vorwärtsstrahlen') bewirkt, dass der blaue Flügel der Linie heller wird. Physikalisch erklärt ist es, dass die emittierende Materie in der Akkretionsscheibe sehr schnell, relativistisch schnell, um das Schwarze Loch rotiert, bevor sie von ihm verschlungen wird. Die Strahlung wird dabei in Bewegungsrichtung kollimiert und erscheint daher einem Beobachter, der sie sehen kann, heller. Außerdem wird die Strahlung blauverschoben, wird also hochenergetischer.

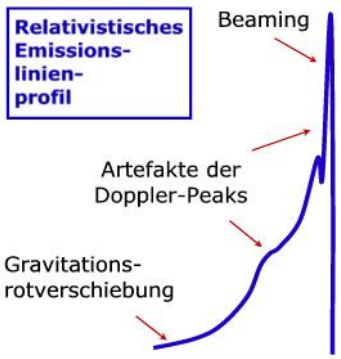

Abbildung 6.3: relativistische Emissionslinie von ionisiertem Eisen nahe eines Schwarzen Lochs.

Auf derjenigen Seite der Akkretionsscheibe, die sich vom Beobachter entfernt, gibt es entsprechend **Back Beaming** ('dt. Wegstrahlen'), eine Verringerung der Intensität des roten Flügels der Spektrallinie. Dies ist also eine Rotverschiebung (aber keine kosmologische!). Der Beaming-Effekt ist aus Teilchenbeschleunigern bekannt, wo relativistisch schnelle Elektronen Synchrotronstrahlung emittieren. Beaming beruht auf der Speziellen Relativitätstheorie. Er spielt also eine Rolle bei relativistisch schnell bewegten, strahlenden Körpern.

Gravitationsrotverschiebung (engl. *gravitational redshift*) hingegen ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie und macht sich dadurch bemerkbar, dass der rote Flügel der Emissionslinie lang zu kleineren Energien hin auseinander gezogen wird. Die emittierten Photonen sind dem Schwarzen Loch nämlich schon so nahe, dass sie Arbeit gegen das starke Gravitationsfeld verrichten müssen und daher Energie verlieren. Die Rotverschiebung der Strahlung ist also *gravitativ* bedingt. Ein Energieverlust eines Photons verschiebt es zum roten Ende des Spektrums, daher der Begriff **Rotverschiebung**, der vor allem in der Kosmologie gebräuchlich ist. Hier wird er auf die Fluchtbewegung der Galaxien infolge der kosmischen Expansion des Universums angewendet. Diese kosmologische Rotverschiebung muss man von der gravitativen unterscheiden.

Der **Doppler-Effekt** ist an sich ein klassischer Effekt, der auch ohne relativistische Beschreibung auftritt. Der Doppler-Effekt findet bei bewegten Quellen Anwendung, die elektromagnetische oder akustische Wellen emittieren: Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter zu, so werden die Wellen gestaucht, also die Wellenlänge verkürzt (Blauverschiebung); bewegt sich die Quelle vom Beobachter weg, so werden die Wellen auseinander gezogen, dementsprechend nimmt ihre Wellenlänge zu (Rotverschiebung). Der Doppler-Effekt hängt empfindlich von der Scheibenneigung (*Inklination*) ab, weil sie den Bewegungszustand des Plasmas relativ zum Beobachter festlegt: niedrige Inklination (engl. *face-on*) bedeutet, dass kaum eine Bewegung relativ zum Beobachter stattfindet. Als Folge davon gibt es fast keinen Doppler-Effekt; hohe Inklination (engl. *edge-on*) wiederum hat sehr hohe Relativbewegungen in Bezug zum Beobachter zur Folge: ein Teil der Akkretionsscheibe rotiert auf den Beobachter zu (Wellenlängenverkürzung, Blauverschiebung), der andere Teil der Scheibe rotiert von ihm weg (Wellenlängendehnung, Rotverschiebung). Eine beliebig dünne Spektrallinie (Delta-Distribution oder Gauß-Peak) im Ruhesystem wird charakteristisch allein durch den Doppler-Effekt im Laborsystem in ein Linienprofil aus zwei Höckern (engl. *Doppler horns*, siehe Abbildung 6.3) deformiert.

Die Voraussetzung für diese zwei Dopplerspitzen ist, dass die Inklination im mittleren bis hohen Bereich zwischen 40 und 90 Grad liegt. Genau zwischen den beiden Höckern (einer entspricht dem blauverschobenen, der andere dem rotverschobenen Anteil) liegt gerade die Ruhewellenlänge oder Ruheenergie der Strahlung. Weil die beiden relativistischen Effekte Beaming und Gravitationsrotverschiebung hinzukommen, bleibt vom Doppler-Effekt nur noch ein verkümmertes Relikt übrig. Das ist die charakteristische Signatur bei heißen Eisenemissionslinien aus den Akkretionsscheiben Schwarzer Löcher. Das Ergebnis aller drei Effekte ist schließlich ein schiefes, asymmetrisches Linienprofil, das Astronomen tatsächlich bei Kandidaten für Schwarze Löcher beobachten. Als Teleskope dienen dabei Röntgenobservatorien im Weltraum, wie die Satelliten ASCA, RXTE, XMM-Newton und Chandra.

6.8.6 Die Linie als Informant über Loch und Akkretionsfluss

Mit den relativistischen Emissionslinien betreiben die Röntgenastronomen Diagnostik an Schwarzen Löchern und an dem in sie einfallenden Materiestrom. Diese Technik kann sowohl auf stellare Schwarze Löcher in Röntgendoppelsternen, als auch auf supermassereiche Schwarze Löcher in AGN angewendet werden. Besonders interessante AGN sind in diesem Zusammenhang Seyfert-Galaxien und Quasare. Linien als diagnostische Werkzeuge eignen sich, um beispielsweise die Neigung des Scheibensystems zur Sichtlinie zu bestimmen oder die Plasmadynamik abzulesen.

6.8.7 Weitere Ressourcen

Ich habe in meiner Diplomarbeit (2000), im Rahmen eines neuen Modells in einem Papier (2004) und die Gravitationsrotverschiebung ebenfalls in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung (2006) diese Phänomene eingehend untersucht.

- ◇ Web-Artikel: Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing,
- ◇ Web-Artikel: Röntgenlinien - Sendboten von Loch und Scheibe,
- ◇ Vortrag vom Mai 2003: Relativistic Emission Lines of Accreting Black Holes,
- ◇ Diplomarbeit herunterladen (pdf mit 3.9 MB)
- ◇ Müller, A. & Camenzind, M.: *Relativistic emission lines from accreting black holes - The effect of disk truncation on line profiles*, A& A **413**, 861-878, 2004 oder als Preprint unter astro-ph/0309832 (2003)
- ◇ Müller, A. & Wold, M.: *On the signatures of gravitational redshift: The onset of relativistic emission lines*, A& A **457**, 485-492, 2006 oder als Preprint unter astro-ph/0607050 (2006)

6.9 Eklipse

Eine Eklipse (lat. *eclipsis*: Ausbleiben, Finsternis) ist eine Finsternis, also eine Verfinsterung eines Himmelskörpers durch die Bedeckung eines anderen. Vor allem **Sonnenfinsternis** (SoFi) und **Mondfinsternis** (MoFi) werden unter dem Begriff Eklipsen zusammengefasst.

Dies ist zu unterschieden von einem *Durchgang*, dem Transit.

6.9.1 Bezug zur Ekliptik

Die Ähnlichkeit der Begriffe Eklipse und Ekliptik ist kein Zufall, denn die Eklipsen können nur stattfinden, wenn sich alle drei beteiligten Himmelskörper (Sonne, Erde und Mond) in derselben Ebene, der Ekliptik, befinden.

6.10 Ekliptik

Die Ekliptik ist eine Ebene in der Sonne und (mehr oder weniger) alle Planeten liegen.

6.10.1 Ein Zufall?

Es ist kein Zufall, dass sich Sonne und Planeten in der gleichen Ebene befinden. Die Ursache findet man in den Frühphasen des Sonnensystems, als es sich gerade gebildet hat.

6.10.2 Entstehung der Sonne

Die Sonne entstand aus metallreichem, interstellarem Material. Dieses Ausgangsmaterial haben vorhergehende Sterngenerationen erzeugt, indem sie es in Rote-Riese-Phasen und Supernovae freigesetzt haben. Typischerweise besitzt diese Materie *Drehimpuls*, d. h. sie rotiert. Dabei bildet sich eine Scheibenstruktur aus, weil die Materie durch Zentrifugalkräfte von der Drehachse weggedrückt wird. Magnethydrodynamische Prozesse wie vor allem die magnetische Rotationsinstabilität sorgen dafür, dass sich die Materie im Zentrum der Scheibe anhäuft. Die Scheibe heißt im Fachjargon *protoplanetare Scheibe* oder kurz **Proplyd** (Kunstwort aus ***pro**to**pl**anetar**y** **d**isk*). Sobald dieses Material eine kritische Massengrenze, seine charakteristische Jeans-Masse, erreicht, setzt der Gravitationskollaps ein. Die Protosonne (siehe Protostern) war massereich genug (nämlich schwerer als 0.08 Sonnenmassen), dass dann thermonukleare Fusionsprozesse, insbesondere die pp-Kette, einsetzten: **Die Sonne erstrahlte als Stern!**

6.10.3 Leerfegen der Sonnenumgebung

Als Stern produziert die Sonne Strahlung, die sich von der Photosphäre auf den Weg in den Weltraum macht. Die Photonen besitzen allerdings einen Impuls und üben damit Druck auf das aus, was sich ihnen in den Weg stellt: den **Strahlungsdruck**. Darüber hinaus gehen von der Sonne Teilchen aus, der so genannte **Sonnenwind**, der ebenfalls Druck auf die Umgebung ausübt.

Strahlungsdruck und Sonnenwind pusten nun die restliche Materie weg, aus der die Sonne entstanden ist. Aber nicht alles. Denn innerhalb der Scheibe, haben sich Materieansammlungen durch die Wirkung der Gravitation zu **Planeten und Planetoiden** verdichtet.

6.10.4 Zeugen des Szenarios

Die Ekliptik bezeugt als Zeuge Nr. 1 diese Entstehungsgeschichte, weil noch heute Sonne und Planeten, die sich aus einer Urscheibe bildeten, **in einer Ebene** anordnen. Außerdem wurde nicht die ganze Materie aus dem Sonnensystem gefegt, denn **interplanetares Gas und Staub** sind nach wie vor überall fein verteilt vorhanden. Das offenbart uns Zeuge Nr. 2:

das **Zodiakallicht**. Ein dritter Zeuge sind die jungen Sterne, die die Astronomen beobachten und die genau die Entwicklungsstadien zeigen, die die Sonne schon durchlief: So befinden sich die **T Tauri Sterne** gerade in der Phase, in der sie beginnen, ihre Umgebung 'leerzufegen'.

6.10.5 Ekliptik am Himmel

Bislang war nur von der Ekliptik als Ebene die Rede - aus der Sicht des irdischen Beobachters sieht alles ganz anders aus. Wir sind selbst Teil der Ekliptikalebene und rotieren um die Sonne. Hinzu kommt, dass die Erdachse gegenüber der Ekliptik geneigt ist. Der Winkel zwischen Ekliptik und Himmelsäquator beträgt 23 Grad und 27 Minuten. Diese **Schiefe der Ekliptik** verursacht gerade die Jahreszeiten. Wäre die Erdachse genau senkrecht auf der Ekliptikalebene, würde auf jedem Breitengrad immer dieselbe Jahreszeit herrschen. Läge die Erdachse genau in der Ekliptik würde an einem der Pole immer Sommer und Tag und am anderen Pol Winter und Nacht herrschen - zum Glück ist die Ekliptik schief.

Projiziert man nun die Ekliptik an den Himmel, so biegt sie sich als Band einmal um unseren ganzen Globus. In diesem ekliptikalen Band liegen gerade ein paar ganz besondere Sternbilder, die zwölf **Tierkreiszeichen**. Nun ist auch klar, weshalb man niemals einen Planeten beispielsweise im Großen Bären sehen wird: die Planeten liegen in der Ebene der Ekliptik und *müssen* sich daher durch die Tierkreiszeichen bewegen - nirgendwo sonst! Der Große Bär ist jedoch weit weg von der Ekliptik und nahe am Himmelspol. Wer Planeten sucht, sollte also sein Augenmerk auf die Tierkreiszeichen richten.

6.10.6 Bezug zur Ekliptik

Nur in der Ekliptik ereignen sich Eklipsen (Sonnen- und Mondfinsternisse), weil dann Sonne, Erde und Mond in derselben Ebene sind.

6.10.7 Lesehinweis

- ◇ Web-Essay: Der Sternenhimmel

6.11 Ekpyrotisches Modell

Ein modernes, kosmologisches Modell, das den Urknall durch die Kollision zweier Universen erklärt! Diese mutige und spekulative Annahme geht auf *Paul Steinhardt* und *Neil Turok* (2001) zurück und kann tatsächlich mathematisch mit den Stringtheorien gefasst werden.

6.11.1 Etymologie von ekpyrosis

Die Namensgebung basiert auf der *ekpyrosis*, einem griechischen Wort für den **Weltenbrand**, wie ihn die Stoa (Schule der Stoiker um *Zenon von Krition*, 336 - 264 v. Chr.) verwendete. Gemäß stoischer Vorstellung, wird der Kosmos durch das Urfeuer in periodisch wiederkehrenden Zeiträumen verbrannt und entsteht in derselben Form neu (*palingenesis*: Wiedergeburt). Damit zeigt sich abermals, wie gut das Denken der Antike eine Renaissance im Denken der Neuzeit erlebt.

6.11.2 Ohne Bums, kein Dings

Im Ekpyrotischen Modell kollidiert unser Universum mit einem zweiten, uns nicht zugänglichen Universum, einem Paralleluniversum. Beide Universen beschreibt man im Rahmen der Stringtheorie als dreidimensionale **3-Branen**, die eine fünfdimensionale Welt, den **Bulk**, beranden. Die Strahlung und Materie bleibt auf ihr Universum beschränkt, nur die Gravitation kann von einer Bran zur anderen vermitteln. Die Ursache für die Kollision ist die folgende: die beiden Branen driften durch die Vermittlung eines zeitlich variablen Skalarfeldes, dem Radion, aufeinander zu. Aus der inelastischen Kollision würde dann soviel Energie frei, dass sie den Urknall treiben könnte und daraus auch Materie und Strahlung entstehen könnten.

6.11.3 Problem: Feinabstimmung

Kritisch am Ekpyrosis-Modell ist die erforderliche Symmetrie der exakt parallel zueinander ausgerichteten, vierdimensionalen Vorläuferuniversen. Jede Asymmetrie wurde inflationär, d. h. **exponentiell**, verstärkt werden und damit die Kollision und das Ekpyrotisches Modell zunichte machen. Die Kosmologen erhoffen sich durch die direkte Messung von Gravitationswellen - wenn ihr Nachweis denn gelingen sollte - Aufschluss darüber, ob Inflation oder Ekpyrosis die richtige Beschreibung des Universums liefert. Hochfrequente Gravitationswellen als Reliktstrahlung der Ekpyrosis sollten nämlich intensiver sein. Auch könnten zukünftige Polarisationsmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die letztendlich auch eine Aufprägung durch Gravitationswellen erfahren haben, eines der Modelle begünstigen.

6.11.4 Auf Ekpyrosis folgt Ekpyrosis?

Die Erweiterung des Ekpyrotischen Modell, die noch mehr die Grenzen des Vorstellbaren strapaziert, ist das Zyklische Universum, wo die Kollisionen der Welten wiederholt, eben **zyklisch**, stattfinden. Dann hätten wir es mit einem **pulsierenden Universum** zu tun, das periodisch in der Abfolge von Big Bang, Expansion, Stopp, Kontraktion, Big Crunch, erneuter Big Bang entsteht und vergeht.

6.12 Elektromagnetismus

Eine der **vier fundamentalen Wechselwirkungen der unbelebten Natur** neben gravitativer, schwacher und starker Wechselwirkung.

6.12.1 Maxwells große Entdeckung

In der historischen Retrospektive wurden Elektrostatik und Magnetismus zunächst als separate Phänomene wahrgenommen, bis der englische Physiker *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879) die **klassische Elektrodynamik** begründete. Seine *Maxwellschen Gleichungen* - je nach Formulierung vier Differential- oder vier Integralgleichungen - koppeln magnetische an elektrische Felder. Damit konnten elektrische Ströme, Magnetfelder von stromdurchflossenen Leitern, elektrische Felder von elektrischen Ladungen, aber auch elektromagnetische Wellen im Vakuum oder in Medien (Licht) erstmals rechnerisch behandelt werden und als elektromagnetische Effekte verstanden werden.

6.12.2 Vektoranalysis: div, grad, rot

Der mathematische Apparat der klassischen Elektrodynamik umfasst die Vektoranalysis, die Potentialtheorie und die Theorie Greenscher Funktionen. Der **Nabla-Operator** ist der zentrale Differentialoperator, der die Maxwell-Gleichungen kompakt mithilfe von Gradient (*grad*), Divergenz (*div*) und Rotation (*rot*) schreiben lässt. In der folgenden Gleichungen sind von oben nach unten Gradient eines Skalarfeldes, Divergenz eines Dreiervektors, Rotation eines Dreiervektors in kartesischen Koordinaten dargestellt (für andere Koordinatensysteme wie Kugelkoordinaten nehmen die Gleichungen eine andere Form an):

$$\begin{aligned}
\nabla\Phi &= \frac{\partial\Phi}{\partial x}\vec{e}_x + \frac{\partial\Phi}{\partial y}\vec{e}_y + \frac{\partial\Phi}{\partial z}\vec{e}_z \\
\nabla\vec{E} &= \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \\
\nabla\times\vec{A} &= \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\vec{e}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}\right)\vec{e}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\vec{e}_z.
\end{aligned}$$

6.12.3 Gaußscher und Stokesscher Satz

Der Nabla-Operator ist nichts anderes als eine gewöhnliche räumliche Ableitung. Die äquivalenten Maxwell-Gleichungen in integraler Form erhält man durch Anwendung der bekannten *Integralsätze nach Gauß und Stokes*: Der Gaußsche Satz verwandelt ein Volumenintegral der Divergenz eines Vektorfeldes in einer Oberflächenintegral über das Vektorfeld. Der Stokessche Satz verwandelt das Oberflächenintegral über die Rotation eines Vektorfeldes in ein Kurvenintegral des Vektorfeldes entlang der Kurve, die die Oberfläche einschließt.

6.12.4 Maxwell-Gleichungen in differentieller Form

Im Folgenden sind nun alle vier **inhomogenen zeitabhängigen Maxwell-Gleichungen im Vakuum in differentieller Form** notiert:

$$\begin{aligned}
\nabla\vec{E} &= \rho \\
\nabla\times\vec{B} &= \vec{j} + \frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \\
\nabla\vec{B} &= 0 \\
\nabla\times\vec{E} &= -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}.
\end{aligned}$$

Die erste und dritte Gleichung machen eine Aussage über die Quellen des elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Die erste Gleichung besagt, dass die Quelle des elektrischen Feldes eine elektrische Ladungsdichte ist. Knapp gesagt: *Elektrische Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld im Raum.*. Bei magnetischen Feldern gibt es keine zugehörigen 'magnetischen Ladungen'. In knapper Form heißt es: *Es gibt keine magnetischen Monopole.*. Die zweite Gleichung nennt man **Ampèresches Gesetz**. Physikalisch bedeutet es, dass ein stromdurchflossener Leiter mit elektrischer Stromdichte j ein Magnetfeld im Raum induziert. Gleiches passiert, wenn sich ein elektrisches Feld zeitlich ändert. Die letzte Gleichung heißt **Faradaysches Induktionsgesetz**. Dies wird so interpretiert, dass ein zeitlich variierendes Magnetfeld einen elektrischen Strom in Leitern induziert.

Bei *ohmschen Leitern* gilt insbesondere das **Ohmsche Gesetz**: die elektrische Stromdichte ist proportional zum elektrischen Feld, wobei die Proportionalitätskonstante *elektrische Leitfähigkeit* heißt. Diese Leitfähigkeit ist in ohmschen Leitern unabhängig vom angelegten elektrischen Feld. Vektoriell gesehen sind Stromdichte und elektrisches Feld dann kollinear: die Vektoren ('Pfeile') zeigen in dieselbe Richtung.

6.12.5 klassische Elektrodynamik und Spezielle Relativitätstheorie

Die Maxwell-Theorie ist bereits **kovariant**, d. h. forminvariant in der Speziellen Relativitätstheorie. Relativistisch betrachtet macht es keinen Sinn zwischen elektrischem und magnetischem Feld zu unterscheiden, weil beide Phänomene äquivalent sind und nur vom Bezugssystem oder **Beobachter** abhängen! Das lässt sich leicht an folgendem Beispiel nachvollziehen: Ein reines elektrisches Feld einer ruhenden Ladung wird durch Anwendung einer Lorentz-Transformation zu einem Magnetfeld einer bewegten Ladung. Dieser Sachverhalt rechtfertigt in tiefsinniger Weise die Wortsynthese zum Begriff Elektromagnetismus.

6.12.6 Maxwells Theorie häppchenweise

Mit dem Aufkommen der Quantentheorie Anfang des 20. Jahrhunderts wuchs das Bestreben die Maxwell-Theorie zu quantisieren. Im Wasserstoff-Problem tauchte bereits das Photon auf, das bei elektronischen Übergängen in der Atomschale emittiert oder absorbiert wird. Jede Atomschale ist gerade mit Elektronen bestimmter Energie besetzt. Bei einem Quantensprung eines Elektrons wird ein Photon charakteristischer Energie frei oder eingefangen. Die elektromagnetische Welle, die man in Form einer **Wellengleichung** aus den Maxwell-Gleichungen ableitet, ist jedoch noch unquantisiert. Der Quantisierungsapparat ermöglicht eine Umformulierung der klassischen Wellengleichung mithilfe von Feldoperatoren. Auf diese Weise erhält man die **Klein-Gordon-Gleichung**. Die daraus entstandene Quantenelektrodynamik (QED) war die erste erfolgreiche Quantenfeldtheorie überhaupt. Das Renormierungsverfahren wurde ebenfalls an der QED entwickelt. Der mathematische Apparat der Quantenfeldtheorie ist die Gruppentheorie. Eine U(1)-Theorie beschreibt hier die photonischen Wechselwirkungen. Da das Photon keine Ruhemasse aufweist, ist seine Reichweite unendlich. Die wesentlichen Wechselwirkungen in makroskopischen, kosmischen Dimensionen und insbesondere in der Astrophysik sind daher Elektromagnetismus und Gravitation. Die anderen Wechselwirkungen werden erst wichtig, wenn das Universum extrem klein ist und die Ausdehnung vergleichbar wird mit dem subatomaren Bereich. Dieser mikroskopische Bereich ist gerade in der Gegend der Planck-Skala. Ein mikroskopisch kleiner Zustand des Kosmos hat kurz nach dem Urknall vorgeherrscht und tangiert dann das Regime der **Planck-Ära**, der Großen Vereinheitlichten Theorien (**GUT**) bzw. Vereinheitlichten Theorie (**UT**).

6.12.7 Vereinheitlichung der Naturkräfte

Das Unifikationsbestreben fand im Elektromagnetismus jedoch erst seinen historischen Anfang (sieht man einmal von *Sir Isaac Newton* ab, dem die Vereinheitlichung von irdischen und kosmischen Kräften zugeschrieben wird). Mittlerweile ist es gelungen, die schwache und elektromagnetische Wechselwirkung in der elektroschwachen Theorie zu vereinigen. Hier wurde eine enge Verwandtschaft von Photon und Weakonen offen

gelegt, die bei hohen Energien betrachteter Teilchenprozesse als eine elektroschwache Kraft behandelt werden können. Der nächste Schritt sind die Großen Vereinheitlichten Theorien, die die starke Kraft im Rahmen einer SU(5)-Theorie zur Elektroschwachen Kraft hinzunehmen. Ab 10^{16} GeV Energie fordern die Teilchenphysiker neue Eichbosonen: die X-Bosonen und Y-Bosonen (zusammengefasst als Leptoquarks). Der letzte Schritt ist der schwierigste und noch nicht vollzogen worden: die Gravitation kann noch nicht vollständig mit quantenfeldtheoretischen Konzepten beschrieben werden. Deshalb steht eine **Vereinheitlichung aller vier Naturkräfte** als *Vereinheitlichte Theorie* (engl. *Unified Theory*, UT) oder eine **Theorie von Allem** (engl. *Theory Of Everything*, TOE) noch aus. Ein diskutierter Kandidat in dieser Hinsicht sind die Stringtheorien.

6.13 Elektronenvolt

Eine Einheit für die Energie, die sehr gebräuchlich ist in der Hochenergie- und Teilchenphysik, Quantenphysik sowie Kernphysik. Es ist die typische Energieskala einzelner Teilchen und definiert als die Energie, die ein Elektron, das die negative Elementarladung von -1.602 × 10^{-19} C beim Durchgang durch ein elektrisches Feld der Potentialdifferenz 1 V (Volt) erhält.

6.13.1 Umrechnung in Joule:

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Üblicherweise gibt man Teilchenmassen in Einheiten von Elektronenvolt (Abkürzung **eV**). Dabei entsprechen die Präfixe der bekannten Nomenklatur: 1 meV = 1/1000 eV, 1 keV = 1000 eV, 1 MeV = 1 000 000 eV, 1 GeV = 1 000 000 000 eV, 1 TeV = 10^{12} eV, 1 PeV = 10^{15} eV, 1 EeV = 10^{18} eV etc.

6.13.2 Beispiele:

- ◇ Radioquant: etwa 1 meV
- ◇ Röntgenphoton: um 1 keV
- ◇ Gammaphoton: ab etwa 1 MeV
- ◇ Elektronenmasse: 510.9989 keV
- ◇ Protonenmasse: 938.2720 MeV (oft vereinfachend 1 GeV)
- ◇ Omega-Hyperon: 1.67245 GeV
- ◇ Heben eines Kilogramms vom Boden auf eine 1m hohe Platte: 6.12 × 10^{19} eV = 61.2 EeV = 9.81 J

Am letzten Beispiel sieht man das das Elektronenvolt eine **Einheit der Mikrophysik** ist und für unsere Makrowelt recht unhandlich ist.

6.14 elektroschwache Theorie

Die historisch erste gelungene vereinheitlichte Quantenfeldtheorie war die Verschmelzung von elektromagnetischer Wechselwirkung, also der Quantenelektrodynamik (QED), und der schwachen Wechselwirkung. Die elektroschwache Theorie geht auf die Physiker *Sheldon Lee Glashow*, *Steven Weinberg* und *Abdus Salam* zurück und wird auch *Weinberg-Salam Modell* genannt.

6.14.1 U(1) $\times$ SU(2) - wie bitte?

Vom Standpunkt der Gruppentheorie aus, bildet man das direkte Produkt der Symmetriegruppe U(1) der QED mit der Symmetriegruppe SU(2) der schwachen Theorie (zurückgehend auf Glashow, 1961). Dies generiert zunächst **vier masselose Vektorbosonen** (vektoriell heißt Spin 1), die man W^+, W^-, W^0 und B^0 nannte. Unter Hinzunahme eines **skalaren (d. h. Spin 0), eichinvarianten Feldes**, das man mit dem **Higgs-Teilchen** identifiziert, erhalten diese vier Vektorbosonen über den *Higgs-Mechanismus*, einer **spontanen Symmetriebrechung**, eine ***Masse***! Auf diese Weise wurden die hohen Massen von den W- und dem Z-Teilchen (den Weakonen) erklärbar.

6.14.2 Glänzende Bestätigung einer Theorie!

Selbstverständlich war der Jubel über die experimentelle Verifikation dieser Theorie durch den Nachweis des Z-Teilchens 1973 am CERN (*Donald Perkins*) groß und wurde mit dem Nobelpreis für die Theoretiker (Weinberg, Salam und Glashow, 1979) belohnt. Die geladenen Ströme W^- und W^+ wurden erst zehn Jahre nach der Entdeckung des Z-Teilchens, 1983, verifiziert. Ebenfalls am CERN wurde in einem Synchrotron Protonen und Antiprotonen auf Kollisionskurs gebracht. *Carlo Rubbia* und *Simon Van der Meer* entdeckten daher die beiden weiteren Vektorbosonen.

6.14.3 Nachahmer

Die elektroschwache Theorie mit einer typischen Energieskala von 1 TeV (1000 GeV) war der erste Schritt im Bestreben die vier fundamentalen Naturkräfte zu vereinigen. Später folgten die Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT), die die Quantenchromodynamik (QCD) zusammen mit der elektroschwachen Theorie vereinheitlichen will. Die hier typische Energieskala liegt bei 2×10^{16} GeV. Die letzte **Vereinheitlichung aller vier Naturkräfte** ist die *Vereinheitlichte Theorie (UT)*.

6.14.4 früher, heißer Kosmos

In der Frühphase des Universums, nur Sekundenbruchteile nach dem Urknall, haben die richtigen Bedingungen geherrscht, dass alle vier Wechselwirkungen *ununterscheidbar* waren. Nach der UT suchte man allerdings bisher immer noch vergeblich, weil die Miteinbeziehung der Gravitation nicht trivial ist und nur über das Auffinden einer Quantengravitation zu funktionieren scheint. Die aktuellen Forschungen auf dem Gebiet der Stringtheorien und eine Verifikation (oder Falsifikation) der Extradimensionen sind die Wege, die beschritten werden, um einem Konzept der Quantengravitation oder gar einer Vereinheitlichten Theorie näher zu kommen.

6.15 Elementarladung

Die elektrische Ladung kann nicht beliebige Zahlenwerte annehmen, sondern sie tritt nur in Vielfachen einer sehr kleinen Mindestladung auf. Die kleine Zahl heißt **Elementarladung**, symbolisiert mit e und beträgt:

$$1\,e = 1.60217733 \times 10^{-19}\mathrm{C}.$$

Das C steht für die SI-Einheit *Coulomb* der elektrischen Ladung oder 'Elektrizitätsmenge' und wurde nach dem französischen Physiker *Charles Augustin de Coulomb* (1736 - 1806) benannt. Von der Dimension her entspricht die elektrische Ladung dem Produkt aus Stromstärke (SI-Einheit: *Ampère*) und Zeit (SI-Einheit: Sekunde).

6.15.1 Der Millikan-Versuch

Der Zahlenwert für die Elementarladung ist sehr klein. Woher kennt man diesen mikroskopischen Wert so genau? Im Jahr 1909 führte der US-amerikanische Physiker *Robert Andrews Millikan* (1868 - 1953) ein historisches, physikalisches Experiment durch, dessen Messprinzip einfach und genial ist: Er brachte elektrisch geladene Öltröpfchen im elektrischen Feld eines Plattenkondensators zum Schweben. Aus der **Gleichgewichtsbedingung** 'Schwerkraft ($G = mg$) wird kompensiert durch elektrische Feldkraft ($F = QE$)' und der Kenntnis der elektrischen Feldstärke E (die gleich der elektrischen Spannung durch den Plattenabstand der Kondensatoren ist), konnte Millikan auf die Ladung der Öltröpfchen Q schließen. Bei der Betrachtung vieler Öltröpfchen zeigt sich, dass deren Ladungen immer ein Vielfaches der Elementarladung e betragen. Millikan bekam für diese hervorragende Idee mit glänzendem Resultat den Nobelpreis für Physik 1923.

6.15.2 Beispiele

In der Physik ist es sehr bequem, die elektrische Ladung der Teilchen in Einheiten der Elementarladung e auszudrücken. Dabei sind sowohl positive, als auch negative **Vielfache** möglich. Elektrisch neutrale Teilchen haben das Nullfache der Elementarladung. So gelten u. a. folgende elektrische Ladungen:

- ◇ Proton: 1 e
- ◇ Elektron: -1 e
- ◇ Positron: +1 e
- ◇ Neutronen: 0

6.15.3 Ausnahmen bestätigen die Regel

Die Teilchenphysik kennt jedoch auch ein paar Exoten, die **kein ganzzahliges Vielfaches von** e sind. So haben Quarks (die Bausteine der Hadronen) und X-Bosonen sowie Y-Bosonen (hypothetische Teilchen der GUT-Ära) **drittelzahlige Ladungen**.

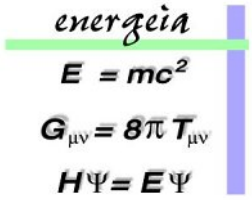

Abbildung 6.4: Energie - Wichtigste Größe der Physik.

6.15.4 Auf theoretischem Fundament

Die elektrischen Ladungen dieser und anderer Teilchen sind im Standardmodell der Teilchenphysik auch theoretisch erklärt. Dabei gehen wesentliche Konzepte wie Eichtheorie, Symmetrie, Gruppe und Vereinheitlichung der vier Naturkräfte ein.

6.16 Energie

Die Energie ist die zentrale Größe in der Physik. Der Begriff Energie geht auf *energeia* zurück, was erstmals in der Antike von *Aristoteles* (384 - 322 v.Chr.) verwendet wurde. Damals bedeutete dies soviel wie 'Geist' oder 'Seele'. In der Tat beseelt die Energie die Vorgänge in der Physik, wenn man in dieser metaphorischen Sprache bleiben möchte.

6.16.1 Energie in der Physik

Doch fassen wir den Energiebegriff physikalisch und betten ihn mathematisch streng ein. Ich möchte dabei chronologisch vorgehen. Es zeigt sich, dass die Energie sich wie ein roter Faden durch die Physik zieht:

- Die **Klassische Mechanik** ist historisch wohl das erste Gebiet der Physik gewesen, das die Energie exzessiv nutzt. Begriffe wie **kinetische Energie** (Bewegungsenergie) und **potentielle Energie** (Energie der Lage) sind sicher jedem noch aus der Schulphysik geläufig. Die Dynamik von Massenpunkten kann so sehr gut beschrieben werden. Zentral ist der empirisch begründete **Energieerhaltungssatz**. So wandelt sich die potentielle Energie einer ruhenden Kugel beim Hinabrollen auf einer schiefen Ebene in kinetische Energie um, während die potentielle Energie abnimmt. Schnell kann man auf diese Weise die Geschwindigkeit am Fußpunkt der schiefen Ebene rechnerisch bestimmen.

  Eine typische Methode der klassischen Mechanik basiert darauf, die **Hamilton-Funktion** eines zu untersuchenden Systems zu bestimmen. Der klassische Formalismus definiert, dann eindeutig die *Bewegungsgleichung*, die nach einem festen Algorithmus aus der Hamilton-Funktion folgt.

- In der **Phänomenologischen Thermodynamik** gibt es fundamentale Hauptsätze, wobei der *Erste Hauptsatz der Thermodynamik* nichts anderes ist als der Energieerhaltungssatz, bezogen auf thermodynamische Größen. Eine wesentliche Energieform ist hier die **Wärmeenergie** oder thermische Energie. Die makroskopischen Größen der klassischen Thermodynamik erhalten ihre mikroskopische Deutung in der Statistischen Physik und Quantenstatistik.

◇ Die **Klassische Elektrodynamik** beschäftigt sich mit elektrischen und magnetischen Phänomenen in der Natur. In elektrischen und magnetischen Feldern ist Energie gespeichert, die freigesetzt werden kann, beispielsweise, wenn sich eine Ladung entlang der elektrischen Feldlinien bewegt oder wenn sie von magnetischen Feldern bei einer Bewegung abgelenkt wird (Lorentz-Kraft).

Vor allem aber folgt aus den Maxwellschen Gleichungen eine besondere Form der Energie: die *elektromagnetische Welle*, in quantisierter Form Photon genannt. Es handelt sich um die für die Astronomie so wichtige **Strahlungsenergie**.

◇ Die Relativitätstheorie ist die erste wesentliche Theorie des 20. Jahrhunderts. In ihrer speziellen Formulierung erkennt sie die **Äquivalenz von Masse und Energie** in Einsteins berühmter Formel. In ihrer allgemeinen Formulierung tritt die **Kopplung von Energie und Raumzeitkrümmung** zutage. Die Gravitation entpuppt sich als ein Phänomen, das auf das Vorhandensein von *Energie in jedweder Form* zurückzuführen ist. Andererseits gibt es eine komplizierte Rückkopplung der Raumzeit auf die Energie, was sich in einem nichtlinearen Charakter der Einsteinschen Feldgleichungen widerspiegelt. In der Tensorschreibweise der Allgemeinen Relativitätstheorie steckt die Energieform vollständig im Energie-Impuls-Tensor. Er verschwindet bei Abwesenheit von Energie und Materie (*Vakuumfall*) und hat eine wohldefinierte Form für bestimmte Energieformen, wie Staub, eine ideale Flüssigkeit oder ein elektromagnetisches Feld (relativistisch, aber unquantisiert!). Die Energie offenbart sich in der Relativitätstheorie als bestimmende Größe von Raum und Zeit!

◇ Der zweite, erkenntnistheoretische Sprung in Bezug auf den Energiebegriff gelang im 20. Jahrhundert mit der Quantentheorie bzw. **Quantenmechanik**. Die Energieformen wurden als diskontinuierlich oder **quantisiert** - wie man seither sagte - erkannt. Historisch gelang dies zuerst bei der Strahlungsenergie, in der Deutung der Strahlung eines Schwarzen Körpers, als quantisierte Wärmestrahlung. Daher gilt *Max Planck* als 'Vater der Quantentheorie', wenngleich das gesamte theoretische Gebilde ein Werk vieler Quantenphysiker (*Bohr, Rutherford, Sommerfeld, de Broglie, Fermi, Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Dirac* u.v.m.) war.

Die Hamilton-Funktion der klassischen Mechanik wird in der Quantenmechanik vom **Hamilton-Operator** abgelöst. Er ist der Protagonist der quantenmechanischen Probleme, wie dem *Wasserstoff-Problem* und legt in der **Schrödinger-Gleichung** die Dynamik des Systems fest. Im zeitunabhängigen Fall wird die Schrödinger-Gleichung zu einer *Eigenwert-Gleichung* und die Eigenwerte des Hamilton-Operators bestimmen die energetischen Zustände des Systems, während die Eigenfunktionen die Wellenfunktion (Ψ, 'Psi') festlegen.

◇ Die Erfolge in der Quantenmechanik läutete den Siegeszug der Quantenfeldtheorien ein. Die vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik, **elektromagnetische, schwache, starke und gravitative Wechselwirkung**, wurden als Austausch bestimmter Quanten, den intermediären Bosonen, begriffen. Gegenstand der Quantenfeldtheorien ist nun der Versuch, alle vier Wechselwirkungen zu quantisieren. Dies ist bis auf die Gravitation gelungen. Wesentlicher Ausfluss dieser Bemühungen in verschiedenen Quantenfeldtheorien ist das Standardmodell der Elementarteilchen.

Weder die theoretische Beschreibung einer quantisierten Gravitation oder

Quantengravitation ist in konsistenter Form gelungen, noch wurde das quantisierte Austauschteilchen der Gravitation, das Graviton, experimentell gefunden. Aussichtsreichster Kandidat zur Lösung dieses Problems sind die Stringtheorien.

- ◇ Die wohl seltsamste Form von Energie hat eine zentrale Bedeutung in der Kosmologie und heißt **Dunkle Energie**. Diese Energieform tritt als der so genannte **Lambda-Term** in den Einsteinschen Gleichungen neben dem Energie-Impuls-Tensor in Erscheinung. Einstein selbst war es wiederum, der diese Energieform einführte (wenn er sie auch nicht *Dunkle Energie* nannte), um ein Statisches Universum theoretisch zu bewerkstelligen. Auch wenn nach den modernen Erkenntnissen das Universum expandiert, so stellte sich die Dunkle Energie als vital heraus, wie astronomische Messungen belegen: sie wirkt antigravitativ und treibt den Kosmos auseinander! Ihr Anteil überwiegt andere Energieformen bei weitem: sie macht offenbar etwa 70% aus!

  Die Dunkle Energie hat nicht nur kosmologische Relevanz, sondern ist ebenfalls die wesentliche Zutat bei den Gravasternen. Dabei handelt es sich um eine **reguläre Raumzeit ohne Ereignishorizont**, die die bisher favorisierten, aber singulären Schwarzen Löcher ablösen könnte. Die Dunkle Energie erscheint somit in vielfacher Hinsicht als interessante, kosmische Energieform.

6.16.2 Fazit: wohl die wichtigste Größe der Physik!

Dieser Streifzug durch die wesentlichen Teildisziplinen der Physik zeigt, dass sich die Energie wie ein Ariadnefaden durch das Labyrinth von Fragen der modernen Physik zieht. Immer wieder stoßen die Physiker auf den Energiebegriff, deuten und definieren ihn neu, finden neue Energieformen und erkennen die Energie als zentrales Element in der Natur. Die uralte Bedeutung *Geist* könnte nach modernem Verständnis treffender nicht sein.

6.17 Energiebedingungen

Energiebedingungen (engl. *energy conditions*, ECs) eignen sich im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie zur Klassifikation von Materie- und Energieformen. Man betrachtet dabei die **Zustandsgleichung** oder den w-Parameter oder den Energie-Impuls-Tensor der betreffenden Energieform und überprüft, ob die jeweilige Energiebedingung - eine mathematische Relation - gilt oder nicht.

6.17.1 Wozu?

Die Betrachtung von Energiebedingungen ist dadurch motiviert, dass in den Einsteinschen Feldgleichungen sehr viel Freiheit bei der Wahl eines Energie-Impuls-Tensors besteht. Möglicherweise ist jedoch die getroffene Wahl 'unphysikalisch' - die Energiebedingungen geben daher Kriterien an die Hand, um zu entscheiden, ob die Energieform physikalisch sinnvoll ist. Es gibt wohl mindestens sieben Energiebedingungen (*Visser* 1996); hier soll es um die wichtigsten vier gehen.

Null-Energiebedingung

Bei der Null-Energiebedingung (engl. *null energy condition*, **NEC**) bezieht sich die 'Null' auf Nullvektoren, also lichtartige Vektoren (siehe dazu Geodäte). Anschaulich besagt die

Bedingung, dass die lokale Energiedichte, die ein beliebiger (zeitartiger) Beobachter misst, positiv sein muss.

schwache Energiebedingung

Die schwache Energiebedingung (engl. *weak energy condition*, **WEC**) besagt, dass sowohl die Energiedichte, als auch die Summe aus Energiedichte und Druck immer positiv sein müssen.

dominante Energiebedingung

Die dominante Energiebedingung (engl. *dominant energy condition*, **DEC**) sagt anschaulich aus, dass die lokale Energiedichte immer positiv sein muss und dass der Energiefluss zeitartig oder null sein muss.

starke Energiebedingung

Die starke Energiebedingung (engl. *strong energy condition*, **SEC**) besagt, dass die Spur des Energie-Impuls-Tensors immer größer oder gleich null sein muss. Anders gesagt muss der w-Parameter immer größer als -1/3 sein.

6.17.2 Allgemeines

Die vier Energiebedingungen kann man zu folgenden Gleichungen zusammenfassen, wobei ρ die Energiedichte und p der Druck sind:

NEC:	$\rho + p \geq 0 \Leftrightarrow w \geq -1$		
WEC:	$\rho \geq 0$	und	$\rho + p \geq 0$
DEC:	$\rho \geq 0$	und	$-\rho \leq p \leq \rho$
SEC:	$\rho + 3p \geq 0 \Leftrightarrow w \geq -1/3$	und	$\rho + p \geq 0$

Es gilt, dass in der dominanten Energiebedingung automatisch die schwache Energiebedingung enthalten ist. Ebenso ist in der schwachen die Null-Energiebedingung enthalten. Aber dominante und schwache Energiebedingung sind *nicht* in der starken Energiebedingung enthalten. Die Null-Energiebedingung ist in der starken Energiebedingung enthalten.

6.17.3 Beispiele

Wie aus dem Lexikoneintrag w-Parameter hervorgeht (siehe Abbildung darin), liegen Quintessenz und Strings exakt auf der SEC. Topologische Defekte, kosmologische Konstante und Phantom-Energie verletzen die SEC. Topologische Defekte und kosmologische Konstante genügen der NEC, aber die Phantom-Energie verletzt sie. Aus diesem Grund wird die Phantom-Energie bisweilen als 'unphysikalisch' angesehen. Staub, Photonen, baryonische Materie und kalte Dunkle Materie erfüllen alle vier Energiebedingungen.

6.17.4 Buchtipp

- ◇ *Matt Visser*: Lorentzian Wormholes; AIP, Woodbury, New York, 1996

6.18 Energie-Impuls-Tensor

Der Energie-Impuls-Tensor ist der zweite wesentliche Tensor der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Er beschreibt den Zustand der Materie.

6.18.1 Vakuum: Energie-Impuls-Tensor null

Die einfachste Möglichkeit ist die Abwesenheit von Materie, ein (relativistisches) **Vakuum**. Dann verschwindet der Energie-Impuls-Tensor und man hat die *Vakuum-Feldgleichungen* zu lösen:

$$\mathbf{G}^{\mu\nu} = 0.$$

Alle elektrisch neutralen Schwarzen Löcher sind ohne Ausnahme Vakuumlösungen - nämlich die Schwarzschild-Lösung und die Kerr-Lösung. Die Masse des Schwarzen Loches befindet sich in den intrinsischen Singularitäten. Die Singularität kann als 'Masse ohne Materie' aufgefasst werden. Es ist eine **Krümmungssingularität**, wo die Raumzeit eine unendliche Krümmung aufweist. Das rechtfertigt im engeren Sinne die Bezeichnung 'Loch'.

6.18.2 Jetzt mal mit Energie-Impuls-Tensor

Bei Anwesenheit von Materie muss man adäquate Formulierungen für den Energie-Impuls-Tensor finden. Am wichtigsten sind die Energie-Impuls-Tensoren von inkohärenter, nicht-wechselwirkender Materie, vereinfacht gesagt Staub

$$T^{\mu\nu} = \rho_0 u^\mu u^\nu,$$

von idealen Flüssigkeiten

$$\mathbf{T}^{\mu\nu} = (\rho_0 + p)u^\mu u^\nu - p\mathbf{g}^{\mu\nu},$$

und der des elektromagnetischen Feldes

$$\mathbf{T}_{\mu\nu} = \frac{1}{4\pi}(-\mathbf{g}^{\kappa\lambda}\mathbf{F}_{\mu\kappa}\mathbf{F}_{\nu\lambda} + \frac{1}{4}\mathbf{g}^{\mu\nu}\mathbf{F}_{\kappa\lambda}\mathbf{F}^{\kappa\lambda}).$$

Die Behandlung der Einsteinschen Feldgleichungen, das Auffinden von Lösungen, wird dann erheblich komplizierter! Im Prinzip kann man ganz allgemein den Energie-Impuls-Tensor aus bekannter **Lagrangedichte einer Feldtheorie** konstruieren. Dies ist der kanonische Weg in Quantenfeldtheorien.

6.18.3 Energieerhaltung: ein zentraler Satz der Physik

Der Erhaltungssatz für Energie und Impuls, einer der zentralen Sätze der Physik überhaupt, manifestiert sich relativistisch im Verschwinden der kovarianten Ableitung des Energie-Impuls-Tensors. Die Ausformulierung dieser Bedingung liefert dann bekannte Erhaltungs- und Bewegungsgleichungen, wie die Kontinuitätsgleichung oder die Navier-Stokes-Gleichung der relativistischen Hydrodynamik.

6.19 Entfernungsmodul

Ein Synonym zum Begriff Distanzmodul, der unter dem Eintrag Helligkeit hergeleitet und erklärt wird.

6.20 eos

Eine in der Fachsprache sehr gebräuchliche Abkürzung für das Wort Zustandsgleichung (engl. ***e****quation* ***o****f* ***s****tate*).

6.21 eos-Parameter

Der eos-Parameter wird häufig auch w-Parameter genannt (siehe dort für detaillierte Erläuterungen) und ist wesentlich für die Kosmologie.

6.22 Epizykel

Dieser Begriff wird im Zusammenhang unter dem Begriff Gravitation erläutert. Siehe auch Quasi-periodische Oszillationen für die Klärung des Begriffs *Epizykelfrequenz*.

6.23 Ereignishorizont

Der Ereignishorizont (engl. *event horizon*) ist ein bestimmter Typus eines Horizonts, der in der Theorie Schwarzer Löcher und in der relativistischen Kosmologie eine wichtige Rolle spielt.

6.23.1 Horizonte trennen Beobachtbares von Unbeobachtbarem

Wie alle Horizonte trennt er Beobachtbares von Unbeobachtbaren. In der Relativitätstheorie trennt der Horizont *Ereignisse* (Weltpunkte) von einem Außenbeobachter. Ereignisse sind dabei durch Angabe eines Ortes (drei Raumkoordinaten) und einer Zeitkoordinate charakterisiert. Daher rührt der Name *Ereignishorizont*.

6.23.2 Schwerkraftfalle Schwarzes Loch

Bei Schwarzen Löchern ist der Ereignishorizont eine ausgezeichnete Fläche, die die echte Singularität umschließt. Anschaulich definiert wird beim Ereignishorizont die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit. Weil schon in der Speziellen Relativitätstheorie die Lichtgeschwindigkeit eine Obergrenze für Signale darstellt, die nicht überschritten werden kann, trennt der Ereignishorizont alle Ereignisse, die innerhalb des Horizonts geschehen, von der Außenwelt ab. Deshalb markiert der Ereignishorizont einen Bereich von 'Orten ohne Wiederkehr' (engl. *point of no return*): Alles, Materie und Strahlung, was sich einem Schwarzen Loch bis zum Ereignishorizont nähert, *muss* notwendigerweise in die Singularität stürzen. Alle Geodäten zeigen dann nach innen, direkt auf die Singularität. Aus diesem Grund ist der Horizont eine *Einfangfläche* (engl. *trapping surface*). **Der Einfang ist aber vom Standort des Beobachters abhängig.** Die Definition des Horizonts über Einfangflächen führt auf den Begriff des **scheinbaren Horizonts**.

Erstaunlichweise kommt klassisch - in einer Newtonschen Rechnung - dasselbe Ergebnis zustande, wie korrekt gerechnet mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), wenn man den Horizont eines nicht rotierenden Schwarzen Loches berechnen will. Das ist allerdings ein Zufall. Die richtige Mathematik zur Beschreibung von Ereignishorizonten liefert nur die ART.

6.23.3 Gestalt des Horizonts

Horizonte von Schwarzen Löchern sind exakt kugelförmige Regionen, wie die (gleich folgenden) Definitionsgleichungen zeigen. Dies gilt sowohl in der statischen Schwarzschild-Metrik, als auch in der stationären, aber rotierenden Kerr-Metrik. Dennoch wird ein Außenbeobachter eine nicht kugelsymmetrische Form des Horizonts wahrnehmen, falls das Loch rotiert und falls der Beobachter geeignet zum Loch orientiert ist. Dies ist ein Resultat von dem Gravitationslinseneffekt und von dem Frame-Dragging-Effekt.

6.23.4 Horizonte in der Sprache von Einsteins Theorie

Im Unterschied zu 'normalen' Sternen ist der Ereignishorizont nur eine *mathematisch definierte Fläche*, eine so genannte *Nullfläche*, die **nicht** mit einer festen Oberfläche assoziiert ist! In der ART beschreibt man den Ereignishorizont eines rotierenden Schwarzen Loches als zweidimensionale Nullfläche. Sie wird von den beiden Killing-Vektoren aufgespannt. Die Killing-Vektoren folgen wiederum aus der Symmetrie der Raumzeit. Aus der Betrachtung der Isometrien lässt sich die Killing-Gleichung ableiten, deren Lösungen die Killing-Vektoren sind. Weil sie eine Nullfläche erzeugen, heißen sie auch **Nullgeneratoren**. Die Nullfläche der Kerr-Geometrie ist aufgrund der Isometrien unabhängig von den Koordinaten t (Zeit) und Φ (Azimuthalwinkel). Mit dieser Invarianz sind eindeutig die beiden Symmetrien *Stationarität* und *Axialsymmetrie* assoziiert.

Der **Horizontradius** berechnet sich aus der Masse des Schwarzen Loches M und dessen spezifischen Drehimpuls a gemäß

$$r_{\mathrm{H}}^{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}.$$

Der Kerrparameter a ist null für die Schwarzschild-Lösung und vom Betrag her M für die maximale Kerr-Lösung (in geometrisierten Einheiten, d. h. wenn G = c = 1). Der Horizont ist für Schwarzschild bei zwei Gravitationsradien oder einem Schwarzschildradius:

$$\mathrm{R_S} = 2\,\frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2}.$$

Der Schwarzschildradius beträgt einfach nur 2M in geometrisierten Einheiten.

6.23.5 Kerr: Noch ein Horizont!

Wer gerade aufmerksam die Gleichungen gelesen hat, wird eine Besonderheit bei der Kerr-Geometrie festgestellt haben: **zwei Horizonte**. Dabei ist der *innere Horizont* r_- kleiner als der *äußere Horizont* r_+. Der innere Horizont ist eine so genannte Cauchy-Fläche. Die relativistische Definition der Horizonte ist das Verschwinden des so genannten Delta-Potentials:

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2.$$

Es handelt sich dabei um eine bestimmte Funktion, wie sie in der Kerr-Geometrie in Boyer-Lindquist-Koordinaten verwendet wird. Weil Delta am Horizont null ist, zeigen die Boyer-Lindquist-Koordinaten leider pathologisches Verhalten an den Horizonten: die Komponente $\mathbf{g}_{rr}$ des metrischen Tensors divergiert und strebt gegen unendlich. Diese **Koordinatensingularität** (keine 'echte') kann mit anderen Koordinaten, wie den Kerr-Schild-Koordinaten vermieden werden.

6.23.6 Deshalb sieht man schwarz

Das Verschwinden von Δ am Ereignishorizont führt dazu, dass der Rotverschiebungsfaktor dort null wird. Dies ist im Kern der Grund dafür, dass Schwarze Löcher schwarz sind, denn dieser Faktor gewichtet in hoher Potenz jede Emission, die bei Schwarzen Löcher beispielsweise aufgrund der Akkretion entsteht. Diesen gravitativen Effekt auf Strahlung nennt man **Gravitationsrotverschiebung**. Der Energie- **und** Intensitätsverlust von Strahlung wird für einen Außenbeobachter am Horizont unendlich stark. Strahlung, die sich knapp vor dem Horizont auf den Weg macht, sieht ein Außenbeobachter extrem gerötet und extrem verdunkelt - aber er sieht sie im Prinzip noch.

6.23.7 rotierender Horizont, aber keiner sieht's!

Der äußere Horizont, den man in der Regel meint, wenn man nur von einem *Ereignishorizont* spricht, liegt in der Kerr-Metrik mit maximaler Rotation ($a = M$ bzw. $a = -M$ in geometrisierten Einheiten) bei nur einem Gravitationsradius. Der Horizont rotiert wie ein **starrer Körper**, was ein Unterschied zur differentiellen ('breitenabhängigen') Rotation der Sonne ist. Er reißt bei seiner Drehbewegung alles mit, was Relativisten als *Frame-Drag* bezeichnen. Diese Korotation mit dem Horizont ist eine wichtige Randbedingung für alle Objekte, die sich dort befinden. Zieht man den Ereignishorizont als Größenkriterium für Schwarze Löcher heran, so sind Kerr-Löcher bei gleicher Masse immer kleiner.

6.23.8 nackte Tatsachen

An sich verhüllt der Ereignishorizont gemäß der *kosmischen Zensur* (engl. *cosmic censorship*) intrinsische Singularitäten, wie der englische Mathematiker und Relativist *Roger Penrose* als Erster vermutet hat. *Intrinsisch* meint immer 'echte' Singularitäten oder Krümmungssingularitäten, die im Gegensatz zu den Koordinatensingularitäten *nicht* zu beheben sind. Ein Kuriosum bietet in dieser Hinsicht die extreme Kerr-Lösung: Der innere Horizont ist in diesem Fall ($a = M$ bzw. $a = -M$), deckungsgleich mit dem äußeren Horizont (siehe Definitionsgleichung oben). Die zentrale Ringsingularität ist in diesem Spezialfall eine so genannte 'nackte Singularität', die von außen sichtbar ist. Solche sichtbaren, unverhüllten Singularitäten sind jedoch verboten. Im Rahmen der ART kann man zeigen, dass durch nackte Singularitäten allerlei Unfug angestellt werden kann, weil sie z. B. das Prinzip der Kausalität verletzen. Beruhigend ist, dass noch kein Astronom eine nackte Singularität in der Natur beobachtet hat. Insofern stützt das die Hypothese von Penrose. In gleicher Weise spricht diese Zensur gegen Weiße Löcher bzw. der einen 'Seite' eines Wurmlochs.

Für Zwischenwerte von a gibt es einen signifikanten Versatz zwischen innerem und äußerem Horizont, der umso größer ist, je näher a der Null kommt. Im Schwarzschild-Fall verschwindet der innere Horizont in der zentralen Singularität bei $r = 0$. Dies alles fasst die Abbildung 6.5 zusammen, die beide Horizonte in Abhängigkeit von a illustriert:

6.23.9 Geodäten am Horizont

Am Schwarzschildradius der Schwarzschild-Lösung bzw. am äußeren Horizont der Kerr-Lösung werden alle Geodäten **lichtartig**! D.h. Strahlung und Materie bewegen sich auf dem Lichtkegel. Man kann sehr leicht nachrechnen, dass alles - Strahlung und Materie - exakt

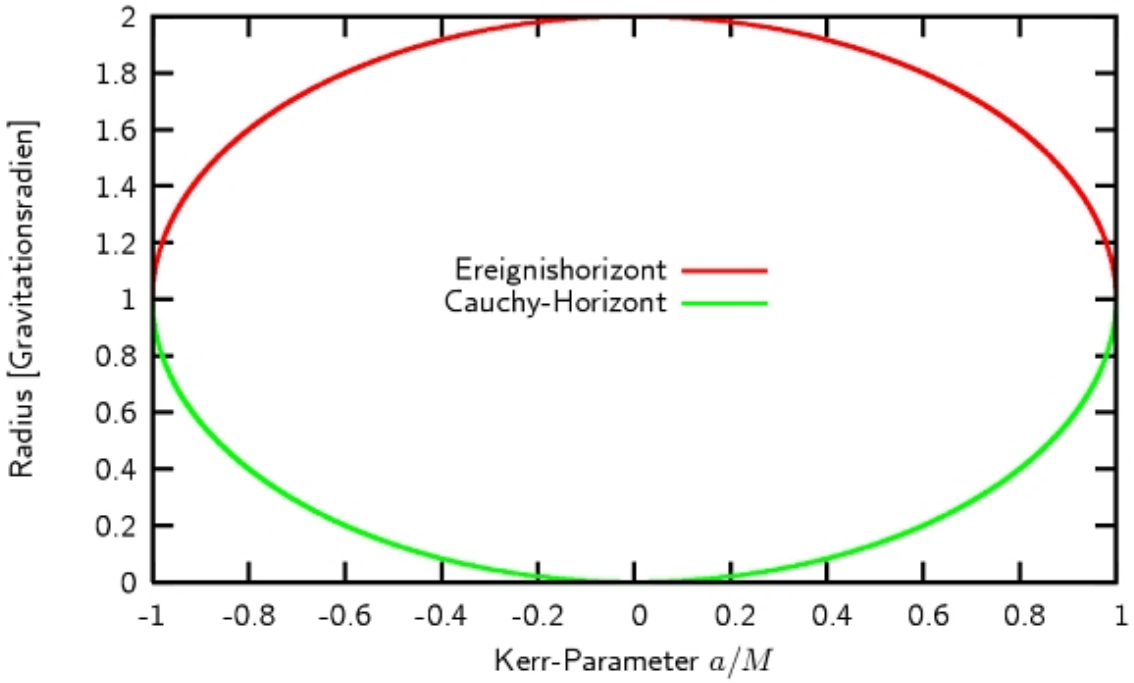

Abbildung 6.5: Innerer und äußerer Horizont in Abhängigkeit des Kerr-Parameters a.

mit der Lichtgeschwindigkeit radial in den Ereignishorizont einfällt. Innerhalb des Horizonts werden die Geodäten raumartig, also tachyonisch.

6.23.10 Evidenzen für den Ereignishorizont?

Die folgende Aussage ist an sich eine Sensation:

Bisher ist es nicht gelungen, bei irgendeinem kosmischen Objekt einen Ereignishorizont nachzuweisen!

Die Astronomen beobachten zwar eine Vielzahl dunkler kompakter Objekte (engl. *compact dark object*, CDO), doch gibt es mittlerweile zum Schwarzen Loch *mit* Ereignishorizont Alternativen, z. B. den Gravastern oder den Holostern, die beide *ohne* Ereignishorizont auskommen. Das ist ein Dilemma in der Physik Schwarzer Löcher! Einschränkend muss gesagt werden, dass bei vielen Loch-Kandidaten die Rotation (durch Eisenlinien oder quasi-periodischen Oszillationen) nachgewiesen wurde. Diese Objekte können zurzeit **nur befriedigend als Kerr-Loch**, aber nicht durch den Grava- oder Holostern beschrieben werden. Auch die theoretische Astrophysik sieht im Kerr-Loch ein unverzichtbares Objekt, das beispielsweise relativistische Jets antreibt (siehe auch Blandford-Znajek-Mechanismus). Insofern wird von den Astronomen tatsächlich nach wie vor versucht, den Ereignishorizont nachzuweisen. Vom uns am nächsten befindlichen mutmaßlichen Schwarzen Loch im Röntgendoppelstern XTE J1118+480 (Distanz 1.8 kpc) wurde behauptet, dass der Ereignishorizont nachgewiesen wurde (*McClintock et al.* 2004,). Die Argumentation beruht darauf, dass eine thermische Strahlungskomponente, wie sie in einem Neutronenstern (der eine

feste Oberfläche hat) auftritt, fehlt. Sie solle durch die starke Gravitationsrotverschiebung in der Nähe des und am Ereignishorizont stark unterdrückt werden. Die Argumentation dieser Autoren ist jedoch in der Fachwelt umstritten: So behaupten hingegen *Abramowicz* und Kollegen (A& A **396**, L31, 2002) sinngemäß,

..., dass es prinzipiell unmöglich sei, den Ereignishorizont mittels ***elektromagnetischer*** *Strahlung nachzuweisen!*

Die einzige Hoffnung besteht nach den Verfechtern dieser Gegenposition in Gravitationswellen, deren Wellenform in eindeutiger Weise von einem Ereignishorizont zeugen könnten. Diese Sichtweise untermauert eine recht aktuelles Papier von *Berti & Cardoso* (2006, gr-qc/0605101). Anmerkung des Autors: Falls Sie mich fragen, so teile ich die Position von *Abramowicz* und Kollegen.

6.23.11 Hoffnungsträger Radioastronomie

Innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre werden möglicherweise die Radioastronomen den Ereignishorizont und den umgebenden dunklen Bereich **direkt** abbilden können! Die Radioastronomie erlaubt derzeit die höchste räumliche Auflösung am Himmel, nämlich mittels interferometrischer Methoden wie VLBI bis in den Bereich von Millionstel Bogensekunden. Um eine Vorstellung dieses winzigen Himmelsareals zu bekommen, betrachte man den Vollmond, dessen scheinbarer Durchmesser etwa ein halbes Grad, also 30 Bogenminuten oder 1800 Bogensekunden beträgt. Eine Zerlegung des Vollmonddurchmessers in 1.8 Milliarden gleich große Teile liefert also die Auflösungsgrenze der Radioastronomie!

Favorisierte Kandidaten zur radioastronomischen Abbildung des 'Großen Schwarzen Flecks' (nach der Terminologie meiner Dissertation) um ein Schwarzes Loch sind die zentralen supermassereichen Schwarzen Löcher im Zentrum der Milchstraße in 8 kpc Entfernung (etwa drei Millionen Sonnenmassen schwer) oder im Aktiven Galaktischen Kern von M87 (siehe Arbeiten von *Krichbaum et al.*, MPIfR, astro-ph/0411487, astro-ph/0607072). M87 ist zwar weiter weg (18.7 Mpc), aber dafür ist das zentrale Loch schwerer (drei Milliarden Sonnenmassen), was in einem größeren 'Schwarzen Fleck' resultiert.

6.23.12 Literatur von Andreas Müller zum Thema

In meiner Doktorarbeit Download PhD, pdf) und einem Konferenzbeitrag (Download Proceeding, pdf) finden Sie viele Einzelheiten zu Schwarzen Löchern und zum Ereignishorizont.

Ich lege in diesen Arbeiten außerdem dar, wie man aus der genauen Gestalt des 'Großen Schwarzen Flecks' nicht nur die Masse des Loches, sondern auch seinen Rotationsparameter und Neigungswinkel zum Beobachter bestimmen könnte.

Die Radioastronomen erreichen im Wellenlängenbereich von Millimetern ein sehr gutes Auflösungsvermögen. Vermutlich wird der Durchbruch in der Radioastronomie gelingen: *die erste obskurative Verifikation eines Schwarzen Loches*, also der Nachweis eines Lochs durch seine Schwärze.

Inwiefern die (noch hypothetische) Hawking-Strahlung für einen Nachweis taugt (was man als *eruptive Verifikation* bezeichnen kann), muss noch gezeigt werden. Denn zum einen ist diese Strahlungsform dermaßen schwach, dass sie von anderen Strahlungsformen überstrahlt wird; zum anderen gibt es auch andere thermische Strahlung am Schwarzen Loch, so dass

eine überzeugende Beweisführung sehr erschwert wird. In dieser Hinsicht ist die Verfolgung der Experimente an Teilchenbeschleunigern wie dem LHC anzuraten.

6.24 erg

Eine Einheit für die Energie. 1 erg entspricht 10^{-7} Joule, der gebräuchlicheren SI-Einheit.

6.24.1 Diese Theoretiker...

Die Einheit erg ist eine typische Theoretikereinheit, weil in der theoretischen Physik im **cgs-System** (c: Zentimeter, g: Gramm, s: Sekunde) gerechnet wird. 1 erg folgt dann auf natürliche Weise, wenn man cm, g und s zu der Dimension einer Energie (Kraft × Länge = Masse × Beschleunigung × Länge = Masse × Länge zum Quadrat pro Zeit im Quadrat) verknüpft:

$$\mathrm{g} \times \mathrm{cm} \times \mathrm{cm} \times \mathrm{s}^{-2} = 1\ \mathrm{erg} = 10^{-7}\,\mathrm{kg} \times \mathrm{m}^2 \times \mathrm{s}^{-2} = 10^{-7}\mathrm{J}.$$

6.24.2 Astronomische Zahlenbeispiele

So gibt man beispielsweise die Leuchtkraft, mit der Dimension einer Leistung (Arbeit pro Zeit) in erg/s an. Die typische frei werdende Energie bei einer Supernova beträgt gewaltige 10^{51} erg. Diese Energiemenge wird auch in Form von Röntgenstrahlung frei, wenn ein Stern von einem Schwarzen Loch durch Gezeitenkräfte zerrissen wird.

6.25 Ergosphäre

Die Ergosphäre ist eine abgeplattetete Kugelfläche, die die Forscher auch **statisches Limit** nennen. In Abbildung 6.6 ist sie blau dargestellt. Diese Fläche umschließt vollständig den Ereignishorizont (schwarz) **rotierender Schwarzer Löcher**. Noch innerhalb des Ereignishorizonts liegt der innere Horizont oder Cauchy-Horizont (grün und transparent dargestellt). Die Quelle der Gravitation eines rotierenden Schwarzen Loches ist die zentrale Ringsingularität (die hier aus grafischen Gründen vergrößert dargestellt wurde). Das Gebiet zwischen Ergosphäre und Ereignishorizont (äußerem Horizont) nennen Theoretiker bisweilen auch die **Ergoregion** - häufig wird Ergosphäre gleichbedeutend mit Ergoregion verwendet. Ergosphäre und Ergoregion gibt es nur bei der Kerr-Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie.

6.25.1 Kein Entrinnen von der rotierenden Raumzeit

Ab der statischen Grenze **muss** jeder Beobachter mit dem Schwarzen Loch ko-rotieren. Dieser Effekt heißt **Frame-Dragging**, d. h. innerhalb der Ergosphäre gibt es keine statischen Beobachter. Das Kerr-Loch zwingt seine Rotation allen Körpern, Beobachtern, selbst dem Licht auf, weil eben die Raumzeit selbst rotiert. Das gilt sogar dann, wenn der Körper oder das Teilchen sich ursprünglich gegen die Rotationsrichtung des Schwarzen Loches bewegte: es wird zur Bewegungsumkehr gezwungen! Ein Beobachter innerhalb der Ergosphäre würde den Fixsternhimmel in der Ferne rotierend wahrnehmen (siehe ZAMO). So nah an einem Kerr-Loch wäre das ein Schwindel erregender Höllenritt im Karussell der Raumzeit. Dramatischer wird es noch näher am Loch: Am Horizont selbst rotiert **alles** mit der exakt identischen

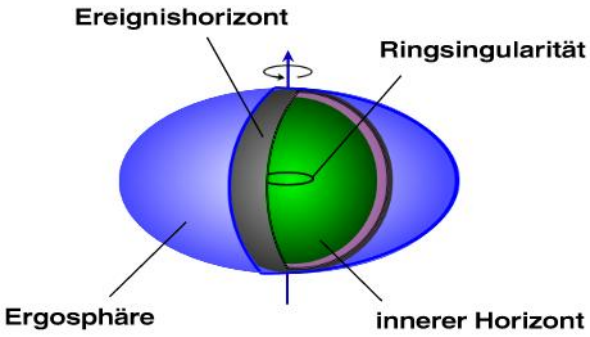

Abbildung 6.6: Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre.

Winkelgeschwindigkeit wie das Schwarze Loch. Ausgedrückt in Geschwindigkeiten ist das im Falle des extremen Kerr-Lochs ($a = M$) exakt die **halbe Vakuumlichtgeschwindigkeit** (*Bardeen*, *Press* & *Teukolsky* 1972).

6.25.2 Ein Dickwanst am Äquator

Die **statische Grenze** ist vom Poloidalwinkel (θ) abhängig. Deshalb besitzt die Ergosphäre keine Kugelsymmetrie, sondern ist an den Polen abgeplattet. Diese Achsensymmetrie passt zu derjenigen der Kerr-Geometrie. Die Fläche des statischen Limits ist allgemein definiert mit der Gleichung $\mathbf{g}_{\mathrm{tt}} = 0$, d. h. die 00-Komponente des metrischen Tensors verschwindet auf der Berandungsfläche der Ergoregion. Benutzt man $\mathbf{g}_{\mathrm{tt}}$ der Kerr-Geometrie in Boyer-Lindquist-Form, so erhält man gerade folgende Gleichung:

$$r_{\mathrm{stat}} = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta}.$$

Hier sind M die Masse des Schwarzen Loches und $a = J/M\mathrm{c}$ der Rotationsparameter des Loches (beachte geometrisierte Einheiten: G = c = 1). An der statischen Grenze springt also gerade das Vorzeichen der metrischen Komponente $\mathbf{g}_{\mathrm{tt}}$ der Kerr-Metrik. Diagramm 6.7 illustriert in die Abhängigkeit der metrischen Komponente $\mathbf{g}_{\mathrm{tt}}$ vom Radius r:

Physikalisch bedeutet die Änderung des Vorzeichens von $\mathbf{g}_{tt}$, dass die Koordinatenzeit t von einer zeitartigen zu einer raumartigen Koordinate wird! An der Gleichung für r_{stat} erkennt man auch, dass die Ergosphäre in der Äquatorialebene ($\theta = \pi/2$) **immer** bei zwei Gravitationsradien beginnt, **unabhängig** vom Kerr-Parameter. Außerdem berührt die Ergosphäre an den Polen ($\theta = 0$ bzw. $\theta = \pi$) **immer** den äußeren Horizont (der von a abhängt).

Im Schwarzschild-Fall (Kerr-Parameter $a = 0$) fällt die Ergosphäre mit dem Ereignishorizont (siehe auch Schwarzschild-Radius) zusammen und verschwindet.

Im Falle der extremen Kerr-Lösung, $a = \pm M$ hat die Ergoregion maximale Größe.

6.25.3 Bedeutung für die Astrophysik

Die schnell rotierenden Kerr-Löcher haben für die relativistische Astrophysik eine überragende Bedeutung. Dabei ist die Ergosphäre das entscheidende Schlüsselelement. Denn es ist möglich, dass Akkretionsscheiben bis in die Ergoregion hineinreichen, vor allem dann, wenn das

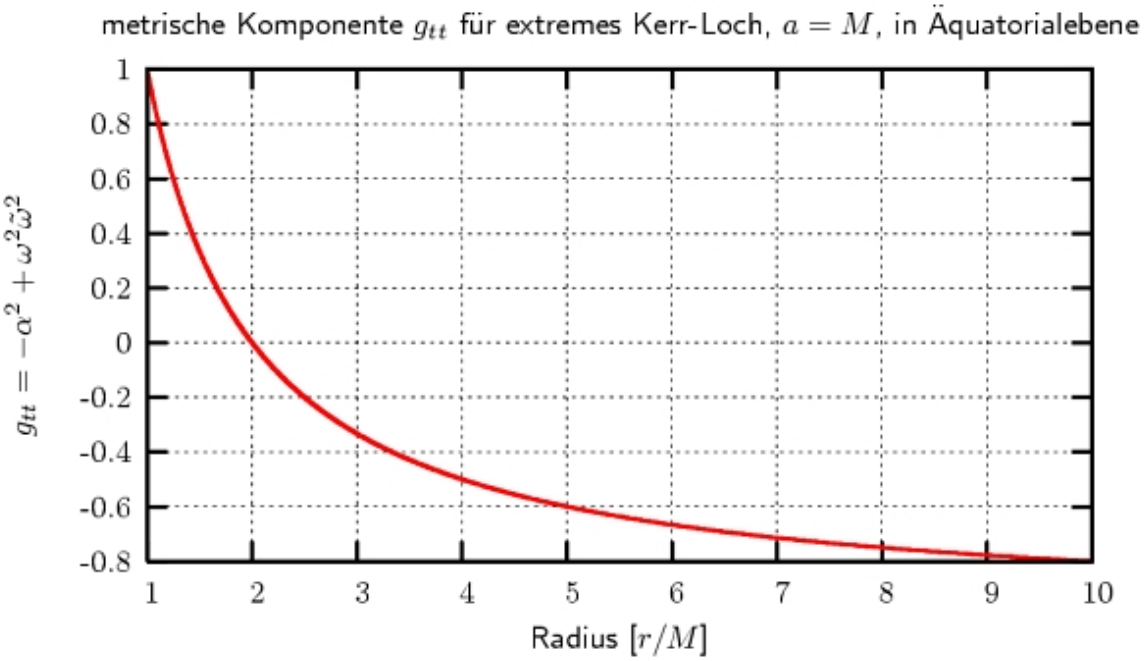

Abbildung 6.7: Radialverhalten der metrischen 00-Komponente in der Äquatorialebene.

Schwarze Loch schnell rotiert und die marginal stabile Bahn bei kleinen Radien liegt. Der Innenrand der Standardscheibe reicht nämlich in üblichen Akkretionsmodellen bis an den Radius marginaler Stabilität, $r_{\rm ms}$. Für den maximalen Kerr-Fall ($a = M$) ist $r_{\rm ms}$ genau ein Gravitationsradius, so dass in der Äquatorialebene die Scheibe exakt einen Gravitationsradius in die Ergoregion reichen könnte. Falls die Akkretionsscheibe in die Ergosphäre eintritt, so sprechen Astrophysiker von einer **ergosphärischen Scheibe**.

Die Astronomen beobachten bei leuchtkräftigen Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) wie den radiolauten Quasaren und den Radiogalaxien, aber auch bei den Gamma Ray Bursts und einigen Röntgendoppelsternen extrem schnelle Materiestrahlen. Der aktuell favorisierte Entstehungsmechanismus dieser **relativistischen Jets** basiert gerade auf der **Magnetosphärenphysik der Kerr-Löcher**. Wesentliche Prozesse funktionieren *nur innerhalb der Ergosphäre*, wie z. B. Penrose-Prozess, Blandford-Znajek-Mechanismus und Frame-Dragging. Die Idee: Akkretionsflüsse 'schwemmen' Magnetfelder an das Loch heran. Diese Felder werden von der schnell rotierenden Raumzeit extrem verdreht. Anders gesagt: Rotationsenergie des Loches überträgt sich auf die Magnetfelder. Irgendwann setzt eine Art 'Kurzschluss' ein, weil verdrillte Felder mit entgegengesetzter Polarität aufeinandertreffen. Als Konsequenz kollabieren die Felder (*Rekonnexion*) und setzen die Feldenergie frei. Das Plasma in der Umgebung nimmt dies als kinetische Energie auf und strömt daher mit großer Geschwindigkeit vom Loch weg. Ein relativistischer Ausfluss ist entstanden, der durch Magnetfelder weiter gebündelt wird: ein Jet ist entstanden. Dieser Materiestrahl entsteht typischerweise an beiden Hemisphären des Loches, so dass in vielen AGN zwei Jets beobachtet werden. Sie bewegen sich weit aus den Zentren der Galaxien heraus und können sogar die **Mpc-Skala** erreichen. Ein kompaktes, rasant rotierendes, superschweres Schwarzes Loch hat

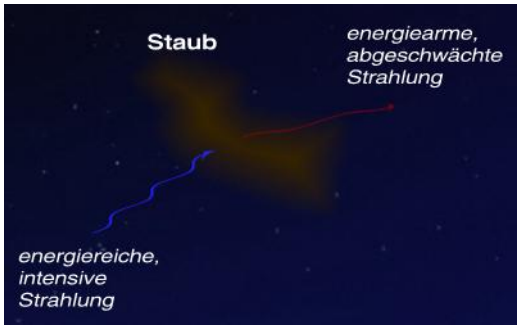

Abbildung 6.8: Streuung und Extinktion an interstellarem Staub.

Materie einige Millionen Lichtjahre weit von sich geschleudert!

Auf Supercomputern lösen die Theoretiker die komplizierten Gleichungen der Magnetohydrodynamik in der Kerr-Raumzeit. Zwar weisen die Modelle noch einige Unzulänglichkeiten auf (keine Berücksichtigung von Kühlung durch Strahlung; keine Berücksichtigung von Rekonnexion; innere Randbedingung am Horizont), aber sie zeigen eindrucksvoll die Wechselwirkung der rotierenden Raumzeit mit der Umgebung und belegen auf überzeugende Weise die Stimmigkeit dieses Szenarios.

6.25.4 Anmerkung

Die Ergosphäre ist **nicht** zu verwechseln mit der *Photonensphäre*, die durch den Photonenorbit bestimmt ist.

6.25.5 Weitere Informationen

- ◇ Passend zur Thematik sind die Einträge Poynting-Fluss, Gravitomagnetismus und Lense-Thirring-Effekt im Wissensportal.
- ◇ Artikel bei *Einstein online* von A. Müller: Das Schwarze Loch als Materieschleuder: Kosmische Jets (2007)

6.26 eV

Eine Einheit für die Energie in der Mikro- und Teilchenphysik, das Elektronenvolt (siehe dort).

6.27 Extinktion

Unter diesem Fachbegriff versteht man in der Astronomie die Rötung des Lichts z. B. von Sternen. Eine Rötung der Farbe ist letztlich ein Energieverlust der Strahlung. Die Ursache dafür sind Streuprozesse im interstellaren und intergalaktischen Medium (siehe dazu auch optische Tiefe).

6.27.1 Extinktion in der Milchstraße

Dieser Effekt ist beispielsweise in der galaktischen Ebene sehr groß. Das liegt daran, weil die Milchstraße eine Spiralgalaxie ist, bei der sich in der galaktischen Ebene hohe Konzentrationen von Staub angesammelt haben. Staub, Gas und Sterne erschweren es gerade den Astronomen ins Zentrum der Milchstraße zu schauen - zumindest im optischen Bereich. Deshalb weichen sie auf andere Spektralbereiche aus, die nicht so sehr von der Rötung des Lichts betroffen sind. Denn der Streuprozess hängt von der Wellenlänge ab. Günstige Strahlungsenergien zur Beobachtung des Galaktischen Zentrums sind Radiowellen, Nahinfrarot und Röntgenstrahlung. Mit Teleskopen für diese Spektralbereiche beobachten Astronomen z. B., wie sich Sterne und Gas um das supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum unserer Heimatgalaxie bewegen. **Multiwellenlängenastronomie** macht so einen Bereich zugänglich, der von der Sonne 26000 Lichtjahre entfernt ist: Als sich das Licht im Galaktischen Zentrum auf den Weg machte, liefen auf der Erde Steinzeitmenschen wie der *Cro-Magnon-Mensch* herum!

6.27.2 Lichtsperren aus Staub: Dunkelwolken

Der Pferdekopfnebel

Die Extinktion bringt auch Strukturen bizarrer Schönheit hervor: sie heißen **Dunkelwolken** und bestehen aus kaltem Staub der optisch nahezu undurchsichtig (opak) ist. Ein berühmtes Beispiel ist der *Pferdekopfnebel* im Beobachtungsfoto 6.9 (Credit: ESO/VLT 2002). Diese Dunkelwolke im Sternbild *Orion* (nahe am so genannten Jakobsstab) sieht von der Erde aus betrachtet aus wie ein Pferdehals mit Pferdekopf. Der Prozess der Extinktion ist hier besonders stark: das Sternenlicht wird in der Helligkeit um einige zehn bis zwanzig Magnituden reduziert!

Reflektionsnebel in Orion

Im Sternbild Orion befindet sich der etwa 1500 Lichtjahre entfernte *Orion-Molekülwolkenkomplex*, zu dem Orionnebel, Pferdekopfnebel und die folgenden beiden Reflektionsnebel gehören. Wir betrachten nun eine deutlich dunklere, aber optisch nicht minder reizvolle Region. Das optische Beobachtungsfoto 6.10 zeigt Staub aufgrund der Extinktion schwarz, aber auch zwei auffallend helle, wolkenartige Strukturen (Credit: *Rector & Schweiker*, NOAO/AURA/NSF 2007). Die größere 'Wolke' etwas unterhalb der Bildmitte ist der **Reflektionsnebel M78**, links oben ist der **Reflektionsnebel NGC 2071**. Die Reflektionsnebel verdanken ihre Bezeichnung der Tatsache, dass sie das Licht der Sterne in der Umgebung nur reflektieren - das verleiht ihnen die typisch bläuliche Farbe. Dies steht im Gegensatz zu den Emissionsnebeln (wie z. B. dem Orionnebel), die durch energiereiche Strahlung junger Sterne selbst zur Emission angeregt werden.

6.28 Extradimension

Dieser Begriff wurde vor allem durch die Stringtheorien wieder populär, hat jedoch schon weit ältere Wurzeln in physikalischen Theorien. Im Allgemeinen verstehen Physiker unter diesem Begriff **weitere räumliche Dimensionen**, neben den bekannten drei Raum- und der einen Zeitdimension.

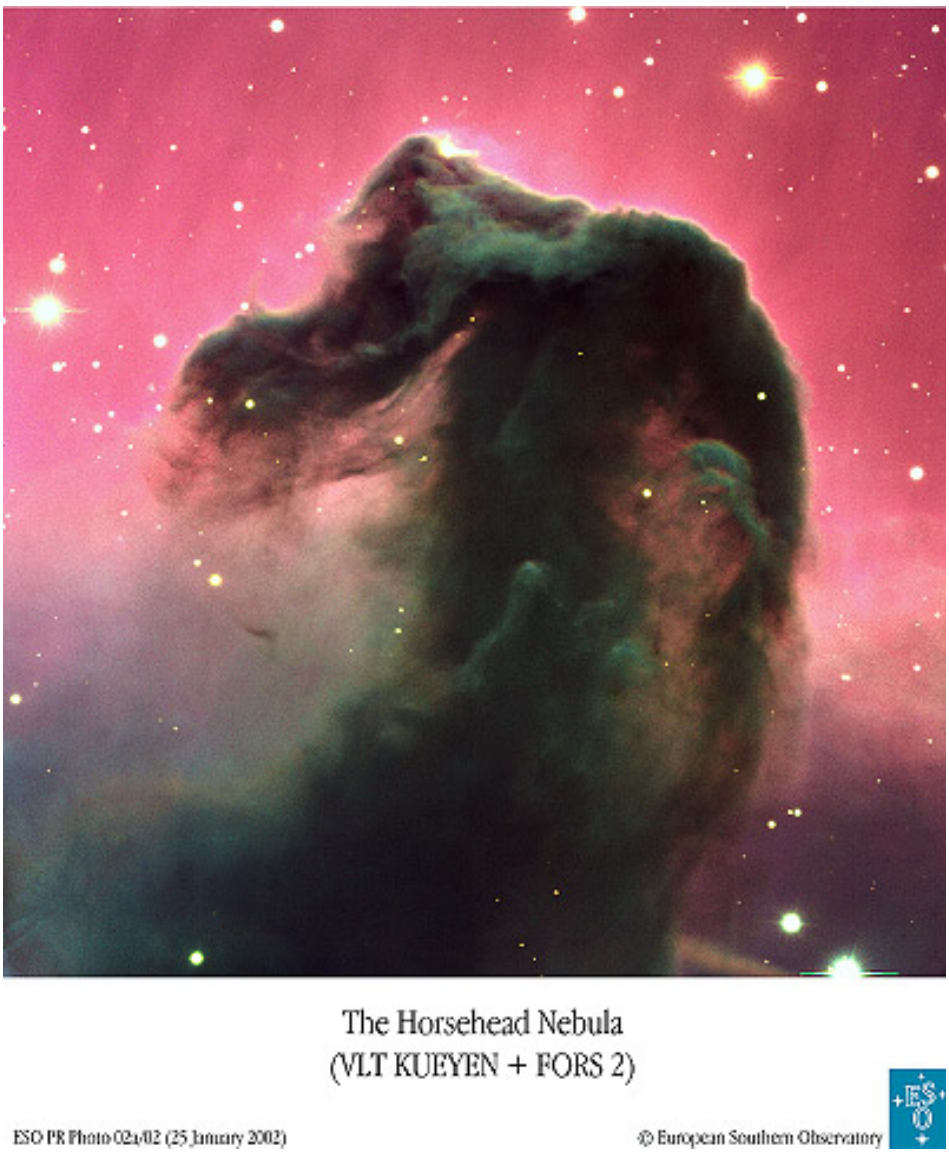

Abbildung 6.9: Pferdekopfnebel im Sternbild Orion, ESO/VLT 2002.

Abbildung 6.10: Reflektionsnebel M78 und NGC 2071 im Pferdekopfnebel im Orion-Molekülwolkenkomplex, 2007.

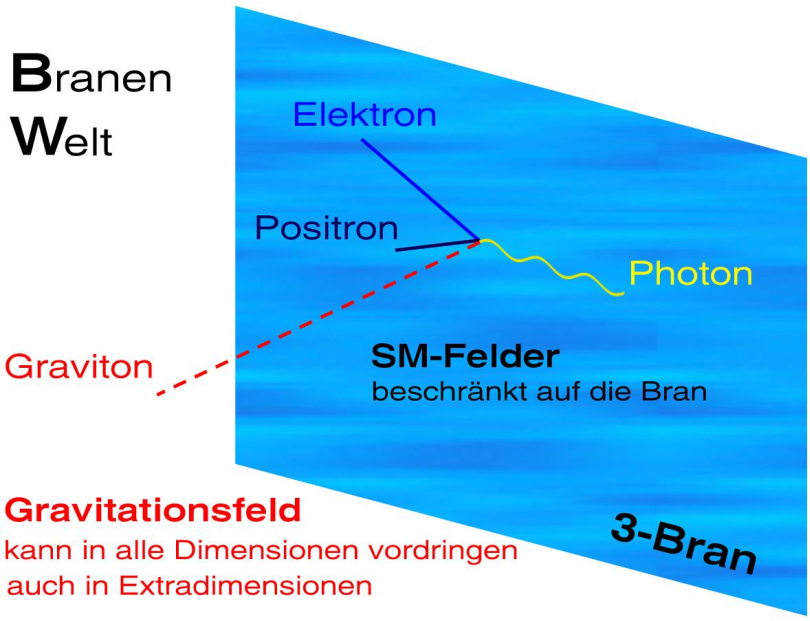

Abbildung 6.11: Beschränkung der SM-Felder und Unbeschränktheit der Gravitationsfelder.

6.28.1 Die Anfänge des Extraraums

Raum und Zeit sind uns vertraut, weil wir uns täglich darin bewegen. Es gibt keinen Zweifel daran, dass diese vier Dimensionen existieren. Als vierdimensionale Raumzeit sind diese Dimensionen Gegenstand der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Sie bilden in Einsteins ART ein Kontinuum, das Krümmung und Dynamik aufweisen kann. Einsteins Theorie ist eine (unquantisierte) Gravitationstheorie, die über die Newtonsche Gravitation hinausgeht und insbesondere die starke Schwerkraft und kompakte Massen die Natur beschreibt.

Höherdimensionale Räume sind in der Mathematik und der theoretischen Physik nichts Ungewöhnliches. Als Beispiel mögen Funktionenräume dienen, deren Dimension sogar unendlich sein kann. Eine der ersten vereinheitlichten Theorien in der Physik überhaupt ist die **Kaluza-Klein-Theorie**. Sie wurde bereits in den 1920er Jahren entwickelt, weil die Physiker Relativitätstheorie und Elektromagnetismus in einem einzigen Konzept beschreiben wollten. Neu war der Ansatz, weil Kaluza und Klein *eine weitere, neue Raumdimension* in dieser Feldtheorie einführten. Der Ansatz setzte sich jedoch nicht in der Physik durch, weil sich die etwa gleichzeitig entwickelte Quantentheorie als erfolgreicher zeichnete.

Erst durch die Fortschritte in den **Stringtheorien** erlebten die Extradimensionen wieder eine Renaissance: *I. Antoniadis* sagte Anfang der 1990er Jahre Extradimensionen in den perturbativen Stringtheorien voraus. Im Ansatz sind die Felder des Standardmodells (*SM-Felder*) auf einen Raum kleinerer Dimension, der so genannten **3-Bran**, beschränkt. Die Bran ist jedoch in eine höherdimensionale Welt inklusive Extradimensionen, dem so genannten **Bulk**, eingebettet. Im Modell wird nun angenommen, dass die Gravitation in **alle Raumdimensionen** - auch den Extradimensionen - vorzudringen vermag. Damit ist die Schwerkraft in diesem Sinne unbeschränkt, während die SM-Felder nur auf der Bran existieren können (siehe Illustration 6.11 nach *M. Cavaglia*, hep-ph/0210296).

Dieses Modell erklärt das bislang nicht verstandene Beobachtungsphänomen, dass

die Gravitation gegenüber den anderen Naturkräften so schwach ist. Dieser als **Hierarchieproblem** bezeichnete Sachverhalt wird mit der Hypothese von zusätzlichen Raumdimensionen gelöst. Anschaulich gesprochen ist der schnellere Abfall der Gravitationskraft dadurch zu verstehen, dass sie sich in alle Dimensionen ausbreitet. Im Feldlinienbild werden die 'Feldlinien ausgedünnt': die Gravitationskraft wird schwächer auf Skalen, wo die Extradimensionen relevant werden.

6.28.2 Wie misst man weitere Dimensionen?

Offensichtlich tritt der Extraraum im Alltag nicht in Erscheinung. Wenn es die Extradimensionen gibt, so müssen sie auf kurze Abstände beschränkt sein. Diese Erscheinung wird in der Physik Kompaktifizierung genannt und geht in der Grundidee schon auf die Kaluza-Klein-Theorie zurück. Aber wie groß sind die typischen Abstände, bei denen die Extradimensionen physikalisch wichtig werden?

Um diese Frage zu beantworten, versuchen die Physiker den Nachweis der zusätzlichen Raumdimensionen zu erbringen. Das Messprinzip ist eigentlich ganz einfach: Die Modelle mit kompaktifizierten Extradimensionen fordern, dass die Gravitation in den Zusatzdimensionen wirkt. Es ist also zu erwarten, dass bei Erreichen der kritischen Längenskala **Abweichungen vom Newtonsche Gravitationsgesetz** auftreten. Die Newtonsche Kraftgesetz besagt, dass die Schwerkraft mit dem Abstandsquadrat abnimmt. Es ist ein r^{-2}-Abstandsgesetz. Rechnerisch kann man zeigen, dass in Modellen mit kompaktifizierten Extradimensionen ein Gravitationskraftgesetz folgt, das bei kleinen Abständen mit höherer Potenz (z. B. r^{-4}) abfällt. Die genaue Form der Abweichungen hängt davon ab, wie viele Extradimensionen tatsächlich vorhanden sind und auf welcher Längenskala sie kompaktiziert sind. Dieser kritische Abstand heißt in der Literatur *Kompaktifizierungsradius*. Ist der Kompaktifizierungsradius relativ groß, d. h. groß im Vergleich zu den Abständen, wo die schwache Kraft wirkt - etwa 0.1 Femtometer - , so nennen die Physiker die Extradimensionen *große Extradimensionen* (engl. *large extra dimensions*, **LED** oder **LXD**). Für große Extradimensionen gibt es bislang keine experimentellen Hinweise - im Gegenteil: wenn es sie gibt, so sind sie auf extrem kleine Abstände 'zusammengerollt'.

6.28.3 Tabletop-Experimente & Mega-Projekte

Die Physiker verwenden ganz unterschiedliche Versuchsanordnungen, um Abweichungen vom Newtonsche Gesetz und damit die Extradimensionen zu beweisen:

Eine Möglichkeit besteht in Experimenten, die der historischen Anordnung des britischen Physikers *Henry Cavendish* (1731 - 1810) ähneln: Dazu verwendet man ein so genanntes Torsionspendel (auch Drehwaage, Gravitationswaage genannt). Dies ist ein hantelförmiges Gebilde aus zwei Metallkugeln, die an einem Draht aufgehängt werden. Diese frei bewegliche Anordnung wird von zwei weiteren, schweren Kugeln über Gravitationskräfte in eine Drehschwingung (*Torsionsschwingung*) versetzt. Aus der Verdrillung des Drahtes und der Schwingung kann bei bekannter Gravitationskonstante die Massen bestimmen oder aus bekannten Massen der Kugeln die Gravitationskonstante, oder man kann auch die Gültigkeit des Newtonschen Kraftgesetzes und dessen Abnahme mit dem Abstandsquadrat testen. Bisher konnten mit solchen **Cavendish-Experimenten** keine Extradimensionen nachgewiesen werden - vermutlich deshalb, weil der Kompaktifizierungsradius viel kleiner ist, als der kleinstmögliche Abstand der Kugeln - oder weil es Extradimensionen nicht gibt.

In einer völlig anderen Versuchsanordnung werden nicht makroskopische Kugeln, sondern ultrakalte Neutronen verwendet. Grundlage dieses Experiments ist der **Einschluss von Neutronen zwischen Platten**. Die gesamte Anordnung ist dem Gravitationsfeld ausgesetzt. Die Neutronen haben eine Ruhemasse und fallen daher im Gravitationsfeld wie alle Testmassen. Allerdings werden in solchen Experimenten, wo Neutronen über einem Neutronen reflektierenden Spiegel fallen, Quanteneffekte wichtig: Die Neutronen fallen nicht kontinuierlich, sondern nehmen dabei diskrete Zustände ein, die von der Quantenmechanik diktiert werden. Die im Gravitationsfeld gebundenen Zustände der Neutronen können benutzt werden, um die Gültigkeit des Newton-Gesetzes im Mikrometerbereich anzugeben. Als Ergebnis konnte die Gültigkeit des klassischen Newtongesetzes in einem Fenster im Bereich von 1 bis 10 Mikrometern bestätigt werden (*Abele et al.*, Lect. Notes Phys. 631, 355, 2003; Preprint hep-ph/0301145).

Der verbleibende Bereich für Kompaktifizierungsradien, der noch nicht experimentell untersucht wurde, liegt demnach zwischen der Millimeter- und der Mikrometerskala. Mittlerweile liegen auch für diesen Bereich Untersuchungen vor, die das Newton-Gesetz bestätigen und damit die Existenz von Extradimensionen bis hinunter in den Mikrometerbereich widerlegen. In diesen neuen Experimenten messen Physiker die **Anziehung zwischen zwei Metallscheiben** infolge der Gravitationskraft. Der Scheibenabstand kann vom Millimeter- bis in den Mikrometerbereich variiert werden. Das aktuelle Ergebnis ist, dass der Kompaktifizierungsradius der Extradimensionen kleiner ist als 44 Mikrometer (*Kapner et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 021101, 2007; Preprint hep-ph/0611184).

Wie kann man das Gravitationsgesetz auf noch kleineren Abständen untersuchen? Das funktioniert beispielsweise mit **Teilchenbeschleunigern**. In den Beschleunigungsanlagen der neusten Generation versuchen die Experimentatoren in hochenergetischen Stößen von Protonen oder schweren Ionen in einem extrem kleinen Volumen soviel Energie zu deponieren, dass dieser Bereich zu einem Schwarzen Loch kollabiert! Gemäß der Modelle wären sie um ein Vielfaches leichter ($\sim$ 1 TeV) als ihre kosmischen Pendants und hätten nur eine kurze Lebensdauer (typisch 10^{-23} Sekunden), wie Berechnungen ergeben haben. Zum Akkretieren wären sie zu kurzlebig, als dass sie eine Gefahr für den Beschleuniger oder gar die Erde darstellen könnten. Denn nach kurzer Zeit würden sie durch die Emission von Hawking-Strahlung zerstrahlen. Die Beobachtung des Zerfalls dieser Mini-Löcher und derer Folgeprodukte würde eine Zählung der Extradimensionen erlauben. Denn es existieren Modellrechnungen unter Annahme verschiedener Dimensionalität der Extradimensionen. Eine signifikante Anzahl von Extradimensionen würde die fundamentale Planck-Skala von 10^{19} GeV in den Bereich von nur einigen TeV, der elektroschwachen Skala, herabsetzen. Die damit assoziierte Quantengravitation nennt man *TeV-Quantengravitation*. Sie könnte demnach bereits bei den neusten Beschleunigertypen wie dem Tevatron in den USA oder dem LHC am CERN studiert werden, sollte es Extradimensionen geben. Es klingt abenteuerlich, aber in den Extradimensionen könnten Gravitonen (nur sie können die 3-Bran verlassen) verschwinden und Energie in andere Dimensionen tragen. Auf diese Weise sollten Extradimensionen in Beschleunigerexperimenten auffallen, weil ab einer kritischen Energie der *Energiesatz (scheinbar) verletzt* würde (engl. *missing-energy experiments*). Dabei bestimmt die Anzahl der Extradimensionen die Energieskala (oder äquivalent den Abstand), ab der diese Phänomene auftreten sollten.

6.28.4 Mehr Dimensionen lösen Probleme in der Kosmologie

Die Extradimensionen sind vitale Zutat der moderner, physikalischer Feldtheorien, weil Stringtheorien, M-Theorie und Supergravitation *nicht ohne* Zusatzdimensionen auskommen. Diese höherdimensionale Branenwelt resultiert letztendlich aus diesen Konzepten und wurde zu einer wichtigen, neuen Stoßrichtung der modernen, relativistischen Kosmologie. Die neuen Modelle sind sehr mächtig: Im ADD-Szenario, den Randall-Sundrum-Modellen, dem DGP-Szenario, dem Ekpyrotischen Szenario und dem Zyklischen Universum finden sich verschiedene Ansätze der **Branen-Kosmologie**, die mit nicht-kompaktifizierten und kompaktifizierten Extradimensionen operieren. Mit diesen Modellen kann das Wesen der Dunklen Energie neu gedeutet, der Wert der kosmologischen Konstante abgeleitet, der Verlust der Konstanz von fundamentalen Naturkonstanten (Gravitationskonstante, Feinstrukturkonstante) skizziert oder eine Erklärung für den Urknall formuliert werden.

6.28.5 Newtons Nachfahren

Eine andere Theorie, die Abweichungen vom klassischen Newton-Gesetz voraussagt, ist die **MOND-Theorie** (MOND ist ein Akronym für ***MO****dified* ***N****ewtonian* ***D****ynamics*). Hier werden jedoch *keine* Zusatzdimensionen gefordert, sondern das Kraftgesetz wird *beschleunigungsabhängig*.

6.28.6 Übrigens, Trekkies:

Den Unterraum, den die kompaktifizierten Extradimensionen aufspannen, kann man als *Subraum* bezeichnen.

6.29 extragalaktisch

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die sich wörtlich '*außerhalb der Galaxis (gemeint ist unsere Galaxis: die Milchstraße) befindlich*' bezieht. Es handelt sich also um eine Orts- oder Skalenangabe, die auf den Bereich außerhalb der Milchstraße verweist. Demzufolge beschäftigt sich die **Extragalaktik** mit der Astrophysik außerhalb der Milchstraße, z. B. mit anderen Galaxien, besonders den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) und mit Galaxienhaufen sowie Galaxiensuperhaufen, die es alle erst in einiger Entfernung zur Milchstraße (und nicht in der Lokalen Gruppe - selbst ein kleiner Galaxienhaufen) gibt. In astronomischen Längeneinheiten ausgedrückt ist das Gebiet der Extragalaktik auf der Skala von Megaparsec, also Millionen von Lichtjahren. Parametrisiert durch die kosmologische Rotverschiebung ist dies ein Bereich deutlich unterhalb von $z \sim 1$.

6.29.1 Es geht noch größer!

Eine noch größere Skala als die extragalaktische ist die **kosmologische Skala**. Hier werden die betrachteten Längenskalen vergleichbar mit der Ausdehnung des Universums und sind im Bereich von Gigaparsec (Gpc), also Milliarden von Lichtjahren. *Per definitionem* liegen hochrotverschobene Objekte oberhalb von $z = 1$.

6.30 extrasolar

Dieses Attribut bezeichnet in der Astronomie wörtlich Gebiete, die sich '*außerhalb unseres Sonnensystems*' befinden.

6.30.1 extrasolare Planeten

Häufig trifft man diesen Terminus in Form von 'extrasolaren Planeten'. Damit meint man also Planeten außerhalb des Sonnensystems, die sich um andere Sterne gebildet haben. Ebenso liest man oft vom 'extrasolaren Leben'. Das bezeichnet eine Form von Leben, das sich außerhalb unseres Sonnensystems um einen anderen Stern entwickelt haben mag. Extrasolare Planeten wurden mannigfaltig vor allem mit der *Doppler-Whobbling*-Methode nachgewiesen: der Stern bewegt sich geringfügig, weil Stern und Planet/Planeten um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Der Doppler-Effekt verschiebt dabei in sehr geringem, aber beobachtbarem Maße die Strahlung um ihre Wellenlänge im Ruhesystem zu kleinen Wellenlängen hin, bei der Bewegung des Sterns auf die Erde zu und zu großen Wellenlängen hin, bei Bewegung von der Erde weg. Diese Methode skaliert mit der Masse des Planeten. Deshalb wurden im Wesentlichen nur schwere Planeten in der Gegend der Jupitermasse gefunden.

6.30.2 extrasolares Leben

Extrasolares Leben wurde bisher nicht nachgewiesen. Dieser Nachweis ist auch schwer zu erbringen. Das SETI-Projekt (*Search for Extraterrestrian Intelligence*, dt. 'Suche nach außerirdischen Intelligenzen') sucht seit Jahren nach elektromagnetischen Signalen, die künstlichen Ursprungs sind - bisher ohne Erfolg.

6.31 extraterrestrisch

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*außerhalb der Erde befindlich*' meint. Extraterrestrische Physik ist also die Weltraumphysik oder die Physik des Kosmos, die Astrophysik.

6.31.1 Der Extraterrestrische

Berühmt und bekannt wurde dieser Terminus sicherlich im Science-Fiction Film *E.T. - Der Außerirdische*, denn 'E.T.' ist gerade das Akronym für den ***e**xtra**t**errestrian*, den Außerirdischen, dessen Finger rot glühen kann. Es handelt sich übrigens nicht um einen Mitarbeiter unseres Instituts.

6.31.2 Jemand da draußen?

Signale extraterrestrischen Ursprungs stammen demnach von kosmischen, aber nicht notwendigerweise künstlichen Quellen. Bisher war zumindest kein Signal darunter, von dem man sagen könnte, dass gerade ein E.T. nach Hause telefoniert. Das SETI-Projekt (*Search for Extraterrestrian Intelligence*, dt. 'Suche nach außerirdischen Intelligenzen') durchforstet seit Jahren die Flut elektromagnetischer kosmischer Signale (Radiowellen), auf bestimmte Muster, die auf einen künstlichen Ursprung, d. h. auf eine andere Intelligenz hinweisen - bisher wurde nichts gefunden.

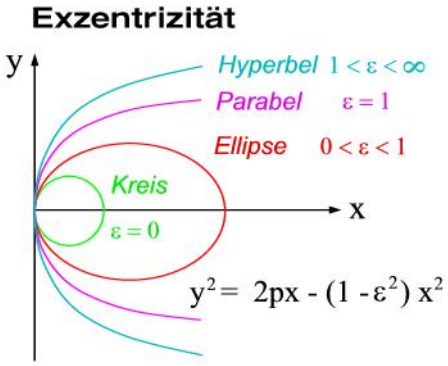

Abbildung 6.12: Exzentrizitäten der Kegelschnitte.

Führt man sich allerdings vor Augen, dass die Radiotechnik des Menschen erst wenige Jahrzehnte verfüg- und kontrollierbar ist, verwundert es nicht, dass man bisher nichts fand. Die Lichtgeschwindigkeit, mit der sich auch die Radiowellen ausbreiten, ist endlich und liegt bei fast 300 000 km/s. Jedes Jahr dehnt sich der Horizont unserer gesendeten Radiostrahlung um ein Lichtjahr aus. Die Strahlung schwächt sich aber auch bei ihrer Ausbreitung in ihrer Intensität ab. Bei großzügigem Aufrunden hat der Mensch also gerade mal seine mit Information modulierten Radiowellen hundert Lichtjahre ins Universum hinaus geschickt. Diese Skala liegt noch weit innerhalb der Milchstraße und reicht nicht einmal bis zum roten Schulterstern Beteigeuze im Wintersternbild *Orion*.

6.32 Exzentrizität

Die Exzentrizität ist ein **Bahnparameter**, der zusammen mit weiteren Bahnparametern (Neigung der Bahnebene gegenüber Ekliptik, Position des Perihels, Perihelzeit etc.), die Bahn eines Himmelskörpers im Sonnensystem eindeutig charakterisiert.

6.32.1 Himmelsbahnen im Sonnensystem

Himmelskörper im Sonnensystem bewegen sich (vor allem) unter dem Einfluss der **Gravitation der Sonne**. Die dabei auftretenden Bahnformen wurden empirisch von *Johannes Kepler* entdeckt: die **Kepler-Gesetze** zeigten, dass sich die Planeten im Sonnensystem auf Ellipsenbahnen bewegen. Später wurden diese und andere Bahnformen mit den mathematischen und physikalischen Methoden von *Sir Isaac Newton* im Rahmen der **Newtonschen Gravitation** erklärt: Die Bahnen der Körper im Sonnensystem sind **Kegelschnitte**, also Schnittfiguren, die sich ergeben, wenn man eine Ebene mit der Mantellinie eines Kreiskegels schneidet. Je nachdem, unter welchem Winkel die Ebene schneidet, resultieren daraus die Figuren **Kreis, Ellipse, Parabel oder Hyperbel**.

6.32.2 Kegelschnittgleichung und numerische Exzentrizität

In einem kartesischen Koordinatensystem lässt sich eine allgemeine mathematische Gleichung ableiten, die als Lösungen alle genannten Schnittfiguren enthält. Diese Gleichung heißt

Scheitelform der Kegelschnittgleichung und ist in der Graphik 6.12 notiert. Darin ist p der Kegelschnittparameter und ϵ die *numerische Exzentrizität*. Es hängt nun vom Zahlenwert der Exzentrizität ab, ob die Funktion $y(x)$ einen Kreis, eine Ellipse, eine Parabel oder eine Hyperbel beschreibt. In der Graphik rechts sind außerdem alle Kegelschnitte als Kurven dargestellt und zwar in Abhängigkeit von der Exzentrizität ϵ. Für Exzentrizitäten kleiner als 1 sind die Kurven geschlossen (Kreis, Ellipse); für Exzentrizitäten größer als 1 sind die Kurven offen (Parabel, Hyperbel).

6.32.3 Bedeutung von Exzentrizität

Aus der Abbildung wird die anschauliche Bedeutung der Exzentrizität (grch. *èkkentros*: 'außerhalb der Mitte') klar: sie ist ein Maß für die Abweichung vom Kreis. Dreht man die Exzentrizität nach oben, so werden die resultierenden Kurven dem Kreis immer unähnlicher.

Der Kreis als geometrisch vollendete Figur hat verschwindende Exzentrizität. Die Kegelschnittgleichung degeneriert zur Kreisgleichung und beschreibt hier einen Kreis mit Ursprung im Punkt (p, 0) und mit Kreisradius p. Wächst nun die Exzentrizität an, so 'bläht' sich der Kreis zur Ellipse auf. Bei einer Exzentrizität von exakt gleich 1, verschwindet die Klammer in der Kegelschnittgleichung und damit der in x quadratische Term: die Gleichung $y(x)$ beschreibt eine Parabel. Für Exzentrizitäten größer als 1 wird die Klammer immer negativ und damit der Vorfaktor des in x quadratischen Terms immer positiv in der Kegelschnittgleichung. Dann ist $y(x)$ immer eine Hyperbelgleichung.

7 Lexikon F

7.1 Falschfarbenbild

Mit unseren menschlichen Augen nehmen wir Farben wahr, die in der Sprache der Astronomie ausschließlich im **optischen** Bereich liegen. Wir sehen das Licht und assoziieren damit Farbempfindungen von rot, orange, gelb, grün, blau bis violett. Diese Regenbogenfarben nennt man in der Physik **sichtbares Spektrum**.

7.1.1 Farben als Wellen

Licht ist aus der Sicht der klassischen Elektrodynamik eine elektromagnetische Welle. Dieser Welle kann eine *Wellenlänge* zugeordnet werden. Physiker haben gemessen, dass der Bereich des sichtbaren Spektrums außerordentlich kurze Wellenlängen von 400 (violett) bis 700 (rot) Nanometern aufweist. Ein Nanometer ist der Milliardste Teil eines Meters: 1 nm = 10^{-9} m = 10^{-7} cm.

7.1.2 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum ist jedoch viel breiter als der schmale Bereich des sichtbaren Lichts: So gibt es bei den großen Wellenlängen im Bereich von

- ◇ Kilometern bis Zentimetern die **Radiowellen**,
- ◇ Zentimetern die **Mikrowellen**
- ◇ Mikrometern die **Infrarotstrahlung**,
- ◇ hundert Nanometern das **sichtbare Licht**
- ◇ Nanometern das **Ultraviolett**,
- ◇ Zehntel Nanometern (Angstrøm) die **Röntgenstrahlung**,
- ◇ Billionstel Metern die **Gammastrahlung**,
- ◇ Trillionstel Metern die **TeV-Strahlung**.

Von oben nach unten nimmt auch die Energie der Strahlung deutlich zu. Diese Strahlungsenergie ist übrigens gequantelt (Einsteins Lichtquantenhypothese) und zwar in die **Photonen**.

7.1.3 Wer sehen will, muss fälschen

Astronomen sind natürlich **an allen** vorgestellten Strahlungsformen interessiert, weil jede davon Informationen über eine kosmische Quelle enthält. Die Anfänge der Astronomie waren optisch (*optische Astronomie*); sukzessiv wurden jedoch die anderen *Beobachtungsfenstern* geöffnet, und so entstanden die Teildisziplinen *Radioastronomie, Infrarotastronomie, Ultraviolettastronomie, Röntgenastronomie* und *Gammaastronomie*.

Inzwischen geht die moderne Astronomie sogar über die elektromagnetischen Wellen hinaus, weil es möglich geworden ist, Teilchen zu beobachten, die aus der Tiefe des Weltalls zu uns gelangen. Dazu gehören die Neutrinos (*Neutrinoastronomie*) und kosmische Strahlung (*Hochenergieastrophysik*).

Mit diesen für das menschliche Auge **prinzipiell unbeobachtbaren** Strahlungsformen und Teilchen hat der Astronom ein Darstellungsproblem, denn wie kann er z. B. das Bild einer Röntgenquelle betrachten, wenn er doch mit seinen Augen unempfindlich ist für Röntgenstrahlung? Die Lösung stellt gerade das *Falschfarbenbild* dar. Doch was ist eigentlich falsch an der Farbe? Nun, der Trick besteht ganz einfach darin, jeder Wellenlänge *außerhalb* des sichtbaren Bereichs wieder eine für uns sichtbare Farbe aus der Palette von rot bis violett zuzuordnen. Das macht man am besten so, dass blau wieder der kleinsten Wellenlänge (höchsten Strahlungsenergie) und rot der größten Wellenlänge (kleinsten Strahlungsenergie) zugeordnet werden. Nach der Farbtheorie (subtraktive und additive Farbmischung) entsteht dann beim Betrachten des 'gefälschten' Gesamtbildes genau der Farbeindruck wie im sichtbaren Bereich. Sie wollen ein Beispiel? Bitte Abbildung 7.1 betrachten.

7.1.4 Beispiel

Im Wissensportal für Astrophysik gibt es sehr viele Beispiele für Falschfarbenbilder. Das Foto 7.1 ist ein Falschfarbenbild des Planetarischen Nebels NGC3242 (Credit: ESA/XMM-Newton, *Chu & Gruendl*; *Guerrero & Ruiz* 2003). Der Nebel wird auch *Jupiters Geist* genannt, weil er etwa dieselbe scheinbare Größe wie der riesige Gasplanet Jupiter hat. Jupiters Geist befindet sich am Südhimmel im Sternbild *Hydra* (dt. *Weibl./Nördliche Wasserschlange*) in etwa 3000 Lichtjahren Entfernung. Die Punktquelle im Zentrum ist ein Weißer Zwerg, der aus einem Roten Riesen hervorgegangen ist. Die abgestoßenen Hüllen des Riesensterns erstrahlen nun als flächenhafter Nebel.

Zur Erstellung des Falschfarbenbilds müssen die Farben rot (R), grün (G) und blau (B) an einen bestimmten Spektralbereich oder an eine bestimmte Spektrallinie (im Prinzip ist das ein sehr enger Spektralbereich) vergeben werden. Im Fall von NGC3242 ist das so geschehen, dass blau die Röntgenstrahlung darstellt, die mit XMM-Newton beobachtet wurde. Grün und rot sind optische Spektrallinien, die mit dem Weltraumteleskop Hubble beobachtet wurden. Das resultierende Gesamtbild heißt **RGB-Bild** oder **Falschfarbenkomposit**, weil es sich aus drei Grundfarben zusammensetzt (lat. *compositus*: zusammengesetzt). So wie sich NGC3242 hier auf diesem Falschfarbenbild präsentiert, wäre er niemals unter natürlichen Bedingungen für das menschliche Auge beobachtbar. Die gewählten, scharfen, optischen Spektrallinien bringen besonderen Kontrast und Schärfe in das Bild.

Nun ist auch eine **physikalische Interpretation des Falschfarbenbildes** angebracht - jetzt 'machen wir Wissenschaft': Die interessanten Ringstrukturen werden vom Sternenwind des Zwergs erzeugt. Der Wind prallt auf das Nebelmaterial in der Umgebung und bildet dabei ein etwa zwei Millionen Grad heißes Plasma, das die im Bild blau dargestellte

Abbildung 7.1: Falschfarbenbild des Planetarischen Nebels NGC3242.

(thermische) Röntgenstrahlung abgibt. Es handelt sich hier um einen Planetarischen Nebel mit einer Röntgenblase oder Röntgenkavität (engl. *X-ray cavity*). Das heiße Gas dehnt sich aus und quetscht dabei das Nebelgas zur dicken, grünen Ringstruktur zusammen. Grün und rot dargestellt ist das deutlich kältere Nebelgas, das in optischen Spektrallinien von Sauerstoff (OIII, grün) und Stickstoff (NII, rot) beobachtet wurde. Diese Interpretation ist natürlich nicht allein auf der Basis des Falschfarbenbildes möglich, sondern erfordert weitere Informationen, wie z. B. Spektren oder Lichtkurven.

7.1.5 Hell & dunkel

Eine RGB-Farbe ist eine Anordnung aus drei Zahlen (R, G, B), ein so genanntes *Tripel*. Die erste Zahl steht für den Rotwert R, die zweite für den Grünwert G und die dritte für den Blauwert B. Jeder dieser Zahlenwerte kann nun eine ganze Zahl aus dem Wertebereich von 0 bis 255 annehmen. Je kleiner die Zahl, umso dunkler ist die jeweilige Farbe. Wie viele Farben sind mit dem RGB-System darstellbar? Richtig, $256 \times 256 \times 256 =$ **16.78 Millionen**! Das reicht für ein recht buntes Bild.

Folgendes sind Beispiele dafür: (0, 0, 0) ist schwarz; (255, 255, 255) ist weiß; (255, 0, 0) ist hellrot; (50, 0, 0) ist dunkelrot; (0, 0, 20) ist dunkelblau usw. Die Helligkeit der Farbe wird also durch die Höhe dieser Zahl kontrolliert. Leuchtkräftige Röntgenstrahlung von NGC3242 hat so z. B. den RGB-Wert (0, 0, 220) und erscheint hellblau, während leuchtschwache Röntgenemission vielleicht nur den Wert (0, 0, 15) erhält und somit dunkelblau dargestellt wird.

7.1.6 Falschfarben als mächtiges Werkzeug

In der Astronomie und Astrophysik werden Falschfarbenbilder nicht nur bei Beobachtungsdaten eingesetzt, sondern natürlich auch bei **Simulationsdaten**, die Computer und Hochleistungsrechner berechnet haben. So kann man einen RGB-Wert nicht nur einer Wellenlänge außerhalb des sichtbaren Bereichs zuordnen, sondern auch einer Temperatur, einem Materiedichtewert oder einem magnetischen Druck. Das wird bei der **Visualisierung** simulierter Daten beispielsweise in der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik benutzt. Ein weiteres Beispiel aus der Strahlungsphysik ist Ray Tracing, wo z. B. eine Verteilung des Doppler-Faktors als Falschfarbenbild dargestellt werden kann.

Falschfarbenbilder gibt es nicht nur in der Astronomie, sondern auch beispielsweise in der Elastomechanik (Spannungsverteilungen im Material) in der medizinischen Diagnostik (Kernspintomographie), in der Meteorologie (Niederschlagswahrscheinlichkeiten) uvm.

7.1.7 Fazit

Falschfarbenbilder sind von unschätzbarem Wert für die Astronomie als Wissenschaft, und sie sind oft von einer Schönheit, der sich kaum ein Betrachter entziehen kann. Die Falschfarbentechnik führt uns die latente Schönheit der Natur im wahrsten Sinne vor Augen.

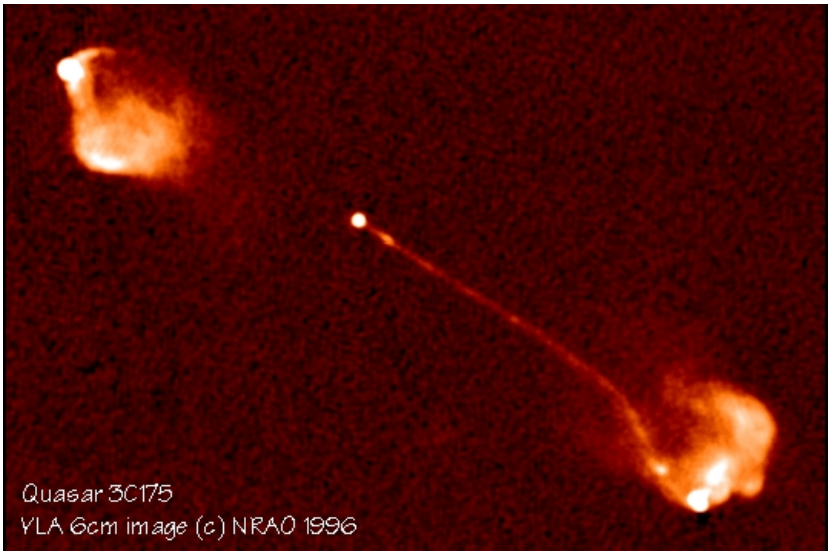

Abbildung 7.2: Falschfarbenbild: doppelte Radioquelle 3C175, beobachtet mit dem VLA.

7.2 Fanaroff-Riley-Klassifikation

Diese Klassifikation mit der Abkürzung FR wurde zur Unterscheidung von Radioquellen eingeführt, insbesondere für Radiogalaxien. Historisch geht sie auf *B.L. Fanaroff* und *J.M. Riley* zurück (1974). Diese Radioastronomen untersuchten 57 Radiogalaxien und radiolaute Quasare (3C-Katalog). Es handelt sich dabei um klassische **doppelte Radioquellen** (engl. *double radio sources*), die bei Radiofrequenzen von 1.4 GHz und 5 GHz deutlich voneinander separiert werden konnten. Ein Beispiel ist die Radioquelle 3C175 in Abbildung 7.2, wie sie 1996 mit dem VLA bei einer Wellenlänge von 6 cm fotografiert wurde (Credit: *Bridle et al.*, NRAO/VLA 1996). Mittlerweile ist klar, dass die beiden Radioquellen Jets sind, deren Plasma aus Elektronen Synchrotronstrahlung im Radiobereich emittiert. Die Jets sind Materiestrahlen, die von einem supermassereichen Schwarzen Loch im Herzen des Quasars erzeugt werden.

7.2.1 Terminologie für Radiostrukturen

Die Radiostrukturen der Radiogalaxien und radiolauten Quasare werden mit folgender Nomenklatur versehen:

- ◇ Der *Core* (dt. Kern) ist mit der zentralen, aktiven Quelle assoziiert. Hier befindet sich das supermassereiche Schwarze Loch, das durch Akkretion die Aktivität des Aktiven Galaktischen Kerns (AGN) steuert.
- ◇ Der oder die *Jets* (einseitig oder beidseitig) besteht aus Plasma, das durch das intergalaktische Medium propagiert. Typische Längenskalen sind im Bereich von kpc oder Mpc!
- ◇ In den *Hot Spots* (dt. Heiße Flecken) wird das Jetplasma geschockt, erreicht dabei hohe Temperaturen und kommt in seiner Propagation zum Erliegen oder strömt im *Cocoon*

(dt. Kokon) entlang der Jetachse zurück zur Quelle.

◇ Die *Lobes* (dt. Lappen) sind ausgedehnte, bogenartige Radiostrukturen, die sich hinter den Hot Spots anschließen.

7.2.2 Das Klassifikationskriterium

Fanaroff und *Riley* definierten nun ein Verhältnis, R_{FR}, aus dem Abstand der beiden oberflächenhellsten Gebiete (lokalisiert auf gegenüberliegenden Seiten der Zentralquelle) und der Größe der Quelle im Bereich der Radiokonturen niedrigster Radiohelligkeit. Ihre Zweiteilung (Dichotomie) ist die Folgende:

◇ FR Typ I: R_{FR} kleiner 0.5

◇ FR Typ II: R_{FR} größer 0.5

7.2.3 Zusammenhang mit der Radioleuchtkraft

Nun stellten *Fanaroff* und *Riley* fest, dass diese Klasseneinteilung nach Oberflächenhelligkeiten mit der **spektralen Radioleuchtkraft** der Quelle korreliert. Ab einer kritischen, frequenzabhängigen Radioleuchtkraft konnten sie die Radioquellen entweder nur in der einen oder nur in der anderen FR-Klasse finden. Bis heute wird diese Klassifikation bei Radiogalaxien benutzt. Die helle Radioquelle Cygnus A in einer Entfernung von 233 Mpc ist der Archetypus für FR II.

7.2.4 Steile und flache Spektren

Die Astronomen können viele Radiospektren durch Potenzgesetze anpassen, die folgende Form haben:

$$S \propto \nu^{-\alpha}.$$

In einer Auftragung Flussdichte S über Frequenz ν dient die Steigung (engl. *slope*) als Unterscheidungsmerkmal. Die Steigung α wird *spektraler Index* genannt. Ist der spektrale Index größer als 0.5, nennt man das Spektrum *steil*; für einen Index von etwa null, nennt man es *flach*.

Die Radiostrukturen haben oft wohldefinierte spektrale Indizes:

◇ Der Core ist flach.

◇ Jets zeigen steile Spektren mit typischen spektralen Indizes von etwa 0.6.

◇ Die Hot Spots haben Indizes zwischen 0.5 und 1.0 und sind daher steil.

7.3 Faraday-Rotation

Die Faraday-Rotation ist Gegenstand der **Plasmaphysik**, und man bezeichnet damit die **Drehung der Polarisationsebene** einer polarisierten, elektromagnetischen Welle beim Durchgang durch ionisiertes, magnetisiertes Material. Das Plasma erzeugt ein äußeres Magnetfeld, das die Drehung der Polarisationsebene bewirkt. Wie gedreht, wird entscheidet die Stärke und Richtung des Magnetfeldes, aber auch die Frequenz der eingestrahlten Photonen.

7.3.1 Was ist polarisierte Strahlung?

Die Polarisation wird festgelegt durch den elektrischen Feldvektor der elektromagnetischen Welle. Dabei betrachtet man sein zeitliches und räumliches Schwingungsverhalten, wenn man entlang der Ausbreitungsrichtung der Welle blickt. Oszilliert der Vektor in einer Ebene, spricht man von *linear polarisierter* Strahlung. Beschreibt er einen Kreis, ist es *zirkular polarisierte* Strahlung. Zudem gibt es noch *elliptisch polarisierte* Strahlung, wenn der elektrische Feldvektor eine Ellipse bei der Propagation beschreibt.

7.3.2 Gedrehte Strahlung verrät Magnetfeld

In der Astrophysik verwendet man die Faraday-Rotation als *Tracer*, sozusagen als Informant, um intergalaktische Magnetfelder und intergalaktisches Clustergas zu vermessen. In den Galaxienhaufen (engl. *galaxy cluster*) sind die Massenanteile so verteilt, dass Dunkle Materie mit 90% dominiert, die sichtbaren Sterne machen nur 1restlichen 9% heißes intergalaktisches Clustergas ist. Es ist so heiß, dass es als thermischer Planckscher Strahler im Röntgenbereich beobachtet werden kann! Der Fachausdruck für eine solche Röntgenstruktur lautet *X-ray cavity* (dt. Röntgenkavität oder 'Röntgenblase'). Durchläuft nun die Strahlung einer Radioquelle, z. B. einer Radiogalaxie oder eines radiolauten Quasars, die sich *hinter* dem Clustergas befindet das ionisierte Material, so gerät es unter den Einfluss der Faraday-Rotation. Typischerweise befindet sich im Zentrum des Galaxienhaufens eine starke Radioquelle, die das *Intraclustergas* durchleuchtet, so z. B. die Radiogalaxie M87, ein Aktiver Galaktischer Kern (AGN) im Virgo-Haufen. Die hohen Temperaturen erhält das Intraclustergas dadurch, dass die Radioquellen im intergalaktischen Medium Energie deponieren. Manchmal dokumentieren die heißen Röntgenblasen wie Fossilien die ehemalige Radioaktivität in der Umgebung. Vielleicht können sie Zeugen einer längst vergangenen Phase eines lokalen, radiolauten AGN sein. Die Blasen fungieren wie ein Behältnis, das die Magnetfelder in die Randbereiche des Clusters transportiert. Auf diese Weise bildet sich ein **intergalaktisches Magnetfeld** aus.

7.3.3 linear polarisierte Synchrotronstrahlung

Man muss dazu sagen, dass die Radiostrahlung besagter Quellen in der Regel linear polarisiert ist, weil es sich um Synchrotronstrahlung handelt. Die Synchrotronstrahlung wird beispielsweise in den Jets erzeugt, kann aber auch aus der Kernregion des AGN im Akkretionsfluss nahe am supermassereichen Schwarzen Loch erzeugt werden.

7.3.4 Einordnung in den ganz großen Zusammenhang

Diese linear polarisierte Strahlung aus Hintergrundquellen erleidet wie gesagt die Faraday-Rotation. Mithilfe dieses Effekts lässt sich nun eine Aussage über die Magnetfelder im vorgelagerten Galaxiencluster machen. Man vermutet, dass die Magnetfelder eine wichtige Rolle in der Dynamik der Galaxienhaufen spielen. Die **Kartographie intergalaktischer Magnetfelder** ist dann ein Schlüssel zu Simulationen der Haufendynamik im Rahmen der Magnetohydrodynamik. Insbesondere sind die Astronomen an *Cooling Flows*, großskaligen Materieflüssen, interessiert. Dieses Verständnis ist ebenso relevant für die Kosmologie, weil es vermutlich auch klärt - so die Hoffnung -, wie die **großräumigen Strukturen** im Universum zustande kommen.

7.3.5 Quellen:

Dolag, Bartelmann & Lesch 2002, *McNamara* 2004

7.4 Farbindex

Dieser Begriff wird bei dem Eintrag Helligkeit erklärt.

7.5 Farbladung

Die Farbladung ist diejenige Quanteneigenschaft oder Quantenzahl in der Quantenchromodynamik (grch. $\chi\rho\tilde{\omega}\mu\alpha$, *chroma*: Farbe), die die starke Wechselwirkung hervorruft. So wie die Photonen der Quantenelektrodynamik (QED) an die elektrischen Ladungen koppeln, koppeln die acht Gluonen, die Eichbosonen der QCD, an die Farbladungen.

7.5.1 farbige Kräfte kommen nicht weit

Die Farbfreiheitsgrade sind **rot**, **grün** und **blau**. Daneben existieren die drei korrespondierenden **Antifarben**. Eine der elementaren Teilchenfamilien, die Quarks, tragen eine bestimmte Farbladung der drei möglichen. Das Groteske an der QCD ist, dass die Gluonen *selbst* Farbladungen tragen und daher auch untereinander stark wechselwirken. Dies ist der tief liegende Grund für die Kurzreichweitigkeit der starken Wechselwirkung trotz masseloser Eichbosonen (vergleiche Yukawa-Potential).

7.5.2 Bunte Quantenwelt

Alle Hadronen sind farbneutral oder 'weiß', wie die Quantenfeldtheoretiker sagen, weil die Superposition der Farben rot, grün und blau gerade weiß ergibt. Das hat zur Folge, dass die drei Quarks, die ein Baryon konstituieren, alle unterschiedliche Farben haben müssen: entweder rot, grün und blau oder anti-rot, anti-grün und anti-blau.

Die beiden Quarks, die zusammengesetzt ein Meson bilden, müssen entsprechend durch Farbe und korrespondierender Anti-Farbe ausgezeichnet sein. Dann erscheint auch das Meson nach außen farbneutral.

Die zweite, echte Elementarteilchenfamilie, die Leptonen sind ohne Ausnahme farbneutral. Anders gesagt, nehmen sie **nicht** an der starken Wechselwirkung teil.

7.5.3 Farbe als abstrakter Begriff für eine Ladungsform

Die Benennung dieses Quantenfreiheitsgrades der QCD nach Farben ist im Prinzip willkürlich und spielt keine Rolle. Es findet sich jedoch eine praktikable Analogie zur *additiven Farbmischung*, wie aus obigen Beispielen ersichtlich ist.

Insgesamt kennen die Quantenfeldtheorien vier Ladungen, an die die vier Grundkräfte koppeln:

- ◇ Die elektrische Ladung der QED,
- ◇ die schwache Hyperladung der Schwachen Wechselwirkung,

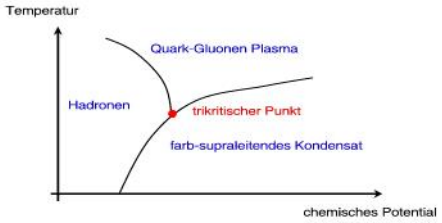

Abbildung 7.3: Phasendiagramm der QCD.

- die Farbladung der QCD
- und die Masse als 'gravitative Ladung' der Gravitationstheorien.

7.6 Farbsupraleitung

Die BCS-Theorie (nach den Pionieren *John **B**ardeen, Leon **C**ooper, Bob **S**chrieffer*, 1957) der Supraleitung in der theoretischen Festkörperphysik sieht ein kollektives Phänomen der Leitungselektronen vor. Wenn es kalt wird, sind Elektronen ungern Singles: Bei tiefen Temperaturen schließen sich deshalb zwei Elektronen (die zur Gruppe der Fermionen gehören) zu den so genannten **Cooper-Paaren** zusammen.

7.6.1 Ein perfektes Quantenpaar

Diese Paarung ist nur mit einer Wechselwirkung mit dem Kristallgitter des Festkörpers zu erklären, so dass eine anziehende (*attraktive*) Kraft zwischen den sich normalerweise aufgrund der Coulomb-Kraft abstoßenden Elektronen resultiert. Die Paare sind dann bosonisch und weisen damit völlig neue physikalische Eigenschaften auf. Die Pärchen pfeifen nämlich auf das Pauli-Verbot! Cooper-Paare bestehen aus Elektronen mit antiparallelem Spin, und deshalb können sich beliebig viele Cooper-Paare im *gleichen* Quantenzustand (gleiches Energieniveau) aufhalten.

7.6.2 Paare haben keinen Widerstand

Das **widerstandslose Stromfließen in einem Supraleiter** kann dadurch erklärt werden, dass die Cooper-Paare *nicht* an den Gitterionen gestreut werden können. Gerade diese Streuung führt bei der 'normalen' Leitung zu Verlusten, dem elektrischen Widerstand. Die Paare wirken jedoch aufgrund der starken Korrelation mit dem Gitter als Gesamtheit: der Gesamtimpuls der Cooper-Paare, also der elektrische Strom, bleibt erhalten. Erst das Aufbrechen der Bindung der Cooper-Paare durch Zuführen von Energie (höhere Temperaturen) kann die Supraleitung beenden.

7.6.3 Farbsupraleitung als Pendant

In Analogie zur dieser BCS-Supraleitung wurde bereits 1977 von *Barrois* eine **Farbsupraleitung** (engl. *color superconductivity*) vorgeschlagen, die vor kurzem 'wiederbelebt' wurde. In der Farbsupraleitung sind es nicht Elektronen, sondern **Quarks**, die

fermionischen Konstituenten der Nukleonen, die eine Paarbindung (*Diquarks*) eingehen. Die Bezeichnung *Farb*supraleitung rührt daher, weil Quarks neben der drittelzahligen elektrischen Ladung eine **Farbladung** tragen (Quantenchromodynamik, QCD).

7.6.4 Bezug zu kompakten Sternen

Einen Übergang in eine Phase von Quarkpaaren vermutet man bei sehr hohen Dichten (mehrfache Kernmateriedichte!), beispielsweise im Innern von Neutronensternen und Quarksternen. Das Phasendiagramm 7.3 zeigt, wie man sich die drei Phasen Hadronen, farbsupraleitende Phase und Quark-Gluonen-Plasma mit jeweiligen Phasengrenzen vorstellt.

Allerdings beträgt der Einfluss der Farbsupraleitung auf die Zustandsgleichung von kompakten Objekten wie den Neutronensternen nur wenige Prozent, weshalb ihre Wichtigkeit für phänomenologische Modelle eher marginaler Natur ist.

7.6.5 Quelle

◇ *Alford, M.*: Color superconducting quark matter in compact stars, Preprint hep-ph/0110150

7.7 Feldgleichungen

Ganz allgemein versteht man unter den Feldgleichungen die Bewegungsgleichungen in klassischen Feldtheorien und auch in den Quantenfeldtheorien (QFT). Diese Bewegungsgleichungen diktieren die Dynamik des physikalischen Systems.

7.7.1 Immer das gleiche Rezept

Feldgleichungen folgen zwingend einem Konstruktionsplan, mit dessen Hilfe aus den **Lagrangedichten** (*Lagrangian*) der Theorie die Bewegungsgleichungen über die Euler-Lagrange-Gleichungen (die bereits aus der klassischen Mechanik bekannt sind) folgen. Diese Bewegungsgleichungen sind gerade identisch mit den **Feldgleichungen** der Theorie. Der umgekehrte Weg ist ebenfalls praktikabel: man sucht Bewegungsgleichungen auf, aus denen die Lagrangedichten folgen. Der kanonische Aufbau einer Theorie ist somit möglich, wenn auch die praktischen Rechnungen im Detail äußerst kompliziert sind.

7.7.2 Beispiele

◇ In der Quantenelektrodynamik (QED), einer (speziell) relativistischen und quantisierten Theorie des elektromagnetischen Feldes, können die Elektronen und deren Antiteilchen, die Positronen, auf dem Quantenniveau beschrieben werden. Die elektromagnetische Kraft wird durch den Austausch von Bosonen, den Photonen, verstanden.

◇ Die Quantenchromodynamik (QCD) ist eine quantisierte Theorie der starken Wechselwirkung. Sie erklärt auf der Quantenebene die Wechselwirkung der Quarks, die eine Farbladung tragen, genauso wie den Zusammenhalt der Nukleonen (Proton und Neutron) bzw. allgemeiner gesprochen den Zusammenhalt der Hadronen.

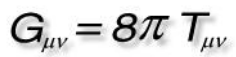

Abbildung 7.4: Einsteinsche Feldgleichungen.

◇ Auch klassische, nicht quantisierte Feldtheorien wie die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) können mit dem Apparat der Euler-Lagrange-Gleichungen behandelt werden. Mit dem Ansatz der so genannten *Einstein-Hilbert-Wirkung* (die die gleiche Information wie der Lagrangian trägt) folgt dann die unten stehende Feldgleichung der ART.

7.7.3 klassische Feldgleichung der Gravitation

Bezogen auf die Relativitätstheorie meint der Begriff *Einsteinsche Feldgleichungen* (Abbildung 7.4) den fundamentalen Satz an Gleichungen, der die Materie (beschrieben durch den Energie-Impuls-Tensor T, der im Vakuumfall verschwindet) an die Raumzeit (repräsentiert durch den Riemannschen Krümmungstensor, der den Einstein-Tensor G konstituiert) selbstkonsistent koppelt. Die einfache Gestalt der Feldgleichung täuscht! Diese Gleichung komplett ausformuliert besteht aus **zehn nichtlinearen, gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen** für die es keinen vollständigen Satz an Lösungen gibt. Immer wieder werden deshalb neue, spezielle Lösungen für Einsteins Feldgleichung gefunden. Eine Lösung der Feldgleichung gibt dann Aufschluss über die Raumzeit-Geometrie der Materie oder - falls der Energie-Impuls-Tensor verschwindet - die des Vakuums. Ungeladene Schwarze Löcher sind beispielsweise immer Lösungen der Vakuum-Feldgleichungen (z. B. die Kerr-Lösung oder die Schwarzschild-Lösung).

7.7.4 zentrale Bedeutung von Feldgleichungen

In der Physik geht es an sich immer um Feldgleichungen. Denn sie diktieren die Dynamik und das zukünftige Verhalten eines Systems oder die Wechselwirkung durch Kräfte.

7.8 Fermi-Beschleunigung

Dieser Mechanismus ist dafür verantwortlich, dass elektrisch geladene Teilchen soviel Energie gewinnen können, dass sie relativistisch schnell werden und sogar in den UHE-Bereich (UHE: *ultra-high energetic*), also TeV bis PeV, kommen können.

7.8.1 zwei Beschleunigungsformen

◇ **Fermi-Beschleunigung erster Ordnung**: Relativistische Schockwellen breiten sich in einem turbulenten Plasma aus und beschleunigen die geladenen Teilchen im Plasma. Dies ist gewissermaßen ein 'Reiten auf der Schock-Welle'.

◇ **Fermi-Beschleunigung zweiter Ordnung**: Sind die Geschwindigkeiten nicht-relativistisch, so kann eine stochastische Beschleunigung einiger weniger Teilchen stattfinden, wenn sie durch ein turbulentes Plasma hindurch diffundieren.

7.8.2 extrem beschleunigte Teilchen aus dem All

In beiden Fällen wird makroskopisch kinetische Energie des Plasmas auf einige wenige (mikroskopische) Teilchen übertragen. Astrophysikalisch realisiert sind diese Szenarien vermutlich in internen Schocks im Jetplasma extragalaktischer Jets von AGN, in Feuerball-Schocks eines Gammastrahlenausbruchs, in stellaren Jets von Mikroquasaren oder in den kugelförmigen Schockwellen, die sich nach einer Supernova vom Typ II durch das interstellare Medium (ISM) ausbreiten (so genannte *Blast-wave-Modelle, Sedov-Lösung*).

Damit sind alle diese Objekte heiße Kandidaten für die Erzeugung von UHE-Protonen, die eine Komponente der kosmischen Strahlung darstellen. Aus diesen höchstenergetischen Protonen können sich schließlich über eine lange Reaktionskette UHE-Neutrinos mit Energien ab 1 TeV bilden. Solche höchstenergetischen Neutrinos (bzw. deren Sekundärprodukte) können mit den Neutrinodetektoren AMANDA und ICECUBE im Eis der Antarktis aufgefangen werden.

7.9 Fermionen

Der Begriff Fermionen leitet sich von dem italienischen Kernphysiker *Enrico Fermi* (1901 - 1954) ab. Fermionen heißen alle Teilchen mit **halbzahligem Spin**. Spin ist ein Freiheitsgrad der Teilchen (eine Quantenzahlen), der erst mit der relativistischen Quantenmechanik aufgekommen ist und anschaulich mit der Hilfsvorstellung verbunden wird, dass das Teilchen um die eigene Achse rotiert (Eigendrehimpuls). Letztendlich lag diese Vorstellung nahe, weil ebenso wie der klassisch bekannte **Bahndrehimpuls** der Spin (wie im Übrigen auch Isospin und schwacher Isospin) einer **quantenmechanischen Drehimpuls-Algebra** gehorchen. Die Anschaulichkeit geht jedoch sicherlich - wie in vielen Bereichen der Quantentheorie - verloren, wenn man sich die Wellenfunktion dieses Teilchens mit Spin vergegenwärtigt. Quanten sollte man sich nicht als rotierende Kügelchen vorstellen.

7.9.1 Konsequenzen für den Materieaufbau

Die Fermionen unterscheiden sich fundamental von den Teilchen mit *ganzzahligem* Spin, die die Physiker **Bosonen** nennen. Das so genannte **Spin-Statistik-Theorem** setzt diese Spineigenschaften in Bezug zur Quantenstatistik. Fermionen genügen der Fermi-Dirac-Statistik. Letztendlich sind diese Sachverhalte von grundlegender Wichtigkeit für den Aufbau der Materie.

7.9.2 Beispiele für Fermionen

Bekannte Fermionen mit Spin 1/2 sind das Elektron, die Quarks und die Nukleonen. Sie unterliegen alle dem **Pauli-Prinzip**. In der Astrophysik hat das Konsequenzen für den inneren Aufbau von kompakten Sternen, z. B. für Weiße Zwerge, Neutronensterne und Quarksterne (Stichwort: *Entartungsdruck*).

7.10 Fermionenstern

Fermionensterne (engl. *fermion stars*) sind kompakte Objekte, die nur aus Fermionen bestehen. Gelegentlich sprechen Astrophysiker auch von *Fermionenbällen*. Theoretische

Astrophysiker interessieren sich für Fermionensterne, weil sie Alternativen zu normalen Sternen oder schweren kompakten Objekten darstellen. Gravitationsforscher wollen vor allem wissen, ob Fermionensterne insbesondere als Alternative zu Schwarzen Löchern in Frage kommen. Die astronomischen Beobachter versuchen Eigenschaften der kompakten Objekte wie Radius oder Masse zu bestimmen. Ein Vergleich mit dem Zoo der kompakten Objekte verrät ihnen dann, ob sie im vorliegenden Fall beispielsweise einen Weißen Zwerg, einen Neutronenstern, ein Schwarzes Loch, einen Bosonenstern oder einen Fermionenstern entdeckt haben.

7.10.1 stabilisierender Quantendruck

Es gibt einen fundamentalen Unterschied zwischen Bosonen und Fermionen - das ist die Kernaussage des Spin-Statistik-Theorems: Fermionen unterliegen dem **Pauli-Prinzip**. Es besagt, dass zwei Fermionen nicht denselben Zustand besetzen können (d. h. sie dürfen nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen). Genau dieser Sachverhalt stellt einen nur quantentheoretisch zu verstehenden Druck zur Verfügung - den **Entartungsdruck**. Dieser stabilisiert die Neutronensterne bis zu einer gewissen Massenobergrenze - die Neutronen im Innern des Neutronensterns sind ja Fermionen mit Spin 1/2.

7.10.2 Oppenheimer-Volkoff-Masse

Im klassischen und einfachsten Neutronensternmodell, in dem tatsächlich *nur* Neutronen betrachtet werden, die außerdem *nicht* miteinander wechselwirken, resultiert die so genannte **Oppenheimer-Volkoff-Grenze**. Sie besagt, dass solche stark vereinfachten Neutronensterne **maximal 0.7 Sonnenmassen** schwer und knapp 20 Kilometer im Durchmesser sein können. Kompliziertere Modelle, die in der Folgezeit entwickelt wurden und sicherlich näher an den Neutronensternen in der Natur liegen, erlauben deutlich schwerere Neutronensterne - bis maximal ungefähr drei Sonnenmassen. Einzelheiten zu diesem aktuell immer noch brisanten Forschungsgebiet werden im Eintrag Neutronenstern vorgestellt.

7.10.3 Sternexoten

Es ist in der theoretischen Astrophysik durchaus diskussionswert, das Oppenheimer-Volkoff-Modell zu verallgemeinern und zu fragen, ob beispielsweise **Neutrinosterne** ein plausibeles Sternmodell sind. Andere Möglichkeiten bei den Fermionensternen bieten die fermionischen, supersymmetrischen Partner, z. B. Neutralinos (*Neutralinostern*) oder Gravitinos (*Gravitinostern*). In erster Näherung sind Abschätzungen für Masse und Radius dieser exotischen Objekte mit dem Oppenheimer-Volkoff-Modell durchführbar.

7.10.4 Fermionenball in M87?

Setzen wir doch einmal das schwerste, beobachtete supermassereiche Schwarze Loch in M87 an. Dieses Superloch hat etwa drei Milliarden Sonnenmassen, die wir als Oppenheimer-Volkoff-Grenzmasse M_{OV} einsetzen (Gleichung zu finden unter Oppenheimer-Volkoff-Grenze). Für einen fermionischen Entartungsfaktor $g = 2$ finden wir eine notwendige Fermionenmasse von ca. 15 keV; bei $g = 4$ reduziert sie sich zu etwa 11 keV. Diese Masse schließt zumindest einen Neutrinostern aus, weil Neutrinos viel leichter sind ($\sim$ wenige eV).

7.10.5 Fermionenstern, Bosonenstern oder doch Schwarzes Loch?

Vergleicht man Fermionenbälle und Bosonenbälle, so scheinen mit den derzeit kursierenden Modellen, die Fermionenbälle durchaus konkurrenzfähig mit einigen Kandidaten für Schwarze Löcher zu sein, weil sie recht kompakt sein können. Allerdings ist es nicht möglich, die komplette Massenskala der kosmischen Schwarzen Löcher von 10 bis 10 Milliarden Sonnenmassen konsistent nur durch Fermionensterne zu erklären. Es scheint, als kommt die moderne Astrophysik auch in dieser Hinsicht nicht ohne klassische Schwarze Löcher aus.

7.11 Fernparallelismus

Der Fernparallelismus ist eine Gravitationstheorie, die *Albert Einstein* 1928 eingeführt hat. Er legt mit dieser Theorie eine vollkommen andere Sicht auf die Schwerkraft vor, als in seiner 1916 publizierten Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Nicht die Krümmung einer Raumzeit ist verantwortlich für die Gravitation, sondern deren **Torsion**. Im Fernparallelismus verschwindet der Torsions-Tensor **nicht** - in der ART hingegen schon.

7.11.1 Einsteins Motivation

Einstein zielte mit diesem völlig neuen Ansatz auf eine **Unifikation von Gravitation und Elektromagnetismus**. Er wählte jedoch dabei eine gänzlich andere Konzeption, als in der etwa zeitgleich entwickelten Kaluza-Klein-Theorie. Randbemerkung: Auch der deutsche Mathematiker *Herman Weyl* hatte eine solche Vereinheitlichung ab 1918 versucht, jedoch mit einem anderen Ansatz: er führte ein neues Kovektorfeld ein, das er mit dem elektromagnetischen Potential A identifizierte. Dieser Ansatz modifiziert auch den Levi-Civita-Zusammenhang der ART um einen neuen Term zum so genannten *Weyl-Zusammenhang* in der Weylschen Theorie.

7.11.2 Ursprung der Bezeichnung 'Fernparallelismus'

Fernparallelismus (engl. *teleparallelism*, *distance parallelism*) oder **fernparallele Gravitation** (engl. *teleparallel gravity*, *TP gravity*) ist eine Name, den Einstein selbst einführte, um seine neue Theorie zu bezeichnen. Die Schwerkraft steckt nun vollends in der **Torsion**, und die Raumzeit ist flach, weist also keinerlei Krümmung auf. Einstein konnte zeigen, dass unter diesen Voraussetzungen zwei beliebige Vektoren *absolut parallel* zueinander sind. Das gab dieser Theorie den Namen.

7.11.3 Grundidee im Fernparallelismus

Die Grundzüge des Fernparallelismus lassen sich am besten in der Gegenüberstellung zu Einsteins ART begreifen: In der ART ist ein Tensorfeld, der **metrische Tensor**, die zentrale Grundgröße, der durch ein Linienelement charakterisiert wird. Diese Metrik ist im Allgemeinen bestimmt durch 10 unabhängige Komponenten. Im metrischen Tensor steckt die gesamte Struktur und Dynamik der Raumzeit. Durch Berechnung der Christoffel-Symbole und des Riemannschen Krümmungstensors kommt man zu den Feldgleichungen in Einsteins ART.

Die zentrale Grundgröße im Fernparallelismus ist hingegen ein **Tetradenfeld**, das sich im Allgemeinen aus 16 unabhängigen Komponenten zusammensetzt. Die Torsion übernimmt die Rolle einer Gravitationskraft.

7.11.4 zwei Formulierungen der Gravitation

Trotz dieser Unterschiede im Ansatz kann gezeigt werden, dass ART und Fernparallelismus im Grunde **äquivalente Formulierungen der Einsteinschen Gravitation** sind - sozusagen zwei Seiten derselben Medaille (*Gronwald & Hehl* 1996, ePrint unter gr-qc/9602013). Der Energie-Impuls-Tensor ist in der ART die Quelle der Krümmung und in der fernparallelen Gravitation die Quelle für Torsion.

Dementsprechend ist es möglich Analoga zur Schwarzschild-Lösung, Kerr-Lösung und FLRW-Lösung der ART in der Theorie des Fernparallelismus zu finden (*Pereira, Vergas & Zhang*, CQG 2001; *Nashed Gamal* 2002; *Sharif & Amir*, Gen. Rel. Grav. 2006).

7.11.5 Zusammenhang

Dadurch dass nun die Torsion endlich ist, wird der Levi-Civita-Zusammenhang ersetzt durch den **Weitzenböck-Zusammenhang**. Dieser neue Zusammenhang im Fernparallelismus setzt sich zusammen aus dem gewohnten Levi-Civita-Zusammenhang der ART und dem **Verdrehungstensor** (engl. *contortion tensor*; nicht zu verwechseln mit der Spannungs- oder Verzerrungstensor in der Kontinuums- und Elastomechanik).

7.11.6 Aktuelle Entwicklungen

Der Fernparallelismus kann als Feldtheorie mit einem Wirkungsfunktional assoziiert werden. Mittlerweile ist bekannt, dass nur ein spezielles Wirkungsfunktional den Fernparallelismus in die ART überführen lässt. Gravitationstheoretiker erforschen derzeit viele Varianten des Fernparallelismus, die nicht in Einsteins Theorie überführt werden können. Sie hoffen dadurch neue Einsichten in die Natur der Gravitation zu bekommen.

7.12 Feynman-Diagramm

Die Feynman-Diagramme oder Feynman-Graphen sind von enormer Relevanz in der Teilchenphysik und Quantenfeldtheorie. Der theoretische Physiker, Nobelpreisträger und geniale Kommunikator *Richard P. Feynman* (1918 - 1988) erfand sie im Rahmen der Entwicklung der Quantenelektrodynamik. Sie illustrieren **Teilchenwechselwirkungen** und sind daher ein einfaches Modell, um sich die Kräfte zwischen Teilchen zu veranschaulichen. Feynman-Diagramme stellen gewissermaßen Weg-Zeit-Diagramme dar: die Zeitachse zeigt senkrecht nach oben, die Raumachse waagerecht nach rechts. Weil diese Achsen Konvention sind, werden sie fast ausschließlich weggelassen.

7.12.1 So liest man ein Feynman-Diagramm

Die Teilchen werden als Linien dargestellt, die sich an Wechselwirkungspunkten (*Vertices*, Einzahl: *Vertex*) schneiden. Die Wechselwirkung findet dann an einem ausgezeichneten Raum-Zeit- oder Weltpunkt statt. Man hat zur Darstellung der Teilchen folgende Vereinbarungen getroffen:

- ◇ **Durchgezogene, gerade Pfeile** kennzeichnen alle Fermionen. Ungerade Linien repräsentieren die Bosonen (Ausnahme ist das Higgs-Teilchen, s. u.). Die Pfeilrichtung bei Antiteilchen ist umgekehrt zu den normalen Teilchen, weil sich Antiteilchen 'rückwärts in der Zeit bewegen'.
- ◇ **Wellenförmige Linien** verwendet man für das Photon der Quantenelektrodynamik und die Weakonen der schwachen Wechselwirkung.
- ◇ **Schraubenförmige Linien** verwendet man für die Gluonen der Quantenchromodynamik (QCD).
- ◇ **Gestrichelte Linien** sind normalerweise dem Higgs-Teilchen vorbehalten.

7.12.2 Rätselhafte Hieroglyphen am Feynman-Graphen

Diese Konventionen werden nicht immer so rigide eingehalten. In der Regel stehen die Teilchensorten immer an den Linien. Jedes Teilchen hat ein internationales Symbol: γ für das Photon; g für die Gluonen; W^+, W^- und Z für eines der Weakonen, e^- für das Elektron; e^+ für das Positron, ν für die Neutrinos (meist mit Index für eine der drei Leptonenfamilien); l für ein Lepton; q für ein Quark; p für ein Proton; n für ein Neutron; K für ein Kaon; π für ein Pion; χ für das Neutralino uvm.

7.12.3 Vertices & Wirkungsquerschnitte

Die Feynman-Graphen bestehen aus Grundelementen, die zu verschiedenen Wechselwirkungsszenarien zusammengesetzt werden können. So existieren *Fermion-Boson-* und *Boson-Boson-Vertex*. Mindestens zwei dieser Vertizes konstituieren zu einem Wechselwirkungsereignis. Der Austausch eines virtuellen Bosons, wie den Eichbosonen irgendeiner der vier Wechselwirkungen, wird durch den **Propagator** dargestellt. Die Teilchenphysiker sind immer an *Wahrscheinlichkeitsamplituden* interessiert, deren Quadrate den **Wirkungsquerschnitt** bilden. Letzterer steht für die Wahrscheinlichkeit des gesamten Wechselwirkungsprozesses. Die Amplituden sind proportional zur Kopplung und zum Propagator, der durch eine *Greensche Funktion* dargestellt werden kann. Dieser Formalismus führt schnell auf die bekannten **Streuformeln** für Rutherford-Streuung und Mott-Streuung.

7.12.4 Endlich mal ein Beispiel

Die Abbildung 7.5 zeigt das Feynman-Diagramm des β^--Zerfalls auf der Quark-Ebene: Durch den Austausch eines negativen W-Bosons wandelt sich ein d-Quark im Neutron zu einem u-Quark um. Das ändert den Quarkgehalt dieses Baryons und führt dazu, dass das Neutron (udd) im Atomkern zu einem Proton wird (uud). Da bestimmte Quantenzahlen, wie z. B. elektrische Ladung, Leptonenzahl sowie Energie und Impuls, bei diesem Vorgang erhalten sein müssen, bilden sich im Beta-Zerfall auch neue Teilchen: ein Elektron (*β-Strahlen*) und ein Anti-Elektron-Neutrino. Auf diese Art und Weise lassen sich sämtliche Teilchenreaktionen darstellen.

7.12.5 Strahlungskorrekturen

Es stellt sich heraus, dass es auch **Feynman-Diagramme höherer Ordnung** gibt. Diese weisen so genannte *Strahlungskorrekturen* auf, die man wie folgt klassifiziert:

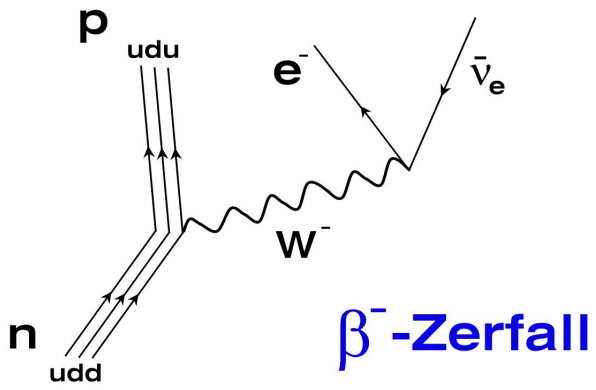

Abbildung 7.5: Feynman-Diagramm des β^--Zerfalls.

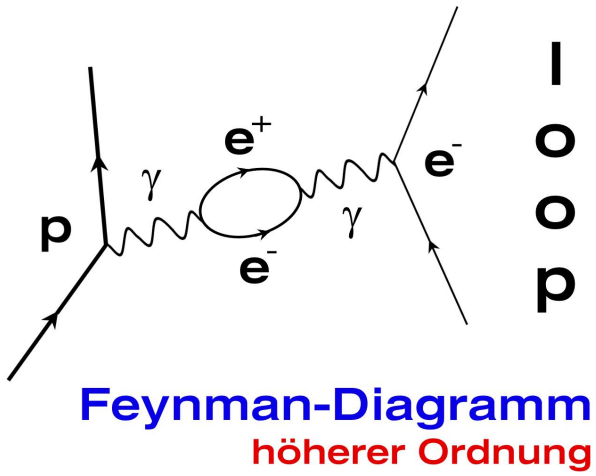

Abbildung 7.6: Feynman-Diagramm erster Ordnung mit einer Schleife (nicht-photonische Strahlungskorrektur).

- ◇ photonische Strahlungskorrekturen z. B. Bremsstrahlung,
- ◇ nicht-photonische Strahlungskorrekturen mit Vertex- oder Propagator-Korrekturen (Schleifen oder *loops*), die von virtuellen Teilchen- und Teilchenpaaren herrühren,
- ◇ und schließlich QCD-Strahlungskorrekturen, bei denen Vertexkorrekturen und Korrekturen durch die Abstrahlung von Gluonen eingehen.

7.12.6 Noch ein komplizierteres Beispiel

Die zweite Abbildung 7.6 zeigt gerade einen Feynman-Graph höherer Ordnung mit einer Schleife aus einem Elektron-Positron-Paar. Alle Strahlungskorrekturen bewirken, dass der Wirkungsquerschnitt, also die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen der Teilchenwechselwirkung, verändert wird. Die Teilchenphysiker sind gerade an diesen

Wirkungsquerschnitten interessiert und berechnen sie für eine Vielzahl verschiedener Feynman-Graphen.

7.12.7 Der eigentliche Clou

Die Feynman-Diagramme sind jedoch weit mehr als eine anschauliche Darstellung von Teilchenprozessen. Die Teilchenphysiker können sie Bausteinen gleich in Fragmente zerlegen, die jeweils eindeutig mit mathematischen Gleichungen verknüpft sind. Auf diese Weise kann man aus vielen Feynman-Diagrammen niedrigster bis höherer Ordnung Gleichungen ableiten, die die Wirkungsquerschnitte liefern. Das ist das eigentlich Geniale an Feynman-Diagrammen!

7.13 FFO

Die Abkürzung FFO steht für den *free-falling observer*, einen frei fallenden Beobachter. Diese Beobachter folgen den zeitartigen Geodäten der im Allgemeinen gekrümmten Raumzeit.

7.13.1 Frei fallen? Klingt gefährlich!

Auf einen frei fallenden Beobachter oder ein frei fallendes Objekt wirken keine äußeren Kräfte. In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) sagt man: das Objekt bewege sich geodätisch oder kräftefrei. Der einfachste Fall ist die flache Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie, die so genannte Minkowski-Metrik. Ein FFO bewegt sich hier gleichförmig geradlinig, d. h. linear auf einer Geraden. In den gekrümmten Raumzeiten der ART wird das komplizierter: Der FFO bewegt sich dann auf einer 'krummen Bahn', aber kräftefrei.

7.13.2 Werkzeug für Einsteins Theorie

Die Untersuchung von Bewegungen von Objekten im Rahmen der ART erfordert in der Regel die Wahl eines Koordinatensystems und eines Beobachters. Als Beobachter kommen FIDOs und ZAMOs in Frage. Manchmal - zum Beispiel am Ereignishorizont von Schwarzen Löchern - zeigen FIDOs pathologisches Verhalten, d. h. sie erweisen sich als ungeeignet, um die Physik zu beschreiben. Dann wählt man FFOs. Der Übergang auf neue Beobachter wird dabei mit Lorentz-Transformationen vollzogen.

7.14 FIDO

Das Kürzel FIDO steht für den *fiducial observer*, einem Beobachter, dem man trauen kann. Man muss sich vorstellen, dass die Raumzeit mit einer Schar von Beobachtern, den FIDOs, besetzt ist, die an jedem Punkt der Mannigfaltigkeit Experimente durchführen können. Jeder FIDO hat seine eigene Uhr, deren Gangart gegenüber Unendlich durch die Rotverschiebung bestimmt ist.

7.15 Flachheitsproblem

Ein Problem in der Kosmologie, das durch die **Inflation** gelöst wird. Unter dem Eintrag Inflation werden Problem und Auflösung erläutert.

7.16 FLRW-Kosmologie

Mit den rechnerischen Werkzeugen, die Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie zur Verfügung stellt, lässt sich das Universum als Ganzes beschreiben. Anders gesagt kann man auf diese Weise Kosmologie erstmals als exakte Wissenschaft (als Disziplin der Astronomie) betreiben.

7.16.1 Was hat das mit FLRW zu tun?

Das Akronym FLRW steht nun für die Nachnamen der Pioniere der Kosmologie, nämlich

- ◇ den russischen Mathematiker und Astronomen *Alexandr Alexandrowitsch Friedmann* (1888 - 1925),
- ◇ den belgischen Priester und Kosmologen *Abbè Georges Lemaître* (1894 - 1966),
- ◇ den amerikanische Kosmologen *Howard Percy Robertson* (1903 - 1961)
- ◇ und den britischen Geometer und Mathematiker *Arthur Geoffrey Walker* (1909 - 2001).

Jeder dieser Protagonisten trieb die theoretische Kosmologie entscheidend voran und trug zu dem bei, was heute unter der Bezeichnung **Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Modelle** (*FLRW-Modelle*) kursiert. Gebräuchlicher ist die deutliche kürzere Bezeichnung Friedmann-Weltmodelle (unter diesem Eintrag werden die Modelle detailliert vorgestellt). Im Prinzip handelt sich dabei um verschiedene Typen **dynamischer Universen**.

7.16.2 Natur passt zu FLRW-Kosmos

Die *experimentelle Kosmologie* stellt mittlerweile Beobachtungsdaten von Supernovae, kosmischer Hintergrundstrahlung, Verteilung der primordialen Elemente (siehe primordiale Nukleosynthese) und Galaxienhaufen bereit, die bestens mit FLRW-Modellen verträglich sind. Eine Abweichung von den Friedmann-Universen gibt es erst in den frühesten Phasen des Kosmos (siehe Urknall, Inflation, Planck-Ära).

7.17 Fluchtgeschwindigkeit

Die Fluchtgeschwindigkeit oder *Entweichgeschwindigkeit* ist diejenige Geschwindigkeit, die ein Körper erreichen muss, um dem Gravitationsfeld einer Masse zu entkommen.

7.17.1 Eine kleine Rechnung

Das Frame-Dragging der Mittels der Newtonschen Gravitationsphysik lässt sich schnell aus Gleichsetzen der kinetischen Energie mit der potenziellen Energie einer Testmasse im Gravitationsfeld einer großen Masse M die Fluchtgeschwindigkeit v_{esc} berechnen. Das Resultat lautet:

$$v_{\mathrm{esc}} = \sqrt{\frac{2\,\mathrm{G}M}{R_{\mathrm{surf}}}}.$$

Dabei sei das Gravitationsfeld als kugelsymmetrisch angenommen und die kleinere Testmasse am Ort R_{surf}, z. B. der Oberfläche der großen Masse M, lokalisiert. G ist die Newtonschen Gravitationskonstante mit dem Zahlenwert 6.672×10^{-11} $\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$ in SI-Einheiten.

7.17.2 Beispiele

Die Entweichgeschwindigkeit der Erde beträgt 11.2 km/s oder gut 40000 km/h. Das ist schon eine ganz ordentliche Geschwindigkeit, die von Raketen erreicht werden muss, um beispielsweise Satelliten in den Erdorbit zu bringen.

Das Extrem stellt bei diesen Betrachtungen ein Schwarzes Loch dar: hier entspricht die Fluchtgeschwindigkeit gerade der Vakuumlichtgeschwindigkeit c, satte 300000 km/s oder 1.08 Mrd. km/h! Nach der Speziellen Relativitätstheorie ist c allerdings die generelle Höchstgeschwindigkeit. Nur Licht schafft diese 300000 km/s, aber nicht Materie. Mit anderen Worten: Nicht einmal das Licht vermag einem Schwarzen Loch bei einem kritischen Abstand, dem Ereignishorizont, zu entkommen. Deshalb ist das Loch von außen betrachtet schwarz.

7.17.3 weitere Bezeichnungen

Die Fluchtgeschwindigkeit wird auch *parabolische Geschwindigkeit* genannt, weil der entkommende Körper auf einer Parabelbahn entkommt. Eine weitere Bezeichnung für die Fluchtgeschwindigkeit ist *zweite kosmische Geschwindigkeit*.

Anmerkung: Die *erste kosmische Geschwindigkeit* ist diejenige Mindestgeschwindigkeit, die ein Körper haben muss, um auf einer Kreisbahn eine Masse zu umkreisen; sie ist kleiner als die Fluchtgeschwindigkeit. Bei Erreichen der *dritten kosmischen Geschwindigkeit* verlässt der Körper die Masse auch, allerdings auf einer Hyperbelbahn (deshalb auch *hyperbolische Geschwindigkeit*); sie ist noch größer als die Fluchtgeschwindigkeit.

7.17.4 Grenzen der Newtonschen Theorie

Es sei angemerkt, dass es bei einer so kompakten Masse wie einem Schwarzen Loch an sich nicht mit den Mitteln der Newtonschen Gravitationsphysik gerechnet werden darf. Hier beginnt das Regime einer neuen Gravitationstheorie, nämlich Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART). Sie fasst Gravitation geometrisch als eine gekrümmte Raumzeit auf. Dass mit der Gleichung oben trotzdem das richtige Resultat herauskommt, nämlich der so genannte Schwarzschild-Radius, ist Zufall; so versagt die Newtonsche Gravitation bei der analogen Berechnung für den Fall eine rotierenden Schwarzen Loches. Korrekt beschrieben wird dieses durch die Kerr-Lösung der ART.

7.18 Frame-Dragging

Dieser englische Fachbegriff wird in dieser Form auch im deutschsprachigen Fachjargon verwendet, weil er sich schlecht ins Deutsche übersetzen lässt. Es handelt sich um einen rein **allgemein relativistischen Effekt**, der mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) beschrieben wird und nicht in der Newtonschen Physik existiert. Frame-Dragging besagt, dass **jede rotierende Masse** das lokale Bezugssystem (engl. *reference frame*) mitzieht (engl. 'ziehen': *to drag*). Anders gesagt wird alles von der rotierenden Masse gezwungen sich mit der Drehrichtung der Masse zu drehen. Das gilt für andere Testmassen, für Licht (Lichtkegel, Photonen), für lokale Beobachter - denn die Raumzeit von rotierenden Massen rotiert selbst.

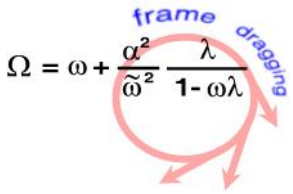

Abbildung 7.7: Frame-dragging-Formel in der Kerr-Geometrie.

7.18.1 rotierende Massen in Einsteins Gravitation

Rotierende Raumzeiten besitzt zwei Symmetrien: Achsensymmetrie (Axialsymmetrie) und Stationarität. Das entsprechende Linienelement kann ganz allgemein notiert werden (*Papapetrou-Form*). Es gibt da einige Spezialfälle: Ist die rotierende Masse ein Massenmonopol, so resultiert die Kerr-Lösung. Demgegenüber weisen Neutronensterne, die ebenfalls rotieren, einen Massenquadrupol auf. Doch beide Metriken sind axialsymmetrisch und stationär.

Der Frame-Drag tritt **immer** bei rotierenden Massen auf! In der Regel ist er allerdings verschwindend gering und schwierig zu messen - wie im Falle der rotierenden Erde. Das liegt daran, weil die Erde kein kompaktes Objekt ist. Die Effekte werden erst bei schnell rotierenden Neutronensternen (siehe auch Pulsar) und rotierenden Schwarzen Löchern besonders stark. Je mehr Masse auf kleinem Raum rotiert, umso heftiger ist Frame-Dragging.

7.18.2 Historisches & Aktuelles

Frame-Dragging wurde bereits 1918 von den beiden österreichischen Physikern *Joseph Lense* (1890 - 1985) und *Hans Thirring* (1888 - 1976) entdeckt. Deshalb nennt man ihn auch Lense-Thirring-Effekt. Unter diesem Lexikoneintrag wird die Mathematik des Frame-Draggings sowie deren Messung mit dem Satelliten **Gravity Probe-B** beschrieben.

7.18.3 Schleudertrauma am Kerr-Loch

Das Frame-Dragging der Kerr-Löcher ist mathematisch anhand der Gleichung (notiert in Boyer-Lindquist-Koordinaten) in Abbildung 7.7 zu verstehen: Winkelgeschwindigkeit des Loches ω, Lapse-Funktion α, Winkelgeschwindigkeit Ω und Zylinderradius $tilde\omega$ sind Funktionen, die die rotierende Metrik bestimmen; λ ist der spezifische Drehimpuls des Teilchens, das um das Loch rotiert. Am Ereignishorizont verschwindet α (Definition des Horizonts!), so dass in jedem Fall der zweite Term null ist. Die Rotation des Teilchens, genauer die Winkelfrequenz Ω, wird nun vollständig bestimmt von der Winkelfrequenz des Schwarzen Loches ω, der so genannten **Frame-Dragging-Frequenz**: Das rotierende Loch reißt alles mit sich! Dabei ist es völlig unerheblich, welchen Drehimpuls (welches λ) das einfallende Teilchen hat.

7.18.4 Messen des rotierenden Raums

Auch wenn der Effekt klein ist, haben dennoch Physiker versucht, den Frame-Dragging-Effekt bei der Erde zu messen. Dies geschah mithilfe der **LAGEOS**-Satelliten, deren Position

und Bewegung mittels Laser sehr genau bekannt ist. 1997 fanden sie noch eine schwache Evidenz mit hohem Messfehler (zwischen 25 und 200%); 2004 hat die gleiche Forschergruppe mehr Erfolg gehabt und mit hoher Wahrscheinlichkeit - sogar vor der dafür konzipierten Satellitenmission **Gravity Probe-B** - den Frame-Drag der Erde nachgewiesen (*Ciufolini et al.*, Nature **431**, 958, 2004).

Als Testmasse benutzen die Physiker **Gyroskope**, im Prinzip kleine Kreisel. Die rotierende Raumzeit kann durch ein **gravitomagnetisches Feld** beschrieben werden. Der Shift-Vektor (β), wie er im ADM-Formalismus auftritt, kann als Vektorpotential angesehen werden, der dieses Feld im Raum erzeugt. Das Konzept ist vollkommen analog zur klassischen Elektrodynamik, wo das magnetische Vektorpotential $\mathbf{A}$ das Magnetfeld, $\mathbf{B}$ = rot $\mathbf{A}$, erzeugt. Das Pendant zur Lorentz-Kraft heißt beim Frame-Dragging **gravitomagnetische Kraft**. Letztendlich beeinflusst diese Kraft Testkörper und zwingt ihnen die Korotation auf. Gyroskope werden dann zur *Lense-Thirring-Präzession* veranlasst. Es handelt sich bei dem Lense-Thirring-Effekt also physikalisch gesprochen um eine **Wechselwirkung von Drehimpulsen**, nämlich demjenigen des Loches (Kerr-Parameter a) und demjenigen des ankommenden Teilchens/Testkörpers/Kreisels.

7.19 f(R)-Gravitation

f(R)-Gravitation ist ein Oberbegriff für gegenüber der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) erweiterte Gravitationstheorien, die außer der Hilbert-Wirkung der ART *weitere nichtlineare Terme* vorsehen. Diese nichtlinearen Modifikationen werden besonders durch Stringtheorien und M-Theorie motiviert. In der Gravitationsforschung ist allerdings generell von Interesse neue Theorievarianten zu testen - auch, um sich von der Richtigkeit von Bewährtem (in diesem Fall ART und Newtonsche Gravitation) zu überzeugen.

7.19.1 Warum f(R)?

Die Bezeichnung f(R) nimmt Bezug darauf, dass eine wesentliche Grundgleichung dieser Feldtheorie, das so genannte *Wirkungsfunktional*, eine mehr oder weniger beliebige Funktion des Krümmungsskalars R (= *Ricci-Skalars*, siehe Ricci-Tensor) sein kann, der sowohl in positiven oder negativen Potenzen, als auch logarithmiert etc. auftreten kann. Die mathematische Symbolik f(R) kann wörtlich als 'Funktion des Ricci-Skalars' übersetzt werden. Die Nichtlinearitäten bewirken anschaulich, dass bei sehr kleinen Krümmungen der Raumzeit plötzlich die neuen Zusatzterme relevant werden können, dass sie aber bei moderaten bis hohen Krümmungen vielleicht völlig irrelevant sind. Dieses seltsame, 'launige' Verhalten liegt in der Natur von Nichtlinearitäten.

7.19.2 Motivation zu einem neuen Ansatz

Das Interesse an solchen Varianten entbrannte, als entdeckt wurde, dass ein solcher f(R)-Ansatz zu **beschleunigten Phasen** einer sich ausdehnenden Raumzeit führen kann (*Alexei A. Starobinsky* 1980) - genau das beobachten die Kosmologen für die globale Raumzeit des ganzen Universums. Sollte diese Beschleunigung vielleicht gar nicht durch Einsteins Theorie, sondern vielmehr durch eine f(R)-Gravitation beschrieben werden?

7.19.3 Qual der Wahl

Um diese Frage zu lösen, unternehmen die Gravitationsforscher große Anstrengungen. Aktuell widmen sich zahlreiche Veröffentlichungen ganz unterschiedlichen f(R)-Modellen. Die Forschergruppen setzen ein bestimmte Funktion für f(R) an und betrachten die resultierende Dynamik der modifizierten Feldgleichungen der Gravitation. Eine der vielen **f(R)-Familien** zeigt z. B. die folgende Gleichung:

$$f(\mathcal{R}) = \mathcal{R} + \alpha\,\mathcal{R}^m - \beta/\mathcal{R}^n.$$

Darin sind α und β reelle Größen geeigneter Dimension, während m und n beliebige natürliche Zahlen symbolisieren. Die Analyse dieser speziellen Klasse hat ergeben, dass ein solcher Ansatz problematisch und nicht verträglich mit Daten der experimentellen Kosmologie ist (*Brookfield et al.* 2006).

Der **Übergang zur ART** findet bei der Wahl f(R) = R statt, weil dann gerade die *Einstein-Hilbert-Wirkung* reproduziert wird (siehe dazu auch *Olmo* 2006, astro-ph/0612047). Dazu muss man wissen, dass die Einstein-Hilbert-Wirkung nur von der Determinante der Metrik - und nicht von weiteren Ricci-Skalaren - abhängt und dass sie über den Euler-Lagrange-Formalismus automatisch auf die klassischen Einsteinschen Feldgleichungen führt.

f(R)-Gravitationen lassen sich generell auf *Skalar-Tensor-Theorien* reduzieren, also auf Theorien, in denen nicht nur eine tensorielle Größe (wie der metrische Tensor in der ART) die Dynamik bestimmt, sondern auch noch ein zusätzlicher Skalar. Spezielle f(R)-Ansätze sind daher äquivalent zur Brans-Dicke-Theorie.

7.19.4 Ein technischer Aspekt

Technisch unterscheidet man bei der Analyse von f(R)-Modellen zwei Methoden: Den **Metrik-Formalismus** und den **Palatini-Formalismus**. Beim Metrik-Formalismus erhält man die Feldgleichungen aus der Variation der Wirkung nach der Metrik. Im Palatini-Formalismus hingegen wird der Ricci-Skalar als Funktion der Zusammenhänge (siehe Christoffel-Symbole) aufgefasst und die Wirkung wird nach Metrik und Zusammenhängen getrennt voneinander variiert.

7.19.5 Stand der f(R)-Forschung

Zielsetzung der f(R)-Gravitationsforschung ist es, die Möglichkeiten neuer Gravitationstheorien durchzuspielen und aus Beobachtungsdaten die entsprechenden Parameter des Ansatzes einzuschränken (im obigen Beispiel also α, β, m und n). Gleich drei f(R)-Familien werden in einem aktuellen Papier von *Fay, Tavakol & Tsujikawa* (2007) untersucht (Preprint unter astro-ph/0701479).

7.19.6 Zentrale Fragen in der f(R)-Forschung

- ◇ Vermag f(R)-Gravitation ein schlüssiges Modell der **Inflation** zu skizzieren?
- ◇ Können f(R)-Ansätze Merkwürdigkeiten wie die Dunkle Energie oder die Pioneer-Anomalie erklären?
- ◇ Leistet f(R)-Gravitation mehr als die ART?

7.20 Friedmann-Weltmodelle

Die Friedmann-Weltmodelle beschreiben die Dynamik des Universums als Ganzes. Mit ihrer Hilfe lassen sich Szenarien für dynamisch ganz unterschiedliche Universen entwerfen.

7.20.1 dynamische und statische Modell-Universen

Damit sind Friedmann-Universen wesentlicher Gegenstand der **Kosmodynamik**. Auch *Albert Einsteins* Statisches Universum ist als Grenzfall enthalten. Geeignete **kosmologische Parameter** ermöglichen eine Klassifikation in nicht-statische, also dynamische, und statische Lösungen. Die Behandlung und Untersuchung der Lösungsmannigfaltigkeiten der Friedmann-Weltmodelle nennen Kosmologen manchmal auch *Friedmannologie*. Formal folgen die Friedmann-Weltmodelle oder **FLRW-Modelle** (*Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Modelle*) aus folgenden vier Zutaten:

- ◇ kosmologisches Prinzip,
- ◇ Weylsches Postulat,
- ◇ Robertson-Walker-Metrik und
- ◇ Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** kosmologischer Konstante (mit Lambda-Term).

Friedmann-Weltmodelle sind also eingebettet in eine **relativistische Kosmologie**. Das Linienelement der Robertson-Walker-Metrik wird in die Einsteinschen Feldgleichungen mit Lambda-Term eingesetzt und führt auf ein System zweier unabhängiger Differentialgleichungen zweiter Ordnung, den **Friedmann-Gleichungen**. Sie sind von fundamentaler Bedeutung für die moderne Kosmologie. Die beiden Gleichungen können zu einer einzigen Differentialgleichung erster Ordnung kombiniert werden

$$H(t)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{kc^2}{R^2(t)} + \frac{\Lambda c^2}{3}. \tag{7.1}$$

Diese Gleichung ist erster Ordnung, weil der Hubble-Parameter $H(t)$ die erste Ableitung von $R(t)$ enthält. Die Gleichung wird für unterschiedliche kosmologische Parameter betrachtet und führt so auf unterschiedliche Modelluniversen.

7.20.2 Historische Wegbereiter der modernen Kosmologie

Die Friedmann-Gleichungen fand der russische Mathematiker und Astronom *Alexandr A. Friedmann* 1922 und 1924 für die Krümmungsparameter $k = -1$ und $k = +1$, sowie Gesamtdruck $p = 0$ (also einem Substrat aus Staub). *H.P. Robertson* fand die flache Lösung mit $k = 0$ (*Euklidisches Universum*).

Die Friedmann-Weltmodelle beschreiben **Universen konstanter Krümmung** k. Räume konstanter Krümmung haben einen Riemannschen Krümmungstensor mit einfacherer Gestalt, als im allgemeinen Fall beliebig gekrümmter Mannigfaltigkeiten.

7.20.3 Drei Krümmungstypen des Kosmos

FLRW-Modelle unterscheiden sich in ihrer **globalen Geometrie** und Topologie:

- ◇ **elliptisches oder sphärisches Universum**: Krümmung $k = +1$.

  Dieses Weltall ist geschlossen, unbegrenzt, hat jedoch endliches Volumen. Eine moderne Manifestation dieses Typs ist das Dodekaeder-Universum.

- ◇ **Euklidisches Universum**: Krümmung $k = 0$.

  Dieses Weltall ist offen/unendlich oder geschlossen/endlich. Das Universum ist *flach*. Hier gelten die Sätze der ebenen Geometrie *Euklids*, z. B. die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180 Grad. Im Konsens-Modell der Kosmologie (engl. *concordance model*) ist das unendlich ausgedehnte, flache Universum die Grundlage.

- ◇ **hyperbolisches Universum**: Krümmung $k = -1$. Das Horn-Universum mit negativer Krümmung ist eine moderne Alternative zum flachen Universum.

  Dieses Weltall ist ebenfalls offen/unendlich oder geschlossen/endlich - je nach Topologie.

7.20.4 Aber beliebige viele Topologietypen des Kosmos

Eine Entscheidung, welche **kosmische Topologie** vorliegt ist nicht-trivial und Gegenstand der aktuellen, kosmologischen Forschung. Die Aufstellung zeigt, dass nach der Bestimmung des Krümmungsparameters k nur die Geometrie feststeht, jedoch *noch nicht* die Topologie. Momentan favorisiert man (auch aus Gründen der Einfachheit; vergleiche *Ockhams Rasierklinge*) ein **flaches, offenes Euklidisches Universum**. Flachheit folgt aus den Beobachtungen. Der Euklidische Kosmos konkurriert noch mit dem geschlossenen Dodekaeder-Universum oder Horn-Universum, die als Alternativen vorgeschlagen wurde - noch können sie nicht von den Beobachtungsdaten ausgeschlossen werden. Die topologischen Aspekte der Kosmologie werden unter dem Eintrag Topologie profunder erörtert.

7.20.5 kosmische Materie fließt

In der Herleitung der Friedmann-Gleichung geht die Annahme ein, dass das Universum mit Materie, beschrieben als *ideale Flüssigkeit*, angefüllt ist. Deshalb wurde auch der Energie-Impuls-Tensor einer idealen Flüssigkeit verwendet. Die Flüssigkeit wird durch ihre Energiedichte (relativistische Verallgemeinerung der Massendichte) und ihren Druck p bestimmt. Verschwindet der Druck, $p = 0$, spricht man von *Staub*. Die Lösungen der Friedmann-Gleichung werden für verschiedene Parameter diskutiert. Dabei dienen Krümmungsparameter k, kosmologische Konstante ('Lambda', Λ) und Druck der idealen Flüssigkeit p als Klassifikationsmerkmale.

7.20.6 Stars in order of appearance

So folgt eine **Klassifikation von Friedmann-Universen** in chronologischer Reihenfolge ihrer Entdeckung:

- ◇ Bereits 1917 schlug *Albert Einstein* sein **statisches Universum** vor. Bei statischen Lösungen ist der Weltradius konstant, $R(t) = const$. Lambda wurde ja von Einstein

auf diese Weise eingeführt und ist ungleich null. Als Krümmung wurde $k = +1$ gewählt, weil alle sphärischen Universen geschlossen sind, was Einstein als ästhetisch empfand. Im statischen Universum verschwinden sowohl Hubble-Parameter, als auch Abbremsparameter, was anschaulich unmittelbar einsichtig ist.

◇ Im gleichen Jahr 1917 fand der holländische Astronom *Willem de Sitter* (1872 - 1934) eine flache Lösung, $k = 0$, mit positiver kosmologischer Konstante, die dynamisch, aber **materiefrei** (Energie-Impuls-Tensor null) ist. Damit verstößt sie gegen das Machsche Prinzip! Die Dynamik dieser de-Sitter-Lösung wird von der Dunklen Energie verursacht.

◇ 1922 schlägt *Friedmann* die Gleichung vor, die heute nach ihm benannt wurde. Sie enthält sämtliche Universen, auch den statischen Einstein-Kosmos. Die **Friedmann-Lösungen** im engeren Sinne fand *Friedmann* 1922 und 1924 selbst. Für sie gilt: verschwindendes Lambda, $k = -1, +1$ und $p = 0$. Besonders interessant sind Friedmanns **oszillierende Weltmodelle** für negative Lambda. Die Dunkle Energie stoppt die Expansion und verursacht eine Kontraktion des Universums. Im Prinzip könnte dieses Universum beliebig oft expandieren und kontrahieren. Es ist ein **pulsierendes Universum**. Friedmanns Erkenntnisse waren jedoch für die damalige Zeit zu avantgardistisch. Ein dynamisches Universum war jenseits jeder Vorstellung - auch für die Kosmologen der ersten Stunde, allen voran Einstein. Friedmanns Lösungen fanden sehr zögerlich die Akzeptanz anderen Kosmologen.

◇ Der belgische Kosmologe *Abbè Georges Lemaître* (1894 - 1966) arbeitete auf gleichem Gebiet wie Friedmann. Er fand 1925 die Lösung eines **expandierenden Universums**. Zunächst wurden positive Krümmung und positives Lambda vorausgesetzt. Dynamische Universen waren zu dieser Zeit äußerst unattraktiv. Erst Hubbles Entdeckung der Fluchtbewegung der Galaxien im Jahr 1929 verschafften den **Friedmann-Lemaître-Modellen** verdienten Zulauf.

◇ 1929 fand *Robertson* Lösungen mit beliebigem Lambda, $k = 0$ und $p = 0$.

◇ Im Zuge von Einsteins zurückgenommener kosmologischer Konstante, erlangen Modelle mit verschwindendem Lambda zunehmend Aufmerksamkeit. Das **Einstein-de-Sitter-Universum** (1932) ist flach, $k = 0$.

◇ In der Folgezeit wurden viele **Subklassifikationen** der Friedmann-Lemaître-Lösungen gefunden (nach *Robertson*, 1933).

7.20.7 Lemaître: Erfinder des Urknalls unter anderem Namen

Dynamische Universen haben variablen Weltradius $R(t)$, der häufig auch als **Skalenfaktor** $a(t)$ in der Fachliteratur bezeichnet wird. Die Entdeckung der Expansion führte *Lemaître* zu der Annahme, dass wenn man die Expansion zeitlich zurück extrapoliert, es ein beliebig kleines Universum gegeben haben muss. *Lemaître* nannte dies die '**Geburt des Raumes**' (Artikel in Nature 1931). Demzufolge darf er als der 'Vater der **Urknall-Theorie**' bezeichnet werden.

7.20.8 Was sind das für Ωs?

Bei der Diskussion der Friedmann-Gleichungen bietet sich an, einige dimensionslose Größen einzuführen: die **Dichteparameter**. Sie werden symbolisiert durch den letzten Buchstaben des griechischen Alphabets, Ω, der verschiedene Indizes trägt. Die Terme der Friedmann-Gleichung (7.1) (oben) lassen sich so in eine Summe aus Dichteparametern umschreiben. Jeder Dichteparameter kann einer bestimmten Energieform bzw. Energiedichte zugeordnet werden:

- ◇ Materie, zusammenfassend für baryonische Materie und Dunkle Materie,
- ◇ Dunkler Energie oder Lambda-Term,
- ◇ elektromagnetische Strahlung im Kosmos,
- ◇ Krümmungsvorzeichen der globalen Raumzeit.

Die *Omegas* erhalten entsprechende Indizes, um die Energieform zu charakterisieren (Ω_m: Materie, Ω_Λ: Dunkle Energie, Ω_rad: Strahlung, Ω_k: Krümmung des Universums). Die Omegas hängen im Allgemeinen von der Zeit bzw. von der kosmologischen Rotverschiebung ab! Der Index 0 steht üblicherweise für das lokale Universum, $z = 0$ ('heute'). Die Friedmann-Gleichung kann mit den Definitionen der Omegas auf Dichteparameter umgeschrieben werden, so dass man mit die untere Bilanzgleichung erhält:

$$\Omega_\mathrm{m} = \frac{8\pi \mathrm{G}}{3\mathrm{H}_0^2}\rho_{\mathrm{m},0} := \frac{\rho_{\mathrm{m},0}}{\rho_\mathrm{c}},$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3\mathrm{H}_0^2},$$

$$\Omega_\mathrm{k} = -\frac{kc^2}{R_0^2\mathrm{H}_0^2},$$

$$1 - \Omega_\mathrm{rad} - \Omega_\mathrm{m} - \Omega_\Lambda := \Omega_\mathrm{k}.$$

Der Astronom misst nun die beispielsweise die Omegas von Strahlung, Materie und Dunkler Energie im lokalen Universum und kann so die Krümmung des Kosmos bestimmen.

7.20.9 Expansion vs. Abbremsung

Die Dichte-Parameter bestimmen zusammen mit dem **Hubble-Parameter**

$$H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$$

und dem **Abbremsparameter**

$$q(t) = -\frac{\ddot{R}(t)}{H^2(t)R(t)}$$

vollständig die Dynamik des Universums. Man bezeichnet diesen Parametersatz als **kosmologische Parameter**, weil sie sämtliche Eigenschaften des Kosmos - bis auf die globale Topologie - bestimmen. Der Hubble-Parameter H(t) ist mit der **Expansionsgeschwindigkeit** des Universums in der Epoche t assoziiert und im Allgemeinen

zeitabhängig (bzw. abhängig von der Rotverschiebung). Im lokalen Universum kann zwischen kosmologischer Rotverschiebung und Entfernung (vergleiche Entfernungsmodul) approximativ eine *lineare* Beziehung abgeleitet werden: das **Hubble-Gesetz**. Der amerikanische Astronom *Edwin Hubble* fand dieses Gesetz bereits 1929 auf der Grundlage von nur 18 Galaxien - eine richtige Interpretation, trotz geringer Datenmenge und schlechter Statistik. Die Proportionalitätskonstante heißt **Hubble-Konstante**, $\mathbf{H}_0$, und ist nur im nahen Universum konstant. Das lässt sich so verstehen, dass im nahen Universum die Expansionsgeschwindigkeit konstant ist. Bei größeren Distanzen, ab etwa 420 Mpc, bemerkt man Beschleunigungseffekte und die Linearität des Hubble-Gesetzes gilt nicht mehr.

7.20.10 Die Größe der Welt

Die Größe $R(t)$ bzw. $a(t)$ kann als zeitabhängiger *Weltradius* verstanden werden. Seine erste Zeitableitung ist assoziiert mit der Expansions- (positives Vorzeichen) oder Kontraktionsgeschwindigkeit (negatives Vorzeichen); seine zweite Zeitableitung ist verknüpft mit der Beschleunigung (positives Vorzeichen) oder Abbremsung (negatives Vorzeichen). Die Gleichung oben zeigt den so zu definierenden Abbremsparameter $q(t)$ (Brems-, Beschleunigungs-, Dezelerationsparameter oder *Dezelerationsfunktion*). Der Abbremsparameter charakterisiert die zeitliche Veränderung der Expansionsgeschwindigkeit, also Beschleunigungen der Ausdehnung des Universums. Um dies zu veranschaulichen, skizzieren wir kurz Hubbles historische Technik nach: Hubble maß Rotverschiebungen extragalaktischer Systeme. Aufgrund der kosmischen Expansion streben alle Galaxien auseinander, was sich darin äußert, dass ein Beobachter, der in einem Sternensystem lokalisiert sein mag, die Strahlung aller anderen Galaxien rotverschoben misst. Hubble trug nun seine Daten in einem Diagramm ein: gemessene Radialgeschwindigkeiten über zugehörigen Entfernungen (bestimmt mithilfe der Cepheiden). Im Bereich bis etwa 15 Mpc ergibt sich eine Gerade: das ist das lineare Hubble-Gesetz! Die Steigung der Geraden entspricht der Hubble-Konstanten. Die Auswirkungen von Abbremseffekten sieht man für größere Distanzen beobachteter Systeme. Dann knickt die Gerade nach oben oder nach unten ab. Das parametrisiert nicht die Steigung der Gerade (1. Ableitung), sondern ihre Krümmung (2. Ableitung). Daraus resultiert die Gleichung für den Abbremsparameter. Im Allgemeinen werden Hubble-Parameter und Abbremsparameter für jede Epoche t ausgewertet und die so resultierenden Zeitabhängigkeiten analysiert.

7.20.11 Dynamische Modelluniversen im Vergleich

Die Abbildung 7.8 zeigt unterschiedliche Szenarien, wie sich ein dynamisches Universum entwickeln kann (Credit: WMAP-Website). Auf der horizontalen Achse ist die kosmische Zeit in Einheiten von Milliarden Jahren aufgetragen. Bei der Stelle *Now* befinden wir uns als lokale Beobachter auf der Erde. Links von *Now* schauen wir in die Vergangenheit unseres Universums und rechts von *Now* in die Zukunft. Auf der vertikalen Achse ist die Größe des Universums als Weltradius aufgetragen. Die Einheiten sind willkürlich und wurden so normiert, dass der Weltradius bei *Now* gerade exakt 1 ist. Im Urknall muss der Weltradius null gewesen sein - hier startet also die Entwicklung des dynamischen Kosmos. Die unterschiedlichen Kurven stehen nun jeweils für ein anderes Friedmann-Weltmodell. Die Parameter, die den Kurvenverlauf und damit das Schicksal des Universums bestimmen, sind die beiden **Dichteparameter** Ω_m (die 'Materie', d.h normale plus Dunkle Materie) und Ω_V (das 'Vakuum', also die Dunkle Energie).

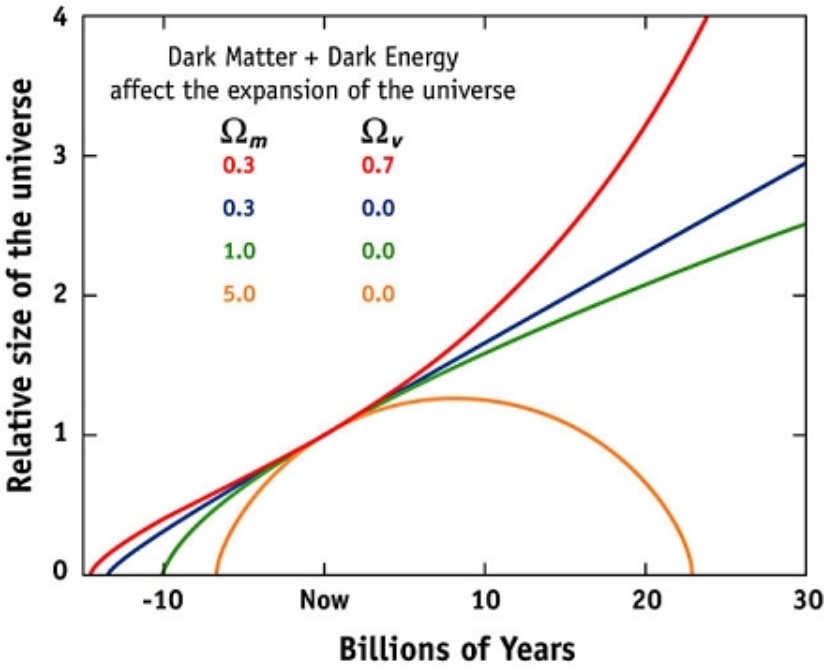

Abbildung 7.8: Friedmann-Weltmodelle: Entwicklung verschiedener Universen.

Am Anfang dehnen sich alle Modelluniversen aus, weil zunächst alle Kurven von links unten nach rechts oben ansteigen. Allerdings starten sie an unterschiedlichen Stellen; mit anderen Worten: je nach Energieinhalt haben die Modelluniversen **unterschiedliches Alter**. Dieses Alter kann man am Kreuzungspunkt der Kurve mit der horizontalen Achse ablesen: die grüne Kurve steht für ein Universum mit einem Alter von 10 Mrd. Jahren; ganz links liegt ein Alter von knapp 15 Mrd. Jahren vor.

erst Expansion, dann Kollaps

Die orangegelbe Kurve zeigt einen besonderen Verlauf: der Weltradius nimmt in der Zukunft (rechts von *Now*) wieder ab! Betrachten wir die Parameter, so stellen wir fest, weshalb das so ist: dieses Modelluniversum enthält sehr viel Materie ($\Omega_\mathrm{m} = 5.0$) und gar keine Dunkle Energie ($\Omega_\mathrm{V} = 0$). Die Zahl 5 bedeutet, dass die Materiedichte die kritische Dichte um das Fünffache überschreitet! Dieses Universum enthält soviel Materie, dass irgendwann in der Zukunft (nach knapp weiteren 10 Mrd. Jahren) die Gravitation gewinnt und die Expansion wieder umkehren kann. Als Konsequenz kollabiert das Universum und die kosmologische Rotverschiebung kehrt sich um in einer kosmologische Blauverschiebung. Das ist ein geschlossenes Universum.

kritische Expansion

Die grüne Kurve enthält hingegen etwas weniger Materie ($\Omega_\mathrm{m} = 1.0$) und ebenfalls keine Dunkle Energie. Der Materieinhalt entspricht exakt der kritischen Dichte. Wie man sieht, startet die Expansion recht flott, aber die Kurve flacht immer mehr ab, so dass die Expansion immer langsamer wird. Der Materieinhalt reicht hier nicht aus, damit das Universum in sich

zusammenfällt.

verlangsamte Expansion

Bei der blauen Kurve liegt die Materiedichte unterhalb der kritischen Dichte ($\Omega_m = 0.3$; ebenfalls keine Vakuumenergie). Es handelt sich um ein offenes Universum, bei dem sich die Expansion verlangsamt, aber aufrechterhalten wird. Im Unterschied zur grünen Kurve ist dieses Modelluniversum älter - die blaue Kurve schneidet die horizontale Achse weiter links, d. h. zu früheren kosmischen Zeiten.

beschleunigte Expansion nur mit Dunkler Energie

Die rote Kurve enthält dieselbe Materiedichte wie die blaue ($\Omega_m = 0.3$), aber zusätzlich gibt es auch Dunkle Energie ($\Omega_V = 0.7$) - verglichen mit der Materiedichte sogar mehr als doppelt soviel. Die Dunkle Energie weist einen negativen Druck auf und wirkt somit antigravitativ. Dieser Effekt wird besonders ausgeprägt zu späten Entwicklungsphasen dieses dynamischen Modelluniversums. Es ist klar zu sehen, dass die Expansion sogar beschleunigt wird - die rote Kurve steigt nach rechts extrem an. Dieser Vorgang kann nur mit der Dunklen Energie als Zutat erklärt werden.

Es sei bei dieser Kurve auf ein besonderes Detail hingewiesen: am Anfang steigt der Weltradius zwar an, aber die Expansion wird für eine Zeit lang *abgebremst*! Das erkennt man an der Rechtskrümmung der Kurve; später verschwindet das und eine klare Linkskrümmung liegt vor. Zu Beginn der der Expansion war die Dunkle Energie dynamisch noch nicht so relevant. Erst zu späten kosmologischen Epochen hin dominiert sie die Dynamik des ewig expandierenden Kosmos.

7.20.12 Unser beschleunigt expandierender Kosmos

Die Aufgabe der Astronomen ist es nun Beobachtungen durchzuführen, um Datenpunkte in dieses Diagramm eintragen zu können. Versammeln sich die Datenpunkte eindeutig auf einer der Kurven, so steht das Friedmann-Modell für unser Universum fest. Das Sammeln von Datenpunkten übernehmen beispielsweise Supernovaforscher, die weit entfernte Supernovae vom Typ Ia analysieren. Fatalerweise schmiegen sich alle Kurven im Bereich von *Now* sehr eng aneinander. Die Astronomen müssen demnach tief in die Vergangenheit des Kosmos schauen (dort, wo die Kurven voneinander abweichen), um klar bestimmen zu können, welcher Kurve unser Universum folgt - leider können sie nicht in die Zukunft blicken und Datenpunkte rechts von *Now* eintragen. Liegt jedoch die Kurve fest, so wissen wir, wie sich das Universum in **Zukunft** entwickeln wird!

Die Astronomen wissen es. Ende der 1990er Jahre wurde tatsächlich die beschleunigte Expansion anhand von weit entfernten, explodierenden Weißen Zwergen gemessen.

Unser Universum folgt der roten Kurve in Diagramm 7.8!

Wir leben in einem Universum, dass nach den aktuellen Erkenntnissen der modernen Kosmologie niemals kollabieren wird, aber ewig expandieren und dabei langsam auskühlen wird. Das Alter unseres Universums beträgt 13.7 Mrd. Jahre - bei dieser Zahl schneidet die rote Kurve die horizontale Achse. Die Zusammensetzung unseres Universums ist so, wie die Parameter der roten Kurve nahe legen: **ein Drittel Materie, zwei Drittel Dunkle Energie** (s. u. für die präzisen, aktuellen Daten).

Die Supernovadaten passen zu allen anderen astronomischen Messungen (kosmische Hintergrundstrahlung, großräumige Verteilung der Galaxien und Galaxienhaufen, Häufigkeiten der primordialen Elemente) und auch zu den Erkenntnissen aus der **Altersbestimmung**. So gibt das Alter von Objekten im Kosmos ein Mindestalter für das Universum vor. Die Altersbestimmung mit radiogenen Methoden bei Gesteinen oder das Alter von Kugelsternhaufen (den ältesten Systemen in der Milchstraße) oder von Weißen Zwergen - all das passt zu den Erkenntnissen der experimentellen Kosmologie.

7.20.13 aktuelle Werte der Hubble-Konstanten H_0

- ◇ Die Hauptaufgabe des amerikanischen Weltraumteleskops Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) war es gerade, die Hubble-Konstante äußerst präzise zu messen. Ergebnis: $\mathbf{H}_0 = 72$ km s^{-1} Mpc^{-1} (H0KP, *Freedman et al.* 2001).
- ◇ Auch die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung kann herangezogen werden, um die kosmologischen Parameter zu messen. Brandaktuelles Ergebnis: $\mathbf{H}_0 = 73$ km s^{-1} Mpc^{-1} (WMAP 3^{rd} year data, *Spergel et al.*, 2006; astro-ph/0603449).

7.20.14 Auch Astronomen streiten

Zuvor stritten Kosmologen jahrzehntelang, ob die Hubble-Konstante eher bei 50 oder eher bei 100 km s^{-1} Mpc^{-1} läge. Dieser Streit ist mittlerweile beigelegt, weil die Fehlerbalken aufgrund mehrerer unabhängiger Methoden sehr klein geworden sind.

7.20.15 Rezept für ein Universum

Die Konstituenten kosmischer Energieformen sind aktuell gemäß Messungen des Mikrowellen-Satelliten WMAP (Stand März 2006, Quelle *WMAP Homepage*), der die Hintergrundstrahlung exakt vermessen hat:

- ◇ gewöhnliche, baryonische Materie: 4%
- ◇ Strahlung: irrelevant,
- ◇ heiße Dunkle Materie (HDM): irrelevant,
- ◇ kalte Dunkle Materie (CDM): 22%,
- ◇ Dunkle Energie (Lambda): 74%.

Der Beitrag von elektromagnetischer Strahlung kann im lokalen Universum vernachlässigt werden, weil $\Omega_{\mathrm{rad}} \sim 10^{-5}$ beträgt. Die Strahlung wird durch die Expansion des Kosmos sehr stark ausgedünnt; allerdings war sie in der Frühphase des Universums wichtig - vor allem in der Phase des **strahlungsdominierten Kosmos**.

7.20.16 Das größte Geheimnis der Astrophysik

Damit kommt der Dunklen Energie die tragende Rolle in der Kosmodynamik des bereits entwickelten Universums zu. Sie macht sich als **Antigravitation** bemerkbar und treibt die Expansion des Universums. Auch wenn Interpretationen in Form von Vakuumpolarisationen

des Quantenvakuums oder ultraleichten skalaren Bosonen wie dem Cosmon oder dem Radion für diese Komponente vorliegen, gehört sie doch zu den **größten Geheimnissen des Kosmos**.

7.20.17 Moderne Entwicklungen

Die Friedmann-Modelle dienen in der modernen Kosmologie als einfache Modell-Universen. In den 1980er Jahren wurden diese Modelle modifiziert und eine Phase exponentieller Expansion des Universums implementiert. Diese Phase heißt **Inflation**. Die aktuellen Supernovamessdaten bevorzugen eindeutig die **kosmologische Konstante** Λ, die man als konstante und gleichmäßig verteilte Form Dunkler Energie ansehen kann. Trotz dieser aktuellen Datenlage haben Physiker zeitlich veränderliche Formen Dunkler Energie wie Quintessenz-Modelle entwickelt. Motiviert ist das durch das Problem der Kleinheit von Λ und das Koinzidenzproblem.

Eine andere moderne Stoßrichtung ist die Berücksichtigung räumlicher Extradimensionen. In diesen Modellen werden neben einer Zeitdimension und drei Raumdimensionen, die in der Raumzeit der ART verknüpft sind, weitere räumliche Dimensionen angenommen, die möglicherweise kompaktifiziert sind. Diese Ansätze modifizieren das klassische vierdimensionale Linienelement der ART. Solche Überlegungen folgen vor allem aus den Stringtheorien. Diese neuen Ansätze resultieren in einer **Kosmologie mit Branen**, zum Beispiel realisiert als ADD-Szenario, DGP-Szenario oder Randall-Sundrum-Modelle. Wenn räumliche Extradimensionen existieren sollten, wird die klassische Friedmann-Gleichung der vierdimensionalen Kosmologie deutlich modifiziert. Es gibt dann neue Terme, die von der **Spannung** der Bran oder von der **Dunklen Strahlung** (engl. *dark radiation*) abhängen. Außerdem skaliert der Hubble-Parameter bei hohen Energien *linear* mit der Energiedichte (klassisch steigt er nur mit der Wurzel an).

Diese Modelle mit neuer Physik haben attraktive Eigenschaften - letztendlich muss aber die Naturbeobachtung klären, ob die Modelle etwas mit der Realität zu tun haben.

7.20.18 Weitere Literatur

- ◇ Buchtipp: **Einführung in die Kosmologie** von *Hubert Goenner* (1994), Spektrum Verlag
- ◇ Vortrag: *An introduction to Brane World Cosmology* (Stand März 2004).

8 Lexikon G

8.1 Galaktischer Schwarz-Loch-Kandidat

Diese Bezeichnung basiert auf der Fachsprache, engl. *Galactic Black Hole Candidate* oder GBHC, und meint stellare Schwarze Löcher, die sich in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, tummeln.

In der Astronomie beschreibt das Attribut *galaktisch* etwas, das mit einer Galaxie, einer Ansammlung von hundert Mrd. Sternen zu tun hat. In der Regel bezieht sich *galaktisch* ausschließlich auf unsere Milchstraße.

8.1.1 absolut obsolet

Das Akronym GBHC war vor einigen Jahren noch recht gebräuchlich, wurde nun jedoch durch die Redewendung *galaktisches Schwarzes Loch* ziemlich verdrängt. Achtung, Quelle für ein Missverständnis: Mit *galaktisches Schwarzes Loch* ist **nicht** das zentrale supermassereiche Schwarze Loch einer Galaxie gemeint!

8.1.2 Wirt & Parasit

Das Schwarze Loch hat einen Begleitstern und verrät sich dadurch, dass Materie von diesem durch den Lagrange-Punkt oder durch Wind-Akkretion den Weg zum Loch findet. In der Umgebung des Lochs strahlt dann hell eine Akkretionsscheibe. Die Situation illustriert Abbildung 8.1. Die Vorgänge werden detailliert im Eintrag Röntgendoppelstern erläutert. Es gibt viele Parallelen zur Physik der AGN.

8.1.3 Beispiele

Prominente Quellen sind Cyg X-1, eine Röntgenquelle im Sternbild *Schwan* und *GRO J1655-40*, ein so genannter Mikroquasar, der sogar einen Jet hat. Diese Röntgenquellen sind auf äußerst kurzen Zeitskalen **variabel**, aber **nicht periodisch** (höchstens quasi-periodisch,

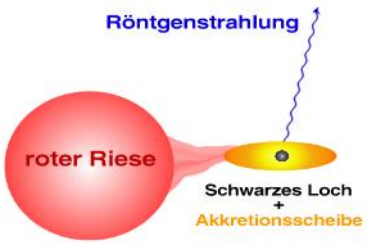

Abbildung 8.1: Röntgendoppelstern.

siehe Quasi-Periodische Oszillationen, QPOs). Dies erklärt sich vermutlich dadurch, dass die Akkretionsrate zeitlich variabel ist, zum Beispiel dadurch bedingt, dass der Begleitstern pulsiert und damit das Schwarze Loch unterschiedlich stark füttert. Daher oszilliert das Übergangsgebiet von kalter Standardscheibe (SSD) zu heißer Korona radial.

8.2 Galaxie

In der Astronomie bezeichnet Galaxie eine Ansammlung von einigen 100 Milliarden Sternen. Galaxien gehören damit zu den größten Strukturen im Universum.

8.2.1 Griechische Milch macht's

Wer den klaren Nachthimmel betrachtet, kennt den Anblick, wie sich die Sterne unregelmäßig verteilen. Unter guten Sichtbedingungen fällt ein schleierartiges Band auf, das sich um den ganzen Himmel windet. Bei genauer Betrachtung entpuppt sich dieses Band als Myriaden von Sternen, die alle zu unserer Heimatgalaxie, der **Milchstraße**, gehören.

Das Wort $\gamma\acute{\alpha}\lambda\alpha\kappa\tau o\varsigma$, *gala, galaktos* ist altgriechischer Herkunft und bedeutet 'Milch'. Einerseits hat das einen Bezug zum milchig-trüben Erscheinungsbild der Milchstraße. Andererseits gibt es eine Verbindung zur griechischen Mythologie: Als nämlich Herakles als Säugling von Hera gestillt wurde, saugte er so kräftig, dass Hera ihn von sich stieß und Milch über den Himmel spritzte und dabei das Band der Milchstraße hinterließ.

8.2.2 Von Spiralen, Balken und Ellipsen

Könnte man die Milchstraße von außen betrachten, so würden wir sehen, dass die Scheibe aus Sternen, Gas und Staub ihr Antlitz dominiert. Die Scheibe zeigt dabei weitere, spiralförmige Strukturen, wie sie in der Abbildung 8.2 zu sehen sind: dies ist die berühmte Andromedagalaxie (M31), eine Begleitgalaxie der Milchstraße (Credit: *R. Gendler*, HST/NASA 2002). Beide Galaxien ähneln sich sehr. Galaxien mit dieser Gestalt (*Morphologie*) heißen **Spiralgalaxien**.

Es gibt jedoch auch ganz andere Gestalten unter den Sternsystemen, z. B. Spiralgalaxien mit einem zentralen, dicken Balken. Es handelt sich dabei um eine dynamische Struktur aus Sternen. Solche Galaxien nennt man **Balkenspiralgalaxien**. Außerdem fanden die Galaxienforscher **elliptische Galaxien**, manchmal auch nur kurz 'Ellipsen' genannt. Sie sehen aus wie eine kugelige oder ovale Wolke, und es gibt sie in groß (*Riesenellipsen*) und in klein (*Zwergellipsen*). Alles, was von der Gestalt her ganz anders aussieht wird in der Gruppe der **irregulären Galaxien** zusammengefasst. Zu diesem Typus gehören z. B. die Kleine und die Große Magellansche Wolke, die ebenfalls der Milchstraße verhältnismäßig nahe (etwa 150000 Lichtjahre) sind.

Alle diese morphologischen Galaxientypen werden in der Hubble-Klassifikation geordnet.

8.2.3 Von Strahle- und Dunkelmännern

Die Astronomen schätzen die Gesamtzahl aller Galaxien im Kosmos auf einige hundert Milliarden! In diesen Galaxienzoo kann man auch mit einem anderen Kriterium Ordnung bringen: mit der Helligkeit. Es gibt weniger helle und hell strahlende Galaxien. Die Milchstraße ist beispielsweise nicht so hell und wird deshalb zu den 'normalen', d. h. **inaktiven Galaxien**

Abbildung 8.2: Andromedagalaxie M31.

gezählt (engl. *inactive*, *dormant*: 'schlafend'). Demgegenüber stehen die **aktiven Galaxien** oder genauer gesagt die **Aktiven Galaktischen Kerne (AGN)**. Deren enorme Leuchtkraft speist ein supermassereiches Schwarzes Loch (*supermassive black hole*, SMBH), das im Zentrum einer jeden (aktiven wie inaktiven) Galaxie lauert. Wird das Loch mit Materie gefüttert, kommt es im Zuge dieser Akkretion zu extrem hellen Leuchtprozessen. Ist das Loch auf Diät, weil es kein Futter in der Umgebung gibt, so bleibt es unauffällig und dunkel, wie bei der Milchstraße. Dennoch beobachten die Astronomen ein SMBH im Herzen unserer Heimatgalaxie, das etwa 3.5 Millionen Sonnenmassen schwer ist und mit der Radioquelle Sgr A* in Verbindung gebracht wird.

8.2.4 Galaxienjagd in der Tiefe des Alls

Wenn Astronomen sehr leuchtschwache, sehr dunkle Objekte im Kosmos beobachten möchten, müssen sie genauso vorgehen wie ein Fotograf, der im Dunkeln fotografiert: sie müssen lange belichten. Die Blende bzw. Öffnung des Teleskops bleibt also lange auf und sammelt viel Strahlung der kosmischen Quellen auf. Mit jedem Photon, das aufgesammelt wird, erhält der Astronom mehr Informationen. Er misst somit ein Spektrum aus, das er mit physikalischen Gesetzen interpretiert. Durch den *Fit* des geeigneten Modells an die Daten versteht der Astronom, um welche Quelle es sich handelt und welche Eigenschaften (Leuchtkraft, Entfernung, Alter, Zusammensetzung etc.) sie hat.

Die moderne Forschung stellt viele dieser lang belichteten Fotos von Himmelsausschnitten bei allen möglichen Strahlungsenergien her: diese Bilder heißen Deep Fields und verraten viel über die Geschichte des Universums, z. B. wie sich Galaxien und darin befindliche schwere Löcher entwickelt haben.

8.2.5 Galaxien sind soziale Wesen oder Einzelgänger

Tja, so ein Sternsystem hat eben doch auch menschliche Züge. So haben Astronomen durch jahrelange Beobachtungen (Surveys) herausgefunden, dass Galaxien sich in Gruppen formieren können, die sie **Galaxienhaufen** (engl. *clusters*) nennen; oder sie stehen mehr oder weniger für sich und heißen **Feldgalaxien**. Damit nicht genug: die Gruppen verdichten sich an manchen Orten zu noch dichteren Haufen, so dass der Begriff **Galaxiensuperhaufen** oder **Superhaufen** (engl. *super clusters*) angebracht ist. Das Zentrum dieser Superhaufen ist eine extrem massereiche Galaxie - im Falle des Virgo-Haufens ist es der AGN M87.

Die erwähnten Beispiele Milchstraße, Andromedagalaxie, Magellansche Wolken und eine Horde von Zwerggalaxien bilden einen kleinen Galaxienhaufen, die so genannte Lokale Gruppe.

8.2.6 Großskalige Strukturen

Die relevanten Raumskalen bei der Betrachtung von Galaxien sind riesig und betragen hunderte von kpc (Galaxiendurchmesser) über Mpc (Distanz zwischen Galaxienhaufen) bis Gpc (Durchmesser von Superhaufen). Sowohl Beobachtungen, als auch Simulationen auf Supercomputern zeigen, dass die Anordnung dieser großskaligen Strukturen sehr unregelmäßig ist: Galaxien und Galaxienhaufen ordnen sich auf Ketten zu fadenförmigen Gebilden an, die an Knotenpunkten zusammenstoßen. An den Knotenpunkten sitzen gerade die Superhaufen mit ihren extrem massereichen, zentralen Riesenellipsen. Zum Erstaunen des Betrachters sind dazwischen extrem große 'Blasen mit Nichts', die so genannten Strukturbildung, Voids.

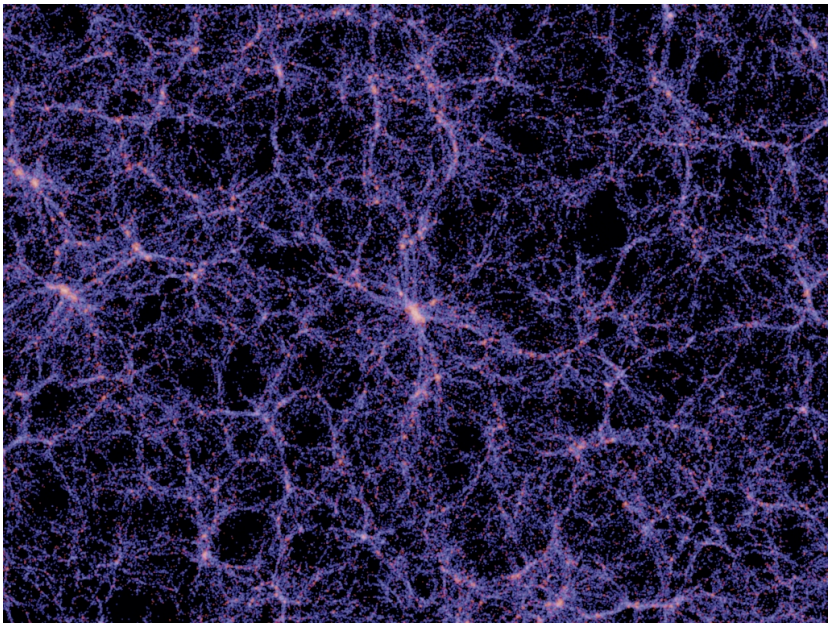

Abbildung 8.3: Galaxie: Millennium Run 2005: Struktur des Kosmos im Großen.

Den visuellen Eindruck gibt sehr gut der *Millennium Run* in dem Bild 8.3 wieder, bei dem ein Supercomputer nach monatelanger Rechnung das Aussehen eines Stücks Universum ausgespukt hat (Credit: *Volker Springel et al.* 2005, Virgo-Konsortium und MPA).

Diese Untersuchungen sind wesentlich für die moderne Kosmologie, da im Rahmen der Strukturbildung verstanden werden muss, wie sich nach dem Urknall aus der 'Ursuppe' Sterne, Galaxien und schließlich Leben gebildet haben.

8.2.7 kritische Anmerkung zum Schluss

Wie die Diskussion um den Planetenbegriff auf der Tagung der Internationalen Astronomischen Union in Prag im Sommer 2006 gezeigt hat, stellt schon die klare Benennung einfacher, kosmischer Strukturen ein Problem dar. Letztendlich fußt eine eindeutige Definition auf einem recht detaillierten und umfangreichen Kriterienkatalog - das ist nicht immer praktikabel. Einer vergleichbaren Problematik begegnet man bei allen diesen Begrifflichkeiten wie *Planet*, *Stern* oder *Galaxie*. So ist der Übergang vom Kugelsternhaufen über die Galaxie zum Superhaufen eher kontinuierlich. Dennoch sollte aufgrund der Erfahrung klar sein, worüber man spricht.

8.2.8 Weitere Literatur

- ◇ Web-Artikel: Das größte Schwarze Loch der Milchstraße

8.3 Gamma Ray Burst

Es handelt sich dabei um **Strahlungsausbrüche** im hochenergetischen Bereich der Gammastrahlung, die auf sehr kurzen Zeitskalen (Millisekunden bis einige hundert Sekunden)

Abbildung 8.4: Illustration eines GRBs.

am Himmel beobachtbar sind. **G**amma **R**ay **B**ursts werden mit dem Akronym GRB abgekürzt. Im Deutschen ist der Begriff Gammastrahlenausbruch geeignet. Wie ein GRB in etwa aussieht, zeigt die Illustration 8.4 (Credit: Website des Röntgensatelliten Chandra, NASA/CXC). Dieser Lexikoneintrag demonstriert, dass GRBs ein sehr aktives und aktuelles Forschungsgebiet der Astronomie sind. Allein in den letzten Jahren wurden umwälzende Entdeckungen gemacht.

8.3.1 Am ganzen Himmel - im ganzen Kosmos

GRBs werden überall am Himmel in alle Richtungen gleichermaßen (*isotrop*) beobachtet. Es gibt keine Häufung in der galaktischen Ebene, was dafür sprechen würde, dass sie nur in der Milchstraße auftreten oder beobachtbar sind. Die Diagnose, dass GRBs isotrop am Himmel auftreten, basiert vor allem auf dem BATSE-Experiment an Bord des *Compton-Gamma-Ray Observatory* (CGRO), das über 2700 GRBs detektieren konnte. Astronomen interpretieren das so: GRBs sind kosmologisch, d. h. sie können auch in sehr großen Entfernungen, bei **sehr großen kosmologischen Rotverschiebungen** bis $z \sim 6$ beobachtet werden.

8.3.2 Pionierleistung

Der erste GRB wurde bereits am 02. Juli 1967 von den amerikanischen Vela-Satelliten VELA 4A und B entdeckt, die für diese hochenergetische Strahlung empfindlich waren. Eigentlich dienten diese Satelliten nicht astronomischen, sondern militärischen Zwecken, denn die USA wollten damit die Gammastrahlung von Nuklearwaffenexplosionen aufspüren. In dieser Ära des Kalten Kriegs waren die Tests von Kernwaffen verboten.

Gammastrahlung kennt man schon seit längerer Zeit aus der Kernphysik. Wenn radioaktive Atomkerne (*Radionuklide*) zerfallen, bilden sie häufig einen hoch angeregten Tochterkern,

der sich unter Aussendung von Gammastrahlung abregt. Kernphysiker nennen das den Gamma-Zerfall. Doch die Quelle der kosmischen Gammastrahlung eines GRB ist **nicht Radioaktivität**!

8.3.3 Katalogisieren von GRBs

Zunächst ein paar Worte zur Nomenklatur: Die Fülle der beobachteten GRBs - typisch ist ein GRB am Tag - erfordert eine Katalogisierung. Ein Gammastrahlenausbruch wird mit den Buchstaben GRB eingeleitet, danach folgen sechs Ziffern, die das Beobachtungsdatum des Ausbruchs enthalten: Die ersten beiden Zahlen geben das Jahr an, die nachfolgenden beiden den Monat und die letzten beiden den Tag. So steht GRB 990705 für einen Gamma Ray Burst, der am fünften Juli 1999 beobachtet wurde. Gibt es mehrere GRBs pro Tag, werden sie aufsteigend mit Buchstaben des Alphabets gekennzeichnet, z. B. GRB950917A.

8.3.4 Beispiele

Nennen wir nun ein paar besondere GRBs: Der kürzeste Burst hatte eine Länge von 15 Millisekunden (GRB950917A), während der längste etwa 1000 Sekunden dauerte (GRB971208). Der am weitesten entfernte Burst ist GRB050904 mit einer Rotverschiebung von $z = 6.18$ (*Price et al.*, ApJ 2006), und der räumlich nächste war bei $z = 0.0085$ (GRB980425).

8.3.5 Durchbruch 1: das Nachleuchten bei anderen Wellenlängen

Im Jahr 1997 konnten die Quellen für GRBs - die *Gamma Ray Burster* - sogar optisch nachgewiesen werden und zwar als **optisches Nachleuchten** im Anschluss an den Ausbruch im Gammabereich. Astronomen bezeichnen das als **GRB-Nachleuchten** (engl. *GRB afterglow*) und betrachten vor allem die zeitliche Entwicklung des GRB-Leuchtens (umfangreicher Review: *van Paradijs et al.*, ARA& A 2000). Diese so genannte **Lichtkurve** zeigt sehr unterschiedliche Charakteristika in Form von Minima und Maxima. Irgendwann ist der GRB vorbei und die Lichtkurve am Minimum. Die Herausforderung der GRB-Forscher besteht darin, die unterschiedlichen Lichtkurven zu klassifizieren und die zugrunde liegende Physik zu verstehen.

Das Nachleuchten ist von immenser Wichtigkeit, weil es gestattet, die kosmologische Rotverschiebung zu bestimmen. Und siehe da: die GRBs befinden sich tatsächlich in ungeheuer großen Distanzen, Milliarden von Lichtjahren entfernt.

8.3.6 Durchbruch 2: zwei GRB-Typen

Zählt man die GRBs ab, die eine bestimmte Dauer haben, so ergibt sich ein Histogramm mit zwei (evt. drei) Maxima. Die Verteilung der GRBs ist demnach **bimodal**. Die Konsequenz: Astrophysiker unterscheiden heutzutage zwei Typen von GRBs, denen auch eine unterschiedliche Physik zugrunde liegt:

Lange GRBs dauern zwischen 2 und 1000 Sekunden. Die Astrophysiker sind davon überzeugt, dass in diesem Fall junge, sehr massereiche Sterne wie O-Sterne oder Wolf-Rayet-Sterne als Kollapsar (im engeren Sinne der Bezeichnung) enden und in einer Hypernova explodieren (*MacFadyen & Woosley*, ApJ 1999). Hypernovae sind noch heftigere Sternexplosionen als Supernovae (SN), aber von der Physik her verwandt. Zum Teil

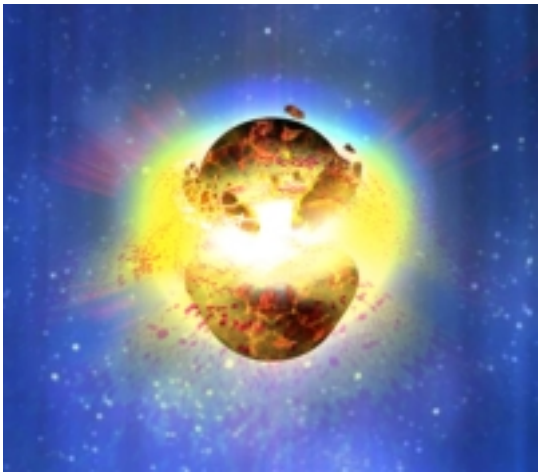

Abbildung 8.5: Illustration einer Neutronensternverscmelzung.

treten Supernova und Hypernova sogar zusammen auf. Die Population der Vorläufersterne (engl. *progenitors*) sind vornehmlich junge, massereiche Sterne. Das bereits angesprochene Nachleuchten in anderen Wellenlängenbereichen wurde nur bei den langen GRBs bisher beobachtet!

Kurze GRBs dauern zwischen 0.01 und 2 Sekunden. Astrophysiker erklären diese Ausbrüche mit einem anderen physikalischen Szenario: **Verschmelzungsprozesse** von kompakten Objekten, insbesondere Doppelsternsysteme (*Binäre*) aus Neutronensternen, sollen im Moment der Kollision und Verschmelzung den hellen Gammablitz erzeugen (*Narayan, Paczynski & Piran*, ApJ 1992; *Ruffert & Janka* seit 1995). Die Fachleute bezeichnen das mit dem englischen Begriff *NS-NS merging*, wie es in der Abbildung 8.5 illustriert ist (Credit: Website des Röntgensatelliten Chandra, NASA/CXC). Es ist vermutlich auch möglich, dass kurze GRBs bei der Verschmelzung von einem Neutronenstern mit einem stellaren Schwarzen Loch erzeugt werden (*Ruffert & Janka*, A& A 1999). Hier lautet der Fachbegriff *NS-BH merging*. Doppelsternsysteme sind sehr häufig im Kosmos anzutreffen, so dass es plausibel ist, dass die genannten kompakten Binäre vorkommen und verschmelzen können. Die Population dieser Vorläufersterne sind eher alte Neutronensterne. Das Phänomen des Nachleuchtens wurde bei diesen kurzen GRBs nie beobachtet!

8.3.7 Ein sattes Rrrums!

Hier wird nicht gekleckert, sondern geklotzt: Gammastrahlenausbrüche sind die gigantischsten Explosionen, die im Universum bekannt sind. Der Energieoutput eines GRBs ist enorm, mit dem einer Supernova vergleichbar und übertrifft diese sogar. Es gibt dabei Unterschiede zwischen den kurzen und langen GRBs: Die freiwerdende Energie bei kurzen GRBs liegt bei etwa 10^{48} bis 10^{50} erg; lange GRBs setzten sogar etwa das Tausendfache frei, 10^{51} bis 10^{53} erg! Die Einheit erg ist eine typische Theoretiker-Einheit: 1 erg = 10^{-7} Joule. In der Supernova- und GRB-Physik gibt es außerdem die inoffizielle Einheit 1 foe = 10^{51} erg; *foe* bezieht sich auf *(ten to the power of) fifty-one erg*. Der kanonische Wert von 5×10^{50} erg für die im GRB freiwerdende Energie wurde erst gefunden, als der Blauverschiebungseffekt (*Beaming*) berücksichtigt wurde (*Frail et al.*, ApJ 2001). Zuvor gab es Vermutungen, dass

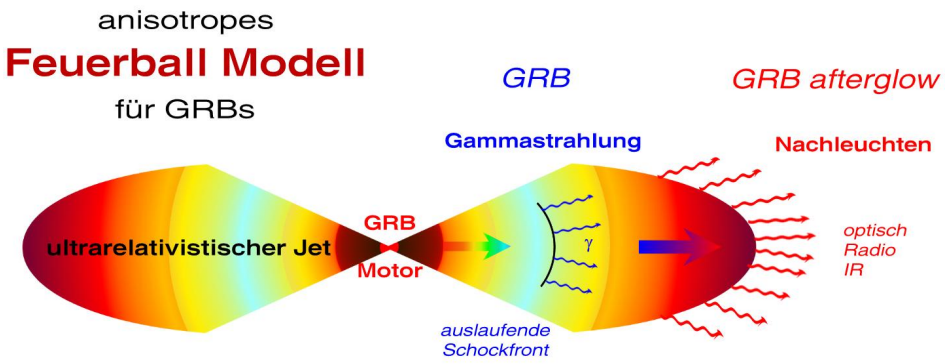

Abbildung 8.6: Feuerball-Modell für GRBs.

GRBs den fundamentalen Energieerhaltungssatz verletzen würden - diese Zweifel sind nun beseitigt.

8.3.8 GRBs - eine kosmische Gefahr

Ein Gamma Ray Burst nahe der Erde hätte fatale Folgen: die intensive, energiereiche Strahlung würde das Leben auslöschen, weil sie eine vergleichbar vernichtende Wirkung wie die Gammastrahlung aus Atomkernen hat. Die bekannten Schädigung des Erbguts oder die direkte Zerstörung des Lebens wären die Folgen eines nahen GRBs. Ein möglicher Kandidat eines langen GRBs ist der 'Superstern' η Carinae, der etwa 100 Sonnenmassen aufweist! Er ist mit 7500 Lj recht weit entfernt, doch wie eine Abschätzung im Lexikoneintrag Hypernova demonstriert, ist das irdische Leben von diesem Stern gefährdet. Jüngst konnte gezeigt werden, dass die langen GRBs mit dem größeren Energieoutput (also die gefährlicheren) in der Milchstraße sehr selten sind. Der Grund ist die interstellare Umgebung des GRBs: in der Milchstraße gibt es zu viele Metalle (dazu später unter dem Abschnitt *GRBs und SN*).

Im Detail hängt die Gefährlichkeit auch davon ab, wie der GRB zur Erde orientiert sein wird. Warum die Orientierung eine Rolle spielt, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

8.3.9 Durchbruch 3: Das Feuerball-Modell

Der so genannte **anisotrope Feuerball** (engl. *anisotropic fire ball*) ist das aktuell favorisierte, physikalische Modell, um GRBs zu verstehen (*Meszaros & Rees* 1997; umfangreicher Review: *Meszaros*, ARA& A 2002). In Abbildung 8.6 ist schematisch illustriert, wie das Modell funktioniert: Der 'GRB-Motor', entweder eine Hypernova oder ein Kollaps von mindestens zwei kompakten Objekten, treibt eine Schockfront nach außen. Dort trifft die Schockwelle auf das interstellare Medium (ISM). In diesem Zusammenhang nennt man das Umgebungsmedium um den Gammastrahlenausbruch auch *Circum Burst Medium* (CBM). Die Lorentz-Faktoren liegen bei 100 bis 1000, was Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Explosionsmaterials bis zu 99.99995% der Vakuumlichtgeschwindigkeit entspricht. Die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie werden bei diesen so genannten **ultra-relativistischen Geschwindigkeiten** wichtig. Am Bugschock dieser Front wird die kinetische Energie des Feuerballs auf die Elektronen und Photonen des CBM übertragen. Die Elektronen werden dabei auch ultra-relativistisch und kühlen vor dem Hintergrund des interstellaren

Magnetfeldes über Synchrotronemission. In der innersten Schale entstehen dabei die charakteristischen Gammaquanten des GRBs. Das wird auch *prompte Emission* genannt. Dahinter, in weiteren Schalen des mittlerweile abgebremsten Feuerballs, entsteht das Nachleuchten der anderen Wellenlängenbereiche. Die auslaufende und immer langsamer werdende Schockfront erklärt damit das beobachtete Nachleuchten im Ultravioletten, Optischen, Infraroten und Radiobereich.

8.3.10 Ein Blick in einen fast lichtschnellen Materiestrahl

Das Schlüsselelement des anisotropen Feuerballs sind **stellare, ultra-relativistische Jets**. Die Astrophysiker nehmen heute an, dass sie im Kollaps des Vorläufersterns oder des Vorläufersystems entstehen. Aufgrund der enorm hohen Geschwindigkeiten des Jets ist auch der relativistische Beamingfaktor extrem groß. *Beamingfaktor* bezeichnet den speziell relativistischen Doppler-Faktor, der ein Maß dafür ist, wie sehr elektromagnetische Wellen, die vom GRB-Jet ausgehen verschoben werden. Bei einem irdisch beobachteten GRB muss der Jet - beschreibt der anisotrope Feuerball die Natur in richtiger Weise - etwa in Richtung Erde zeigen. Wenn sich ein leuchtendes Objekt fast lichtschnell in Richtung eines Beobachters bewegt, kommt ein starker **Blauverschiebungseffekt** der Strahlung zum Tragen: die Strahlung wird einerseits in ihrer Energie zum Blauen hin verschoben (ändert also ihre Farbe), anderseits wird auch ihre Intensität erhöht (*Beaming*). Ein Beobachter, der die GRB-Strahlung aus der Schockfront sieht, überschätzt sie! 'In Wahrheit', oder physikalisch präzise gesagt, im Ruhesystem ist die GRB-Strahlung viel energieärmer und dunkler. Kurz gesagt: Blauverschobene ('gebeamte') Strahlung ist energetischer und heller!

Beim Gravitationskollaps des Vorläufersterns (lange GRBs) bildet sich ein anfänglich eher pilzförmiger Jet aus. Dadurch dass der Öffnungswinkel des Jets vom Beamingfaktor abhängt, wurden theoretisch so genannte **'verwaiste' GRBs** (engl. *orphan GRBs*) vorhergesagt. Hier sollte ein Nachleuchten bei niedrigeren Strahlungsenergien beobachtbar sein, **ohne** dass zuvor ein assoziierter GRB detektiert wurde. Bisher war die Suche nach diesen orphan GRBs erfolglos.

Daneben gibt es auch so genannte **dunkle GRBs**, wo nur eine Gamma-Komponente **ohne optische Komponente** nachweisbar ist. Vermutlich entstehen diese GRBs in einem Sternentstehungsgebiet, wo dichter, interstellarer Staub sehr hohe Extinktionen (eine bis fünf Magnituden) verursacht. Bei der Extinktion erfolgt aufgrund von Streuprozessen eine Abschwächung der Intensität der Strahlung und eine Rötung. Dieser Effekt mag bei GRBs in dichtem Milieu den optischen Anteil unterdrücken. Allerdings sollten Astronomen in diesem Fall intensive Infrarotstrahlung messen können, was bisher ebenfalls (noch) nicht gelungen ist.

Die Kollapsar-Jets langzeitiger GRBs sind heiße Kandidaten für die Emission ultra-hochenergetischer Neutrinos. Eine Entdeckung von GRBs in diesem 'neuen Fenster der Astronomie' wäre eine spektakuläre Entdeckung.

8.3.11 GRBs und SN: gute Kumpels?

Astronomen haben auch festgestellt, das einige dieser GRBs (z. B. GRB980425) mit Supernovae assoziiert sind: In den Lichtkurven fanden sie '*Extralicht*' (engl. *extra light*), das vermutlich charakteristisch ist für SN. Mittlerweile wurden auch andere solcher *SN-GRB-Verbindungen* (engl *SN-GRB connection*) gefunden wie GRB030329 (*Hjorth et al.*, Nature

423, 847, 2003). Das stützt das Kollapsarmodell. Unklar ist, *warum nicht alle* Supernovae mit GRBs assoziiert sind. Es wird vermutet, dass das Ausmaß der differenziellen Rotation des Eisenkerns im Kollapsar darüber entscheidet, ob beide Explosionsformen zusammen auftreten oder nicht (siehe auch Review: *Woosley & Bloom* ARA& A 2006; ePrint: astro-ph/0609142).

Hinzu kommt noch ein weiterer Aspekt: die Umgebung des Explosionsortes. Auf diese Spur sind die Astronomen gekommen, als sie die Heimatgalaxien betrachteten, in denen sich die jeweilige Explosion ereignete. Das erste Kriterium ist die Morphologie der Galaxie, also der Hubble-Typ. Die Astronomen finden dann das Ergebnis, dass es deutliche Unterschiede bei den Heimatgalaxien gibt: SN ereignen sich viel häufiger in Spiralgalaxien als lange GRBs. Das zweite Kriterium ist die physische Größe der Galaxie. Auch hier finden Astronomen Unterschiede: GRBs ereignen sich bevorzugt in lichtschwachen, kleinen Galaxien. Was heißt das alles? Nun, die Hypothese lautet, dass die Wahrscheinlichkeit für einen GRB an den chemischen Entwicklungszustand des massereichen Sterns gekoppelt ist, also an seine **Metallizität** (*Fruchter et al.*, Nature 441, 463, 2006). So zeigen mehrere Heimatgalaxien, in denen sich lange GRBs ereigneten, Metallizitäten von kleiner als ein Drittel der solaren Metallizität. Diese Vermutung passt zur Stellarphysik, weil metallreiche Sterne so starke Winde entwickeln, dass sie viel Masse verlieren und deshalb nicht zu einem Schwarzen Loch, dafür aber zu einem Neutronenstern kollabieren.

Lange GRBs treten demnach lieber in metallarmen, jungen Galaxien (mit hoher Sternentstehungsrate) auf und scheuen das metallreiche Milieu, wie beispielsweise in der Milchstraße. Die Milchstraße scheint tatsächlich ein recht lebensfreundlicher Ort zu sein.

8.3.12 Ertappte Schwarze Löcher

Das Aufregende und Faszinierende an Gamma Ray Bursts ist, dass man hier im Prinzip die **Bildung eines stellaren Schwarzen Loches** beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass - unabhängig ob kurzer oder langer GRB - am Ende die Entstehung eines Loches steht. Wie bei den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) nehmen Astrophysiker heute an, dass rotierende Schwarze Löcher (Kerr-Lösung) auch bei den leuchtkräftigen GRBs eine Schlüsselrolle spielen. Kerr-Löcher werden zu den **relativistischen Magneto-Rotatoren** (RMRs, *Gammie* 2003) gerechnet. Die schnell rotierende Raumzeit der RMRs ist ein effizienter Antrieb, um ultra-relativistischen GRB-Jets herauszuschießen. Bei den Gamma Ray Bursts spielt somit die gleiche Physik eine Rolle wie bei den AGN: Akkretionsphysik, Magnetohydrodynamik, Jetphysik und natürlich Einsteins Theorie.

8.3.13 Eine andere Hypothese

Eine alternative Erklärung für GRBs wird unter dem Einfluss kosmischer topologischer Defekte gesehen. Diese Alternative ist unter Astrophysikern jedoch nicht etabliert und gilt als spekulativ.

8.3.14 Durchbruch 4: Relationen für langzeitige GRBs

Amati-Relation

2002 haben italienische GRB-Forscher zwölf Gammastrahlenausbrüche ausgewertet, die mit italienisch-niederländisch Hochenergiesatelliten BeppoSAX beobachtet wurden. Sie fanden bei der Analyse einen interessanten Zusammenhang, der heute nach dem Erstautor der

Veröffentlichung **Amati-Relation** genannt wird (*Amati et al.*, A& A 390, 81, 2002). Diese Relation besagt, dass die isotrope Gesamtenergie des Ausbruchs ($E_{\rm iso}$) mit der Maximalenergie der GRB-Strahlung ($E_{\rm peak}$) im Ruhesystem (!) der Quelle eindeutig zusammenhängt. Das bedeutet, dass die (im Laborsystem) *beobachtete* Maximalenergie der Strahlung erst noch um die kosmologische Rotverschiebung z des Bursts korrigiert werden muss, um die Korrelation zu zeigen. Dazu wird die beobachtete Energie mit $(1 + z)$ multipliziert, was die höhere Ruheenergie liefert. Das klingt kompliziert - was bedeutet das anschaulich? Das heißt schlichtweg, dass die GRB-Strahlung 'vor Ort des Bursts' umso energiereicher ist, je größer die Explosionsenergie ist. Das ist eigentlich sehr einleuchtend.

Ghirlanda-Relation

Eine weitere, ähnliche Beziehung bei GRBs ist die **Ghirlanda-Relation** (*Ghirlanda et al.*, ApJ 616, 331, 2004). Sie besagt, dass eine enge Korrelation zwischen der kollimationskorrigierten Energie des Bursts (E_γ) und der Maximalenergie der GRB-Strahlung ($E_{\rm peak}$) besteht. Wie beim anisotropen Feuerball-Modell beschrieben, wird der GRB durch einen Jet gezündet. Dieser Jet hat einen bestimmten Öffnungswinkel. Es ist möglich, aus der isotropen Gesamtenergie und bekanntem Öffnungswinkel die kollimationskorrigierte Energie (gewissermaßen die 'anisotrope Gesamtenergie') auszurechnen. Die Öffnungswinkel der Jets beschaffen sich die Astronomen dabei aus dem GRB-Nachleuchten. Die somit gefundene Ghirlanda-Relation lautet dann auf der Grundlage der Beobachtungsdaten: $E_{\rm peak} \propto E_\gamma^{0.7}$. Die anschauliche Interpretation ist analog zur Amati-Relation. Allerdings streut die Ghirlanda-Relation nicht so sehr (d. h. die Messpunkte liegen enger an der Korrelationslinie). Das liegt an der adäquaten Berücksichtigung der Anisotropie des Feuerballs.

Firmani-Relation

Damit nicht genug - es wurde 2006 eine weitere GRB-Relation gefunden, die **Firmani-Relation** (*Firmani et al.*, MNRAS 370, 185, 2006). Sie setzt drei charakteristische Größen miteinander in Bezug, die mit der prompten GRB-Emission assoziiert sind. Das sind die isotrope Maximalleuchtkraft (L_{iso}), die Maximalenergie der prompten Emission ($E_{\rm pk}$) und die Zeitskala des prompten Signals ($T_{0.45}$). Die Firmani-Relation fußt auf Messdaten und lautet $L_{\rm iso} \propto E_{\rm pk}^{1.62}\, T_{0.45}^{-0.49}$. Diese Relation klingt am kompliziertesten von allen. Sie besagt anschaulich, dass die GRB-Leuchtkraft umso höher ist, je größer die Maximalenergie der prompten Emission und je kürzer die Zeitskala des GRB-Aufblitzens ist. $\rm T_{0.45}$ beträgt typischerweise nur wenige Sekunden.

Das mag alles recht schleierhaft klingen, hat aber eine für die Astronomie entscheidende Konsequenz: Die Firmani-Relation kann dazu benutzt werden, um die Rotverschiebung eines GRBs zu bestimmen (*photo-z* im Astronomenjargon). Selbst wenn *kein* Nachleuchten beobachtet wurde und damit keine Rotverschiebung bestimmt werden konnte, folgt die Rotverschiebung aus der Firmani-Relation, die nur Charakteristika der prompten Emission involviert! Mit anderen Worten: **Gammastrahlenausbrüche kämen dann als Standardkerzen in Frage!** Das ist eine völlig neue Eigenschaft der GRBs. Sie ist besonders deshalb so brisant, weil Supernovae Typ Ia - die sehr erfolgreich genutzten Standardkerzen der Kosmologie - maximal bis zu kosmologischen Rotverschiebungen von $z \sim 1.5 - 2$ genutzt werden können. GRBs als gigantischste Sternexplosionen im Kosmos sind jedoch noch beobachtbar, auch wenn sie sehr weit entfernt sind, z. B. bis $z \sim 6$ und mehr! Damit

wären GRBs von entscheidendem Nutzen, falls sie sich als Standardkerzen bewähren. 2004 ist es chinesischen Astronomen gelungen, für ein kleines GRB-Sample kosmologische Parameter ($\Omega_{\rm m}$, w) *übereinstimmend mit Supernovadaten* zu bestimmen - allerdings war die Signifikanz dieser Messung noch sehr klein (*Dai et al.*, ApJ 612, L101, 2004).

8.3.15 Erfolge mit dem GRB-Satelliten Swift

Ende 2004 wurde ein Spezialsatellit der NASA namens Swift gestartet, der extra für die Entdeckung und Analyse von GRBs designt wurde (*Gehrels et al.*, ApJ 2004). Die erwartete Lebensdauer des Satelliten beträgt acht Jahre. Swift fängt nicht nur die prompte Gammastrahlung, sondern auch die im Nachleuchten auftretende Röntgen-, UV- und optische Strahlung auf. Schnelligkeit ist gefragt, um das Nachleuchten beobachten zu können: Blitzt ein GRB auf, schwenkt Swift innerhalb von 20 bis 75 Sekunden *vollautomatisch* auf die Position des Blitzes, um Beobachtungsdaten aufzunehmen! Die Beobachtungserfolge verdankt Swift dieser Automatisierung und der Kombination von drei Teleskopen:

- ◇ dem *Burst Alert Telescope* (**BAT**), das mit seinem großen Gesichtsfeld etwa 100 GRBs pro Jahr aufspüren kann. Es beobachtet bei Gammaenergien von 15 bis 150 keV und spürt die Burstposition auf;
- ◇ dem *X-ray Telescope* (**XRT**), also dem Röntgenteleskop, das bei Strahlungsenergien zwischen 0.3 und 10 keV empfindlich ist. XRT schießt Fotos und nimmt Röntgenspektren des GRB-Röntgennachleuchtens auf;
- ◇ dem *UV/Optical Telescope* (**UVOT)**, das im optischen Licht zwischen 170 und 650 nm sowohl Fotos macht, als auch Spektren aufnimmt.

Die GRB-Forscher haben u. a. dank Swift viele neue Erkenntnisse gewonnen. So wurde mit Swift und einem weiteren Satelliten HETE-2 2005 herausgefunden, dass die **kurzen GRBs bevorzugt in alten elliptischen Galaxien auftreten** und weniger in jungen Galaxien (*Fox et al.*, Nature 437, 845, 2005; *Gehrels et al.*, Nature 437, 851, 2005).

Ende 2005 wurde das **Verschmelzungsszenario zweier Neutronensterne bestätigt**, weil die beobachtete Rate für kurze GRBs gut mit der erwarteten Kollisionsrate von Doppel-Neutronensternen übereinstimmt (*Barthelmy et al.*, Nature 438, 994, 2005; *Tanvir et al.*, Nature 438, 991, 2005).

Und 2006 bestätigte Swift die oben beschriebene **Amati-Relation** anhand der Beobachtung eines so genannten Röntgenblitzes (engl. *X-ray Flash*, **XRF**) mit der Katalogbezeichnung XRF 050416A (*Sakamoto et al.*, ApJ 636, L73, 2006).

Doch nicht genug mit GRB-Physik: Das Swift-Teleskop wird auch verwendet, um AGN zu untersuchen.

8.3.16 Eine dritte GRB-Klasse?

Im Jahr 2006 haben zwei Gammastrahlenausbrüche die Standardmodelle der GRB-Physik auf eine harte Probe gestellt: Der lange GRB060614 mit einer Dauer von 102 s (z = 0.125) und der mit 4 s ebenfalls lange GRB060505 (z = 0.089). Beide GRBs passen nicht in das Schema von bislang katalogisierten Ausbrüchen (*McBreen & Greiner*, Physik Journal, Februar 2007).

Nach dem Paradigma der SN-GRB-Verbindung sollte mit einem langen Gammastrahlenausbruch eine Supernova auftreten. Trotz angestrengter Suche wurde

weder bei GRB060614, noch bei GRB060505 eine SN entdeckt. Waren es außergewöhnlich lichtschwache SNe? Auch bei der Lichtkurve wurde die seltsame Beobachtung gemacht, dass sie eher zu kurzen GRBs passe. Im Zuge dieser Ungereimtheiten haben führende GRB-Forscher angeregt, eine neue GRB-Klasse einzuführen (*Gehrels et al.*, Nature 444, 1044, 2006). Eventuell gibt es andere Erklärungen, z. B. dass die Supernovaexplosion so schwach war, dass das ausgeworfene Material wieder zurückfiel auf das Schwarze Loch und somit nicht als hell leuchtender Ausbruch in Erscheinung trat.

Bei bislang etwa 4000 entdeckten GRBs, die gut in das Zwei-Klassen-Schema passen, sind 'zwei Ausreißer' noch nicht genug, um ein erfolgreiches Modell zu überdenken. Zum einen müssen nun die beiden Spezialfälle sehr genau analysiert werden. Zum anderen werden weitere Beobachtungen zeigen müssen, ob eine dritte GRB-Klasse tatsächlich nötig ist.

8.3.17 Kosmologie mit GRBs

Bei extrem weit entfernten GRBs geschehen interessante Effekte: Das optische Nachleuchten eines GRBs mit z > 6 kann nicht mehr mit dem UVOT-Detektor auf Swift beobachtet werden, weil es zu stark rotverschoben ist, nämlich oberhalb von 650 nm. Deshalb weicht man in diesen (seltenen) Fällen auf bodengestützte Infrarotteleskope aus.

Der oben erwähnte Entfernungsrekord, der GRB050904 mit $z = 6.18$ ist so weit entfernt, dass das Universum zur Epoche des GRBs noch nicht ganz ionisiert war. Die Ära der Reionisation endete später. Nun kann das optische Nachleuchten des GRBs genutzt werden, um den Kosmos zu durchleuchten, weil sich die Verteilung der neutralen Materie durch Absorptionslinien verrät. Das Prinzip ist vergleichbar der Röntgendiagnostik beim Arzt: der Astronom ist der Arzt, das Universum der Patient. Bitte frei und schön weit aufmachen, Kosmos!

8.3.18 Weitere Links

- Swift
- Multimedia-Präsentation Gamma Ray Bursts vom Mai 2002

8.4 Gamma-Zerfall

Eine der drei Formen von **Radioaktivität**, neben Alpha-Zerfall und Beta-Zerfall.

8.4.1 Was genau ist nun γ-Zerfall?

Beim Gamma-Zerfall zerfallen angeregte Zustände von Atomkernen durch Emission hochenergetischer, elektromagnetischer Strahlung. Diese besonderen *Radionuklide* sind also Gammastrahler. Gammastrahlung hat noch größere Energie als Röntgenstrahlung, etwa oberhalb von einem MeV bzw. unterhalb einer Wellenlänge von einem Pikometer (1 pm entspricht 10^{-12} m). Zudem unterscheiden sich beide Strahlungsformen *per definitionem*: Gammastrahlung kommt aus dem Atomkern; Röntgenstrahlung kommt aus der Atomhülle. Im ersten Fall ändern die Nukleonen (Protonen und Neutronen) ihre energetischen Zustände, im letzten Fall sind es die Elektronen.

8.4.2 γ ist nicht ohne

Gamma-Strahlung ist die gefährlichste aller radioaktiven Zerfallsarten, weil ihre Reichweite im Prinzip unendlich ist. Denn elektromagnetische Strahlung kann nie vollständig abgeschirmt werden. Es ist nur möglich eine 'Halbwertstiefe' zu definieren, wo die Strahlung auf die Hälfte ihrer Intensität abgefallen ist. Einen wirksamen Schutz bieten nur Abschirmungen aus Blei.

8.4.3 Auch Kerne spinnen

Üblicherweise schließt sich der Gamma-Zerfall an einen der beiden anderen Zerfallsarten an, weil hier ein **angeregter Tochterkern** übrig bleibt. Erst durch die Quantentheorie war die Radioaktivität berechenbar und erklärbar. Mit quantentheoretischen Methoden kann man in der Kernphysik die energetischen Zustände eines Atomkerns angeben. Dabei spielt auch der Spin der Nukleonen eine gewichtige Rolle. Alle Nukleonen tragen zum **Kernspin** des Atomkerns bei. Dieser kann mit geeigneter elektromagnetischer Strahlung, die von außen eingestrahlt wird, zum 'Umklappen' (eine Änderung des Quantenzustands, was mit einem Energieunterschied verbunden ist) angeregt werden.

8.4.4 Nutzen für die medizinische Diagnostik

In bildgebenden Verfahren der Medizin ist dieser Umklapp-Effekt ausgenutzt, nämlich in der *Kernspintomographie* (Nuklearmagnetische Resonanz, NMR; Details im Eintrag Spin). Allerdings ist die dabei freiwerdende Strahlung keine Gammastrahlung, sondern ungefährliche Radiowellen. Es gibt aber auch die gezielte Verwendung von Radioaktivität in der Medizin: So werden radioaktive Kontrastmittel, z. B. Jod gespritzt, die aufgrund der radioaktiven Strahlung im Körper verfolgt werden können (engl. *tracer*). Die Halbwertszeiten dieser radioaktiven Substanzen sind kurz und die Strahlung schwach genug, dass die Belastung für den Patienten vertretbar ist. Es darf nicht vergessen werden, dass wir ständig einer **natürlichen Radioaktivität** ausgesetzt sind, z. B. durch Radionuklide im Baumaterial oder durch die Belastung mit kosmischer Strahlung auf Flügen.

8.5 Geodäte

Geodäten sind besondere Kurven in der Differentialgeometrie. Diese Kurven sind identisch mit den Bahnen, auf denen sich Licht und Teilchen ohne Einwirkung von äußeren Kräften bewegen. Geodäten lassen sich über die Lösung der **Geodätengleichung** in einer vorgegebenen Metrik berechnen.

8.5.1 Geodäten in der Physik

In der klassischen Mechanik gibt es die so genannte *Eikonalgleichung* der geometrischen Optik. Hier sind die Verhältnisse einfacher, weil die Metrik flach ist. Die Geodäten von Licht sind hier Geraden. Licht breitet sich geradlinig aus, wie wir es aus dem Alltagsleben gewohnt sind.

Physikalisch bedeutende Geodäten sind diejenigen in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Vorgegeben ist die gekrümmte Raumzeit einer Masse, z. B. eines Sterns oder eines Schwarzen Loches. Für diese Metrik schreibt man die Geodätengleichung auf und löst sie für Licht oder für Materieteilchen. Denn die Geodätengleichung gibt vor, wie sich diese Teilchen in der Raumzeit zu bewegen haben. Anschaulich formuliert sind die

Geodäten diejenigen Weltlinien im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum, für die das Eigenzeitintervall (die Zeitspanne im Ruhesystem) extremal wird. Dies legt nahe, Geodäten aus einem *Variationsprinzip* abzuleiten. Salopp formuliert besagt es: Licht nimmt den kürzesten Weg.

Es stellt sich dann heraus, dass die Geodäten im Allgemeinen gekrümmt sind. Somit kann sich auch Licht auf gekrümmten Bahnen bewegen, was das Phänomen der Gravitationslinse erklärt.

8.5.2 Geodätentypen in Einsteins Theorie

In der Relativitätstheorie werden verschiedene Geodätentypen unterschieden, wie man sich leicht an ihrer relativen Lage zum **Lichtkegel** in Raum-Zeit-Diagrammen klar machen kann:

- ◇ **Zeitartige Geodäten** liegen innerhalb des Lichtkegels. Für das Linienelement gilt $ds^2 > 0$. Freie Teilchen oder frei fallende Beobachter bewegen sich auf zeitartigen Geodäten.
- ◇ **Lichtartige Geodäten** liegen exakt auf dem Lichtkegel. Sie heißen auch **Nullgeodäten**. Entlang dieser Bahnen bewegt sich das Licht und Strahlung im Allgemeinen. Für das Linienelement von Strahlung gilt $ds^2 = 0$.
- ◇ **Raumartige Geodäten** liegen außerhalb des Lichtkegels und sind an sich 'unphysikalisch', weil Teilchen auf diesen Bahnen das *Kausalitätsprinzip* verletzen. Anders gesagt: Ereignisse mit zeitartigem Abstand können nicht kausal miteinander verknüpft sein. Für das Linienelement raumartiger Geodäten gilt $ds^2 < 0$. Die hypothetischen Tachyonen bewegen sich auf raumartigen Geodäten.

8.5.3 Aspekte aus der Differentialgeometrie

In der Differentialgeometrie unterscheidet man außerdem: *affine* Geodäten, entlang derer ein Tangentenvektor *parallel* zu sich verschoben wird; *metrische* Geodäten, die ausgezeichnete Kurven zwischen zwei Punkten sind, die beide Punkte verbinden und deren Intervall stationär ist unter kleinen Variationen, die an den Endpunkten verschwinden. Für Nullgeodäten ist der Tangentenvektor oder - äquivalent dazu - der Abstand zwischen zwei Punkten in der Raumzeit Null. Für Photonen gilt daher, dass das Linienelement verschwindet, $\mathrm{ds}^2 = 0$.

Die Geodätengleichung ist eine gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung. Nach dem Existenz- und Eindeutigkeitssatz folgt, dass es zu jeder Richtung in einem Weltpunkt ***eine* eindeutige Geodäte *gibt***, die durch diesen Punkt geht.

8.5.4 Anwendungen

In einer speziellen Visualisierungsmethode namens Ray Tracing (dt. Strahlenverfolgung) wird gerade die Geodätengleichung für eine große Zahl von Photonen (einige hunderttausend oder sogar Millionen) gelöst. Das dient der Berechnung des Erscheinungsbilds von Objekten (*Rendern*) in flachen und gekrümmten Raumzeiten. Damit kommt Ray Tracing sowohl bei kommerzieller Software zur Darstellung von Landschaften, Gebäuden und beliebig geformten Körpern in 3D, als auch bei physikalischen Codes zur Darstellung von Strömungen, Jets, Staubtori, Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher etc. zum Einsatz.

8.5.5 Web-Artikel

◇ Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing

8.6 Geometrisierte Einheiten

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) enthält **zwei fundamentale Naturkonstanten**: die Vakuumlichtgeschwindigkeit c von 299 792.458 km/s und die Gravitationskonstante G, die 6.672×10^{-11} $\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$ beträgt.

8.6.1 seltsame, aber praktische Bräuche der Theoretiker

In rein theoretischen Betrachtungen ist es von Vorteil, nicht immer diese Zahlenwerte einzusetzen, ja nicht einmal die Konstante als Parameter c bzw. G in der Rechnung auftauchen zu lassen. Stattdessen setzt man einfach $G = c = 1$. Das resultierende Einheitensystem heißt *geometrisierte Einheiten* (engl. *geometrized units*; auch *geometrische Einheiten* genannt) und wurde erstmals im Fundamentalwerk der Gravitation mit gleichnamigem Titel von den Autoren Misner, Thorne und Wheeler (MTW) 1973 eingeführt.

8.6.2 Einsen mit Folgen

Diese Konvention führt dazu, dass Längen in Einheiten der Masse M angegeben werden. So wird der Gravitationsradius ebenfalls in Vielfachen von M aufgeführt. In einem speziellen Anwendungsbeispiel, wo eine experimentelle Messung durchgeführt wird, rechnet man wieder durch entsprechende Multiplikation mit Potenzen von G und c auf explizite Zahlenwerte in SI-Einheiten (Meter, Kilogramm, Sekunde: MKS) oder Gauß-Einheiten (Zentimeter, Gramm, Sekunde: cgs) um.

8.7 Geometrodynamik

Geometrodynamik ist ein Begriff der von dem Relativisten *John A. Wheeler* 1961 geprägt wurde. Diese Bezeichnung bündelt die Vorstellung, dass die **Geometrie ein dynamisches Gebilde** in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) ist und die Metrik oder Raumzeit im Prinzip ständig 'in Bewegung ist' bzw. lokale Krümmungen ständigen Änderungen unterworfen sind. Der Begriff wurde in Analogie zur klassischen **Elektrodynamik** gewählt, ist aber nicht sehr gebräuchlich. Physiker und Relativisten bevorzugen den Begriff ART, mit dem Geometrodynamik gleichbedeutend ist. Die Loop-Quantengravitation wird manchmal auch *Quantengeometrodynamik* genannt.

8.7.1 Farbgeometrodynamik

Die ART ist eine Gravitationstheorie mit verschwindender Torsion, d. h. der Torsions-Tensor ist null. Nur dann sind die Christoffel-Symbol symmetrisch. Es gibt jedoch die Alternative, eine **Gravitationstheorie mit Torsion** aufzuziehen (siehe auch Fernparallelismus). Naturbeobachtungen erzwingen das nicht, doch gibt es diese Freiheit in der Theorie. Ein Vorteil ist u. a., dass der Spin in die ART implementiert werden kann. Die Idee geht auf den französischen Mathematiker *Elie Joseph Cartan* (1869 - 1951) zurück, der dazu in

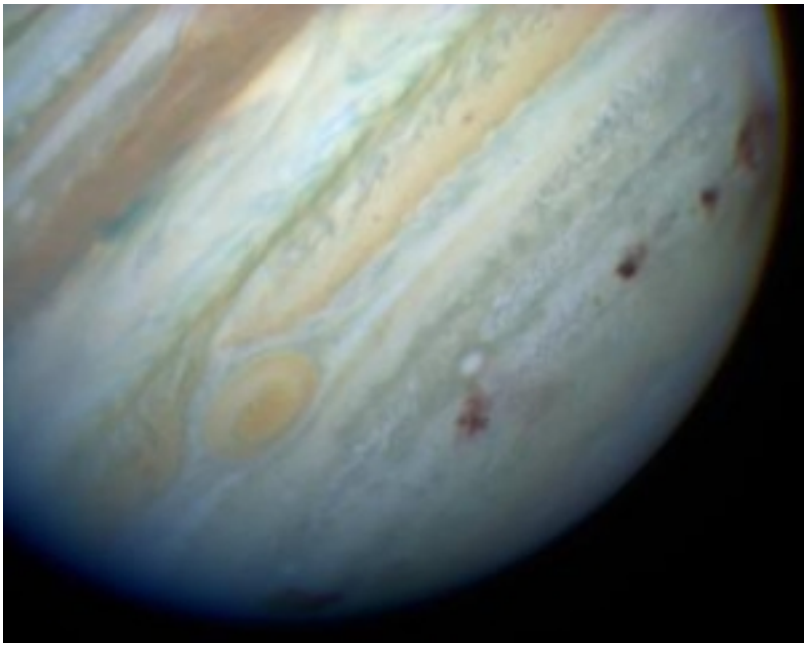

Abbildung 8.7: Teile von Shoemaker-Levy 9 fallen 1994 auf Jupiter.

den 1920 Jahren Arbeiten verfasst hat. Dieser theoretische Zweig wurde von *Friedrich W. Hehl* und *Eckehard W. Mielke* in den 1970ern wieder aufgegriffen und wurde aufgrund der Verwandtschaft zur Quantenchromodynamik mit dem Begriff Farbgeometrodynamik (engl. *color geometrodynamics*, CGMD) bezeichnet.

8.8 Gezeitenkräfte

Dieser Begriff meint im Allgemeinen volumenerhaltende Kräfte auf einen Körper, die infolge der **Gravitation** entstehen.

8.8.1 Ebbe & Flut

Populär sind die Gezeitenkräfte zwischen Sonne, Erde und Mond, die je nach Stellung der Himmelskörper zueinander Ebbe und Flut hervorrufen. Der Wassermantel der Erde wird dabei durch die Gravitationskräfte von Sonne und vor allem Mond deformiert.

8.8.2 Jupiter - ein interplanetarer Staubsauger

Auch im Sonnensystem ereignen sich heftige Ereignisse, die in Zusammenhang mit Gezeitenwechselwirkungen stehen. Im Sommer des Jahres 1994 konnten die staunenden Astronomen Zeuge werden, wie der Komet *Shoemaker-Levy 9* durch die hohen Gezeitenkräfte des Planeten **Jupiter** zerrissen wurde, als er ihm zu nah kam. Die Einschläge waren spektakulär und ein Highlight der Astronomie: Die Abbildung 8.7 zeigt (bei genauer Betrachtung) acht Strukturen, die von Einschlägen der Teile Shoemaker-Levys verursacht

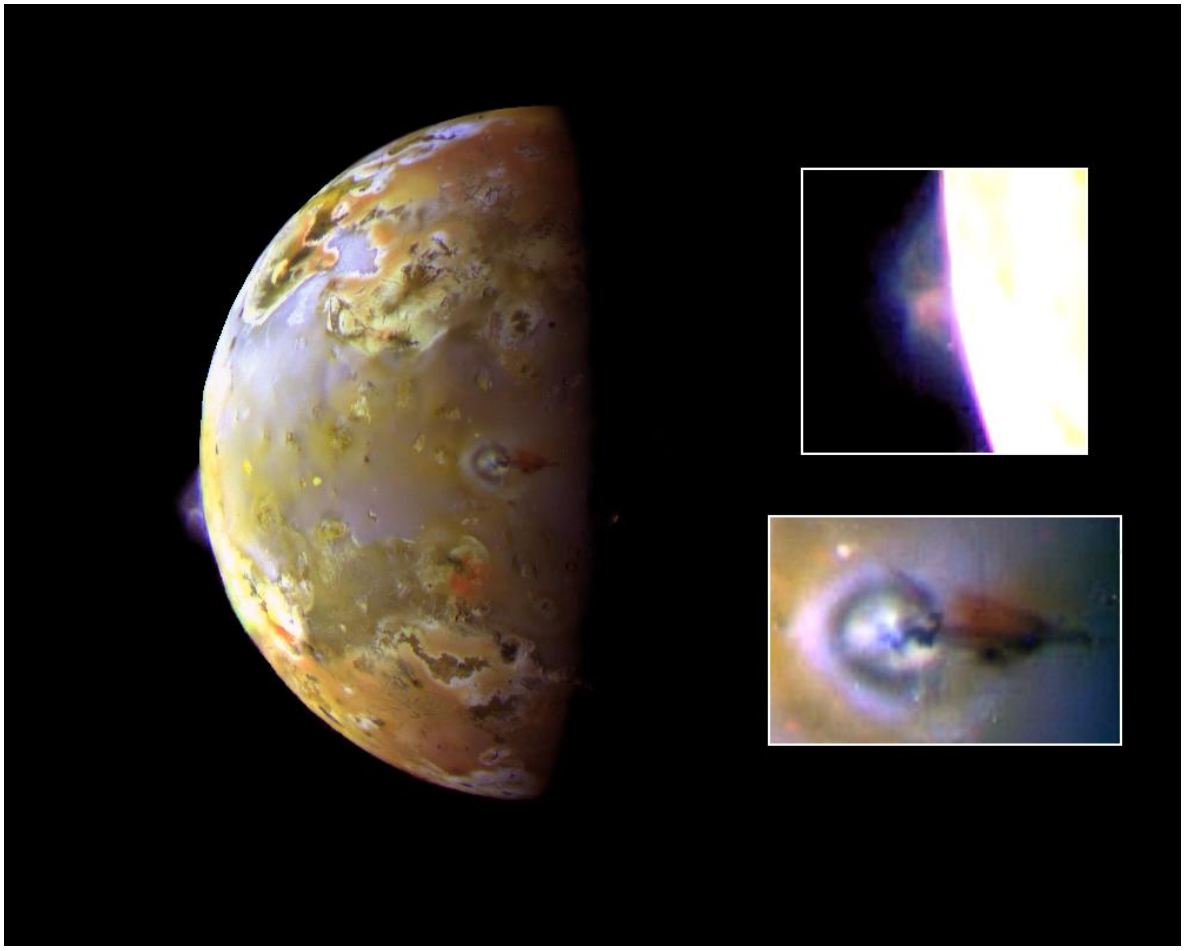

Abbildung 8.8: Vulkanausbruch auf Io.

wurden (Credit: NASA/ESA, HST 1994). Diese Strukturen verändern sich auf der Zeitskala von Tagen.

8.8.3 Jupiter - Ios Masseur

Der Vulkanismus und die hohe morphologische Aktivität des innersten Jupitermonds *Io* werden ebenfalls mit Gezeitenwechselwirkungen erklärt. Das Innere dieses Monds wird ständig umgewälzt und formt ein immer neu erscheinendes Io-Antlitz. Io hat es dadurch zur vulkanisch aktivsten Region im Sonnensystem gebracht. Die Aufnahme 8.8 wurde mit der Raumsonde *Galileo* 1997 aus einer Höhe von 600000 Kilometern über Io fotografiert (Credit: Galileo Project, JPL/NASA, 1997). Auf dem Foto ist etwa in der Mitte eine blaue Rauchfahne zu sehen, die sich etwa 140 Kilometer über Ios Oberfläche erhebt. Sie stammt aus der Region *Pillan Patera*, die schon seit Jahren vulkanisch aktiv ist. Darunter, ebenfalls in der Bildmitte, jedoch nahe an der Trennlinie von Io-Tag und Io-Nacht (*Terminator*) befindet sich der Vulkan *Prometheus*, dessen Rauchfahne eine Ringform aufweist und etwa 75 Kilometer aufsteigt. Schon die Voyager-Sonden dokumentierten 1979 diesen aktiven Vulkan.

Abbildung 8.9: Antennengalaxien NGC4038-4039, HST 2006.

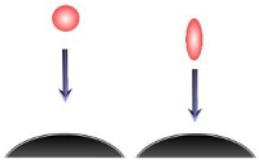

Abbildung 8.10: Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel.

8.8.4 Galaxienhochzeit

Gezeitenkräfte wirken aber durch die **Langreichweitigkeit der Gravitation** auch auf großen Raumskalen und bewirken so beispielsweise eine Veränderung der Morphologie von Galaxien (Balkenspiralgalaxien, **irreguläre Galaxien**), wie eindrucksvoll bei den kannibalistischen Systemen wie der *Antennengalaxien* (Abb. 8.9, Credit: NASA/ESA, HST 2006) beobachtet werden kann. Die Antennengalaxien NGC 4038 und NGC 4039 sind 62 Millionen Lichtjahre entfernt und befinden sich im Sternbild *Rabe* (*Corvus*). Vor einigen hundert Millionen Jahren begannen sie mit der Gezeitenwechselwirkung. Das Bild ist ein Farbenkomposit und zeigt die älteren Sterne, die beide Galaxien in die Ehe mitbringen (gelb-orange), diffus verteilten Staub (braune und schwarze Filamente), und natürlich die durch die Hochzeit neu entstandenen, hell leuchtenden Sterne sowie deren ionisiertes Umgebungsgas aus Wasserstoff (blau und rosa).

In einigen Milliarden Jahren wird die Milchstraße in vergleichbarer Weise mit der Andromedagalaxie kollidieren. Das klingt jedoch schlimmer als es ist, weil es dabei kaum zu direkten Sternzusammenstößen, aber zur Bildung neuer Sterne kommen wird, weil hier die interstellaren Medien beider Galaxien vermischt und verdichtet werden.

8.8.5 unangenehme Gezeiten beim Schwarzen Loch

Kommen wir nun zu den extremen Gezeitenkräften, die - wie sollte es anders sein - von **Schwarzen Löchern** hervorgerufen werden. Körper, die sich zu nahe an den Ereignishorizont wagen, werden durch Gezeitenkräfte stark deformiert und können sogar zerrissen werden. Ein kugelförmiges Testobjekt, das in ein Schwarzes Loch fällt, wird in einen *Ellipsoid* deformiert: in Fallrichtung (*radial*) findet eine Streckung statt und senkrecht zur Fallrichtung (*transversal*) eine Dehnung, wie es die Abbildung 8.10 illustriert. Dabei bleibt das Volumen des Testobjekts jedoch konstant. Die Verhältnisse müssen nicht immer so sein, wie in der Abbildung dargestellt, denn bei besonders schweren Schwarzen Löchern, den supermassereichen Schwarzen Löchern, kann der Gezeitenkrafteffekt auch erst nach dem Ereignishorizont stattfinden und ist damit prinzipiell unbeobachtbar (Einzelheiten bei Gezeitenradius).

8.8.6 Gezeiten in Einsteins Theorie

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) lassen sich Gezeitenkräfte mittels der *Gleichung der geodätischen Abweichung* beschreiben. Der hierbei auftretende so genannte *orthogonale Verbindungsvektor* eignet sich gut, um zwei benachbarte Teilchen, die sich im freien Fall befinden, zu untersuchen. Es zeigt sich auch, dass bei einem Schwarzschild-Loch Spannung und Druck invers mit der dritten Potenz in der Radialkoordinate skalieren, d. h. die Gezeitenkräfte

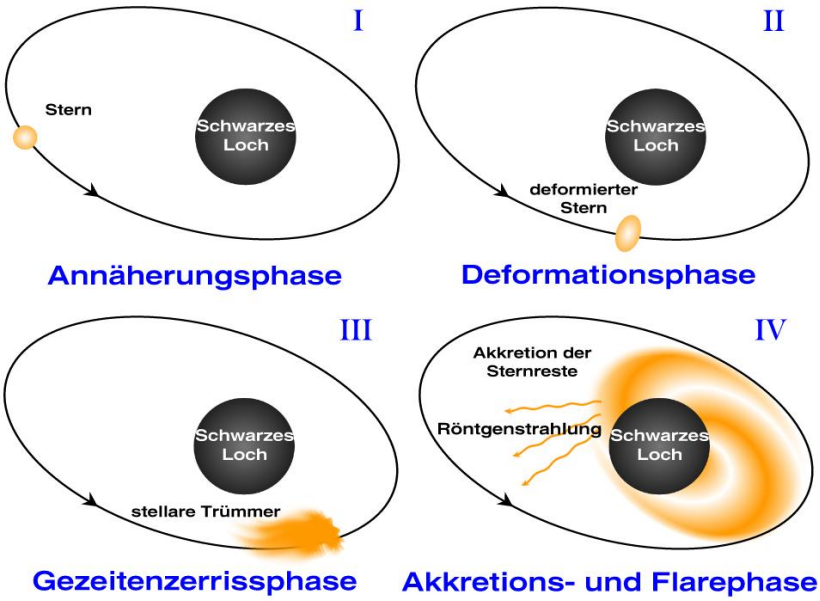

Abbildung 8.11: Phasen des Zerreiß-Szenarios eines Sterns durch Gezeitenkräfte.

werden bei der intrinsischen Singularität in $r = 0$ unendlich groß. Das gilt für alle Schwarzen Löcher.

8.8.7 Loch zerreißt Stern

Ein wichtiges Anwendungsbeispiel ist die Gezeitenwirkung Schwarzer Löcher auf Objekte in ihrer Umgebung. In der Theorie lässt sich der Gezeitenradius (engl. *tidal radius*) definieren, der angibt, ab welchem Abstand zum Schwarzen Loch die Gezeitenkräfte die Selbstgravitation des massiven Objekts dominieren und das Objekt zerreißen (engl. *tidal disruption*).

Von besonderem Interesse in der Astrophysik ist diese Gezeitenwechselwirkung bei Sternen, die einem Schwarzen Loch zu nahe kommen (Sterneinfang, engl *stellar capture*) und den Gezeitenradius unterschreiten. Diese Sterne werden je nach Größe und Masse teilweise oder vollständig zerstört (engl. *stellar tidal disruption*). Bei einer vollständigen Zerstörung verteilen sich die Sterntrümmer (engl. *stellar debris*) in unmittelbarer Nähe zum Loch und können so akkretiert werden. In diesem Szenario, dargestellt in Phasen in der zweiten Abbildung, erwartet man aufgrund der plötzlich lokal erhöhten Akkretionsrate (engl. *accretion burst*) ein deutliches Aufflackern im hochenergetischen Bereich der elektromagnetischen Strahlung: einen **Röntgenflare**. Dabei erreicht die Region um das Schwarze Loch kurzzeitig eine Röntgenhelligkeit, die mit derjenigen von Quasaren vergleichbar ist! Die Strahlung ist thermischen Ursprungs und ist darauf zurückzuführen, dass sich das stellare Restmaterial stark aufheizt. Deshalb können Astronomen das Flare-Spektrum gut mit einem Schwarzkörper (engl. *black body*), also einer Planckschen Strahlungsverteilung charakteristischer Temperatur anpassen. Die einzelnen Phasen, wie der Zerriss eines Sterns durch Gezeitenkräfte abläuft, ist im großen Schema 8.11 illustriert:

- ◇ **I Annäherungsphase:** Zunächst nähert sich der möglicherweise eingefangene Stern

dem Schwarzen Loch bis auf sehr kurze Distanz (engl. *approaching phase*).

- ◇ **II Deformationsphase:** Dann erleidet er starke Deformationen durch Spannungs- und Druckkräfte am Gezeitenradius (engl. *tidal deformation phase*).
- ◇ **III Gezeitenzerrissphase:** Schließlich wird der Stern durch die enormen Kräfte zerrissen (engl. *tidal disruption phase*).
- ◇ **VI Akkretions- und Flarephase:** Die stellaren Trümmer verteilen sich entlang der Bahn des Vorläufersterns und werden auch akkretiert. Dabei entsteht das charakteristische Röntgenflare (engl. *accretion and flare phase*).

Wie unterscheidet man den Röntgenflare durch Sternzerriss von anderen Flares? Dieser Flare im Bereich ultravioletter Strahlung und weicher Röntgenstrahlung klingt auf der **Zeitskala von Monaten** ab. Integriert man die Leuchtkraft (Einheit einer Leistung, erg/s) des Flares über diese Zeit, so findet man eine freigewordene Energie dieses Ereignisses, die der einer Supernova gleichkommt: 10^{51} erg!

Weitere Charakteristika sind, dass er nicht mit der Aktivität verbunden ist, wie man sie beispielsweise in Seyfert-Galaxien beobachtet. Deshalb ist es wichtig, simultan zu den Röntgenbeobachtungen auch im optischen Bereich zu beobachten, um sicherzustellen, dass keine AGN-Aktivität vorliegt. Die verhältnismäßig ruhigen Schwarzen Löcher in den Zentren **inaktiver Galaxien** (engl *dormant black holes*) sind durch stellaren Gezeitenzerriss beobachtbar. Außerdem stützen diese Beobachtungen das allgemein akzeptierte Paradigma, dass nahezu alle Galaxien im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch beherbergen.

Die Ereignisse eines Sternzerriss mit beobachteten Röntgenflare sind sehr selten: **nur alle 10000 Jahre** wird ein Stern in einem solchen Ereignis von einem Schwarzen Loch zerrissen (entsprechend der stellaren Akkretionsrate von 10^{-4} Sonnenmassen pro Jahr).

8.8.8 Keine Science-Fiction mehr!

Die ersten Beobachtungen von Röntgenflares durch Sternzerriss wurden Anfang der 1990er Jahre mit dem deutschen Röntgensatelliten ROSAT durchgeführt. Es konnten jedoch nur Kandidaten-Objekte gefunden werden, weil eine letzte Unsicherheit bestand, ob tatsächlich der Flare durch einen zerrissenen Stern hervorgerufen wurde. Nun sind sich die Astronomen sicher, dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Sternzerriss durch ein Schwarzes Loch beobachtet haben. Hauptindiz ist die zeitliche Entwicklung des Röntgenspektrums. Mit hohem Aufwand wurde in einer internationalen Kollaboration mit hoher räumlicher und hoher spektraler Auflösung auf gute Flare-Kandidaten geschaut. Dazu wurden die Ressourcen weltumspannend gebündelt und der US-amerikanische Röntgensatellit Chandra (NASA) und der europäische Röntgensatellit XMM-Newton (ESA) auf die gleiche Quelle ausgerichtet. Außerdem überprüfte das Weltraumteleskop Hubble (HST) den optischen Bereich, um AGN-Aktivität ausschließen zu können. Bei beobachteter Abwesenheit breiter Emissionslinien und nicht-stellarer Kontinua kann der Astronom davon ausgehen, dass es sich um eine 'normale', d. h. inaktive Galaxie handelt. *Stefanie Komossa* (MPE Garching) und Kollegen untersuchten 2004 die Röntgenquelle **RX J1242-1119** (Rotverschiebung $z = 0.05$) und stellten einen starken Abfall, etwa um den Faktor 240, in der Röntgenleuchtkraft fest, wenn man die alten ROSAT- mit neuen XMM-Beobachtungen vergleicht. Dies wird zusammen mit den anderen beobachteten, individuellen Charakteristika so interpretiert, dass man einen Röntgenflare - ausgelöst von einem zerrissenen Stern nahe einem Schwarzen Loch - beobachtet hat.

Mittlerweile klingt dieser Flare ab, und die Röntgenastronomen beobachten ein so genanntes **Post-Flare-Spektrum** der Quelle. Irgendwann kehrt das gefütterte Schwarze Loch wieder in seinen Ruhezustand zurück und die inaktive Wirtsgalaxie verhält sich so unauffällig wie vor dem Zerriss.

Die Blauhelligkeit gemessen mit HST dient einer Abschätzung der Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum von RX J1242-1119. So ergeben sich **200 Millionen Sonnenmassen**. Das ist fast das 70fache der Lochmasse, die die Infrarotastronomen im Zentrum der Milchstraße (Sgr A*) gemessen haben.

Mittlerweile ist es gelungen die Flares durch Gezeitenzerriss auch im **Ultravioletten** nachzuweisen: In diesem Fall wurde der Stern durch das zentrale Schwarze Loch in einer elliptischen Galaxie zerrissen, die sich im Gesichtsfeld des *GALEX Deep Imaging Survey* befand (*Gezari et al.* 2006). Die Lochmasse von etwa 100 Millionen Sonnenmassen ist konsistent dem Schwarzkörperspektrum, der Lichtkurve des Flares und der M-σ-Relation

8.8.9 Papiere zum Gezeitenzerriss eines Sterns

- ◇ *Halpern et al.* 2004, astro-ph/0402497
- ◇ *Komossa et al.* 2004, astro-ph/0402468
- ◇ *Gezari et al.* 2003, astro-ph/0304063
- ◇ *Gezari et al.* 2006, astro-ph/0612069

8.9 Gezeitenradius

Unter dem Eintrag Gezeitenkräfte wurden verschiedene Bereiche der Astronomie vorgestellt, in denen diese Gravitationskräfte relevant sind. Hier soll es um den Gezeitenradius gehen, der bei den extremen Gezeitenkräfte von Schwarzen Löchern, die auf Sterne wirken, eine Rolle spielt.

8.9.1 Gleichung für den Gezeitenradius

In der Theorie lässt sich der **Gezeitenradius** (engl. *tidal radius*) berechnen, der angibt, ab welchem Abstand zum Schwarzen Loch die Gezeitenkräfte die *Selbstgravitation* des massiven Objekts dominieren. Die Formel für den Gezeitenradius lautet:

$$R_{\mathrm{T}} = R_\star \, (M_{\mathrm{BH}}/m_\star)^{1/3} \, . \tag{8.1}$$

Er wächst mit der dritten Wurzel der Masse des Loches (M_{BH}) an, wächst linear mit dem Radius des Objekts $R_\star$ und fällt mit der dritten Wurzel der Masse des Objekts $m_\star$ ab. Die Betrachtung ist wichtig, um abzuschätzen, bei welchen Abständen zum Loch Sterne durch diese enormen Kräfte zerrissen werden. Dieses Ereignis eines Sternzerrisses nennt man im englischen Fachjargon *stellar tidal disruption* (manchmal im Deutschen *Stellardisruption*). Solche Ereignisse sind mit einem deutlichen Anstieg in der Röntgenemission verbunden, weil die stellaren Trümmer nach dem Zerriss teilweise vom nahen Schwarzen Loch aufgesammelt werden. Es entsteht dabei ein charakteristischer **Röntgenblitz** (engl. *X-ray flare*), weil ein Materie aufsammelndes Loch immer Strahlung erzeugt. Wie im Eintrag Akkretion dargestellt, ist das sogar der effizienteste Weg um elektromagnetische Strahlung herzustellen.

In der Gleichung für den Gezeitenradius gibt man Masse und Radius des eingefangenen Sterns (engl. *captured star*), ebenso wie die Masse des Schwarzen Loches vor. Dann lässt sich der Gezeitenradius ablesen. Man muss dazu sagen, dass der Zahlenwert des Gezeitenradius in dieser Gleichung nur eine Abschätzung ist. Das hat zweierlei Gründe: Zum einen folgt die Gleichung aus einer rein Newtonschen Betrachtung der Gravitation; dies kann bei großer Nähe zum Ereignishorizont nicht mehr adäquat sein, weil sich hier die Krümmung der Raumzeit auswirkt. Zum anderen hängt der genaue Vorfaktor (hier 1) von der Bahnform des Sterns (Ellipse, Kreis) und der genauen Dichteverteilung im Stern ab.

8.9.2 Ein Zerriss im Verborgenen

Wir zeigen jetzt anhand der Gleichung für den Gezeitenradius, dass nicht bei allen Schwarzen Löchern ein Röntgenflare vom Sternzerriss sichtbar sein kann. Dazu betrachten wir einen **sonnenartigen Stern** und setzen in die Gleichung 8.1 den Sonnenradius und die Sonnenmasse ein (Daten unter Eintrag Sonne). Die Gleichung kann danach umgeschrieben werden, wenn man den ebenfalls masseabhängigen Schwarzschildradius (den Radius des Ereignishorizontes eines nicht rotierenden Schwarzen Loches vom Schwarzschild-Typ) einsetzt. Das Resultat ist folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{T}} &= \mathrm{R}_{\odot}\,(M_{\mathrm{BH}}/M_{\odot})^{1/3} \\ &= 1.1\,\mathrm{R_S} \times \left(\frac{M_{\mathrm{BH}}}{10^8 M_{\odot}}\right)^{-2/3}. \end{aligned}$$

Nun tragen wir in Diagramm 8.12 diesen Gezeitenradius eines sonnenartigen Sterns (grün) gegenüber dem Schwarzschildradius (rot) auf. Der Schnittpunkt der Geraden in doppeltlogarithmischer Auftragung liegt bei einer Masse des Schwarzen Loches von **1.1** $\times$ $\mathbf{10}^8$ **Sonnenmassen**. Überschreitet die Lochmasse diesen kritischen Wert, unterschreitet der Gezeitenradius den Horizontradius. D.h. der Zerriss des Sterns ist **nicht** mehr beobachtbar, weil er hinter dem Horizont verborgen ist. Diese Aussage wird leicht für die kompakteren, rotierenden Kerr-Löcher oder für andere eingefangene Objekte wie Riesensterne (z. B. Roten Riesen) oder andere kompakte Objekte (Neutronenstern, Weißer Zwerg) modifiziert: So kann für ein maximal rotierendes Kerr-Loch (Kerr-Parameter $a = M$ in geometrisierten Einheiten), das einen Horizontradius von einem Gravitationsradius aufweist, die Masse des Schwarzen Loches geringfügig größer sein, bevor der Flare verschwindet. Die Kernaussage bleibt bestehen: Bei den schwersten unter den supermassereichen Schwarzen Löchern ist der Sternzerriss durch Gezeitenkräfte nicht beobachtbar. Der angegebene Zahlenwert von etwa 100 Mio. Sonnenmassen ist allerdings recht hoch und wird nur von zentralen Schwarzen Löchern in Quasaren und Riesenellipsen angenommen.

8.9.3 Wie oft passiert's? - Zerrissrate pro Galaxie

Im Falle der **Milchstraße** besteht eine gute Chance das Röntgenflare eines zerrissenen Sterns beobachten zu können, wenn es denn geschehen sollte. Der Sternzerriss ist nämlich ein relativ seltenes Phänomen und geschieht etwa **alle 10000 Jahre einmal** in einer Galaxie. Das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, assoziiert mit der kompakten Radioquelle *Sgr A**, hat eine Masse von etwa 3 Millionen Sonnenmassen. Demnach liegt der Gezeitenradius von Sgr A* für sonnenartige Sterne bei 11.4 Schwarzschildradien oder 22.8 Gravitationsradien (entsprechend 101 Mio. km oder 0.68 AU).

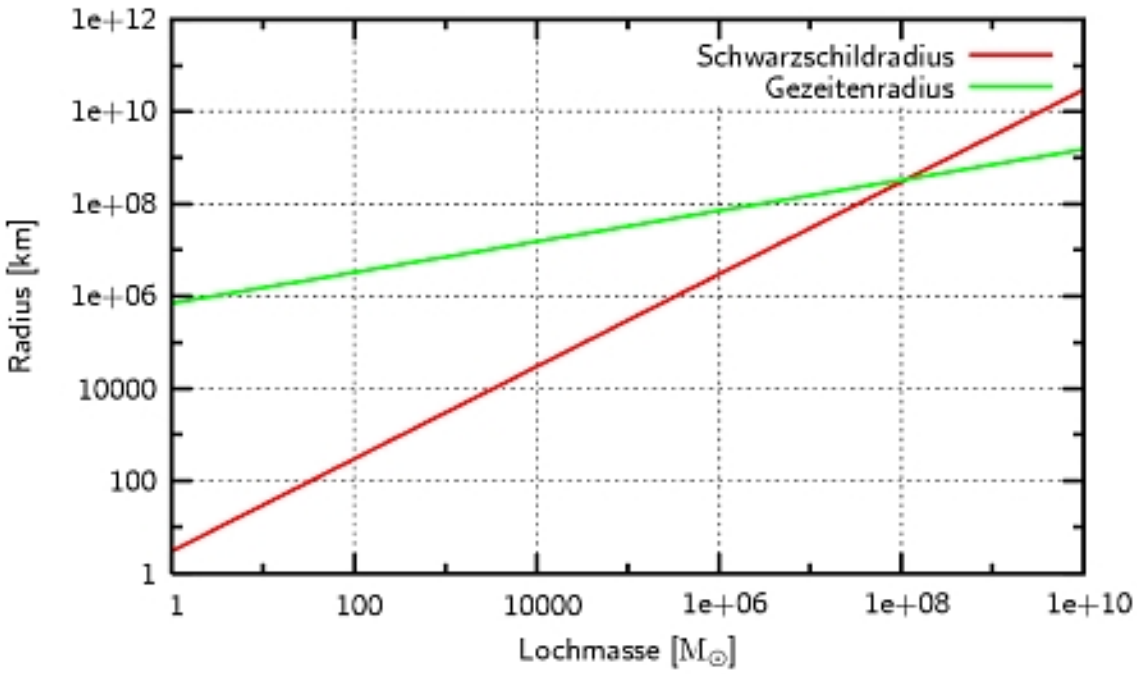

Abbildung 8.12: Schwarzschild- versus Gezeitenradius für sonnenartige Sterne.

8.9.4 Passiert und entdeckt!

Im Februar 2004 wurde bekannt gegeben, das in der **Röntgenquelle RX J1242-1119**, einer elliptischen Galaxie mit einem zentralen supermassereichen Schwarzen Loch von etwa 200 Millionen Sonnenmassen, ein Röntgenflare eines Sterns beobachtet wurde, der den Gezeitenradius unterschritten hatte (*Komossa et al.* 2004, MPE Garching). Das ist die **erste gesicherte Beobachtung** dieser stellaren Zerreißprobe!

8.10 Gluonen

Die Gluonen (engl. *to glue*: kleben) sind die acht masselosen, elektrisch neutralen, aber farbgeladenen Austauschteilchen der starken Wechselwirkung. Die Physiker nennen diese acht Eichbosonen auch das *Farboktett*. Gluonen werden im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) quantenfeldtheoretisch beschrieben.

8.10.1 Stark anfangen, schnell nachlassen

Die starke Wechselwirkung ist in der Tat die stärkste unter allen vier Kräften, wenn man die Kopplungen betrachtet. Aber sie ist auch **extrem kurzreichweitig**: nach nur etwa einem 'Fermi' - einem Femtometer im Jargon der Kernphysiker, also 10^{-15} Metern, was etwa dem Durchmesser der Nukleonen entspricht - ist Schluss mit starker Wechselwirkung! Das verwundert ein wenig, weil die Gluonen doch masselos sind und somit eine unendliche Reichweite gemäß der Behandlung mit einem Yukawa-Potential haben sollten (vergleiche

Photonen und Gravitonen).

8.10.2 Auch Gluonen mögen's bunt

Die Auflösung dieses Paradoxons ist verblüffend: Erstaunlicherweise tragen die Gluonen selbst die so genannte **Farbladung** (dagegen ist das Photon der Quantenelektrodynamik elektrisch neutral), was bedeutet, dass sie auch untereinander (also auch ohne Quarks) stark wechselwirken:

Gluonen spüren die Kräfte, die sie vermitteln!

Die räumliche Separation von Quarks, also eine Erhöhung des Abstands, führt zu sehr starken Gluonenfeldern zwischen ihnen. Die Feldenergie reicht aus, um über den Mechanismus der **Paarbildung** mindestens ein Paar aus Quark und entsprechendem Antiquark zu bilden. Diese Quarkpaare konstituieren wiederum farbneutrale (man sagt auch 'weiße') Mesonen. Die Farbneutralität bedeutet, dass nun auch keine starke Wechselwirkung mehr auftritt. Die starke Wechselwirkung ist zwar rein formal und Yukawa-konsistent unendlich, aber eine Abwesenheit von farbgeladenen Teilchen bei typischen Abständen im Fermi-Bereich führt zu ihrem Verschwinden.

Die Farbladung der Gluonen gestaltet die QCD komplizierter, als andere Quantenfeldtheorien. Die Wechselwirkung unter den Gluonen kann auch dazu führen, dass sie gebundene Systeme bilden, die man als **Gluonium** oder **Glueballs** (dt. Gluonenbälle) bezeichnet. Diese Form der Materie wurde allerdings noch nicht experimentell nachgewiesen.

8.10.3 Erster Nachweis in Deutschland

Sehr wohl wurden die Gluonen jedoch einzeln indirekt nachgewiesen. Dieser Nachweis geschah erstmals 1979 in Deutschland, in der *Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage* (PETRA) am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) in Hamburg. Die Kollaboration um *Paul Söding, Günter Wolf, Björn Wiik* und *Sau Lan Wu* schloss von sternförmigen **hadronischen Jets** auf ein kurzzeitig existentes Gluon.

Der schnelle Zerfall von Gluonen in Quark-Antiquark-Paare führt zur schnellen Bildung von Hadronen in der Umgebung. In Teilchenbeschleunigern messen die Teilchenphysiker sie als hadronische Jets, also hadronische Teilchenströme.

8.10.4 Jet ist nicht gleich Jet

Diese Jets der Teilchenphysik sind jedoch scharf von den kosmischen Jets abzugrenzen! Der Begriff 'hadronischer Jet' ist zwar dort auch zu finden, meint aber makroskopische Jets auf der kpc- oder Mpc-Skala, die eine signifikante Menge an Protonen enthalten.

8.10.5 Gruppentheorie

Die Beschreibung der starken Eichbosonen im Rahmen der QCD gelingt mit einer speziellen, unitären Symmetriegruppe, der **Farb-SU(3)**. Dieser Umstand lässt unmittelbar die Zahl der Gluonen ableiten: Weil generell eine spezielle, unitäre Gruppe SU(N) gerade N^2 - 1 linear unabhängige N × N -Matrizen oder **Generatoren** hat (die als die Eichbosonen der Eichtheorie interpretiert werden), muss die Farb-SU(3) 3^2 - 1 = 8 Gluonen besitzen!

8.11 Grad

Grad ist eine Einheit, um die Größe von Winkeln im **Gradmaß** anzugeben. Wie bei den Zeiteinheiten Stunde, Minute und Sekunde nutzt man zur Angabe von Winkeln im Gradmaß das *Sexagesimalsystem*. Deshalb hat das Winkelgrad 60 Bogenminuten und die Bogenminute 60 Bogensekunden. Entsprechend ergeben 3600 Bogensekunden genau ein Grad. Die Symbole, um diese Einheiten abzukürzen sind ° für das Grad, ’ für die Bogenminute und ” für die Bogensekunde.

In der Astronomie ist das Winkelgrad generell relevant für die Angabe von Winkeln - besonders gebräuchlich ist Grad als Einheit bei der **scheinbare Größe** von Himmelobjekten. So beträgt die Breite des Vollmondes fast ein halbes Grad. Auch das **Auflösungsvermögen** von Teleskopen wird im Gradmaß angegeben.

8.12 Granulation

Granulation bezeichnet ganz allgemeine eine *Körnung* (lat. *granum*: Korn).

8.12.1 Granulation von Sternplasma

Bei **Sternen** ist mit Granulation die Körnung der Sternoberflächen infolge der Konvektion gemeint. Für Einzelheiten siehe die Lexikoneinträge Photosphäre und Sonne.

8.12.2 Granulation von Raumzeiten

In **Quantengravitationen** wie der Loop-Quantengravitation (siehe dort für Details) bezieht sich Granulation auf die Raumzeit: die Raumzeit ist nicht mehr glatt und kontinuierlich wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern sie ist gekörnt, d. h. diskretisiert in Quanten, den so genannten Wilson-Loops.

8.13 Gravastern

Gravastern (engl. *Gravastar*) ist eine Bezeichnung für eine **neuere, sphärisch symmetrische Lösung** der Einsteinschen Feldgleichungen. Der Name *Grava(c)star* ist ein Kunstwort aus Gravitation (*gravitation*), Vakuum (*vacuum*) und Stern (*star*). Aus diesem Grund kann man als Oberbegriff auch die Bezeichnung Vakuumsterne (*vacuum stars*) wählen. Alternativ, jedoch seltener verwendet, nennt man diesen neuen Objekttyp auch Quasi-Schwarzes Loch (engl. *quasi-black-hole*, QBH). Allgemeiner betrachtet gehören die Gravasterne zu den kompakten Objekten in der Astrophysik.

8.13.1 keine Singularität & kein Horizont

Gravasterne wurden von den theoretischen Physikern *Pawel Mazur* (University of South Carolina, USA) und *Emil Mottola* (Los Alamos, USA) im Jahr 2001 als Alternative zu den **singulären Schwarzen Löchern** vorgeschlagen. Sie haben die erstaunliche Eigenschaft, dass sie *regulär* sind, d. h. es gibt **keine intrinsische Singularität** bei r = 0!

Die zweite, wesentliche Eigenschaft ist, dass sie **keinen Ereignishorizont** haben. Die Fluchtgeschwindigkeit bleibt demnach immer knapp unterhalb der

Abbildung 8.13: Struktur eines Gravasterns.

Lichtgeschwindigkeit. Anders gesagt bleibt der relativistisch verallgemeinerte Doppler-Faktor (Rotverschiebungsfaktor, **g-Faktor**), der am Horizont Schwarzer Löcher exakt null wird, an der Oberfläche von Gravasternen endlich, ist aber sehr klein, etwa 10^{-25}! Ohne Horizont gibt es bei diesen Objekten daher auch **keine** Hawking-Strahlung (allerdings ist die Emission einer thermischen Strahlung anzunehmen).

8.13.2 Struktur von Gravasternen: drei Zonen

- **1)** Im Außenraum entspricht er der Schwarzschild-Lösung für nicht-rotierende Schwarze Löcher. Dieser Bereich ist materiefrei und asymptotisch flach.

- **2)** Dann schließt sich eine **dünne Materieschale** an, die aus einem ultrarelativistischen Quantenfluid besteht, das eine schwache Quelle des Gravitationsfeldes ist. Ultrarelativistisch bedeutet, dass diese Materie am *kausalen Limit* existiert: die Schallgeschwindigkeit in diesem Medium ist gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit. Die Dicke der Schicht ist in der Größenordnung der Planck-Länge. Diese Schale soll während des Gravitationskollapses eines Sterns oder Sternhaufens entstanden sein. Letztendlich bewirkt gerade die Materieschale, dass es nicht zur Ausbildung eines Horizonts kommt. Erreicht die Materie im Kollaps das kausale Limit, so findet ein *Quantenphasenübergang* statt. Die äußere Schwarzschild-Vakuumraumzeit geht in ein anderes relativistisches Vakuum über: der de-Sitter-Raumzeit. Noch bevor sich ein Horizont ausbilden kann, geht die stark gekrümmte Raumzeit (in der eine hohe Energie steckt) in ein so genanntes **gravitatives Bose-Einstein-Kondensat (GBEK)** über. Dieser Phasenübergang zeigt viele Analogien zum klassischen Bose-Einstein-Kondensat in der Festkörperphysik. Bei Gravasternen wählt man ein Bose-Fluidum als Quelle

des Gravitationsfeldes. Deshalb steckt man in das Wirkungsfunktional des Systems die Einstein-Hilbert-Wirkung und diejenige eines Skalarfeldes.

- ◇ **3)** Das GBEK ist schließlich der innerste Bereich des Gravasterns, der den weitaus größeren Anteil an der Masse des Gravasterns hat: es handelt sich um eine **Blase aus Dunkler Energie**! Dieser Innenraum ist ebenfalls materiefrei (daher Vakuum) und kommt einer **de-Sitter-Lösung** (positive kosmologische Konstante) gleich, die man aus der Kosmologie kennt. Die 'Blase' aus Dunkler Energie stabilisiert mit einem nach außen gerichteten Druck die dünne Materieschale (siehe 2) und verhindert so dessen Kollaps. Eine positive kosmologische Konstante Λ bedeutet, dass es sich um eine repulsive Kraft handelt, die der Gravitationskraft entgegen wirkt: um **Antigravitation**. In der Fachsprache heißt die Übergangsregion zwischen Schwarzschild- und de-Sitter-Vakuum auch **Quantenphasen-Interface**. Im Prinzip verbindet diese 'Haut' zwei Vakuumzustände miteinander, nämlich das de-Sitter-Vakuum innerhalb mit dem Schwarzschild-Vakuum bzw. asymptotisch Minkowski-Vakuum außerhalb (bis unendlich).

8.13.3 Strahlung von der Gravasternoberfläche

Die Zustandsgleichung innerhalb der Schale ist sehr 'steif'. Die Schalenmaterie ist noch kompakter als Neutronensternmaterie, denn die Schallgeschwindigkeit ist hier identisch mit der Lichtgeschwindigkeit. Es ist daher zu erwarten, dass **Schockfronten** an der Übergangsschicht abprallen. Die Fürsprecher des Gravastern-Modells sehen darin eine Möglichkeit zur *Unterscheidung der Gravasterne von singulären Schwarzen Löchern*. Denn an (materiefreien) Ereignishorizonten gibt es keine derartigen Abpralleffekte. Andere Theoretiker (*Chapline et al.*) berechneten, dass eine Reflektionseigenschaft vorliege, so dass harte Gammastrahlung am Übergang reflektiert werde, aber weichere Photonen durch die Materiehaut gelassen (*transmittiert*) werde, d. h. energiearmes Licht wird verschluckt. Problematisch ist, dass diese Rechnungen besagen, dass Gammastrahlung zwar reflektiert werde, aber diese dennoch aufgrund der Gravitationsrotverschiebung stark rotverschoben werde. Das schmälert die Chance ihrer Detektion und die Zuversicht einer Verifikation/Falsifikation beträchtlich.

8.13.4 Was passiert mit einfallender Materie?

Die **Akkretion eines Gravasterns** ist Gegenstand aktueller Diskussionen. Im für die Beobachtung ungünstigsten Fall verändert sich die aufgesammelte Materie derart, dass sie beim Auftreffen auf die Schale in das Bose-Einstein-Kondensat im Innern umgewandelt wird. Dadurch sollte der Gravastern - wie die Schwarzen Löcher - wachsen, weil er ebenfalls einen Masseparameter hat. In diesem Szenario wäre aber eine Beobachtung äußerst schwierig, weil die ultrakalte Materieschale fast gar nicht leuchtet (nur sehr schwache Wärmestrahlung eines Schwarzen Körpers). Hinzu kommt, dass diese schwache Strahlung dann durch den Einfluss der stark gekrümmten Metrik extrem rotverschoben wird.

8.13.5 Unterscheiden ist schwierig

Astrophysiker müssen mit Beobachtungen sehr nahe an das kompakte Objekt herankommen, bis auf etwa zwei Gravitationsradien (gleich ein Schwarzschild-Radius, R_S), um eine

Unterscheidung von Gravasternen und Schwarzen Löchern angehen zu können. Stark rotverschoben ist jedoch in beiden Fällen die Strahlung, die aus diesem Bereich kommt. Nur sind Schwarze Löcher absolut schwarz und Gravasterne 'grau'. Ausgedrückt in relativistisch verallgemeinerten Dopplerfaktoren gilt für ein Schwarzschild-Loch $g(R_S) \equiv 0$ und für einen Gravastern dagegen nur $g(R_S) \sim 0$.

8.13.6 geschichtlicher Hintergrund

An sich ist die Diskussion von Schwarzschild-de-Sitter-Übergängen nicht neu und geht auf eine Idee von *Sakharov* (1965) und *Gliner* (1966) zurück. In den 1980er Jahren wurden diese Ansätze aufgegriffen, um die Kosmologie voranzutreiben. *Mazur* und *Mottola* haben 2001 die Formen der Zustandsgleichungen aufgegriffen, um die Metrik eines Gravasterns auszurechnen.

8.13.7 Da sollte man hinschauen

Sollten Gravasterne existieren, favorisiert man deren Entstehung in Supernovae massereicher Sterne oder in Hypernovae bzw. lang andauernden Gamma Ray Bursts. Diese Sternexplosionen sind gute Beobachtungskandidaten, um Gravasterne zu entdecken. Bislang gibt es jedoch kein konsistentes Modell, das beschreibt, wie ein massereicher Stern in einen Gravastern übergehen könnte. Das ist nur mit detaillierten Kollapsrechnungen zu bewerkstelligen.

8.13.8 zukünftige Forschungsvorhaben

Nach dem Birkhoff-Theorem ist der sphärisch symmetrische Gravastern notwendigerweise **statisch**. Das ist im Lichte der Astrophysik ein Nachteil der Gravasterne, weil gerade die **schnell rotierenden Schwarzen Löcher** (beschrieben durch die Kerr-Lösung der ART) viele astronomische Beobachtungen befriedigend erklärt:

- ◇ Schnell rotierende Löcher wurden vielfach in Mikroquasaren beobachtet (Röntgenflares, Quasi-periodische Oszillationen);
- ◇ Ein rotierendes Schwarzes Loch existiert auch im Zentrum der Milchstraße;
- ◇ Schnell rotierende Schwarze Löcher sind der favorisierte Mechanismus, um magnetohydrodynamisch Jets von Röntgendoppelsternen und vor allem von Aktiven Galaktischen Kernen anzutreiben.

Eine Verallgemeinerung der Gravastern-Lösung auf den *rotierenden Fall* ist deshalb erwünscht, aber bislang nicht gelungen.

Ein anderer Aspekt ist, dass es nicht genügt, wenn eine Raumzeit Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen ist - es muss auch gezeigt werden, dass die Lösung **stabil** ist. Ist das nicht der Fall, wird dieser Zustand in der Natur gar nicht erst erreicht. Auch die Stabilität von Gravasternen wurde bisher nicht überzeugend dargelegt.

8.13.9 Gravasterne mit anisotropem Druck

Im Gegenteil: Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Gravastern-Modelle, die komplett aus einer idealen Flüssigkeit bestehen, scheitern: Entweder würden sie zu unendlicher

Größe anschwellen, oder es würde sich doch ein Horizont bilden. Die Lösung dieses Stabilitätsproblems ist aus der Sicht neuseeländischer Gravitationsforscher ein **Gravastern mit anisotropem Druck** (*Cattoen et al.* 2005). Das bedeutet, dass der Druck im Gravastern nicht in alle Richtungen gleich sei. Die Anisotropie muss in der Gravasternschale gewährleistet sein. Die Eigenschaft negativen Druckes im Innern bleibt jedoch erhalten. Stetige Lösungen mit isotropem Druck (wie das ursprüngliche Gravastern-Modell nach Mazur und Mottola) haben eine immer Polstelle im Druck als Funktion vom Radius. Das ruft eine unphysikalische, nackte Singularität hervor. Das ist eine neue Erkenntnis in der Gravasternphysik.

8.13.10 skeptische Community

Die Reaktionen der Astronomen auf Gravastern-Modelle sind recht verhalten. Für die einen ist es das, auf das sie ewig gewartet haben, für andere ist nur eine weitere akademische (d. h. überflüssige) Lösung der Einstein-Gleichungen. Dasselbe gilt für eine weitere Alternative zum Schwarzen Loch, die einige Ähnlichkeiten zum Gravastern aufweist, nämlich dem Holostern (*Petri* 2003).

Auf diesem Gebiet muss deshalb sowohl seitens der Theorie, als auch seitens der Beobachtung einiges erforscht werden. Es ist jedenfalls eine heiße Spur, deren Verfolgung hilft, die Rätsel der Schwarzen Löcher zu lösen. Denn auch die klassischen Schwarzen Löcher haben Eigenschaften, die den Physikern Kopfzerbrechen bereiten - vor allem die Krümmungssingularität. Dieser 'Punkt unendlicher Krümmung' ist vielleicht nur ein Artefakt der klassischen Beschreibung mit der ART. Es gibt zwar die Singularitätentheoreme von *Roger Penrose* und *Stephen Hawking*, die die Existenz von Singularitäten erzwingen; doch diese Theoreme erfordern bestimmte Voraussetzungen. Der Gravastern enthält keine Singularität und steht damit in Widerspruch zu den Singularitätentheoremen. Disqualifiziert das den neuen Vorschlag? Oder signalisiert das vielmehr, dass die Singularitätentheoreme einer Überarbeitung bedürfen? Denn auch die Voraussetzungen der Theoreme kann man hinterfragen. Dieser Konflikt ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

8.13.11 Weitere Literatur

- ◇ *Mazur, P. & Mottola, E.*: Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes, Preprint: gr-qc/0109035
- ◇ *Cattoen, C., Faber, T. & Visser, M.*: Gravastars must have anisotropic pressures, Class. Quant. Grav. 22, 4189 (2005), Preprint: gr-qc/0505137
- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation

8.14 Gravitation

Die Gravitation (lat. *gravitas*: Schwere) ist eine der vier fundamentalen Kräfte in der Natur: die Schwerkraft.

8.14.1 Der Schwächling unter den Vieren

Diese Kraft ist von allen vier Grundkräften diejenige, die uns besonders vertraut ist. Die anderen Kräfte sind die elektromagnetische Kraft, starke und schwache Kraft - die beiden

letztgenannten spielen eine besondere Rolle im subatomaren Bereich und sind wichtig, um den Zusammenhalt der uns umgebenden Materie zu verstehen.

Vergleicht man die Stärken der vier Fundamentalkräfte der Physik, z. B. mithilfe der *Kopplungskonstanten*, so wird klar, dass die Schwerkraft **die schwächste aller Kräfte** ist. Aufgrund dieser Tatsache kommt ein Dachziegel, der von einem Haus fällt, nicht bis zum Mittelpunkt der Erde, sondern zersplittert auf dem Erdboden: die elektromagnetischen Kräfte zwischen den Atomen des Ziegels und des Bodens haben für eine plötzliche Abstoßung gesorgt, eine Kraft, die die Gravitation nicht überwinden konnte. Noch stärker als der Elektromagnetismus ist die starke Kraft, der es sogar gelingt, elektrisch gleichartig geladene Protonen in einem Atomkern zusammenzuhalten. Der starken Kraft, aber auch der schwachen Kraft (Radioaktivität), verdanken wir also die Vielfalt der chemischen Elemente.

8.14.2 Der Schwächling dominiert

Doch das Attribut schwach ist nicht gleichbedeutend mit unwichtig: Die Gravitation ist die dominante Kraft auf der ganz großen Längenskala - sobald wir von Astronomischen Einheiten, Lichtjahren oder gar Milliarden Parsec sprechen. Denn Gravitation und elektromagnetische Kraft haben eine **unendliche Reichweite**! Doch die Schwerkraft hat im Gegensatz zum Elektromagnetismus die Eigenschaft, dass sie sich **nicht abschirmen** lässt. Die Konsequenz ist:

Gravitation dominiert das Universum.

Sie ist es, die die großräumigen Strukturen formt: Sie lässt die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne tanzen, sie komprimiert massereiche Sterne am Ende ihres Daseins zu Schwarzen Löchern, und sie bringt sogar Galaxien und Galaxienhaufen zum Verschmelzen.

8.14.3 Aber was ist eigentlich Gravitation?

So vertraut uns die Schwerkraft im Alltag ist, so rätselhaft ist sie auch. Es ist keinesfalls leicht zu verstehen, was die **Natur der Gravitation** ist. Selbst im 21. Jahrhundert wissen Physiker und Astronomen zwar viel über die Schwerkraft, aber auch heute noch sind wir weit davon entfernt, alles verstanden zu haben. Ist Gravitation überhaupt eine Kraft?

In den nächsten Abschnitten knöpfen wir uns fast 2400 Jahre menschlichen Denkens vor, das sich als bedeutsam für das Verständnis der Schwerkraft zeichnete. Das ist sicherlich ein wenig Aufwand, doch *Gravitation* ist ein wesentlicher Begriff der Physik und somit auch dieses Lexikons. Am Ende der Lektüre steht hoffentlich eine Ahnung von dem, was Gravitation überhaupt ist.

Antiker Vordenker: Aristoteles

Zu einem gut dokumentierten Pionier der Schwerkraftforschung muss man griechischen Gelehrten *Aristoteles* (384 - 322 v. Chr.) rechnen. Aristoteles ist eigentlich eher bekannt als bedeutender Geisteswissenschaftler, als Schüler *Platons* und als Erzieher *Alexander des Großen*. Aristoteles versuchte jedoch auch die Bewegung von Sonne, Mond und den damals bekannten Planeten durch recht einfache Modelle zu erklären. Die **ruhende Erde war im Zentrum** dieses Modells (*geozentrisches Weltbild*), und um sie kreisten Sonne, Mond und Planeten. Der **Kreis** als vollkommene, geometrische Figur stellte die Grundlage dar,

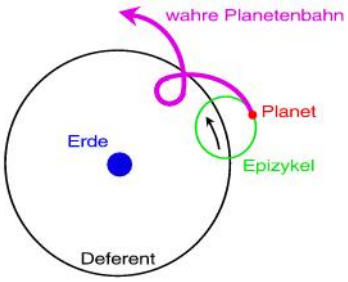

Abbildung 8.14: Illustration des Epizykel-Modells.

um die Bewegungen dieser Körper als Kreisbewegungen aufzufassen. Das erklärte die in etwa periodische Wiederholung der Bewegung der Gestirne. Denn war die Kreisbahn einmal beendet, begann der Zyklus von neuem. Die Sterne wurden dabei als bewegungslose Fixsterne betrachtet. Ohne präzise Messungen und Beobachtungen war dieses Modell konsistent mit den Naturbeobachtungen. Da es in Einklang mit den kirchlichen Lehren stand, überdauerte dieses Aristotelische Weltbild viele Jahrhunderte.

Aristoteles versuchte auch die **Bewegung fallender Körper** auf der Erde zu erklären. Der gerade Fallweg war für ihn ein Beleg dafür, dass die Erde ruhe. Diese ersten Überlegungen mit dem Prinzip 'Naturbeobachtung - erklärendes Modell' stehen bereits im Geiste der fast 2000 Jahre späteren Aufklärungsepoche (Experiment - Theorie). Aristoteles legt hier somit die ersten (wenn auch nicht ganz überzeugenden) phänomenologischen Modelle für die Schwerkraft vor.

Das Epizykel-Modell nach Ptolemäus

Eine kleine Modifikation erfuhr das Modell für die Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten durch den alexandrinischen Gelehrten *Claudius Ptolemäus* (100 - ca. 160 n. Chr.). Er ist der Autor des **ersten Standardwerks der Astronomie**, das unter dem Namen *Almagest* bekannt wurde. Auch das *Ptolemäische Weltbild* ist geozentrisch und fußt auf Kreisbahnen - allerdings wurde Komplexität dadurch ins Spiel gebracht, dass sich die Mittelpunkte von Kreisbahnen ihrerseits auf Kreisen, den so genannten *Deferenten*, bewegen. Der Kreis auf dem Deferenten heißt **Epizykel** (ἐπί κύκλος, grch. 'Überkreis'). Eine Illustration dieses einfachen, geometrischen Modells zeigt die Abbildung 8.14. Das Modell wahrte einerseits die Sonderrolle der Kreisfigur, die von den Aristotelikern als vollkommen angesehen wurde; andererseits vermag das Epizykel-Modell kompliziertere Bewegungen zu erklären: So war damals schon die *rückläufige Bewegung* (z. B. bei Mars) bekannt, die im Aristotelischen Weltbild vollkommen unverständlich war. Wie die Illustration zeigt, weist die resultierende Bahnform des Planeten Schleifen auf, in denen sich der Planet von der Erde aus gesehen rückläufig bewegt. Die Ptolemäische Epizykel-Theorie erklärte demnach die beobachtete Rückläufigkeit. Aber leider waren nicht alle Bewegungen der Himmelskörper mit Epizykeln widerspruchsfrei zu beschreiben.

Galilei - Gravitationsforscher und Pionier der Astronomie

Der italienische Physiker, Mathematiker und Philosoph *Galileo Galilei* (1564 - 1642) ist der erste, der systematisch und mathematisch die Gravitation erforschte. Galilei soll **Fallexperimente** am Schiefen Turm von Pisa durchgeführt haben, um seine Hypothese zu testen, ob Gewicht oder Dichte eines Körpers darüber entscheiden, wie schnell der Körper fällt. Galilei führte auch zahlreiche mechanische Experimente mit **Pendeln** und mit rollenden Objekten auf der **schiefen Ebene** durch. Er erklärte die **Bahn von Geschossen im Schwerefeld** durch eine Überlagerung zweier Bewegungen, nämlich gleichmäßig beschleunigter Fallbewegung und gleichförmig geradliniger Geschossbewegung (*Superpositionsprinzip*) und bewies die **Parabelbahn**.

Randbemerkungen: Bedeutsam und bekannt ist Galileo Galilei für seine astronomischen Entdeckungen: er verbesserte das Holländische Fernrohr, das *Hans Lipperhey* erfunden hatte und beobachtete 1610 erstmals die Krater des Mondes, die Zusammensetzung der Milchstraße aus Sternen und vier Monde des riesigen Gasplaneten Jupiter (*Galileiischen Monde*). Seine Entdeckung der Venusphasen bestätigte das Kopernikanische, heliozentrische Weltbild in der Beobachtung. Die Entrückung der Erde aus dem Zentrum der Welt und die Annahme ihrer Bewegung führte zur offenen Auseinandersetzung mit der katholischen Kirche. 1633 wurde Galilei des schweren Verdachts auf Ketzerei nach Rom vorgeladen, und im gleichen Jahr schwor er von der heliozentrischen Lehre ab. 1992 wurde Galilei von der katholischen Kirche durch Papst Johannes Paul II. offiziell rehabilitiert.

Albert Einstein, zu dem wir im Verlauf dieses Lexikoneintrags noch kommen werden, schrieb über Galilei:

> *Alles Wissen über die Wirklichkeit geht von der Erfahrung aus und mündet in ihr. Rein logisch gewonnene Sätze sind mit Rücksicht auf das Reale völlig leer. Durch diese Erkenntnis und insbesondere dadurch, dass er sie der wissenschaftlichen Welt einhämmerte, ist Galilei der Vater der modernen Physik, ja, der modernen Naturwissenschaft überhaupt geworden.*
> (entnommen aus *Die Klassiker der Physik*, S. 334, Verlag Hoffmann und Campe, 2004)

Newtonsche Gravitation

Die Erforschung der Gravitation hat durch den englische Universalgelehrten *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) einen gewaltigen Durchbruch erlangt. Newton ist für viele Leistungen berühmt geworden: die Begründung der Differential- und Integralrechnung, Entdeckungen in der Optik (Farbtheorie, Korpuskulartheorie des Lichts) und die heute nach ihm benannte Gravitationstheorie. Die **Newtonsche Gravitationsphysik** ist die erste Gravitationstheorie, die den Namen Theorie verdient, weil sie ein konsistentes, umfassendes Konzept und nicht bloß Phänomenologie oder Hypothese ist. Newton stellte diese Theorie in seinem Werk *Philosophiae naturalis principia mathematica* dar. Dieses Werk *Principia* ist das erste Standardwerk der theoretischen Physik überhaupt! Der Titel ist eine Replik auf die *Principia Philosophiae* von *René Descartes*.

Newton widmete sich 1665 der Optik und Gravitation. Die Geschichte mit dem vom Baum **fallenden Apfel**, der Newton am Kopf getroffen und ihn zur Gravitationstheorie inspiriert haben soll, ist wohl ein Mythos - Newton schrieb lediglich, dass ein fallender Apfel ihn veranlasste, über Gravitation nachzudenken. 27jährig wurde Newton (auf Empfehlung des Vorgängers dieses Amts) Lukasischer Professor der Mathematik - ein Lehrstuhl der Universität Cambridge, den heute übrigens *Stephen Hawking* inne hat. Newton kannte die astronomischen

Abbildung 8.15: Inspirierte Fallobst zur Gravitationsforschung?.

Beobachtungen von *Johannes Kepler* und dessen Entdeckung, dass die Planeten sich auf Ellipsenbahnen um die Sonne bewegen. 1666 begann Newton nach einer physikalischen Erklärung dieser rein empirischen Kepler-Gesetze zu suchen. Das zweite Keplersche Gesetz (*Flächensatz*) konnte er 1679 dadurch erklären, dass es eine **anziehende Zentralkraft** geben müsse, die von der Sonne ausgehe.

Ein Treffen dreier Mitglieder der *Royal Society* im Jahre 1684 sollte zum Schlüsselereignis werden: Hier trafen sich Newtons Widersacher *Robert Hooke*, der Astronom *Edmond Halley* und der Architekt *Christopher Wren*. Sie diskutierten über eine Kraft, die proportional zum umgekehrten Abstandsquadrat sei und die Planetenbewegung bestimme. Angeregt durch diese Diskussion fragte Halley bei Newton nach der Bahnform eines Himmelskörpers, die aus diesem Kraftgesetz resultiere. Newton hatte diese Fragestellung bereits Jahre zuvor berechnet und wusste, dass es eine Ellipsenbahn sein müsse. Die detaillierte Ausarbeitung dieser Rechnung mündete schließlich in eine anderthalbjährige Schaffensphase Newtons und in die Publikation der *Principia* 1687. Das Buch I der *Principia* enthält die drei Bewegungsgesetze, die heutzutage als *Newtonsche Gesetze* gelehrt werden, nämlich das **Trägheitsgesetz**, das **dynamische Grundgesetz** und das **Reaktionsprinzip** (*actio = reactio*). Das in dieser Gleichung

$$F = \frac{dp}{dt}$$

dargestellte dynamische Grundgesetz ist in der Schulphysik viel bekannter in der Form $\mathbf{F = m\ a}$, aber dieser Fall gilt nur, falls die Masse zeit*un*abhängig, $\mathbf{m \neq m(t)}$, ist. Das ist im Allgemeinen aber nicht der Fall (z. B. bei der so genannten *Raketengleichung*: eine fliegende Rakete verliert Treibstoff und daher Masse), so dass das Gesetz als zeitliche Ableitung des Impulses **p** formuliert werden muss. Das Buch II ist ein Lehrbuch über Strömungsmechanik. Schließlich stellt Newton in Buch III sein **Gravitationsgesetz** vor

$$F = \mathrm{G}\ \frac{Mm}{r^2}$$

und demonstriert die Gültigkeit dieser Gravitationstheorie anhand der Bewegungen von Planeten und Kometen. Die Newtonsche Theorie besagt auch, dass sich **Gravitation instantan** ausbreite, d. h. ohne Laufzeitverzögerung. Außerdem haben Zeit und Raum einen **absoluten Charakter** in der Newtonschen Physik. Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, dass sich diese Eigenschaften der Gravitation als nicht haltbar erweisen und die Newtonsche Gravitation zur Einsteinschen Gravitation verallgemeinert werden muss.

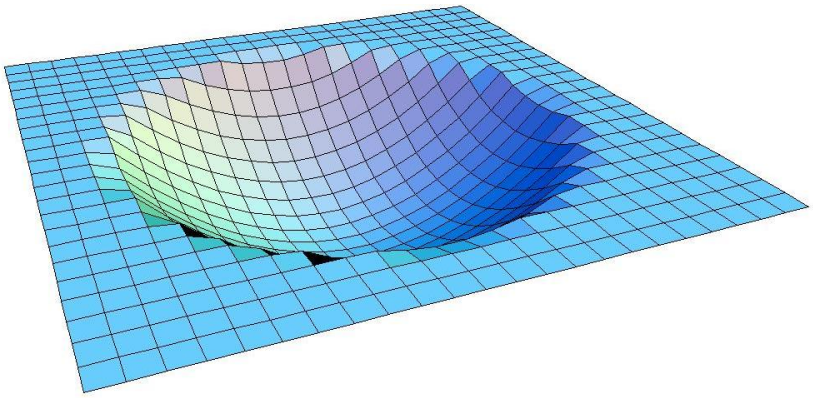

Abbildung 8.16: einfache Darstellung einer gekrümmten Raumzeit.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi\, T_{\mu\nu}$$

Abbildung 8.17: Feldgleichung der ART.

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

Im Jahr 1916 präsentierte *Albert Einstein* (1879 - 1955) eine vollkommen neuartige Sicht auf die Gravitation. In diesem Jahr publizierte er die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), eine (unquantisierte) Gravitationstheorie, die die Gravitation nicht als Kraft, sondern als **geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit** auffasst. Dieser Gravitationstheorie vorangegangen war die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), die keine Gravitationstheorie darstellt, die jedoch die revolutionäre Neudefinition der Begriffe Energie, Masse, Zeit und Raum einleitete. Gemäß Einstein sind Raum und Zeit miteinander verknüpft zu einem vierdimensionalen Gebilde: der Raumzeit. Während die Raumzeit in der SRT noch flach ist, wird sie in der ART gekrümmt. Wie man sich vereinfacht in einer zweidimensionalen Variante eine **gekrümmte Raumzeit** vorstellen kann, zeigt Abbildung 8.16. Die 'Beule' in dieser 2D-Raumzeit kommt durch Massen zustande. Einstein hat bereits in der SRT erkannt, dass Energie und Masse äquivalent sind, was in der berühmten Formel $E = mc^2$ zusammengefasst wird. Die Konsequenz: Massen und alle Formen von Energie verursachen 'Beulen' in der Raumzeit. Eine (kräftefreie) Bewegung durch die Raumzeit ist nun nicht in beliebiger Form möglich, sondern nur entlang bestimmter Kurven, die in der ART **Geodäten** genannt werden. Die Geodäten 'schlängeln' sich durch die 'verbeulte Raumzeit' - wie das genau geschieht, diktieren Rechengesetze der Differentialgeometrie. Die Bewegung entlang der Geodäten nehmen wir als Gravitation war. Wir bewegen uns also täglich unter dem Einfluss der gekrümmten Raumzeit! Die Abstraktionsleistung ist gewaltig, um dieses neue Bild der Gravitation halbwegs fassen zu können. Niemand kann sich eine vierdimensionale, gekrümmte Raumzeit vorstellen, aber unterdrückt man einige Dimensionen, so lassen sich zumindest **Raum-Zeit-Diagramme** zeichnen, die beim Verständnis helfen. Einsteins neue Gravitationstheorie lässt sich in eine einzige, aber leider komplizierte Formel fassen: die **Feldgleichungen der ART**. Es ist die übersichtliche Gleichung in Grafik 8.17 (hier zur

Vereinfachung ohne kosmologische Konstante Λ). In dieser knappen Form besagt die Formel direkt, das die gekrümmte Raumzeit, die in **G** steckt, von Masse und Energie, die in **T** stecken, hervorgerufen wird; die Gleichung enthält weiterhin den Aspekt, dass die Beulen der Raumzeit die Bewegung diktieren. Allerdings täuscht die Einfachheit dieser Formel! Hinter den Symbolen **G** und **T** verbergen sich mathematische Objekte, die **Tensoren** genannt werden. Genauer gesagt ist **G** der Einstein-Tensor und **T** heißt Energie-Impuls-Tensor. Im Allgemeinen sind diese Objekte sehr kompliziert, bestehen aus mehreren Komponenten und variieren von Raumzeitpunkt zu Raumzeitpunkt.

Ein Gravitationsfeld der Newtonschen Physik wird nun also durch eine Raumzeit in der Einsteinschen Physik ersetzt. Die Raumzeit ist Lösung von Einsteins Feldgleichung und eindeutig beschrieben durch die Metrik (den metrischen Tensor **g**) oder alternativ durch das Linienelement. Die Gravitationskraft Newtons wird abgelöst von den Christoffel-Symbolen, dem Riemann-Tensor und anderen mathematischen Größen der ART (1-Formen, 2-Formen, Killing-Felder, Kretschmann-Skalar, Ricci-Tensor, Ricci-Skalar etc.). Häufig ist von Interesse wie sich Testobjekte durch eine gekrümmte Raumzeit bewegen. Um dieses Problem zu lösen muss die **Geodätengleichung** gelöst werden. Für Licht heißt dieses Verfahren relativistisches Ray Tracing.

Raumzeiten sind im Allgemeinen auch *dynamisch*, d. h. sie verändern ständig ihre Krümmungseigenschaften. Das geschieht insbesondere bei **Gravitationswellen**, die sich ebenfalls mit Einsteins Theorie beschreiben lassen. Es handelt sich um Beulen in der Raumzeit, die sich mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c ausbreiten. Das ist ein wichtiger Unterschied zur Newtonschen Physik: Gravitation breitet sich in Einsteins Theorie nicht beliebig schnell, sondern exakt mit c aus.

Einsteins ART hat sich vielfach in Experimenten bewährt. Eine Reihe experimenteller Tests und Erfolge sowie die Theorie selbst werden im Lexikoneintrag Allgemeine Relativitätstheorie in vielen Einzelheiten vorgestellt.

8.14.4 relativistische Astrophysik

Einsteins Theorie hat auch die Astronomie stark geprägt: Viele astrophysikalische Vorgänge können nur mit der Einsteinschen Gravitation zufrieden stellend behandelt werden. Der Gravitationskollaps zu einem kompakten Objekt (z. B. Neutronensterne) ist ein Beispiel dafür. In der Akkretionsphysik wurden Modelle etabliert, die auf der ART basieren. Aber auch auf der ganz großen Raumskala, ist die Einsteinsche Theorie die richtige Wahl: die Kosmologie ist relativistisch. So kann auch das komplette Universum als Lösung der Einsteinschen Feldgleichung aufgefasst und mit der Robertson-Walker-Metrik beschrieben werden. Die Friedmann-Weltmodelle, die aus der ART hervorgehen, beschreiben exzellent viele Beobachtungen der experimentellen Kosmologie (siehe dazu kosmische Hintergrundstrahlung, Supernovae Typ Ia). Eine Reihe beobachteter Phänomene sind im Rahmen der Newtonschen Gravitation nicht zu verstehen, z. B. gravitative und kosmologische Zeitdilatation, Rotverschiebung und Gravitationsrotverschiebung sowie Frame-Dragging.

8.14.5 kosmologische Bedeutung der Gravitation

Die Bedeutung der Gravitation für das ganze Universum begründet sich in zwei Eigenschaften, die eingangs schon erwähnt wurden: Gravitation hat im Prinzip eine **beliebige Reichweite**, und sie ist **nicht abzuschirmen**. Aufgrund der ersten Eigenschaft kann Gravitation auch

über extrem große Distanzen wirken - bis Milliarden von Lichtjahren, also Skalen, die so groß sind, wie der Kosmos selbst. Aufgrund der zweiten Eigenschaft, Nichtabschirmbarkeit, gibt es kaum eine Möglichkeit Gravitation aufzuhalten (es sei denn durch Antigravitation - dazu mehr im nächsten Abschnitt). Die Konsequenz ist das, was Astrophysiker die **gravitative Instabilität** nennen. Anschaulich kann man das so beschreiben, dass die Materie durch den Einfluss der Gravitation anfängt zu 'klumpen': Wird die Jeans-Masse lokal für eine Massenansammlung überschritten, so setzt der Gravitationskollaps ein. Später fragmentiert dieser Klumpen zu kleineren. Diese Szenarien sind wesentlich, um die Herkunft der **großräumigen Struktur** im Kosmos zu begreifen. Aus der anfänglichen Verteilung des 'Urgases', das in der primordialen Nukleosynthese entstand, bildete sich die erste Sterngeneration (Population III) durch gravitative Instabilitäten. Durch den Einfluss der Gravitation entstanden daraus die ersten Galaxien - so lief es zumindest in einem **hierarchischen Wachstumsszenario** ab.

8.14.6 Antigravitation

Die relativistische Kosmologie hat eine Form der Gravitation hervorgebracht, die feuchte Augen bei Science-Fiction-Fans hervorruft: **Antigravitation**. Um den Zusammenhang zu erklären, müssen wir einen Blick auf die moderne Kosmologie werfen. Die Dynamik der bereits angesprochenen Friedmann-Weltmodelle wird von den Energieformen im Kosmos bestimmt. Die 'normale', baryonische Materie, aus der wir auch selbst bestehen, ist dabei eine Energieform, dessen Bedeutung jedoch so gut wie irrelevant ist. Eine andere Materieform, die Dunkle Materie, ist viel häufiger im Universum anzutreffen. Sie beeinflusst nicht nur die Dynamik und Entwicklung von Galaxien, sondern auch vom Kosmos insgesamt. Ihr relativer Anteil beträgt etwa ein Drittel. Was sich allerdings konkret hinter der Dunklen Materie verbirgt ist ein Rätsel - die aktuellen Vorstellungen werden im Eintrag Dunkle Materie präsentiert.

Kommen wir nun zum entscheidenden Teil: die verbleibenden zwei Drittel der Energie im Universum gehen auf das Konto der **Dunklen Energie**. Was genau hinter dieser mysteriösen, kosmischen Zutat steckt, ist ein brisantes und hochaktuelles Forschungsgebiet. Es ist keine konkrete Materieform, sondern die Physiker favorisieren, dass sich das überall im Universum fein verteilte Quantenvakuum selbst als kosmologisch relevante Energieform manifestiert. Das astronomische Beobachtungsfaktum ist eine **beschleunigte Expansion** des Kosmos. Im Standardmodell der Kosmologie wird das durch die Existenz der Dunklen Energie erklärt (Alternativen werden im Eintrag Dunkle Energie aufgezeigt).

Das Besondere an der Dunklen Energie ist ihre Zustandsgleichung, weil sie einen **negativen Druck** aufweist. Das klingt recht unphysikalisch, aber vermag die Beobachtungen erstaunlich gut zu erklären. Der so genannte w-Parameter liegt laut astronomischen Beobachtungen nahe bei **w = -1**. Damit wird aus einer ganzen Palette von Modellen für Dunkle Energie ein bestimmtes von der Natur offensichtlich bevorzugt, und zwar die **kosmologische Konstante**, die niemand Geringeres als Einstein 1917 eingeführt hat. Sie hat gerade den passenden w-Parameter - und sie variiert zeitlich nicht, was ebenfalls zu aktuellen Beobachtungen an weit entfernten, explodierenden Weißen Zwergen passt. Eine solche Zustandsgleichung sorgt für eine Expansion des Universums, die als Antigravitation aufgefasst werden darf. Denn Dunkle Energie wirkt der Gravitation entgegen. Anhand der Friedmann-Gleichung kann man zeigen, dass zu späteren Entwicklungsepochen hin, der Einfluss der antigravitativen Dunklen Energie gewinnt. Die aktuelle Datenlage sagt eine ewige und immer schnellere

Expansion des Universums voraus. Am Ende steht ein **kalter Kosmos**, in dem vermutlich nur noch Schwarze Löcher (mit unterschiedlichen Massen und Drehimpulsen) und vielleicht noch Schwarze Zwerge existieren.

8.14.7 Schwerkraft auf Quantenniveau

Allerdings hat auch die Einsteinsche Gravitation ihre Grenzen. Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgangen sein, das die ART mit dem Attribut *unquantisiert* versehen wurde. Das bedeutet, dass die Konzepte der zweiten großen, physikalischen Theorie des 20. Jahrhunderts, der Quantentheorie, keine Beachtung in Einsteins Theorie gefunden haben. Das geschah nicht aus Ignoranz: Gerne hätte Einsteins eine solch umfassende Feldtheorie erfunden; tatsächlich arbeitete er in seinen letzten Lebensjahren an dieser übergeordneten Theorie - doch diese Herausforderung war selbst für Einstein zu groß.

Eine solche quantisierte Gravitationstheorie wird mit dem Etikett **Quantengravitation** versehen. Die Motivation dafür ist, das Quanteneffekte auch bei gravitativen Vorgängen wichtig werden, nämlich dann, wenn **starke Gravitation und kleine Längenskala** zusammenkommen. Wo passiert denn so etwas in der Natur? Es geschieht bei Objekten, die von der Gravitation dominiert werden und die sehr kompakt sind, nämlich bei **Schwarzen Löchern**. Laut Einsteins ART lauert in jedem Schwarzen Loch ein punktförmiges Objekt, in dem die Krümmung der Raumzeit ins Unermessliche wächst. Diese phantastischen Orte heißen Krümmungssingularitäten (und sind streng von den Koordinatensingularität zu unterscheiden!). Aber gibt es tatsächlich Punkte in der Natur? Die Konzepte der Quantentheorie negieren das. Die Physik Schwarzer Löcher ist eine erste Motivation, um sich an eine Ausarbeitung einer Quantengravitation zu wagen.

Eine zweite Motivation liefert die Kosmologie des frühen Universums: die Hochenergiephysiker haben herausgefunden, dass unsere Welt der vier Naturkräfte nicht im jungen Kosmos anzutreffen war. Das Temperaturmilieu führte dazu, dass einige Kräfte miteinander 'verschmolzen': Je heißer es ist, umso weniger fundamentale Naturkräfte sind vorhanden. Der 'Gipfel' dieser **Unifikation** soll als Urkraft in der Planck-Ära vorgeherrscht haben. Die Gravitation sei die erste gewesen, die sich mit Expansion und dadurch bedingter Abkühlung, von der Urkraft abgespalten haben soll. Die Fachleute nennen diesen Übergang **Symmetriebrechung**. Nach der ersten Symmetriebrechung lagen zwei fundamentale Naturkräfte vor: Gravitation und X-Kraft in der so genannten GUT-Ära. Die Frage, die die Hochenergie- und Teilchenphysiker antreibt, ist, wie man die Gravitation mit den anderen Quantenkräften *einheitlich* als Quantenfeldtheorie beschreiben könnte.

Im Quantenbild ist die Gravitation weder Kraft, noch gekrümmte Raumzeit: sie ist Eichboson. So nennen die Quantenfeldtheoretiker quantisierte 'Botenteilchen', die die Kraft vermitteln. Im Falle der Gravitation hat dieses Austauschteilchen auch einen Namen, nämlich **Graviton**. Die Eigenschaften der Gravitation verlangen einige Eigenschaften des Gravitons, z. B. dass es Spin 2 haben *muss*. Helle Aufregung ist daher entstanden, als in den 1970er Jahren eine Theorie entdeckt wurde, die Spin-2-Teilchen enthält. Diese Theorie war eine der ersten Varianten der **Stringtheorien**. Damit wurden die Stringtheorien schlagartig zum interessantesten Kandidaten einer Quantengravitation. Auch im 21. Jahrhundert gehören die Stringtheorien zu den aktivsten Gebieten der theoretischen Physik. Wie unter dem Eintrag Stringtheorien erläutert wird, steckt diese Forschung in einem Wechselbad aus Erfolgen und Zweifel. Eine Problematik besteht beispielsweise darin, dass bis heute dieses Botenteilchen der Gravitation nicht experimentell entdeckt wurden. Auf der Erfolgsseite kann die Stringtheorie

eine moderne Sichtweise auf Gravitation und Eichung verbuchen: So wurde die **AdS/CFT-Korrespondenz** entdeckt, die auf einen tief liegenden Zusammenhang zwischen Gravitation und Teilchentheorien hinweist. Inzwischen wurde das Prinzip verallgemeinert und wird zurzeit erforscht (*gauge/gravity duality*). Weitere Erfolge sind Modelle die sich unter der Bezeichnungen **Branenwelt** versammeln. Diese Modelle, beispielsweise die Randall-Sundrum-Modelle oder das Zyklische Universum, haben ganz erstaunliche Eigenschaften und vermögen bislang Unverstandenes (Koinzidenzproblem, Schwäche der Gravitation, Kleinheit der kosmologischen Konstante, Ursache des Urknalls etc.) auf sehr elegante Weise zu erklären.

In den 1980er Jahren ist eine andere Variante der Quantengravitation hinzugekommen, die einen etwas anderen Ansatz verfolgt. Nah an den Konzepten der Einsteinschen Gravitation (siehe z. B. unter dem Zungenbrecher Diffeomorphismusinvarianz), betont die **Loop-Quantengravitation** (LQG) den geometrischen Charakter der Gravitation. Im Rahmen dieser Theorie ist die Quantisierung der Raumzeit in so genannte Wilson-Loops tatsächlich gelungen. Mit den Konzepten der LQG können in der Tat die Singularitäten der ART beseitigt werden! Das gilt sowohl für die Krümmungssingularität Schwarzer Löcher, als auch für die Urknallsingularität. Die Theorie und ihre Prognosen werden unter dem Eintrag Loop-Quantengravitation vorgestellt.

Stringtheorien und Loop-Quantengravitation sind die beiden bedeutenden Anwärter, die das Potenzial haben, die Einsteinsche Gravitation zu erweitern. Der Skeptiker mag einwenden, dass es bislang keine überzeugenden Hinweise aus Experimenten gibt, die diesen Quantengravitationen den Status einer bewährten Gravitationstheorie verleihen würden. Das ist der gravierende Unterschied zu den Theorien von Newton und Einstein. Die Gravitationsforscher bleiben jedoch sehr aktiv, um diesen Nachweis zu erbringen. Wichtige, neue Impulse werden von der Teilchenbeschleunigeranlage der modernsten Generation erwartet: dem *Large Hadron Collider* (**LHC**).

8.14.8 Approximatives, Spekulatives & Exotisches

Mit dem bisher Gesagten könnte der Eintrag über Gravitation eigentlich schließen, aber es sollte auch etwas über Gravitationstheorien abseits des Mainstreams gesagt werden. Im Folgenden sollen **approximative und alternative Gravitationstheorien** knapp vorgestellt werden.

Gravitationstheorien mit Torsion

Bei den Gravitationstheorien mit Torsion verschwindet der Torsions-Tensor nicht. Die ART hingegen ist *torsionsfrei*, was *symmetrische* Christoffel-Symbole zur Folge hat. Bei Gravitationstheorien mit Torsion handelt man sich also zusätzliche Terme ein, die es in der ART gar nicht gibt. Das gestaltet diese Alternativen komplizierter als die ART.

Fernparallele Gravitation

Fernparallele Gravitation oder kurz **Fernparallelismus** wurde 1928 von Einstein als neue Gravitationstheorie *mit* Torsion erfunden. In dieser Theorie ist Schwerkraft nicht eine Folge der Krümmung einer Raumzeit, sondern vielmehr eine Folge der Verdrillung der Raumzeit (Torsion). Die Gravitationsforscher konnten zeigen, dass Fernparallelismus und ART als *gleichwertige Formulierungen* der Gravitation aufgefasst werden können.

Aktuell publizieren Gravitationstheoretiker die entsprechenden fernparallelen Pendants zu den gewohnten Lösungen der Feldgleichungen der ART.

In der modernen Gravitationsphysik wird außerdem versucht, noch andere Formen des Fernparallelismus zu konstruieren, die *nicht* als Analog der ART aufgefasst werden können. In diesen fernparallelen Gravitationstheorien (engl. *teleparallel gravity*) können völlig neue Einsichten in die Natur der Schwerkraft gewonnen werden. Die Hoffnung ist, auf diesem Wege eine Gravitationstheorie zu finden, die der Einsteinschen Theorie übergeordnet ist oder interessante Querverbindungen zu Eich-, Feld- und Quantengravitationstheorien ziehen zu können.

Skalar-Tensor-Theorien

Bei den Skalar-Tensor-Theorien liegt die Idee zugrunde, dass neben dem metrischen Tensor ein *weiteres* **Skalarfeld** vorhanden ist. Dieses Feld koppelt an den Krümmungsskalar (*Ricci-Skalar*), aber nicht an den metrischen Tensor. Die ART kann aus einem Wirkungsfunktional abgeleitet werden, das in der Literatur *Einstein-Hilbert-Wirkung* genannt wird. Hier fehlt ein Skalarfeld. Das Wirkungsfunktional der Skalar-Tensor-Theorien enthält entsprechend zusätzliche Terme. Das Skalarfeld kann nun mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgestattet werden: es kann in jedem Raumzeitpunkt konstant sein, oder es kann variieren. Im Falle einer Variation kann davon gesprochen werden, dass die Newtonsche Gravitationskonstante G nun *keine fundamentale Naturkonstante* mehr ist. Es gibt viele Varianten der Skalar-Tensor-Theorien. Die bekannteste ist die **Brans-Dicke-Theorie**.

MOND-Theorie

Die MOND-Theorie (siehe dort für Details), die 1983 von dem israelischen Physiker *Mordehai Milgrom* erfunden wurde, ist eine Gravitationstheorie, die das Newtonsche Gravitationsgesetz um einen zusätzlichen Faktor korrigiert. Dieser Faktor hängt von der Beschleunigung ab und vermag u. a. das Rotationsverhalten vieler Spiralgalaxien sehr gut zu erklären - erstaunlicherweise *ohne* Dunkle Materie.

TeVeS

TeVeS stellt gewissermaßen einen 'Ableger' von MOND dar, weil sie aus der relativistischen Erweiterung von MOND entdeckt wurde. *Jacob D. Bekenstein* hat 2004 diese ***Te**nsor-**Ve**ktor-**S**kalar-Gravitationstheorie* formuliert, die sozusagen noch einen Schritt weiter geht als die Skalar-Tensor-Theorien, weil ein zusätzliches Vektorfeld enthalten ist. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass TeVeS viele Beobachtungen der modernen Kosmologie gleichermaßen zu erklären vermag wie die Einsteinsche Theorie. Dennoch ist diese recht neue Theorie umstritten und befindet sich erst am Anfang eines langwierigen Evaluierungs- und Testprozesses.

Post-Newtonsche Approximation

Die so genannte Post-Newtonsche Approximation der Einsteinschen Gravitation wird gewonnen, wenn man den Grenzübergang $v/c \ll 1$ von der ART zur Newtonschen Physik durchführt, **aber Terme der linearen Ordnung v/c** belässt. Pseudo-Newtonsche (**PN**) Gravitation ist so etwas wie eine 'Zwittergravitation zwischen Einstein und Newton'. Sie

bietet sich insbesondere in der Himmelsmechanik an, wenn hinreichend gute Resultate für Bahnbewegungen gewünscht sind, aber nicht voll relativistisch gerechnet werden kann oder soll. Die Ermittlung der approximativen Gravitationsgleichungen sind zwar recht aufwendig, können aber sehr bequem in Computercodes zur Lösung des Schwerkraftproblems implementiert werden. So werden PN-Codes gerne zur Berechnung von Phänomenen mit Gravitationswellen herangezogen. Zur Erhöhung der Genauigkeit und damit zur noch besseren Annäherung an die Einsteinsche Gravitation, kann die entsprechende Ordnung v/c einfach erhöht werden, z. B. PN 5. Ordnung.

Eine analoge Methodik wird von Gravitationsforschern zur Approximation anderer Gravitationstheorien, z. B. einer Skalar-Tensor-Theorie, durchgeführt. Das unterstreicht die Universalität und Brauchbarkeit des Näherungsverfahrens.

Pseudo-Newtonsche Gravitation

Im Rahmen der Pseudo-Newtonschen Gravitation wird eine Annäherung an die Einsteinsche Gravitationsphysik angestrebt. Punktmassen werden relativistisch mit der Schwarzschild-Lösung beschrieben. Der pseudo-Newtonsche Ansatz besteht in einem 1980 von *B. Paczynski* und *P. Wiita* vorgeschlagenen Modell, das das Schwerefeld einer Punktmasse nachahmt. Dazu wird nicht die typische und mathematisch aufwendige Tensorschreibweise benutzt, sondern die Potentialformulierung, die anmutet wie eine Newtonsche Gravitationsphysik. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass nicht das übliche Newtonsche Potential verwendet wird, sondern das so genannte **Paczynski-Wiita-Potential**. Dieses neue Potential skaliert mit dem Schwarzschild-Radius und vermag entsprechend bis zu einem gewissen Grad die Gravitationseffekte um eine Punktmasse und insbesondere die Effekte nahe einem statischen Schwarzen Loch zu simulieren. Die Genauigkeit mit der die relativistischen Effekte imitiert werden können, beträgt etwa 10-20%, sofern Radien außerhalb der marginal stabilen Bahn (hier bei sechs Gravitationsradien) betrachtet werden.

Gravitation mit Extradimensionen

Eine interessante Variante einer Gravitationstheorie, sind die **Feldtheorien mit Extradimensionen**. Es handelt sich um die Theorien, die weitere Raumdimensionen, nicht jedoch weitere Zeitdimensionen zulassen. Das besondere ist, dass die Gravitation auch in den höheren Raumdimensionen wirkt - nicht jedoch die anderen Naturkräfte. Damit erklären Gravitationstheorien mit zusätzlichen Raumdimensionen, die in der modernen Sprache auch **Branenmodelle** genannt werden, sehr elegant das Hierarchieproblem in der Physik.

Der historisch erste Vorschlag war die **Kaluza-Klein-Theorie**, die als 5D-Feldtheorie auf eine Vereinheitlichung des Elektromagnetismus und der ART abzielte. Die Theorie scheiterte damals, enthält aber Aspekte, die auch heute wieder (im Rahmen der Stringtheorien) interessant sind, z. B. die Kompaktifizierung der Extradimensionen. Interessanterweise können einige Theorien mit Extradimensionen auf die Form von Skalar-Tensor-Theorien gebracht werden. Mit anderen Worten: die Eigenschaften der Extradimensionen können als Skalarfeld identifiziert werden. Beispiele dafür sind das Radion bzw. Dilaton.

Im Wissensportal werden folgende Branenmodelle im Detail vorgestellt: das **ADD-Szenario**, die **Randall-Sundrum-Modelle**, das **DGP-Szenario** und das **Zyklische Universum**. Alle Modelle geben wertvolle, neue Einsichten in physikalisches Neuland. Allerdings ist bislang nicht klar, ob in der Natur tatsächlich diese Form der Physik realisiert

ist. Eventuell bringt die Klärung der Pioneer-Anomalie diesbezüglich neue Erkenntnisse.

f(R)-Gravitation

Die f(R)-Gravitation (siehe diesen Eintrag für Einzelheiten) ist eine Modifikation von Einsteins ART. Im Wirkungsfunktional werden dabei **nichtlineare Zusatzterme** berücksichtigt, die eine beliebige Abhängigkeit von dem **Krümmungs- oder Ricci-Skalar** R haben können - daher die Bezeichnung f(R). Die Dynamik der Gravitation wird bestimmt von einer Feldgleichung, die aus diesem neuen Wirkungsfunktional resultiert. Die Nichtlinearitäten sorgen dabei für neue Effekte, dass beispielsweise die Gravitation auch bei schwachen Krümmungen wesentlich oder sogar zu einer beschleunigten Ausdehnung der Raumzeit führen kann. Der letztgenannte Aspekt macht die f(R)-Modell interessant für die Kosmologie, weil ein f(R)-Szenario die Rolle der Dunklen Energie übernehmen könnte. Derzeit werden viele **f(R)-Familien** vorgestellt, analysiert, falsifiziert und ihre Bedeutung für die Gravitationsforschung, Astrophysik und Kosmologie ausgelotet. Damit diese Alternative sich etablieren kann, sind noch viele erfolgreich absolvierte Bewährungsproben notwendig.

8.14.9 Bedeutung der Gravitation für den Menschen

Will man die Milliarden dauernde Entwicklung des Universums auf den Punkt bringen, so stellt man Folgendes fest: Wir erfahren Gravitation nicht nur täglich als Kraft, die uns am Erdboden hält, sondern ihre sehr subtilen und einzigartigen Eigenschaften, die sie unter allen Naturkräften auszeichnen, sind überhaupt dafür verantwortlich, dass wir hier sind! Die Auswirkungen der Gravitation auf unser Leben manifestieren sich in vielen Aspekten: Die Leben spendende Energie der Sonne wäre ohne Gravitation gar nicht vorhanden; der Lauf der Gestirne, der unsere kulturell verfestigten Zyklen wie Tag, Monat und Jahr formte, ist ebenfalls ein Produkt der Gravitation; ohne Gravitation hätte die Erde keine Atmosphäre, deren Gase die Evolution des Lebens mit einer phantastischen Vielfalt bereichert haben - diese Liste ließe sich weiter fortsetzen. Wir sollten daraus den Schluss ziehen, etwas bodenständiger zu werden und nicht abzuheben, sondern dem gewichtigen Einfluss der Gravitation in Demut, aber nicht mit Schwermut, zu begegnen.

8.14.10 Literaturtipps

- ◇ C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler: **Gravitation**, Freeman San Francisco, 1973
- ◇ **Die Klassiker der Physik - $\mathbf{E = mc^2}$**, Verlag Hoffmann und Campe, 2004

8.15 Gravitationskollaps

Im Allgemeinen versteht man darunter in der Astrophysik den Zusammenfall eines massiven Objektes unter der Wirkung der eigenen Schwerkraft.

8.15.1 Schau 'mal, was da kollabiert

So kollabiert im Rahmen der Sternentwicklung eine kalte Gas-, Staub- und/oder Molekülwolke bei Erreichen einer kritischen Masse - der so genannten Jeans-Masse - zu einem Protostern.

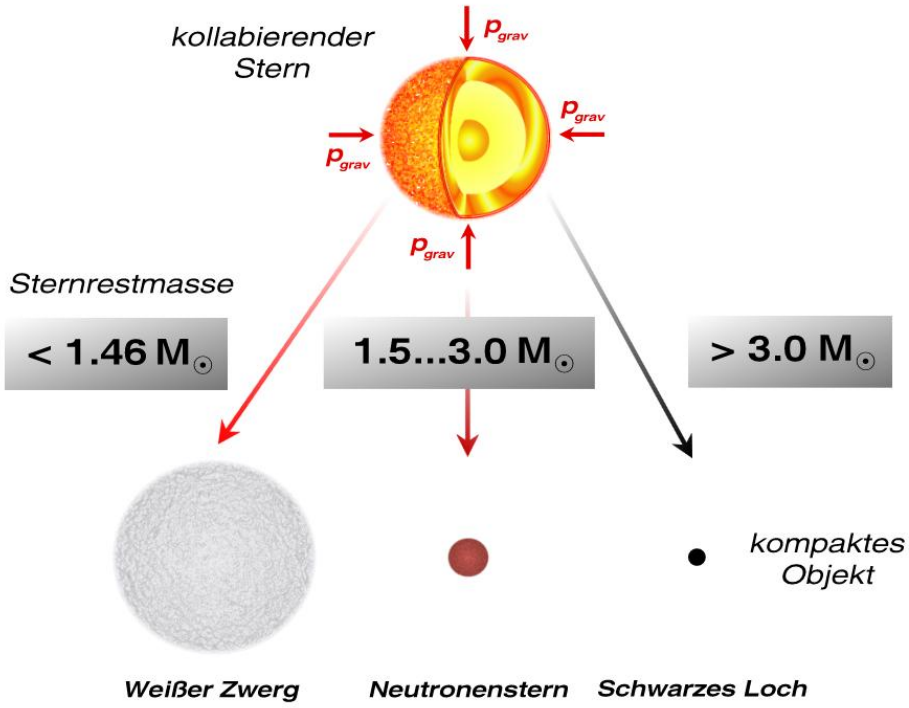

Abbildung 8.18: Ende eines Sterns in Abhängigkeit seiner Masse.

In 'normalen' Sternen wird der Gravitationsdruck durch Gas-, Zentrifugal- und Strahlungsdruck kompensiert: Der Stern steht im hydrostatischen Gleichgewicht. Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Gravitationskollaps 'sterbender' Sterne. So bezeichnen Astronomen das Ende der normalen Sternphase und den Übergang zu einem kompakten Objekt. Der Kollaps setzt dann ein, wenn die inneren, thermonuklearen Fusionsprozesse enden und das nukleare Feuer erlischt. Der Reststern fällt im freien Fall unter der Wirkung der Eigengravitation in sich zusammen. Zunächst gewinnt der Gravitationsdruck die Oberhand, kann aber womöglich gestoppt werden.

8.15.2 Die Masse macht's

Was mit dem kollabierenden Stern geschieht, hängt von seiner **Masse und Zusammensetzung** ab, wie Abbildung 8.18 zusammenfasst. Im Gravitationskollaps wird die Materie mehr und mehr verdichtet. Dabei kann sie ihre Eigenschaften entscheidend verändern. Physiker nennen diese meist sprunghaften Änderungen **Phasenübergänge**. *Phase* ist ein Begriff der Thermodynamik (Wärmelehre). Beispiel eines simplen, aus dem Alltag bekannten Phasenübergangs ist kochendes Wasser: Bei Raumtemperatur flüssiges Wasser - die flüssige Phase - kocht bei etwa 100 Grad Celsius und verdampft - in die gasförmige Phase. Ähnliches geschieht bei den Phasenübergängen kollabierender Sternmaterie.

8.15.3 Endzustand 1: Weißer Zwerg

Aufgrund des Pauli-Prinzips der Quantentheorie können Teilchen mit halbzahligem Spin, die Fermionen, nicht beliebig stark verdichtet werden. Dies betrifft zunächst die Elektronen in der kollabierenden Sternmaterie, die fermionisch sind. Das Pauli-Verbot sorgt bei hohen Dichten für den **Entartungsdruck der Elektronen**. Wiegt die Kollapsmaterie nicht mehr als 1.46 Sonnenmassen (mit einer leichten Abhängigkeit von der Zusammensetzung), so kann der Entartungsdruck dem Gravitationsdruck standhalten und das System ins Gleichgewicht bringen! Die gerade erwähnte kritische Massengrenze heißt Chandrasekhar-Masse nach dem indischen Astrophysiker, der sie entdeckte. Die so stabilisierten, stellaren Objekte heißen Weiße Zwerge. Diese Objekte sind sehr heiß und strahlen deshalb weiß (siehe Effektivtemperatur). Den zweiten Namenszusatz Zwerge verdanken sie ihrer geringen Größe: Sie haben nur einen Durchmesser, der vergleichbar der Erde ist, aber wiegen typischerweise soviel wie die Sonne! Diese erste Möglichkeit für ein kompaktes Objekt nach dem Gravitationskollaps ist im Bild links zu sehen. Weiße Zwerge kühlen langsam aus und werden schließlich zu Schwarzen Zwergen. Dieser Vorgang dauert jedoch gut 10 Mrd. Jahre, was vergleichbar mit dem Alter des Universums ist. Das Alter eines Weißen Zwergs kann drastisch verkürzt werden, wenn er durch Aufsammeln von Materie (Akkretion), beispielsweise von einem nahen Begleitstern, die Chandrasekhar-Masse überschreitet: Dann explodiert der Weiße Zwerg in einer spektakulären Sternexplosion, die nichts übrig lässt. Diese Explosion ist eine Supernova vom Typ Ia und ist von großer Bedeutung für die Kosmologie.

8.15.4 Endzustand 2: Neutronenstern

Bei höheren Restmassen der kollabierenden Sternmaterie kann auch der Entartungsdruck der Elektronen nichts mehr ausrichten. Die Elektronen werden bei den immensen Dichten buchstäblich in die Atomkerne gepresst; die Kernphysiker nennen das einen inversen Beta-Zerfall. Die Konsequenz dieser kernphysikalischen Umwandlungsprozesse auf subatomarem Niveau ist die **Neutronisierung** der Materie. Nun hat die Sternmaterie einen Phasenübergang vollzogen und die Eigenschaften komplett verändert. Neutronen sind allerdings auch Fermionen, so dass nun der Entartungsdruck der Neutronen den kollabierenden Stern stabilisiert. Neben den Neutronen gibt es eine Reihe exotischer Teilchen (Hyperonen, Kaonen, Diquarks, schließlich sogar freie Quarks, wie Astrophysiker vermuten), die sich bei noch höheren Dichten bilden. Das so stabilisierte, noch kompaktere Objekt heißt Neutronenstern. Auch er wiegt etwa soviel wie die Sonne, hat allerdings nur einen Durchmesser von etwa 20 Kilometern! Die Massenobergrenze für Neutronensterne ist seit Jahren strittig unter den Experten: Ein konservativer Wert liegt bei zwei bis drei Sonnenmassen, der aus der Theorie relativistischer, kompakter Sterne folgt (*Nauenberg & Chapline* 1973; *Rhoades & Ruffini* 1974). Mittlerweile werden auch deutlich kleiner Grenzmassen diskutiert, z. B. 1.5 bis 1.8 Sonnenmassen (*Burgio* 2004). Stein des Anstoßes ist die Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie: Es ist einfach nach wie vor unklar, was mit so kompakter Materie im Detail geschieht. Die inhomogene Schalenstruktur unterschiedlicher Materieformen im Innern des Neutronensterns macht die theoretische Beschreibung außerordentlich kompliziert. Wertvolle Hinweise kann in dieser strittigen Frage die beobachtende Astronomie liefern, weil es in vielen Fällen möglich ist, Massen und Radien von Neutronensternkandidaten am Himmel zu messen. Aus diesen Parametern folgen Eigenschaften der inneren Struktur, die ein theoretisches Modell favorisieren könnten.

Neutronensterne findet man entsprechend in der Mitte der ersten Abbildung oben. Neutronensterne sind bereits hochrelativistische Objekte. Sie vermögen recht effektiv aufgrund von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie Licht einzufangen, abzuschwächen und zu röten. Dieses Phänomen hat die Bezeichnung Gravitationsrotverschiebung. Deshalb sind Neutronensterne im Bild dunkelrot dargestellt. Neutronensterne werden in der Regel von den Astronomen entdeckt, wenn ein scharf gebündelter Strahlungskegel, der nahe an der Neutronensternoberfläche entsteht, die Erde trifft. Diese Neutronensterne heißen Pulsare. Neutronensterne können auch besonders starke Magnetfelder aufweisen und heißen dann Magnetare.

8.15.5 Endzustand 3: Schwarzes Loch

Es gibt aber auch das ultimative kompakte Objekt, dass einen Neutronenstern in Kompaktheit und Masse übertrifft: ein stellares Schwarzes Loch. Theoretisch werden sie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) beschrieben und kursieren hier unter den Namen Schwarzschild-Lösung (nicht rotierend) und Kerr-Lösung (rotierend). Es gehört zu den größten Geheimnissen der Astrophysik, was genau mit der Materie beim Kollaps zu einem Schwarzen Loch passiert. Im Rahmen der Relativitätstheorie, die eine klassische, unquantisierte Theorie ist, weisen Schwarze Löcher tief im Innern Singularitäten auf. Sie sind die Quelle der Gravitation, weil aus der Sicht der Theorie der Rest der Raumzeit 'leer' ist. Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch ist der Kollaps auf einen Punkt! Die Gravitationsrotverschiebung in der Nähe des Lochs ist so stark, dass jede Strahlungsemission unterdrückt wird. Das markiert den Ereignishorizont und macht die Schwärze der Löcher aus. Der Horizont verhüllt die intrinsische Raumzeit-Singularität (so genannte *kosmische Zensur*). In einer Singularität wird die Krümmung unendlich (siehe auch Riemann-Tensor und Kretschmann-Skalar) und eine physikalische Beschreibung bricht zusammen. Im Rahmen der klassischen ART lässt sich nur sagen, dass in der Singularität 'Masse ohne Materie' existiert. In einem Schwarzen Loch hat Materie sämtliche Eigenschaften bis auf Masse und Drehimpuls verloren. Diesem Sachverhalt trägt das No-Hair-Theorem Rechnung, das von dem Relativisten *John A. Wheeler* begründet wurde. Er ist es auch, der im Auftreten der Krümmnungssingularitäten den Zusammenbruch der klassischen Physik sieht. Vielleicht zeigen Singularitäten, dass hier der Zuständigkeitsbereich einer völlig neuen physikalischen Theorie beginnt.

Die moderne Physik kennt bereits solche Theorien wie die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation, die versuchen über die klassische ART hinauszugehen. Auf der Basis dieser aktuellen Erkenntnisse ergeben sich neue Ansätze für das Vakuum und Quantenvakuum. Vorsichtig gesagt könnte sich mit den neuen Theorien ein Ende von klassischen Schwarzen Löcher ankündigen, wie die aktuell diskutierten Alternativen Holostern und Gravastern andeuten - aber noch sind die Physiker nicht soweit.

8.15.6 Jeder soll es sehen: spektakuläre Verwandlungen

Die Bildung Weißer Zwerge läuft relativ unspektakulär ab: Der massenarme Vorläuferstern, der mit der Sonne vergleichbar ist, bläht sich zum Roten Riesen auf und verliert seine äußeren Sternhüllen, die einen Planetarischen Nebel bilden. Die restliche Stermaterie fällt in sich zusammen und hinterlässt einen Weißen Zwerg.

Für den Entstehungsprozess der letzten beiden Typen kompakter Objekte, Neutronensterne und stellare Schwarze Löcher, muss der Vorläuferstern sehr massereich sein. Typisch sind 8

bis 20 Sonnenmassen. Das finale Szenario ist katastrophal: Im Gravitationskollaps läuft eine Schockwelle ins Innere des Sterns. Im Kern gibt es bereits einen hochverdichteten Sternkern, der besonders eisenhaltige Prä-Neutronenstern. Die einlaufende Schockwelle wird an dieser dichten Materie (engl. *hard core*) reflektiert und läuft wieder nach außen. Dort zerreißt sie die äußeren Sternhüllen und verursacht die Explosion des Sterngiganten in einer **Supernova Typ II** (engl. *core-collapse SN*). Der innere Teil kollabiert und formt einen Neutronenstern. Wenn mehr Masse in sich zusammenfällt, läuft der Gravitationskollaps ähnlich ab, nur wird die Explosion noch heftiger und leuchtkräftiger und heißt deshalb **Hypernova** bzw. langzeitiger Gammastrahlenausbruch. In diesem Fall entsteht ein Schwarzes Loch.

Der Kollaps ist im Allgemeinen **asymmetrisch** und versetzt damit dem entstehenden kompakten Objekt einen '**Kick**': Es findet also ein Impulsübertrag statt. So wurde ein *astro-archäologisches Objekt* mithilfe des Weltraumteleskops *Hubble* entdeckt: ein stellares Schwarzes Loch von etwa sechs bis sieben Sonnenmassen, das vermutlich in einem dichten Kugelsternhaufen gebildet wurde. Durch den Kick hat es den Haufen verlassen und ist so eines der ältesten Objekte der Milchstraße, das seither auf einer stark exzentrischen Bahn die galaktische Ebene kreuzt. Ähnliches beobachtet man bei einigen Neutronensternen, die mit hoher Geschwindigkeit durch den interstellaren Raum vagabundieren.

Unter dem Eintrag Penrose-Diagramm befindet sich die Darstellung eines kugelsymmetrischen (und daher idealisierten) Gravitationskollapses, der zu einem stellaren Schwarzen Loch führt. In diesem Raumzeit-Diagramm kann man unterschiedliche Typen von Geodäten verfolgen und die Ausbildung eines Ereignishorizonts schematisch visualisieren.

8.15.7 kleine Anmerkung

Oben war von drei *End*zuständen die Rede; es kommt durchaus vor, dass die kompakten Objekte, die sich nach dem Gravitationskollaps eines Sterns gebildet haben, *vorläufigen* Charakter haben. Das hängt von der Umgebung ab. Wenn der 'End'zustand mit Materie gefüttert wird, kann beispielsweise der Weiße Zwerg in einer SN Ia vollständig zerrissen werden; befindet sich ein Neutronenstern in einem Doppelsternsystem mit einem weiteren Neutronenstern, wird das System früher oder später durch die Emission von Gravitationswellen verschmelzen und zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Einzig die Schwarzen Löcher sind als wirkliche Endzustände zu bezeichnen - nicht mal durch die Abstrahlung von Hawking-Strahlung würden sie verschwinden, weil das für Schwarze Löcher mit Sonnenmasse schon deutlich länger dauert, als das Alter des Universums!

Zu diesen klassischen drei und beobachteten Endzuständen gesellten sich in jüngster Zeit einige **Alternativen**: der Bosonenstern, der Fermionenstern, der Quarkstern, der Strange Star, der Gravastern, der Holostern, der Vakuumstern - jedoch gibt es bislang keine überzeugenden Argumente für die Existenz all dieser modernen Alternativen.

8.15.8 Web-Artikel

- ◇ Kompakte Objekte des Himmels (inkl. Tabelle mit beobachteten Quellen)

8.16 Gravitationskühlung

Gravitationskühlung ist ein dissipationsloser Vorgang, der zur Verdichtung einer Konfiguration durch Aussendung von Konstituenten führt. Das wird anschaulich unter dem

Begriff Bosonenstern erklärt (Abschnitt 'Entstehung').

8.17 Gravitationslinse

Als Gravitationslinsen bezeichnen Astrophysiker generell Objekte, die allein aufgrund ihrer hohen Masse, Strahlung signifikant abzulenken vermögen. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) kann das **jede** Masse, weil sie die Raumzeit lokal krümmt und damit die Bahnen anderer Teilchen und von Strahlung, die Geodäten, beeinflusst. In der Praxis wichtig ist der Effekt nur bei **hohen, kompakten Massen**, weil sie eine größere Ablenkung der Bahnen bewirken.

8.17.1 Massen als Linsen

Strahlung folgt gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie den **Nullgeodäten** einer Metrik. Im uns vertrauten Fall einer **flachen Metrik**, der Minkowski-Geometrie, bewegt sich das Licht auf Geraden. Dies ist der Grenzfall der geometrischen Optik. Im allgemeinen Fall jedoch ist die Metrik gekrümmt durch die Anwesenheit von Materie und Energie. Die Nullgeodäten sind dann ebenfalls gekrümmt und können über das Lösen der **Geodätengleichung** ermittelt werden.

In Analogie zu einer Linse, die parallel zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen in ihrem Brennpunkt vereint, lenkt Masse über die Raumkrümmung Strahlung ab.

8.17.2 Linsen der Kosmologie

Bedeutsame Gravitationslinsen in der Astronomie sind massereiche **Galaxienhaufen** (engl. *galaxy cluster*) oder Ansammlungen von Dunkler Materie. Die Dunkle Materie ist anteilig neben der 'normalen' baryonischen Materie in jeder Galaxie enthalten und beherrscht deren Dynamik und Entwicklung. In Galaxienhaufen macht der Massenanteil an Dunkler Materie sogar 90% aus, nur 1% ist sichtbar in Form von Sternen, der Rest ist intergalaktisches Gas! Der gesamte Materieinhalt bestimmt die Dynamik des Haufens und führt zu heftigen Gezeitenwechselwirkungen zwischen den einzelnen Clustergalaxien. Dies kann zu kannibalistischen Szenarien führen, wo Galaxien miteinander verschmelzen (engl. *merging*) oder sich große Galaxien kleinere einverleiben. Dies resultiert häufig in irregulären Galaxien (siehe Hubble-Klassifikation), wie den prominenten *Antennengalaxien* (siehe Bild 8.9 und Beschreibung unter dem Eintrag Gezeitenkräfte). Ein anderes schönes Beispiel eines 'Unfalls der Materiegiganten' zeigt Abbildung 8.19. Dieses Foto des Weltraumteleskops *Hubble* zeigt rechts NGC 2207 und links IC 2163 im Sternbild *Großer Hund* (*Canis Major*). Die Spiralgalaxien kommen sich etwas zu nahe. Somit treten sie in Interaktion durch Gezeitenkräfte: Sterne werden hinausgeschleudert, das interstellare Gas beider Spiralen vermischt sich und regt die Sternentstehung an, eventuell verschmelzen auch früher oder später die Kerne der Galaxien - sprich die supermassereichen Schwarzen Löcher - weil ihr 'Tanz' durch die Abstrahlung von Gravitationswellen immer enger wird. Aus der Durchmischung der Welten entstehen neue Welten und vielleicht sogar neues Leben (Credit: *Merritt et al.* 2004, NASA/ESA).

Abbildung 8.19: Galaxienkollision.

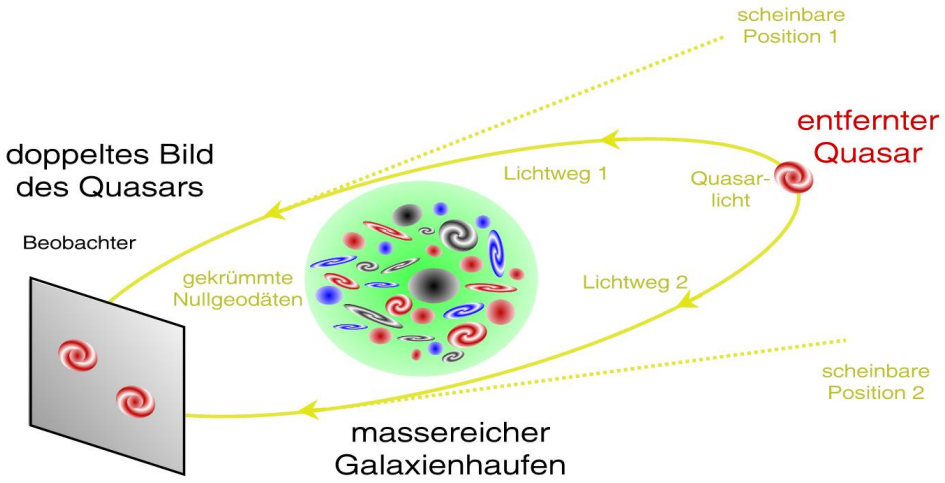

Abbildung 8.20: Doppelbild eines Quasars durch Galaxiencluster als Gravitationslinse.

8.17.3 kosmischer Schwips: Doppel- und Mehrfachbilder

Wenn Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken, fokussieren sie die Strahlung derjenigen kosmischen Objekte, die hinter ihnen und nahe entlang der Sichtlinie liegen. Dabei können auch **Mehrfachbilder** ein und desselben Objekts auftreten, weil die Strahlung auf *verschiedenen* Lichtwegen zum Beobachter gelangt. Es handelt sich gewissermaßen um eine 'kosmische optische Täuschung', wie Abbildung 8.20 zeigt. Häufig beobachten Astronomen bei Galaxienhaufen verzerrte Bilder einzelner Galaxien, die dann als **fadenförmige Gebilde** auf Aufnahmen in Erscheinung treten (siehe Objekte im Abell-Katalog). Manchmal entsteht auch ein charakteristisches rundes Gebilde, der so genannte **Einstein-Ring**. Hier sind die Verhältnisse zwischen Linse und gelinstem Objekt besonders symmetrisch.

8.17.4 klein, aber Linse

Außerdem gibt es kleine Ansammlungen von Materie, die als Mikrolinsen fungieren. Ihre Masse ist so gering, dass man kein aufgelöstes verzerrtes Abbild, aber einen charakteristischen, symmetrischen Helligkeitsanstieg eines Sterns oder eines anderen strahlenden Objekts erhält, wenn eine solche Mikrolinse genau zwischen Beobachter und gelinstem Objekt vorüberzieht. Auch das wurde bereits beobachtet und hat eine Relevanz bei den **MACHOs**, den *Massive Compact Halo Objects*. Diese leuchtschwachen Objekte befinden sich im Halo der Milchstraße und können so indirekt über Mikrolinsen-Ereignisse (engl. *microlensing events*) in Anzahl und Masse abgeschätzt werden. Vermutlich handelt es sich bei den MACHOs um Braune Zwerge oder **M-Zwerge** (massearme Sterne vom Spektraltyp M), die sich im Halo der Milchstraße bewegen (z. B. *Gaudi & Han* 2004, astro-ph/0402417).

Die Mikrolinse kann allerdings auch ein Stern sein, der mindestens einen Planet hat. So eignet sich der Gravitationslinseneffekt zur **Suche und Identifikation von Planeten**. Der erste Kandidat für dieses *Planetarische Mikrolinsen-Ereignis* (engl. *planetary microlensing event*) ist das Objekt OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 (katalogisiert nach den MOA und OGLE Beobachtungen). Diese Linse hat eine Entfernung von 5.2 kpc und ist Sternen im Galaktischen Zentrum in etwa 8 kpc Distanz vorgelagert. Zufällig liegen Hintergrundstern und Mikrolinse ziemlich exakt auf einer Linie. So erscheint das Licht des Hintergrundsterns für kurze Zeit in der Form eines winzigen Einstein-Rings an der Himmelssphäre. Astronomen beobachteten für die Dauer von etwa einer Woche eine schwache Abweichung (*Spikes*) in der Lichtkurve des Hintergrundsterns. Herkömmliche Modelle für das davor liegende Linsensystem mit einzelnen, linsenden Objekten versagen, um diese besondere Lichtkurve anzupassen. Spikes sind ein Charakteristikum von Linsen, die aus einem Binärsystem bestehen. Es stellte sich heraus, dass die Massen der beiden Linsenkomponenten sehr verschiedenen voneinander sind. Die Astronomen um *Ian Bond* schlagen deshalb ein Linsensystem aus Stern mit Planeten vor, um den Anstieg der Lichtkurve zu erklären. Setzt man für den Stern an, dass es sich um einen Hauptreihenstern (speziell ein M-Zwerg mit 0.4 Sonnenmassen) handelt, so hätte der Planet etwa 1.5 Jupitermassen und umkreiste den Stern in einem Abstand von etwa drei Astronomischen Einheiten (Abkürzung AU). Die exotischere Alternative für das Binärsystem wäre ein Weißer Zwerg mit nur 0.6 Sonnenmassen, der dann in 2.8 AU einen Planet mit 2.5 Jupitermassen umkreiste (*Bond et al.* 2004, astro-ph/0404309).

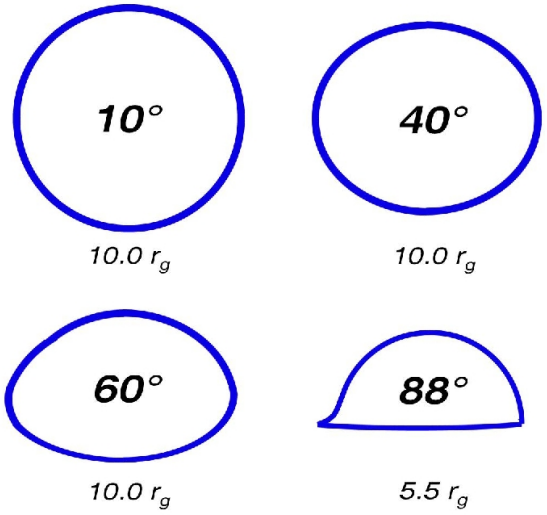

Abbildung 8.21: Gelinste Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln.

8.17.5 Die Mutter aller Gravitationslinsen

Neben den Galaxienhaufen und Mikrolinsen sind die **Schwarzen Löcher** ein weiterer Kandidat für Gravitationslinsen. Auch hier kann man die verzerrten Bilder nicht direkt aufgelöst beobachten, sondern muss die Verzerrung spektroskopisch ableiten. Das numerische Verfahren Ray Tracing bietet eine Möglichkeit im Computerlabor die gelinsten, verzerrten Objekte zu studieren. So kann man die scheinbare Deformation von Akkretionsscheiben beobachten, wenn man sie unter hohen Neigungen beobachten würde. Gleiches gilt für enge Umlaufbahnen um Schwarze Löcher. Abbildung 8.21 zeigt simulierte Kreisbahnen um ein Schwarzes Loch, die einen Abstand von 5 bis 10 Gravitationsradien zum zentralen, maximal rotierenden Schwarzen Loch (nicht dargestellt) haben (*A. Müller*, Dissertation 2004). Es handelt sich bei allen vier Fällen um **Primärbilder**, also nur um Strahlung, die direkt zum Beobachter propagiert. Wichtig ist nun, dass man die klassische elliptische Bahnform nur bei kleinen Neigungen (Inklinationen) der Bahnebene hat, wie die beiden oberen Darstellungen belegen. Bei höheren Inklinationen hingegen, etwa ab 60 Grad, machen sich deutlich die **relativistischen Linseneffekte** bemerkbar: Der Beobachter blickt zwar eher auf die Kante der Bahnebene, aber die Strahlung wird um die kompakte Masse herumgelenkt. So kann man auch Bereiche direkt hinter dem Loch beobachten, die sich im *geometrischen Schatten* befinden und **Newtonsch unbeobachtbar** wären. Bei der hier höchsten Inklination von 88 Grad, was sehr nahe am Maximum von 90 Grad liegt, erhält man ein stark verzerrtes Abbild des Orbits: Obwohl der Beobachter fast exakt auf die Kante der Bahnebene schaut, wo die klassische Ellipse wie eine Linie erscheinen und der Orbiter auf ihr hin- und her oszillieren würde, sieht man in diesem gelinsten Beispiel den hinteren Teil des Bahnorbits! Leider reichen die aktuellen Auflösungen der Teleskope nicht aus, um solch befremdliche Bahnbewegungen am Himmel zu beobachten. Wenn dies gelänge könnte man den **Umlaufsinn der Lochrotation** direkt sehen! Denn die Links-Rechts-Asymmetrie ist auf den Frame-Dragging-Effekt zurückzuführen: Das rotierende Loch zieht den Orbiter mit

sich mit. Im hier gerechneten Beispiel rotiert das Loch maximal (Kerr-Parameter $a = M$ in geometrisierten Einheiten) im Gegenuhrzeigersinn. Deshalb befindet sich bei der Bahnform unter 88 Grad die kleine Ausstülpung der beobachteten Bahn links unten. Auf der gleichen Seite zeigen leuchtende Standardakkretionsscheiben das charakteristische Vorwärts-Beaming, ein Gebiet hoher Blauverschiebung.

Neben der starken Abhängigkeit von der Inklination, spielt natürlich der Abstand des Orbits zum Loch eine gewichtige Rolle. Bei großen Abständen verschwinden die relativistischen Linseneffekte, weil man in den **asymptotisch flachen Bereich** der Raumzeit Schwarzer Löcher kommt. Dieser Fall ist aktuell bei demjenigen Stern mit der Bezeichnung *S2* beobachtbar, der als Stern mit engster Bahn das supermassereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum (etwa 3 Millionen Sonnenmassen) umkreist. *S2* ist zwar mit einer Periastronentfernung von 17 Lichtstunden sehr nahe am Loch, doch entspricht diese Entfernung im relativistischen Einheitensystem gewaltigen 4142 Gravitationsradien. Diese Distanz ist zu groß (vergleiche 5 bis 10 Gravitationsradien in Abbildung), als dass relativistische Effekte, wie Linsenbeugung eine Rolle spielen würden: die Bahnform von *S2* ist eine exakte Kepler-Ellipse (siehe Kepler-Gesetze).

Die Verhältnisse sind bei linsenden Schwarzen Löchern tatsächlich noch komplizierter: Neben den dargestellten Primärbildern entstehen Bilder höherer Ordnung dadurch, dass eng am Loch vorbeilaufende Strahlung das Loch mehrfach umrunden kann (unter gewissen Umständen kann es sogar auf dem Photonenorbit eingefangen werden). So gibt es im Allgemeinen noch **Sekundär- und Tertiärbilder**, die es bei flachen Standardakkretionsscheiben ermöglichen, die Newtonsch unbeobachtbare Unterseite der Scheibe zu beobachten!

Was rechtfertigt den Titel dieses Eintrags 'Mutter aller Gravitationslinsen'? Nun, Schwarze Löcher sind die extremste Form einer Gravitationslinse, weil die Linse sogar das Licht ab einer kritischen Grenze namens Ereignishorizont einzufangen vermag. Aus diesem Grund sind Schwarze Löcher schwarz.

8.17.6 Werkzeuge der modernen, experimentellen Kosmologie

Gravitationslinsen erweisen sich als äußerst nützlich für die Kosmologie: leuchtschwache Objekte werden durch den Einfluss einer Linse verstärkt, so dass ein größerer Strahlungsfluss gemessen werden kann, als ohne Linse. Dies ermöglicht es den Astronomen noch tiefer in den Kosmos zu schauen. Der aktuelle Entfernungsrekordhalter **Abell 1835 IR 1916** ist eine Galaxie mit einer Rotverschiebung von $z = 10$! Astronomen aus der Schweiz, Frankreich und Kalifornien beobachteten mit der Infrarot-Kamera ISAAC (*Infrared Spectrometer And Array Camera*) des *Very Large Telescope* (VLT) in Chile diese schwache Infrarotquelle im Galaxienhaufen Abell 1835. Ihre Strahlung wird durch eine Gravitationslinse im Vordergrund um einen Faktor 25 bis 100 verstärkt. Die Gesamtmasse dieser sehr jungen Galaxie wurde zu nur 500 Mio. Sonnenmassen (inklusive Dunkle Materie im Halo) abgeschätzt (*Pello et al.* 2004, astro-ph/0403025).

Diese Entdeckung übertrumpfte den nur zwei Wochen vorher aufgestellten Rekord einer Galaxie bei $z \sim 7$ (*Kneib et al.* 2004). Auch hier fokussiert der vorgelagerte Galaxienhaufen Abell 2218 die auf der Erde als Infrarotstrahlung detektierte Strahlung und verstärkt sie um einen Faktor 25. Ohne den linsenden Galaxienhaufen hätte man dieses Objekt, das bereits 750 Millionen Jahre nach dem Urknall sein Licht aussandte, nicht entdeckt.

8.17.7 Einstein, der Visonär

Albert Einstein spekulierte schon 1936 auf der Basis seiner Theorie über die Existenz von Gravitationslinsen. Er selbst hatte es nicht für möglich gehalten, dass man dies je beobachten würde (siehe Einstein-Ring für Einzelheiten). Heute ist eine Vielzahl von gelinsten Objekten bekannt (Abell-Katalog). Viele Quasare sind darunter, die **Doppelbilder**, Einsteinkreuze und Einstein-Ringe zeigen. Ein prominentes Beispiel ist das scheinbare Quasarpaar Q2345+007 in einer Entfernung von $z = 2.15$ (siehe Rotverschiebung). Eine Linse konnte für dieses Doppelbild nicht beobachtet werden. Aus diesem Grund vermutet man eine **Ansammlung von Dunkler Materie** als Gravitationslinse (*Green et al.* 2002, astro-ph/0202081).

Einen ähnlichen Effekt wie bei den Gravitationslinsen erwartet man beim '**topologischen Linsen**'. Diese 'Geisterbilder' sind dann auf eine komplexe Topologie des Universums zurückzuführen. Bisher hat man das noch nicht *bewusst* beobachtet. Die Erscheinung wäre derjenigen, die von Gravitationslinsen resultiert vergleichbar, kann aber auch bis zur Unkenntlichkeit, bis zur **perfekten optischen Täuschung**, verzerrt sein. Vielleicht spielt uns der Kosmos so manchen Streich - und wir merken es nicht einmal.

8.17.8 Linsen verzerren den Hintergrund

Der Gravitationslinseneffekt ist auch deshalb bedeutsam in der Kosmologie, weil die überall verteilte Materie in Form von Galaxien, Galaxienhaufen und intergalaktischer Materie die **kosmische Hintergrundstrahlung** beeinflusst. Dieser Vorgang muss berücksichtigt werden, wenn die Kosmologen aus der Hintergrundstrahlung Eigenschaften des Universums herauslesen möchten. Es konnte gezeigt werden, dass enge Strukturen im CMB-Spektrum ausgeschmiert und geglättet werden (*Zaldarriaga & Seljak*, PRD 1998). Der Effekt kann bis zu 10% betragen.

8.18 Gravitationsradius

Die Gravitationsradius ist die übliche **Längeneinheit in der Gravitationsforschung** und insbesondere in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). So verwendet man diesen Radius in der Theorie Schwarzer Löcher.

8.18.1 Definition

Der Gravitationsradius ist definiert zu $r_g = GM/c^2$, wobei G die Gravitationskonstante, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit und M die Masse des Schwarzen Loches ist. Die Zahlenwerte in SI-Einheiten sind: $G = 6.672 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2} sowie $c = 299\,792.458$ km/s.

8.18.2 G = c = 1

Die theoretischen Astrophysiker und Relativisten machen sich das Leben noch einfacher und setzen in Gestalt der geometrisierten Einheiten $G = c = 1$, so dass der Gravitationsradius auch M wird. Manchmal gehen sie noch einen Schritt weiter und setzen sogar auch $M = 1$. Das Vorgehen mag befremdlich anmuten, ist aber weit verbreitet in der theoretischen Physik. Denn es erleichtert theoretische Rechnungen enorm. Beim Vergleich mit experimentellen Daten skaliert man die Ergebnisse wieder entsprechend um.

In alternativem Gebrauch ist die Skala des Schwarzschild-Radius R_S, der gerade doppelt so groß ist, als der Gravitationsradius: $R_S = 2GM/c^2$.

8.19 Gravitationsrotverschiebung

Gravitationsrotverschiebung bezeichnet einen **Rotverschiebungseffekt**, der durch die **Gravitation** hervorgerufen wird: Die Lichtteilchen (Photonen) erleiden einen Verlust von Strahlungsenergie dadurch, dass sie einem anziehenden Gravitationsfeld zu entkommen versuchen.

8.19.1 Analogie

Wenn wir einen Ball in die Luft werfen, so erreicht er einen höchsten Punkt und die Schwerkraft zwingt ihn wieder zur Umkehr. Der Grund: die kinetische Energie des Balles bzw. seine Geschwindigkeit war zu gering, als dass er gegen die Schwerkraft ankommen würde, um das irdische Schwerkraftfeld zu verlassen. Diese Bewegung ist sehr gut mit der Newtonschen Gravitation zu beschreiben, um z. B. den höchsten Punkt auf der Bahn, die Auftreffgeschwindigkeit oder den Auftreffpunkt des Balles zu berechnen. Falls der geworfene Körper die Fluchtgeschwindigkeit der Erde überschreitet, so kann er tatsächlich die Erde verlassen. Diese Grenzgeschwindigkeit beträgt allerdings bei der Erde satte 11.2 km/s oder 40000 km/h so dass im Prinzip nur Raketen das Verlassen der Erde gelingt.

Bei Licht verhält es sich erstaunlicherweise genauso, denn auch Licht verliert Energie, wenn es den Bereich eines Schwerefeldes verlässt. Dies ist jedoch nur korrekt mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu verstehen und zu beschreiben. Das Schwerfeld wird dann ersetzt durch eine **gekrümmte Raumzeit**. Die Lichtteilchen bewegen sich auf Nullgeodäten. Es gibt eine Analogie zwischen Licht und geworfenem Ball: der Ball verliert kinetische Energie, während die Lichtteilchen Strahlungsenergie verlieren. Da ein Verlust an Strahlungsenergie eine Verschiebung zum roten Ende des Spektrums hin bedeutet, ist dies ein Rotverschiebungseffekt - weil weiterhin die Ursache die Gravitation ist, heißt dieses Phänomen *Gravitationsrotverschiebung*.

8.19.2 Extremfall Schwarzes Loch

Prinzipiell darf man sagen, dass jeder Emitter gravitationsrotverschiebend auf die Strahlung wirkt, die er ausstrahlt, weil er eine Masse hat. Bei den üblichen kleinen Massen ist der Effekt jedoch verschwindend gering. Aber der Effekt tritt besonders drastisch bei kompakten Massen wie **Schwarzen Löchern** in Erscheinung: Am Ereignishorizont schlucken sie jede Strahlung, weil die Gravitationsrotverschiebung unendlich groß ist: das verleiht Schwarzen Löchern gerade die charakteristische Schwärze.

8.19.3 gravitationsrotverschobene Linien in AGN

Der Effekt, wie sehr die gekrümmte Raumzeit eines Loches an der Umgebungsstrahlung zieht, kann mit hochpräzisen, astronomischen Messmethoden sogar noch in einiger Entfernung zum Loch nachgewiesen werden. So zeigen **Spektrallinien**, die in der Nähe des supermassereichen Schwarzen Loches des Aktiven Galaktischen Kerns Mrk 110 ausgesandt werden, messbar die Gravitationsrotverschiebung an: Das wurde mittels optischer

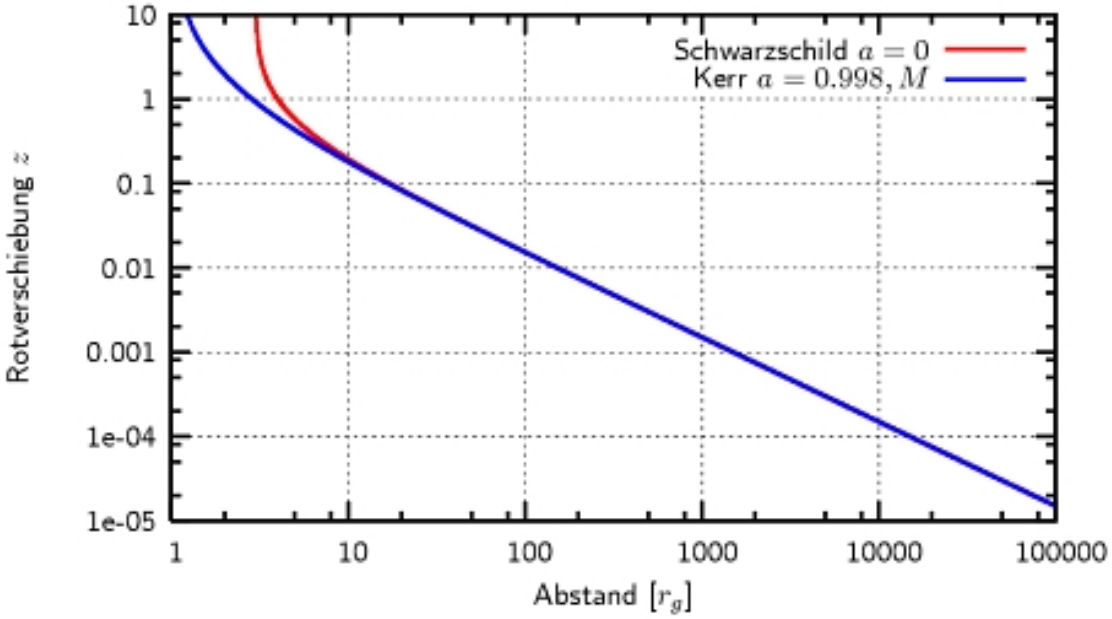

Abbildung 8.22: Gravitationsrotverschiebung um ein Schwarzes Loch.

Spektrallinien von Wasserstoff und Helium (*Kollatschny* 2003) und mittels Sauerstoff- Stickstoff- und Kohlenstofflinien im Bereich weicher Röntgenstrahlung nachgewiesen (*Boller et al.* 2006). Die Entstehungsregion der optischen Linien (die so genannte *broad line region*, BLR) ist einige wenige bis etwa hundert Lichttage vom Loch entfernt (entsprechend hundert bis einige tausend Gravitationsradien). Die Röntgenstrahlung entsteht deutlich näher am Loch, bei etwa ein Zehntel bis einem Lichttag (einige zehn bis hundert Gravitationsradien). Diese Beobachtungen sind konsistent mit Simulationsmodellen, bei denen die Linien von Keplersch rotierenden Ringen in der Äquatorebene des Loches abgegeben werden (*Müller & Wold* 2006). Diese Modelle legen nahe, dass mit modernen, hochauflösenden Teleskopen die Gravitationsrotverschiebung **bis zu einer Entfernung von etwa 75000 Gravitationsradien** nachweisbar sein könnte! Sie zeigen auch, dass die Lochrotation nur mit Spektrallinien getestet werden kann, die sehr nahe am Loch entstehen, z. B. relativistisch verbreiterte Eisenlinien (Fe Kα).

Diagramm 8.22 zeigt die Rotverschiebung als Funktion des Abstandes vom Schwarzen Loch. Es wurde dabei nicht nur die Gravitationsrotverschiebung berücksichtigt, sondern auch der (longitudinale und transversale) Doppler-Effekt. Im Modell kommt die Strahlung von einer Keplerscheibe aus der Äquatorebene. Wie man sieht nimmt die Rotverschiebung z (nicht zu verwechseln mit der kosmologischen Rotverschiebung!) beständig zu, wenn man dem Loch näher kommt. Abweichungen zwischen einem nicht-rotierenden Schwarzschild-Loch (rote Kurve) und einem schnell rotierenden Kerr-Loch (blaue Kurve) sind erst bei Radien **kleiner als 4 Gravitationsradien** erkennbar. Mit anderen Worten: so nahe muss der Emitter mindestens an das Loch kommen, um Lochrotation zu testen!

8.19.4 Von rot nach blau

Weitere Einzelheiten sind beim gegensätzlichen Effekt, der Blauverschiebung, nachzulesen.

8.20 Gravitationswellen

Gravitationswellen sind Wellen, die von beschleunigten Massen erzeugt werden. Man stellt sich darunter eine 'Delle' in der gekrümmten Raumzeit vor, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. Wie alle Wellen transportieren auch Gravitationswellen Energie und Informationen, insbesondere Informationen über sich ändernde Krümmungseigenschaften der Raumzeit. Informationen tragen alle Wellen in Form von Richtung, Polarisation, Frequenz (alternativ als Wellenlänge oder Energie) und Intensität (Wellenamplitude) mit sich. Gravitationswellen stehen in wunderbarer Analogie zu den elektromagnetischen Wellen der klassischen Elektrodynamik, die von beschleunigten, elektrischen Ladungen ausgesandt werden.

8.20.1 Hier lauert ein Nobelpreis

Energie wird gerade umgesetzt, wenn Gravitationswellen auf Materie treffen. Sie dehnen und stauchen diese Materiekonfiguration. Diese Deformation geschieht nicht nur in der Raumdimension, sondern auch in der Zeit. Denn die Welle ist dynamische Raumzeit, ein vierdimensionales Kontinuum, das sich fortpflanzt. Die deformierende Auswirkung auf Testkonfigurationen möchten Physiker gerade ausnutzen, um Gravitationswellen zu messen. Bislang ist dies **nicht auf *direktem* Wege** gelungen, aber ***indirekt***!

8.20.2 Auf Einsteins Pfaden

Die Existenz von Gravitationswellen oder auch *Gravitationsstrahlung* genannt geht auf die Pionierarbeit von *Albert Einstein* (1916) zurück. Er hat die nicht-linearen Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) **linearisiert** und auf **Wellengleichungen** reduziert. Es folgt nun eine Skizzierung der mathematischen Prozedur im Tensorformalismus der ART (in voller Schönheit, siehe z. B. MTW, *Gravitation*):

- ◇ Wir starten mit einem Ansatz für die Metrik, deren raumzeitliche Schwingung gerade der Gravitationswelle entspricht. Sie soll nicht wesentlich von einer flachen Raumzeit (mit Krümmung null) abweichen. Demnach setzt man den metrischen Tensor mit der Minkowski-Metrik an, die ja eine flache Metrik beschreibt; wir ergänzen sie jedoch mit einem Zusatzterm, einer linearen Korrektur ('Störung')

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \epsilon\, \mathbf{h}_{\mu\nu}, \tag{8.2}$$

  mit der skalaren Größe

$$h = \eta^{\mu\nu}\mathbf{h}_{\mu\nu}.$$

  Dieser lineare Ansatz für die Metrik ist eine **Näherung schwacher Gravitationsfelder**.

- ◇ Diesen Ansatz für den metrischen Tensor (8.2) stecken wir in die Einsteinschen Feldgleichungen. Warum? Weil sie die Dynamik der Gravitationswelle beschreibt.

Damit wir die Metrik einsetzen können, müssen sämtliche darin enthaltene Größen ausgerechnet werden: die Christoffel-Symbole, der Riemannsche Krümmungstensor und der daraus resultierende Einstein-Tensor.

◇ Außerdem verschwindet die rechte Seite der Feldgleichungen (Energie-Impuls-Tensor ist null), weil sich zunächst die Gravitationswellen nur im Vakuum ausbreiten mögen.

◇ Jetzt wird es kompliziert: Die resultierende Metrik, die die Minkowski-Metrik korrigiert, ist nicht eindeutig festgelegt. Wie in der Elektrodynamik gibt es eine *Eichfreiheit*, die man ausnutzen kann, um die Einsteinschen Feldgleichungen zu typischen **Wellengleichungen** zu reduzieren. 'Typisch' heißt hier, dass der d'Alembert- oder 'Quabla-Operator' - natürlich in seiner relativistischen Form - als Differentialoperator auftritt. Wie üblich symbolisieren wir ihn durch ein Quadrat. Sowohl der Krümmungstensor, als auch der Einstein-Tensor erweisen sich als *eichinvariante Größen*. Die Eichungen in der Theorie der Gravitationswellen nennt man *Einstein-, Lorentz-, Hilbert-, Fock-* oder *de-Donder-Eichung*. Die hier gemeinte Lorentz-Eichung ist das gravitative Analog zur Lorentz-Eichung der Elektrodynamik in flacher Raumzeit.

8.20.3 Was tun mit der Wellengleichung?

Der Formalismus offenbart, dass (analog zur Elektrodynamik) viele Tensorfelder eine Wellengleichung erfüllen: Nicht nur die neu eingeführte Variable

$$\bar{\mathbf{h}}_{\mu\nu} = \mathbf{h}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h, \tag{8.3}$$

auch die Störung der Metrik selbst und vor allem der Riemannsche Krümmungstensor in linearisierter Form genügen einer homogenen Wellengleichung mit d'Alembert-Operator! Die Wellengleichung lautet dann:

$$\Box\bar{\mathbf{h}}_{\mu\nu} = 0.$$

Die Tatsache, dass der Krümmungstensor, der die Existenz und Krümmung des Gravitationsfeldes beschreibt, selbst eine Wellengleichung erfüllt, beweist, dass sich Gravitationseffekte in Form einer Gravitationswelle mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten.

Es sei betont, dass diese **lineare, relativistische Gravitationstheorie** nur einen Ausschnitt der wesentlich komplizierteren, nicht-linearen Gravitationswellenphysik bietet. Die Fortpflanzung der Gravitationswellen in der Nähe *starker Gravitationsquellen* bzw. *in medium* ist ein übergeordnetes, komplexeres Regime!

In dieser linearisierten Theorie kann man **ebene Wellenlösungen** finden, indem man für die zeitlich und räumlich variierenden Tensorfelder die üblichen Wellenlösungen analog zur Elektrodynamik oder klassischen Mechanik ansetzt: eine ebene Welle, geschrieben als Amplitude multipliziert mit einem Exponential mit imaginärem Argument und dem Produkt aus 4er-Wellenvektor und 4er-Ortsvektor.

8.20.4 Lieber TT eichen, als TT fahren

Dieser Ansatz macht eine weitere Eichung nötig, die man **transversale, spurfreie Eichung** (engl. *transverse traceless gauge*, **TT gauge**) nennt. Dabei werden dem Tensorfeld der Wellengleichung weitere Bedingungen auferlegt, wobei nur seine räumlichen Komponenten

$h_{\mu 0} = 0$, h_{jk} ungleich null
$h_{kj,j} = 0$, divergenzfrei
$h_{kk} = 0$, spurfrei

Abbildung 8.23: ebene Gravitationswellen in der TT-Eichung.

ungleich null, divergenzfrei und spurfrei sind (siehe Gleichungssatz in Abbildung 8.23). In der TT-Eichung gibt es keinen Unterschied mehr zwischen dem Tensorfeld h und der neu eingeführten Variable (8.3)! Alle Tensoren, die den Bedingungen der TT-Eichung genügen, nennt man **TT-Tensoren**. Die Transversalität ist auf die Tatsache, dass die Gravitationswelle senkrecht zur eigenen Ausbreitungsrichtung *räumlich* oszilliert zurückzuführen (Nachweis durch Bildung des Produkts aus Tensorfeld h und 4er-Wellenvektor).

Auch aus einfachen Ansätzen ohne TT-Eichung (eindimensionale, zeitlich variable Wellen) resultieren ebene Gravitationswellen, die sich in eine bestimmte Richtung fortpflanzen. Zu diesen Tensorfeldern lassen sich Linienelemente zuordnen, die gerade als raumzeitlich variierende Gravitationswellen interpretiert werden können.

8.20.5 Gravitationswellen haben zwei Polarisationen

Man kann nun die Linienelemente ausnutzen, um zu beschreiben, was geschieht, wenn Gravitationswellen auf eine Konfiguration von Testteilchen treffen. Dann zeigt sich in verschiedenen Fallstudien, dass Gravitationswellen **transversale** Wellen sind und zwei **Polarisationszustände** besitzen, die sich um 45° unterscheiden. Anders gesagt, hat das Gravitationsfeld zwei Strahlungsfreiheitsgrade, ist also eine **Tensorwelle** mit Spin 2. Die Gezeitenkräfte wirken senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Treffen linearisierte, ebenfrontige Gravitationswellen auf einen Ring aus Testteilchen, so geschieht eine **Quadrupoldeformation**: der Ring wird zunächst in einer Ebene in eine Ellipse, dann wieder in einen Ring und wiederum in eine Ellipse deformiert (illustriert in Animation).

Als Maß für die **Stärke einer Gravitationswelle**, die *Amplitude*, kann die Deformation des Rings mit Radius R zu einer Ellipse entlang der kürzeren Halbachse um dR dienen. Ein größerer Wert dR/R spricht demnach für eine stärkere, intensivere Welle. Eine typische Größenordnung der absoluten Längenänderung dR ist 10^{-21} Meter! Diese winzige Längenskala stellt die Messtechnik vor enorme Anforderungen. Im Wesentlichen ist dies die Ursache dafür, dass Gravitationswellen bisher nicht direkt mit einem Detektor gemessen werden konnten.

8.20.6 Woher kommen Gravitationswellen?

Als **kosmische Quellen** für Gravitationswellen kommen im Prinzip alle beschleunigten Massen in Frage. Die uns umgebende Raumzeit ist also nur in erster Näherung flach: vielmehr handelt es sich um ein ständig schwingendes, raumzeitliches Gebilde, in dem Gravitationswellen verschiedener Intensität und Frequenz interferieren. Zur Messung dieser Ereignisse gibt es nur eine Komplikation: die Raumzeit ist ein sehr *starres Gebilde*, und es sind enorme Massenbeschleunigungen nötig, um sie signifikant zum Schwingen zu bringen und so einen Detektornachweis zu erbringen. Aus diesem Grund kommen nur extreme Ereignisse

im Kosmos in Betracht. Diese Quellen werden nochmals nach dem Zeitverhalten des Signals unterschieden: Einmalige Ereignisse nennt man **Burst-Quellen**. Daneben gibt es regelmäßig zeitlich wiederkehrende Ereignisse von **periodischen Quellen**.

8.20.7 starke kosmische Gravitationswellen-Emitter

- ◇ Supernova-Explosionen (Typ II),
- ◇ kompakte Objekte in einem Mehrfachsystem, z. B. ein Doppelsternsystem aus zwei Neutronensternen (NS) oder stellaren Schwarzen Löchern (SL), also **kompakten Binären** (engl. *compact binaries*),
- ◇ entstehende kompakte Objekte im Gravitationskollaps,
- ◇ verschmelzende kompakte Objekte, insbesondere NS-NS-, NS-SL-, SL-SL-Verschmelzung,
- ◇ supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen von Galaxien (siehe auch Aktive Galaktische Kerne), die Masse durch Akkretion aufnehmen
- ◇ verschmelzende supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen von Galaxien
- ◇ oder die Entstehung des Universums im Urknall. Die Astronomen gehen davon aus, dass man mit Gravitationswellen noch tiefer in die Frühphasen des Universums schauen kann, als mit elektromagnetischen Wellen. Die natürliche, elektromagnetische Barriere der Rekombinationsära bei einer Rotverschiebung von $z \sim 1100$ bzw. etwa 400000 Jahre nach dem Big Bang ist 'transparent' für Gravitationswellen. Die Kosmologen hoffen, dass die Gravitationswellen aus dem frühen Kosmos das dichte, frühe Universum mehr oder weniger unbeeinflusst passiert haben und so wertvolle Informationen über die Entstehung unserer Universums bis zur Erde tragen können. Die Astronomen erwarten die Existenz eines **Gravitationswellenhintergrunds**, der als gravitatives Analogon zur kosmischen Hintergrundstrahlung zu betrachten ist.

8.20.8 Wie schnell zappelt eine Gravitationswelle?

Die **Frequenzen der Gravitationswellen** dieser Quellen sind sehr unterschiedlich und streuen nach aktuellen Berechnungen im Bereich von acht Größenordnungen, von 10^{-4} bis 10^4 Hz. Die niedrigsten Frequenzen im mHz-Bereich werden von umeinander kreisenden kompakten Binären erwartet. Doppelsternsysteme aus Weißen Zwergen tragen so zu einem kontinuierlichen Brummen im All bei. In der **Gravitationswellenastronomie** nennt man das *Untergrundrauschen*. Die Frequenz von verschmelzenden stellaren Schwarzen Löchern liegt bei ziemlich genau einem Millihertz, die Entstehung eines stellaren Schwarzen Lochs bei etwas höheren Frequenzen (engl. *chirp*: 'Zirpen', 'Zwitschern'). Bei 10^{-2} Hz liegt die Frequenz von Gravitationswellen aus einem Doppelsystem mit zwei massereichen Schwarzen Löchern von 100 000 Sonnenmassen. Eine solche Konfiguration ist vorstellbar, wenn ganze Galaxien miteinander verschmelzen und sich deren Kerne annähern. Die **ULIRG NGC 6240** ist ein favorisierter Kandidat für ein solches doppeltes, massereiches Schwarzes Loch (Arbeiten von *Stefanie Komossa*, MPE).

Die Frequenz erhöht sich im entwickelnden Binärsystem aus kompakten Objekten infolge der Abstrahlung von Energie und wird schließlich besonders groß, etwa 10 bis 100 Hz,

im 'Showdown', wenn sie verschmelzen. Die höchsten Frequenzen erwartet man bei der klassischen Kernkollaps-Supernova (engl. *core collapse SN*), also SN Typ II: Bei dieser Burst-Quelle liegen die erwarteten Frequenzen bei einem bis 10 kHz (Quelle: Website des deutschen Gravitationswellendetektors GEO 600).

Der mHz-Frequenbereich ist prinzipiell terrestrisch nicht beobachtbar. Erst **weltraumgestützte Laser-Interferometrie** wird dieses Beobachtungsfenster öffnen. Dies ist die Motivation für das multinationale Projekt **LISA** (engl. Akronym für *Laser Interferometer Space Antenna*), einer Anordnung aus Laserinterferometern, die im Weltraum Gravitationswellen messen soll!

Das Beobachtungsfenster auf der Erde öffnet sich erst **ab einer Frequenz von etwa 10 Hz**. Die Komponenten eines Doppelsternsystems nähern sich mit der Zeit immer mehr an, was die Frequenz der Gravitationswellen nach und nach erhöht. Kurz vor dem Kollaps des Binärs, d. h. dessen Verschmelzung, beträgt die Frequenz etwa 40 Hz und ist damit irdisch beobachtbar.

8.20.9 Zentrum deutscher Gravitationsforschung

In Deutschland sitzen die Experten für Gravitationswellen in Theorie und Experiment am MPI für Gravitationsphysik, das auch *Albert-Einstein-Institut* (AEI) genannt wird. Die Abteilung für Theorie befindet sich in Golm bei Potsdam, während die Experimentatoren und der L-förmige Gravitationswellendetektor in der Nähe von Hannover untergebracht sind. Das AEI entwickelt Datenanalyse-Verfahren für GEO 600 und LIGO. Außerdem berechnen die Gravitationsforscher am AEI theoretische Simulationen von umkreisenden und verschmelzenden kompakten Binären auf Supercomputern exzessiv behandelt. Am AEI beschäftigt man sich auch mit anderen Forschungsgebieten der Gravitation, neben Gravitationswellen. Wie an den meisten Forschungsinstituten wird eine enge, internationale Zusammenarbeit gepflegt.

8.20.10 Es geht komplizierter...

Die allgemeine Behandlung und Wechselwirkung von Gravitationswellen ist sehr kompliziert, wie der obige, mathematische Abriss sicherlich andeutet (obwohl dieser vereinfachend war: im Limes schwacher Gravitationsfelder und im Vakuum). Natürlich sollte die Energie, die die Gravitationswellen mit sich tragen, die Raumzeit selbst krümmen, ein Effekt, der in der linearisierten Theorie vernachlässigt wird. Außerdem verändern Gravitationswellen ihre Gestalt, wenn sie durch ein mit Materie gefülltes Medium propagieren, was man in Analogie zu elektromagnetischen Wellen als '**Brechung**' bezeichnen könnte.

Auch in Abwesenheit von Materie und einer Region, die nur von Gravitationswellen durchsetzt ist, können seltsame Dinge geschehen: Bei bestimmten Wellenlängen und Amplituden kann ein **Gravitationswellenpuls** kollabieren und eine Singularität hinterlassen: solche Brill-Wellen können aus reiner Gravitationsenergie, ein Schwarzes Loch erzeugen!

All diese Effekte verdeutlichen, dass eine tief gehende theoretische Behandlung nur mithilfe von Methoden der Numerischen ART möglich ist. Dann gelingt auch eine approximative Beschreibung von Quellen der Gravitationswellen. Ein mathematischer Zugang besteht z. B. darin, dass jede beliebige Massenverteilung durch elementare Quellen, den *Multipolen*, darstellbar ist. Eine **Multipolentwicklung** in einer geeigneten Basis ist

mit den *Kugelflächenfunktionen* (engl. *spherical harmonics*) sehr elegant möglich. Die Kugelflächenfunktionen bilden eine orthonormierte Basis auf der Einheitskugel. Damit eignen sie sich hervorragend, um beliebige Verteilungen auf Kugelschalen mathematisch darzustellen. In der Kosmologie nutzt man das aus, um die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung auf der Himmelskugel zu beschreiben. Dieses Verfahren ist auch aus der klassischen Elektrodynamik bekannt, um beliebige Ladungsverteilungen und deren Feldverteilungen im Umgebungsraum zu beschreiben. Außerdem erweist sich diese Methode sehr brauchbar bei der Behandlung des quantenmechanischen Wasserstoffsproblems (siehe Quantentheorie) und in der Kern- und Solarphysik. Es ist eine fundamentale Methode, die in sehr vielen Bereichen der Physik Anwendung findet.

Im Prinzip gibt es beliebig viele Multipole, die in der Reihenentwicklung durchnummeriert und bezeichnet werden (Monopol, Dipol, Quadrupol, Oktupol, Hexadekapol etc.). Numerisch interessant wird es dann, wenn aufgrund der Symmetrie der Massenverteilung bestimmte Terme herausfallen oder nach Erreichen einer bestimmten Genauigkeit die Reihenentwicklung abgebrochen werden darf.

8.20.11 Anwendung in der Pulsarphysik

Auf diese Weise ist es möglich einen Binärpulsar relativ einfach durch Multipole zu beschreiben. Dabei unterliegt das Quadrupolmoment einer sehr starken zeitlichen Änderung, weshalb die Abstrahlung von Gravitationswellen hier äußerst effektiv ist. Die so genannte **Quadrupolformel** ist eine der wenigen Formeln der Physik mit *dritter* Zeitableitung. **Indirekt (!)** wurden auf diese Weise Gravitationswellen bereits nachgewiesen: Die Emission von Gravitationswellen reduziert in einem Doppelsternsystem die Rotationsenergie des Systems. Infolge dieses Energieverlusts müssen sich die Sterne sukzessiv annähern. Im Prinzip geschieht diese Abstrahlung **bei allen** Doppel- und Mehrfachsternsystemen. Besonders effizient ist sie jedoch nur bei engen, kompakten Binären. Der **Binärpulsar *PSR1913+16*** ist 25 000 Lj entfernt und erzeugt eine sehr hohe Abstrahlungsleistung bei Gravitationswellen, nämlich fast 10^{45} Watt! Diese hohe Leistung beruht auf der Kompaktheit der Neutronensterne (etwa 1.4 Sonnenmassen mit je nur ca. 20 km Durchmesser) und der des Systems (Umlaufzeit von nur acht Stunden). Nur eine Komponente pulsiert nachweislich. Die Verkürzung der Umlaufzeit durch Abstrahlung von Gravitationswellen und damit die Reduktion der Pulsperiode kann hervorragend durch die Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben werden. Die Astronomen *Russel A. Hulse* und *Joseph H. Taylor Jr.* bekamen für ihre Langzeitbeobachtung und deren Interpretation 1993 den Nobelpreis für Physik. Ihr beobachteter Binärpulsar wird auch häufig als *Hulse-Taylor-Pulsar* bezeichnet. Die Beobachtung war nicht nur ein weiterer Erfolg für die ART, sondern auch für die **Gravitationswellenastronomie**. Der indirekte Nachweis spornt seither viele Kollaborationen an, die Gravitationswellen auch auf direktem Wege zu entdecken (siehe unten).

8.20.12 Pionier des Gravitationswellenexperiments

Experimentell wurde erstmals 1969 von *J. Weber* der Versuch unternommen, Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Das Messprinzip beruhte darauf, dass die Wellen die Anordnung von Testteilchen deformieren und die Teilchen dadurch relative Beschleunigungen erfahren. *Weber* benutzte einen anderthalb Tonnen schweren Zylinder aus Aluminium,

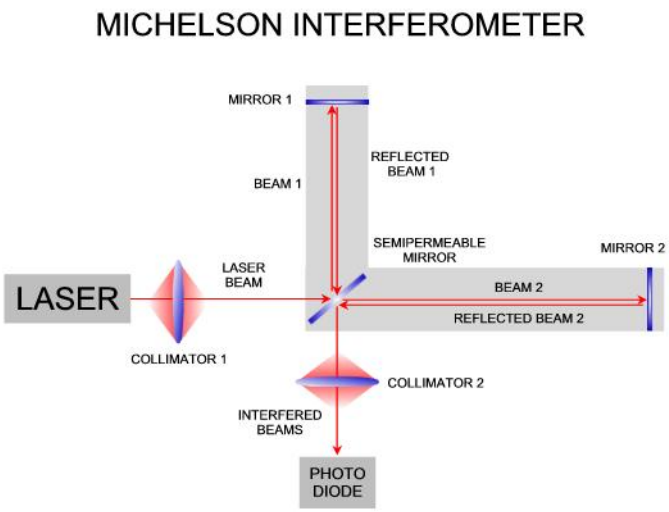

Abbildung 8.24: Aufbau des Michelson-Interferometers.

der mit Piezosensoren bestückt war und beim Durchgang von Gravitationswellen in Schwingungen versetzt werden sollte. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit einer Glocke, die man anschlägt und die dann in Schwingungen gerät. Um lokale Störeffekte ausschließen zu können, wurden zwei dieser Detektoren in 1000 km Abstand aufgestellt. Tatsächlich soll *Weber* Signale aus dem Galaktischen Zentrum detektiert haben, was aber nicht reproduziert werden konnte. Die Empfindlichkeit dieser Zylinder-Detektoren ist außerordentlich gering; außerdem reagieren sie **nur auf eine bestimmte Frequenz** von Gravitationswellen.

8.20.13 Laser-Interferometrie

Viel günstiger ist dagegen eine optische Anordnung aus **Laser-Interferometern**. Solche Messapparaturen beruhen auf dem klassischen *Michelson-Interferometer*, dessen Prinzip Abbildung 8.24 illustriert. Es ist bizarr, dass diese Messapparatur, die 1881/87 Einstein zur Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie bestärkte nun dazu benutzt werden soll, um die letzten Geheimnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie nachzuweisen.

Im experimentellen Aufbau von Laser-Interferometern wird ein sehr stabil laufender Festkörper-Laser dazu verwendet, um das infrarote Laserlicht mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels auf zwei optische Laufstrecken (so genannte **Arme**) aufzuteilen. Diese Arme bilden üblicherweise ein großes L. Am Ende dieser Strecken wird der Teilstrahl jeweils an einem weiteren Spiegel total reflektiert und wieder zu dem Ort geleitet, wo sich die beiden Teilstrahlen bildeten. Dort werden die Teilstrahlen überlagert. In der Physik nennt man die Überlagerung von Lichtwellen **Interferenz**. Interferierende Wellen bilden eine charakteristisches Interferenzmuster und können sich (bei gleicher Wellenlänge) auslöschen, wenn 'Wellenberg auf Wellental' trifft (*destruktive Interferenz*) oder verstärken, wenn 'Wellenberg auf Wellenberg' trifft (*konstruktive Interferenz*). Im Gravitationswellendetektor stellen die Forscher das optische System im normalen Modus so ein, dass durch destruktive Interferenz kein Licht sichtbar ist. Dort, wo die interferierenden Strahlen ausgekoppelt werden, ist es dunkel. Trifft nun eine Gravitationswelle senkrecht auf die Ebene, in der die

Arme des Interferometers liegen ein, so wird ein Arm (oder beide, je nach Einfallsrichtung) periodisch verkürzt und verlängert. Dies ändert die Bedingung für destruktive Interferenz, so dass plötzlich ein Signal am vormals dunklen Auskopplungsort erzeugt werden muss: die Gravitationswelle würde gemessen!

Das hört sich alles ganz toll an. Aber die **messtechnische Herausforderung** lässt sich pointiert wie folgt darstellen: die Interferometrie dient der Messung eines Gangunterschieds, also einer sehr kleinen relativen Längenänderung. Diese wurde mit einer Obergrenze zu 10^{-18} abgeschätzt. Bezogen auf die mittlere Armlänge von 3 km (wie bei LIGO, siehe unten) bedeutet dies, eine Länge unterhalb der Ausdehnung der Nukleonen im Atomkern messen zu wollen! Oder genauso unglaublich veranschaulicht: Auf der Länge eines Lichtjahres entspricht die Längenänderung aufgrund einer durchlaufenden Gravitationswelle dem Durchmesser eines menschlichen Haares! Daher ist klar, dass der Trend zu größeren Armlängen geht. Dies kann künstlich durch Mehrfachreflexionen des Laserstrahls innerhalb der optischen Kavität erreicht werden. Das Großprojekt LISA geht sogar in den Weltraum und kann die Armlänge eklatant steigern.

8.20.14 Lokalisierung der Quelle

Weltweit existieren eine ganze Reihe von Projekten, die auf dem Interferometrie-Prinzip beruhen und sich im Wesentlichen nur durch die Armlängen unterscheiden. Eine Zahl von mindestens zwei Apparaturen ermöglicht die **Lokalisierung** des Entstehungsortes der Gravitationswelle an der Himmelssphäre. Außerdem verbessert es die Messstatistik und reduziert den Einfluss von (lokalen) Störsignalen. Das 'Rauschen' durch störende, lokale Einflüsse wie Straßenverkehr, Flugzeuge, Erdbeben etc. kann durch globale Messungen an verschiedenen Orten der Erde minimiert werden. Die Planung sieht vor, die internationalen Projekte zu koppeln, den Datenaustausch zu bewerkstelligen und so Gravitationswellenastronomie im großen Stil zu betreiben. Das Konzept und auch dessen hohe, organisatorische Anforderungen ist damit der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) der Radioastronomie ähnlich.

8.20.15 Geplante und im Bau befindliche Laser-Interferometer

- ◇ GEO 600 mit 600 m Armlänge bei Hannover, BRD. Die deutsch-britische Kollaboration nimmt bereits Messungen auf.
- ◇ VIRGO mit 3 km Armlänge, die künstlich durch Mehrfachreflexionen auf 120 km gesteigert werden kann. Die französisch-italienische Kollaboration mit Standort nahe Cascina bei Pisa erreicht eine gute Empfindlichkeit im Bereich zwischen 10 und 1000 Hz der Gravitationswellen.
- ◇ TAMA 300 mit 300 m Armlänge in Japan. Das Projekt existiert seit 1995 und nutzt *Fabry-Perot Michelson Interferometer* zur Messung von Gravitationswellen.
- ◇ ***A**ustralian **I**nternational **G**ravitational **O**bservatory*, AIGO hat 80 m Armlänge und befindet sich in Australien.
- ◇ ***L**aser **I**nterferometer **G**ravitational Wave **O**bservaotory*, LIGO. LIGO ist ein Laserinterferometer mit 4 km Armlänge der USA. Die erste Anordnung wird mittlerweile verbessert: LIGO-II ist um einen Faktor 10 empfindlicher als LIGO-I.

- ◇ ***L**aser **I**nterferometer gravitational-wave **S**mall Observaotory in a **M**ine*, LISM, ist unterirdischer Detektor (1000 m Tiefe) in der Kamioka-Mine (wo sich auch der berühmte Neutrinodetektor *Super-Kamiokande* befindet) in Japan. LISM ist mit 20 m Armlänge zwar deutlich kleiner als konkurrierende Gravitationswellendetektoren, aber aufgrund seiner Abschottung durch das Gestein und seiner relativ erdbebensicheren Lage sehr empfindlich. Bislang wurde die Empfindlichkeit für Gravitationswellen mit einem Faktor 100 über derjenigen von LIGO beziffert (April 2004). Das thermische Rauschen wird mit kryogenisch gekühlten Instrumenten unterdrückt. So soll die Empfindlichkeit weiter gesteigert werden, um mit LIGO-II mithalten zu können.

- ◇ ***L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna*, LISA, ein **weltraum-gestütztes Projekt** mit 5 Millionen km Armlänge; das entspricht der 13fachen mittleren Entfernung der Erde zum Mond oder fast 17 Lichtsekunden! Dieses europäisch-amerikanische Projekt wird von der ESA und der NASA geplant und gefördert und soll aus drei baugleichen Satelliten bestehen, die ein riesiges, gleichseitiges Dreieck im All bilden und um 20° der Erde hinterher fliegen sollen. Mit diesem Laser-Interferometer der Superlative können sämtliche Gravitationswellen nachgewiesen werden, fast unabhängig von Frequenz und Richtung, weil die Armlänge so unglaublich groß ist und das Dreieck frei im Weltraum drehbar ist. Es ist geplant LISA 2015 zu starten und dann für fünf Jahre Messungen durchzuführen.

8.20.16 Gravitationswellensalat

Es sei auf eine weitere Komplikation bei der Detektion von Gravitationswellenemittern hingewiesen: Es gibt es viele Quellen, deren Signale (mit unterschiedlichen Amplituden und unterschiedlichen Frequenzen) überlappen. Selbst wenn also der Nachweis von Gravitationswellen gelingt, muss aus diesem 'Signalgemisch' die jeweilige Quelle extrahiert werden. Diese Problematik läuft unter dem Begriff 'Quellenverwechslung' (engl. *source confusion*) und ist ein generelles Problem der beobachtenden Astronomie. Hohe räumliche Auflösung und Frequenzfilter sind dabei die Methoden im elektromagnetischen Sektor, die auf analoge Weise für die Detektion von Gravitationswellen entwickelt werden müssen. Wie aus der bisherigen Betrachtung ersichtlich ist, kann die Armlänge des Interferometers als Frequenzfilter aufgefasst werden.

Trotz einiger aktiver Experimente wurden Gravitationswellen **bislang nicht** gesichert **direkt** nachgewiesen. Mit dem Betrieb der neuen Laser-Interferometer sollte dies möglich werden und der Astronomie ein neues Fenster ins All eröffnen: die **Gravitationswellenastronomie**.

8.21 Gravitomagnetismus

Gravitomagnetismus ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins*. Der Effekt ist wichtig bei rotierenden Raumzeiten. Dort gibt es den Lense-Thirring-Effekt bzw. das Frame-Dragging, das mit dem Gravitomagnetismus erklärt werden kann. Rotierende Massen erzeugen ein **gravitomagnetisches Feld**. Dieses Feld wirkt sich auf Teilchen und Licht aus und führt zur **Lense-Thirring-Präzession**.

8.21.1 Verwandtschaft von Gravitation und Elektromagnetismus

Die Lense-Thirring-Präzession wiederum ist das allgemein relativistische Analogon zur klassischen **Thomas-Präzession** eines magnetischen Moments im magnetischen Feld. In der klassischen Elektrodynamik kann man das magnetische Feld **B** aus einem magnetischen Vektorpotential **A** konstruieren, $\mathbf{B} = \mathrm{rot}(\mathbf{A})$. Im Rahmen des ADM-Formalismus der ART (3+1 Split) zerfällt das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum in dreidimensionale Teilräume (*Hyperflächen*) konstanter Koordinatenzeit. Von einer Hyperfläche zur nächsten, späterer Zeit vermittelt die Lapse-Funktion. Innerhalb der Hyperfläche von einem Ort zum anderen vermittelt der *Shift-Vektor*. Dieser kann als Vektorpotential wie in der Elektrodynamik aufgefasst werden und generiert dann das oben genannte *gravitomagnetisches Feld*. Der Elektromagnetismus hat also ein relativistisches Pendant: den **Gravitomagnetismus**. Das gravitomagnetische Feld beschreibt die Umgebung rotierender Massen und verschwindet bei nicht rotierenden, statischen Massen (beispielsweise bei Punktmassen wie der Schwarzschild-Lösung). Anders gesagt: Ein Massenstrom erzeugt ein gravitomagnetisches Feld, so wie ein elektrischer Strom ein magnetisches Feld in seiner Umgebung erzeugt. Aus dem *gravitomagnetischen Tensor* lässt sich eine gravitomagnetische Kraft ableiten. Diese Kraft ist das Analog zur Lorentz-Kraft der Elektrodynamik. Die gravitomagnetische Kraft lässt **Gyroskope** im gravitomagnetischen Feld präzedieren. Gyroskope sind nichts anderes als Kreisel. Ein Kreisel ist ein guter Testkörper, um den Lense-Thirring-Effekt experimentell zu vermessen. Ein präzedierender Kreisel macht eine typische Torkelbewegung, in der seine Drehachse nicht raumfest bleibt, sondern die Spitze eine Ellipse beschreibt.

8.21.2 Parallelen zur Quantenwelt des Spins

In der Quantentheorie kennt man die **Wechselwirkung von Drehimpulsen**, besonders die Kopplung des Bahndrehimpulses an den Spin, aber auch von Spins untereinander (*Spin-Spin-Wechselwirkung*). Diese Effekte sind mit dem Lense-Thirring-Effekt verwandt. Denn ein sich drehender Kreisel wechselwirkt mit einem rotierenden Körper in der Umgebung.

8.21.3 Gravitomagnetismus beim rotierenden Schwarzen Loch

Bedeutend ist der Lense-Thirring-Effekt in der Astrophysik, weil er Ursache für so genannte **gravitomagnetische Dynamos** ist. Dieser Mechanismus erzeugt starke, toroidale ('schlauchförmige') Magnetfelder nahe an rotierenden Schwarzen Löchern. Diese Löcher werden im Rahmen von Einsteins Theorie durch die Kerr-Geometrie beschrieben. Die Rotation ist vital, weil im Falle der statischen Schwarzschild-Lösung das gravitomagnetische Feld und somit die gravitomagnetische Kraft verschwinden. Das rotierende Loch hingegen verstärkt die Felder in der Magnetosphäre. Wie alle anderen Objekte, werden auch die Magnetfelder von der Rotation mitgerissen und verdrillt. Enger gewickelte Feldlinien entsprechen im Feldlinienbild einer Verstärkung des Feldes.

Dieses Phänomen wiederum spielt eine wichtige Rolle bei der allgemein relativistischen Magnetohydrodynamik: Während der Akkretion bilden sich Poynting-Fluss-dominierte Jets. D.h. über den Mechanismus von magnetischen Feldern, die mit dem rotierenden Loch wechselwirken, fällt nicht nur Materie in das Loch hinein, sondern kann den Bereich um das Loch wieder als Ausfluss verlassen.

Ein anderer Aspekt sind die quasi-periodischen Oszillationen (QPOs). Ein Ansatz der Astronomen besteht darin, dass eine der beobachteten QPO-Frequenzen mit der Lense-Thirring-Frequenz übereinstimme. Die quasi-periodisch wirkende gravitomagnetische Kraft sorgt in diesem Szenario für charakteristische, quasi-periodische Torkelbewegungen der inneren Akkretionsscheibe, wie bei einem Kreisel. In beobachteten Lichtkurven von Röntgenstrahlung finden sich diese charakteristischen Frequenzen.

8.22 Graviton

Das Graviton ist das **hypothetische** Austauschteilchen (Eichboson) einer Quantenfeldtheorie der Gravitation, einer Quantengravitation. Es ist ein **Tensorboson** und hat damit Spin 2.

8.22.1 Graviton vs. Photon

Wie beim Photon erwartet man, dass seine **Ruhemasse exakt null** ist, weil die Gravitation ebenso wie die elektromagnetische Wechselwirkung im Prinzip eine *unendliche Reichweite* hat. Gravitonen bewegen sich ebenfalls mit der Lichtgeschwindigkeit c, wie die Photonen.

Das Graviton darf nicht mit den *unquantisierten* Gravitationswellen verwechselt werden: die Gravitationswellen folgen aus den Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die aber eine klassische (soll heißen unquantisierte) Theorie ist. Die Gravitonen sind Quanten und müssen mit quantenfeldtheoretischen Konzepten beschrieben werden.

8.22.2 Ein bisschen Feldtheorie

Der feldtheoretische Ansatz besteht darin, sich die *Lagrangedichte* der betreffenden Feldtheorie zu beschaffen. Aus ihr folgt durch Auswertung der **Euler-Lagrange-Gleichungen** (wie man sie schon in der klassischen Mechanik notiert) die **Bewegungsgleichung der Theorie**, die Feldgleichungen. Eine solche Lagrangedichte wurde auch für die ART gefunden, die *Einstein-Lagrangedichte*

$$\mathcal{L}_{\text{Einstein}} = \sqrt{-g}R.$$

Dabei bezeichnet g die **Determinante der Metrik** und R die **skalare Krümmung**, die aus den Verjüngungen von Ricci-Tensor und Riemann-Tensor folgen. Im Prinzip lassen sich aus diesem Ansatz und der Annahme einer Lagrangedichte für die Materiefelder (mit endlichem analytischen Rechenaufwand) die vollen Einsteinschen Feldgleichung als Bewegungsgleichungen der ART ableiten! Im Zugang einer **Relativistischen Feldtheorie der Gravitation** (*relativistic field theory of gravity*, **RTG**) geht man wie bei den Gravitationswellen auch zunächst mit einem *linearisierten Ansatz* für die Metrik an das Problem heran:

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \epsilon\ \mathbf{h}_{\mu\nu}.$$

Man stattet die Gravitonen *mit* Masse aus, um gegebenenfalls den Masseparameter *a posteriori* null zu setzen, wie experimentell zu erwarten wäre. Wiederum handele es sich um schwache Gravitationsfelder, die nur wenig von der Minkowski-Metrik abweichen mögen (siehe Gleichung oben). Es handelt sich also um eine lineare Gravitation mit massebehafteten

Gravitonen auf einer flachen Hintergrundmetrik. Die Lagrangedichte sieht dann so aus, wie in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{Einstein}} - \frac{1}{4}m^2(\mathbf{h}_{\mu\nu}\mathbf{h}^{\mu\nu} + ah^2)$$

Andrei Gruzinov zeigte 2002, dass ein masseloses Graviton noch nicht durch Beobachtungen ausgeschlossen werden kann. Er nahm Bezug auf Beobachtungen im Sonnensystem, im Speziellen die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne und die Periheldrehung des Merkurs, die ein masseloses Graviton nahe legen sollen (*Zakharov* 1970, *van Dam & Veltman* 1970). Eine Behandlung mit massiven Gravitonen und der zweiten hier präsentierten Lagrangedichte (m: Gravitonenmasse, a = -1: Pauli-Fierz Massenterm) zeige hingegen, dass es nur eine **Obergrenze für die Gravitonenmasse** gebe.

Die Kollegen *Gershtein et al.* bestätigen diese These anhand von gemessenen WMAP-Daten. Bei Zugrundelegung des gemessenen, totalen Dichteparameters von 1.02 (**flaches** Universum) und dem Hintergrund der Robertson-Walker-Metrik, leiten sie eine Obergrenze der Gravitonenmasse von 1.3×10^{-66} Gramm bzw. 7.3×10^{-34} eV ab. Dieser Zahlenwert ist winzig, aber endlich.

Mit diesen Ergebnissen ist jedoch die verschwindende Ruhemasse noch nicht ausgeschlossen! Weitere Messungen und neue theoretische Zugänge bleiben abzuwarten. Die Erwartung scheint sich jedoch zu erfüllen.

8.22.3 Quantengravitation und mehr Raumdimensionen

Die Quantengravitation birgt weitere faszinierende Aspekte: schon Anfang des letzten Jahrhunderts wurde über die Möglichkeit spekuliert, dass neben den vier Dimensionen der Relativitätstheorie zusätzliche Raumdimensionen existieren könnten. In der **Kaluza-Klein-Theorie** der 1920er Jahre wurde der Versuch unternommen die ART mit der Elektrodynamik in einer übergeordneten, vereinheitlichten Theorie zu beschreiben. Leider hatte diese Theorie einige Pathologien, so dass erst Anfang der 1990er Jahre im Rahmen der Stringtheorien das Thema Extradimensionen wiederbelebt wurde. Die aktuelle Forschung spekuliert darüber, ob die Physik des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen niedrigdimensionalen Raum (Unterraum, engl. *subspace*) - einer so genannten **3-Bran** - beschränkt ist, während sich die Gravitation in einem höherdimensionalen Raum, nämlich 3-Bran **plus** Extradimensionen, dem **Bulk**, ausbreiten kann. Das hätte unter anderem die erstaunliche Konsequenz, dass Gravitonen, die in hochenergetischen Stößen (z. B. in Teilchenbeschleunigern) entstehen könnten, in Extradimensionen verschwinden und damit Energie forttragen! Experimente, die den Energieerhaltungssatz verletzen, könnten daher ein Indiz für solche Prozesse sein. Danach wird in Teilchenbeschleunigern der neusten Generation tatsächlich gesucht.

8.22.4 Quellenverweise

- ◇ Veröffentlichungen zum Thema *Gravitonenmasse*: *A. Gruzinov*, 2002, astro-ph/0112246; *Gershtein et al.*, 2003, astro-ph/0305125
- ◇ Review zur Quantengravitation und Extradimensionen von *M. Cavaglia*, hep-ph/0210296)

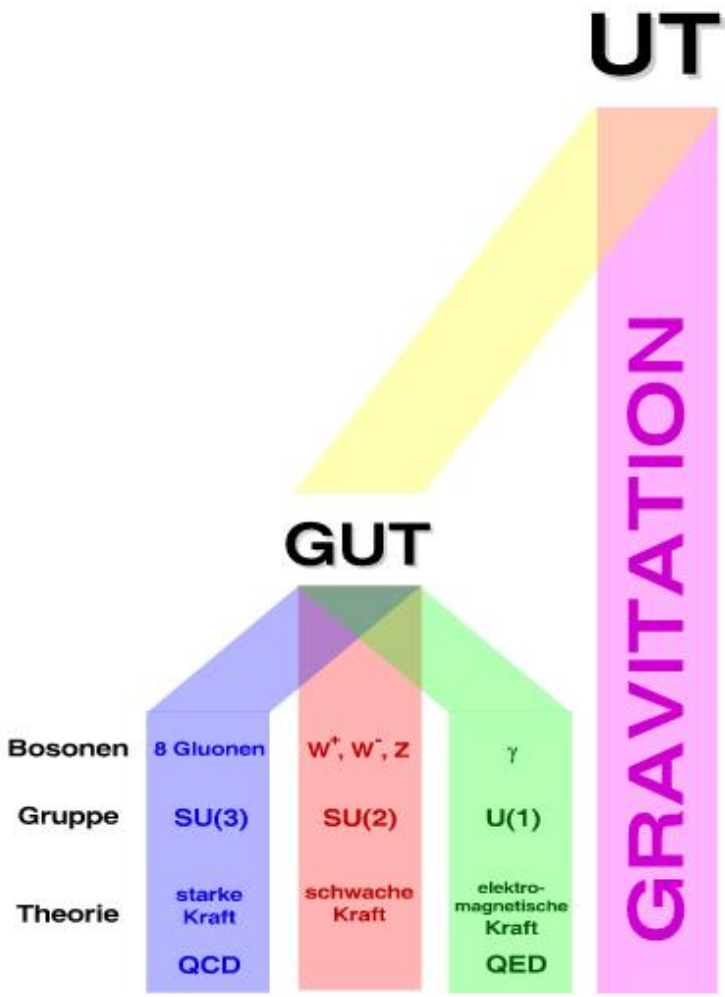

Abbildung 8.25: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).

8.23 GRBR

Dies sind die Relikte oder Überreste von Gamma Ray Bursts (GRBs). Das Akronym GRBR steht für *Gamma Ray Burst Remnant*. Sie sind vergleichbar den viel bekannteren SNR und zeigen Strukturen von expandierenden Schockwellen (*blast waves*) durch das interstellare Medium (ISM). Über Fermi-Prozesse können dabei ultra-hochenergetische Neutrinos gebildet werden.

8.24 Große Vereinheitlichte Theorien

In den Großen Vereinheitlichten Theorien (engl. *Grand Unified Theories, kurz GUT*) ist die Vereinigung von dreien der fundamentalen Naturkräften gelungen, nämlich elektromagnetischer, schwacher und starker Wechselwirkung. Schematisch zeigt das Grafik 8.25.

8.24.1 Motivation

Warum sollte man diese für uns offensichtlich separat in Erscheinung tretenden Kräfte vereinigen wollen? Die Antwort ist, dass die 'laufenden Kopplungskonstanten' der genannten drei Kräfte auf eine vereinigte Kraft hinweisen. Eine Kopplungskonstante ist als Maß für die Stärke einer Kraft zu verstehen. Die starke Kraft ist die stärkste von den vieren (daher ihr Name), die Gravitation die schwächste. Nun zeigt sich jedoch, dass sich bei höheren Energien die Kopplungskonstanten annähern: sie 'laufen' und konvergieren bei einer Energie von etwa 2×10^{16} GeV, wie man aus Hochenergie-Experimenten in Teilchenbeschleuniger extrapolieren konnte. Ab dieser Schwellenenergie sind starke, elektromagnetische und schwache Wechselwirkung nicht mehr voneinander unterscheidbar und manifestieren sich in einer fundamentalen Kraft, der so genannten X-Kraft. Dies ist ein Zustand höherer Symmetrie. Ein Unterschreiten der Schwellenenergie von 2×10^{16} GeV bricht diese Symmetrie und sorgt für ein Aufspalten der X-Kraft in die elektroschwache und starke Kraft. Im Grenzwert kleiner Energien verschwindet demnach die X-Kraft, so wie wir es auch täglich beobachten.

Die drei Kräfte, die in der GUT zur X-Kraft 'verschmelzen', beschreiben die Physiker für sich genommen mit Quantenfeldtheorien. Die Quantenelektrodynamik (QED) beschreibt elektromagnetische Prozesse auf der Quantenebene, die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt den Zusammenhalt von Atomkernen und Nukleonen und das Glashow-Weinberg-Salam-Modell beschreibt schwache Prozesse, wie den Beta-Zerfall. Es liegt nahe, dass es auch für die GUT eine entsprechende Quantenfeldtheorie gibt. Sie kann aus der mathematischen Beschreibung der separaten Kräfte gewonnen werden. Dazu benutzen die Teilchenphysiker die Gruppentheorie. Jeder Wechselwirkung ist eine bestimmte Gruppenstruktur - eine Symmetriegruppe - zugeordnet:

8.24.2 Gruppenzugehörigkeiten

- ◇ Bei der elektromagnetischen Kraft heißt sie **U(1)**, unitäre Gruppe. Aus dem Gruppenformalismus folgt die Existenz eines Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, dem **Photon** (die Regel, dass eine Gruppe N^2 - 1 Erzeugende hat, gilt hier nicht!).

- ◇ Die schwache Wechselwirkung wird durch die spezielle, unitäre Gruppe **SU(2)** repräsentiert. Hier gilt die Regel, dass die Gruppe N^2 - 1 Erzeugende hat, also drei (2^2 - 1 = 3) schwache Austauschteilchen. Es handelt sich um die *masselosen* **Weakonen** W^+, W^- und W^0 genannt werden. Erst durch 'Mischung' - beschrieben mit dem Weinberg-Winkel - von Photon und Z-Teilchen in einer **elektroschwache Theorie** (Schwellenenergie: 1 TeV) wird aus dem masse*losen* W^0 ein masse*behaftetes* Z^0. Ebenso werden die geladenen W-Teilchen massiv. Das Higgs-Boson sorgt dann letztendlich über den Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung für die hohen Massen der schwachen Eichbosonen.

- ◇ Die starke Wechselwirkung wird durch die **SU(3)** dargestellt. Sie hat gegenüber der SU(2) eine Dimension mehr. Daraus folgen acht (3^2 - 1 = 8) starke Eichbosonen, die eine so genannte Farbladung tragen: sie heißen **Gluonen**.

8.24.3 Wir basteln uns eine GUT

Das sind also die Gruppenstrukturen der separaten Kräfte. Die einfachste GUT erhält man, wenn man das **direkte Produkt** der einzelnen Symmetriegruppen der drei Wechselwirkungen (ohne Gravitation) bildet. So resultiert eine **SU(5)-Theorie** mit **24 Eichbosonen** (5^2 - 1). Das heißt also, dass neben den 12 bisher bekannten Eichbosonen (8 Gluonen, 1 Photon, 2 W-Teilchen und 1 Z-Teilchen) 12 weitere hinzukommen. Diese neuen Eichbosonen nennt man **X-Bosonen**, und **Y-Bosonen**. Sie gehören zu den Leptoquarks (Neologismus aus Leptonen und Quarks). X- und Y-Bosonen und deren Antiteilchen sind elektrisch, schwach und farbgeladen. Außerdem sind es Vektorbosonen, die also Spin 1 haben. X- und Y-Bosonen sind superschwer und haben Massen um 10^{16} GeV - zum Vergleich: Proton und Neutron wiegen jeweils 1 GeV. Die X-Bosonen tragen eine elektrische Ladung von 4/3 Anteile der Elementarladung ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ C). Demzufolge tragen Anti-X-Bosonen -4e/3. Die Y-Bosonen haben ein Drittel der Elementarladung, so dass Anti-Y-Bosonen die elektrische Ladung von -1e/3 tragen. Auf die insgesamt 12 X- und Y-Bosonen (inklusive Antiteilchen) kommt man nun, wenn man die Farbladung als weiteren Freiheitsgrad ergänzt: Jedes X-, Anti-X-, Y- und jedes Anti-Y-Boson kann die Farbladung *rot*, *grün* oder *blau* annehmen (entsprechend Indizes R, G, B). So benutzt man die Symbole X_R, X_G, X_B, Y_R, Y_G, Y_B und für die Antiteilchen Anti-X_R, Anti-X_G, Anti-X_B, Anti-Y_R, Anti-Y_G, Anti-Y_B.

8.24.4 Wir basteln uns eine andere GUT

Die Beschreibung der GUT mittels einer SU(5)-Gruppe stellt die einfachste Realisierung dar. Daneben wurde 1975 eine SO(10)-Eichgruppe vorgeschlagen (*Fritzsch & Minkowski, Georgi*). In der SO(10) ist die SU(5) als Untergruppe enthalten. Wie zu erwarten ist, sind in dieser Gruppe noch mehr Eichbosonen enthalten als die 24 der SU(5)-Theorie. Daneben können alle GUT-Modelle erweitert werden, so dass sie Supersymmetrie (SUSY) enthalten. Die Supersymmetrie entpuppt sich dabei als eine **vitale Ingredienz**, damit sich die drei laufenden Kopplungskonstanten tatsächlich in einem Punkt treffen. *Ohne SUSY verfehlen sich die Kurven knapp.* Deshalb gilt dieses extrapolierte Verhalten als gewichtigster Hinweis auf SUSY! Welche Gruppenstruktur die richtige Wahl für die GUT ist, muss die innere Konsistenz der Theorie und ihre Kompatibilität zu anderen Theorien sowie natürlich zum Experiment zeigen.

8.24.5 GUT und was sind die Konsequenzen?

1) Zerfall des freien Protons

Die wichtigste Folgerung der GUT ist der **Zerfall des freien Protons**. Das *gebundene* Proton zerfällt bekanntermaßen im radioaktiven β^+-Zerfall. Sollte es die neuen Leptoquarks wirklich geben, so sind Feynman-Diagramme denkbar, in denen beispielsweise ein Proton in ein Positron und ein neutrales Pion (= Pi-Meson) zerfällt. Das neutrale Pi-Meson zerfällt seinerseits in Photonen (Photopionenproduktion):

$$p \rightarrow e^+\pi^0 \rightarrow e^+\gamma\gamma.$$

Solche Prozesse verstoßen gegen die **Baryonenzahlerhaltung**. Die Baryonenzahl B ist eine Quantenzahl. Für die Nukleonen (Proton und Neutron) ist sie jeweils 1, für das Antiproton -1, für die Quarks je 1/3, für Antiquarks -1/3 und für alle Leptonen (Elektronen, Myonen,

Tauonen, Neutrinos) ist sie null. Mit dieser Kenntnis kann man folgende Baryonenzahl-Bilanz für die Zerfallsgleichung des Protons machen. Die linke Seite enthält nur das Proton: $B_L = 1$ (L für 'links'). Die rechte Seite enthält nun ein Positron mit verschwindender Baryonenzahl, weil es ein Lepton ist und ein Pi-Meson. Das neutrale Pion besteht aus zwei Quarks, u-Quark mit $B = 1/3$ und Anti-u-Quark B = -1/3. So folgt $B_R = 0$ (R für 'rechts'). Der Vergleich von B_L und B_R ergibt einen Unterschied, d. h. in diesem Prozess ist die Baryonenzahlerhaltung verletzt!

Protonenzerfall wird durch die X-Kraft vermittelt. Die extrem hohe Masse der X- und Y-Bosonen führt dazu, dass diese X-Kraft extrem kurzreichweitig ist. Anschaulich gesprochen müssen sich Teilchen sehr, sehr nahe kommen, damit sie die X-Kräfte spüren. Das ist sehr unwahrscheinlich. Präzise das ist der Grund dafür, dass die Zerfallszeit des freien Protons enorm groß ist. Theoretisch konnte man einen Wert von etwa $\mathbf{10^{32}}$ **Jahren** ableiten! Experimentell versucht man dieses Phänomen mit Szintillationszählern zu messen. Diese Detektoren sind in der Lage kurze Lichtblitze zu messen, die aus dem Protonenzerfall als Cerenkov-Strahlung entstehen. Dazu werden die Zähler um einen großen Wassertank herum angeordnet. Der Grund, dass man gerade Wasser verwendet besteht darin, weil es naturgemäß sehr viele Protonen in Form von Wasserstoffatomkernen enthält ($\mathbf{H}_2$O). Wie die Zerfallszeit nahe legt, sollte bei einer Zahl von 10^{32} Protonen im Tank, der Zerfall einmal im Jahr beobachtbar sein. Ein noch größerer Tank verbessert die Statistik entsprechend. Bislang blieb der Erfolg aus und man konnte keinen Zerfall des freien Protons detektieren.

2) Materie-Antimaterie-Asymmetrie

Die schweren X- und Y-Bosonen zerfallen in Quarks und Leptonen nach folgenden Reaktionsgleichungen:

$$\begin{aligned} X &\to uu & \bar{X} &\to \bar{u}\bar{u} \\ X &\to \bar{d}e^+ & \bar{X} &\to de^- \\ Y &\to \bar{u}e^+ & \bar{Y} &\to ue^- \\ Y &\to \bar{d}\bar{\nu}_e & \bar{Y} &\to d\nu_e \end{aligned}$$

Dabei wird nicht nur die Erhaltung der Baryonenzahl B verletzt, sondern auch die der Leptonenzahl L. Interessanterweise ist die Differenz B - L wieder eine Erhaltungsgröße (nur in der SU(5)-Theorie). Außerdem gilt **Erhaltung der elektrischen Ladung**. Man kann die GUT auch so auffassen: Sie stellt eine **Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen** her. Dies besitzt eine Analogie zur Supersymmetrie, die eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen generiert.

In der Kosmologie und letztendlich für unsere Existenz sind die X- und Y-Bosonen von großer Bedeutung: Kurz nach dem Urknall waren alle Kräfte gleich. In dieser Planck-Ära gab es nur eine **Urkraft**. Schließlich setzte der erste Phasenübergang ein: Durch die Expansion des Universums und der damit verbundenen Abkühlung fand eine spontane Symmetriebrechung statt. Deshalb spaltete sich die Urkraft in die X-Kraft und die Gravitationskraft auf. Diese auf die Planck-Ära folgende Epoche nennt man die **GUT-Ära**. Zeitlich ist sie auf 10^{-36} bis 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall anzusiedeln. Die GUT-Epoche ist gekennzeichnet von der Existenz superschwerer X- und Y-Bosonen mit Massen von etwa 10^{16} GeV. Doch das Universum expandierte weiter und wurde kälter. Beim Unterschreiten der GUT-Schwellenenergie von 2×10^{16} GeV, entsprechend einer Temperatur von 10^{29} Kelvin setzte

der nächste Phasenübergang ein. Die X-Kraft zerfiel in elektroschwache Kraft und starke Kraft. Die X- und Y-Bosonen waren nun nicht mehr stabil. Sie zerfielen und reicherten die Urmaterie mit Quarks und Leptonen an. Interessanterweise war der Zerfall jedoch **asymmetrisch**: Es entstanden unterschiedliche Mengen von Teilchen und Antiteilchen. Das primordiale Plasma war heiß und dicht und die Teilchen konnten nicht 'friedlich' mit ihren Antiteilchen koexistieren. Es kam zu einer heftigen Vernichtungsschlacht von Teilchen und Antiteilchen, deren Gewinner die Gammaphotonen waren. In dieser Phase spricht man vom **strahlungsdominierten Kosmos**, weil die Annihilation (Zerstrahlung, Vernichtung) eine ungeheuer große Zahl an Photonen erzeugte. Nun kam jedoch die geringfügige Asymmetrie zum Tragen: Es gab ein bisschen mehr Teilchen als Antiteilchen. Am Ende der Annihilation gab es sehr viele Photonen, aber auch eine Materieteilchen. Dies war die Saat für die ersten Sterne, Galaxien und die Voraussetzung für irdisches Leben: Wo wären wir heute ohne X- und Y-Bosonen?

8.24.6 Novalis: 'Hypothesen sind Netze, nur der wird fangen, der auswirft...'

Die GUT ist demnach ein recht erfolgreiches und viel versprechendes Konzept. Allerdings darf man nicht vergessen, dass sie noch eine Hypothese ist, die nicht erfolgreich bestätigt werden konnten. Aber der Leiter der vereinheitlichten Kräfte steht man heute auf der Sprosse der elektroschwachen Theorie: Sie wurde bestens durch die Verifikation von Z- und W-Teilchen bestätigt.

Die Vereinigung von X-Kraft und Gravitation macht dagegen konzeptionelle Probleme. Die Hinzunahme der Gravitation zur GUT stellt gerade eine Vereinheitlichung **aller Naturkräfte** dar. Die Forscher sind noch nicht so weit, als dass sie diese *Unified Theory* (**UT**) gefunden hätten. Die Herausforderung besteht darin, eine robuste Quantengravitation zu formulieren. Das ist die Basis, um alle Kräfte quantenfeldtheoretisch einheitlich zu beschreiben. Ein Erfolg versprechender Kandidat für eine UT ist die M-Theorie. Sie kann als übergeordnetes Konstrukt zu den Stringtheorien angesehen werden. Einer Unifikation aller Naturkräfte scheint dieser Ansatz besonders nahe zu kommen, aber bisher tun sich die Stringtheorien schwer mit Detailvorhersagen, die direkt in aktuellen Experimenten überprüft werden könnten. Ein zweiter Forschungspfad ist die Loop-Quantengravitation (LQG), die weniger dem Unifikationsbestreben aller Kräfte folgt. Hier geht es speziell um eine quantisierte Beschreibung der Gravitation, die der Allgemeinen Relativitätstheorie in besonderem Maße Rechnung trägt.

8.25 Gruppe

Gruppe meint ein mathematisches Gebilde, das bestimmten Kriterien genügt. Generell gibt es in einer Gruppenstruktur *Elemente* einer bestimmten *Menge*, die miteinander durch eine *mathematische (binären) Operation*, beispielsweise einer **Transformation**, verknüpft werden. Bei den Gruppen resultiert aus dieser Operation wieder ein Element, das zur Ausgangsmenge gehört.

8.25.1 Kriterienkatalog mathematischer Gruppen

- *Abgeschlossenheit* (engl. *closure*, Eigenschaft **i**): die Verknüpfung zweier Elemente führt wieder auf ein Element der Gruppe.

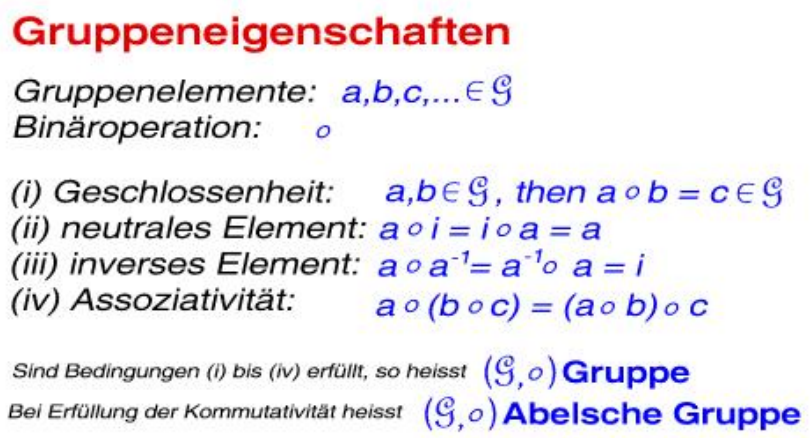

Abbildung 8.26: Definition und Eigenschaften einer Gruppe.

- ◇ Existenz eines *neutralen Elements* i (Eigenschaft **ii**): die Operation ist eine *Identität*.
- ◇ Existenz eines *inversen Elements* (Eigenschaft **iii**): die Operation von Element und zugehörigem inversen Element führt auf das neutrale Element.
- ◇ *Assoziativität* (Eigenschaft **iv**).

Sind alle diese Eigenschaften (vergleiche Abbildung 8.26) erfüllt, heißt die Menge mit betreffender binären Operation *Gruppe*. Ist außerdem *Kommutativität* gegeben, also Vertauschen der Reihenfolge von Operationen führt zum gleichen Ergebnis, so nennt man die Gruppe *abelsch* (engl. *Abelian group*).

8.25.2 Bezug zur Physik: Eichtheorie

In Physik ist die **Gruppentheorie** ein sehr wichtiger mathematischer Zweig, der zu einem tiefen Verständnis der Natur führt. Man untersucht dabei die *Invarianzeigenschaften* physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die auf **Symmetrien** und **Erhaltungsgrößen** führen (*Noether-Theorem*). Viele physikalische Transformationen (Rotationen, Translationen, Galilei-Transformation, Lorentz-Transformation etc.) erfüllen gerade die Gruppeneigenschaften und bilden damit mathematische Gruppen. Die Struktur dieser Gruppen hat einen tiefsinnigen, physikalischen Gehalt, weshalb das Studium der Gruppentheorie lohnt.

So offenbaren auch die Gravitationstheorien Gruppenstrukturen: die klassische Newtonsche Theorie kann auf die **Galilei-Gruppe** zurückgeführt werden.

Die Spezielle Relativitätstheorie und Allgemeine Relativitätstheorie stehen mit der Speziellen und Allgemeinen Lorentzgruppe in Zusammenhang. Man erkennt hier Verwandtschaften zu den klassischen **Drehgruppen** des zwei- und dreidimensionalen Raumes, was nahe legt, dass zumindest ein Anteil bei den Lorentz-Transformationen als Drehung im vierdimensionalen Minkowski-Raum interpretiert werden kann.

Die Quantenfeldtheorien des Standardmodells der Teilchenphysik, Quantenelektrodynamik, Quantenchromodynamik und schwache Wechselwirkung sind ebenfalls mit Symmetriegruppen bestimmter Gruppenstruktur verknüpft.

In den Eichtheorien führt man *Eichfelder* ein, die dafür sorgen, dass gewisse Symmetrien erhalten bleiben. Diese Eichfelder werden als **Eichbosonen** interpretiert, die gerade die Wechselwirkung der jeweiligen Eichtheorie vermitteln. Es handelt sich um die *intermediären* Vektorbosonen, also Spin 1 tragende Austauschteilchen. Einzige Ausnahme bildet das hypothetische Graviton, das Austauschboson einer Quantengravitation, das ein Tensorboson (Spin 2) ist.

Das Konzept macht klare Aussagen zu diesen Wechselwirkungen, wie beispielsweise zur Zahl ihrer Eichbosonen und die Erscheinung der Wechselwirkungskräfte. In der QED beispielsweise erreicht man eine *Invarianz der Dirac-Gleichung* (die man aus einer speziell relativistischen Quantenmechanik extrahiert) durch die Einführung eines Eichfeldes, das man schließlich mit dem Photon identifiziert!

Die Methodik ist in den anderen Quantenfeldtheorien identisch: Physiker sind immer daran interessiert, die Bewegungsgleichungen der jeweiligen Theorie, die **Feldgleichungen**, invariant unter bestimmten **Eichtransformationen** zu lassen. Die resultierenden Eichfelder können immer als Eichbosonen der Theorie interpretiert werden, die die Wechselwirkung vermitteln!

Die **ungebrochenen Eichtheorien** beinhalten masselose Eichbosonen, wie es im Falle der QED und dem masselosen Photon erfüllt ist. Massebehaftete Eichbosonen kann man erst durch den Higgs-Mechanismus generieren, so zum Beispiel in der Schwachen Wechselwirkung. Das Higgs-Boson bewirkt eine spontane Symmetriebrechung und stattet durch Wechselwirkungen mit Fermionen und Bosonen diese mit Masse aus.

8.25.3 Terminologie von Gruppen

Die Gruppennamen fußen auf den Eigenschaften der Transformation. Gegeben sei eine Eichgruppe *G(N)*. Es gelten folgende Vereinbarungen und Definitionen:

- ◇ *G(N)* heißt *speziell*, wenn die Determinante der Transformationsmatrix exakt eins ist: det(U)= 1. Die speziellen Gruppen nennt man die *S(N)*.

- ◇ *G(N)* heißt *unitär*, wenn die Transformationsmatrix unitär ist: $U^{+} = U^{-1}$. Dabei bezeichnet $^{+}$ oder ^{*T} die Bildung der komplexen Konjugation aller Komponenten der Matrix sowie anschließende Transposition, also das Vertauschen von Spalten und Zeilen der Matrix. Die unitären Gruppen nennt man die *U(N)*.

- ◇ *G(N)* kann beide Eigenschaften, speziell und unitär, erfüllen. Dann heißen diese Gruppen die *SU(N)*.

- ◇ *G(N)* heißt *orthogonal*, wenn die Transformationsmatrix orthogonal ist, $O^{T} = O^{-1}$. Dabei bezeichnet ^{T} wiederum die Transposition, also das Vertauschen von Spalten und Zeilen einer Matrix (Anmerkung: Bei **reellen Matrizen** fallen die Begriffe *unitär* und *orthogonal* zusammen.). Diese Gruppen erhalten das Präfix *O*.

- ◇ Die speziellen, orthogonalen Gruppen heißen auch *SO(N)*.

- ◇ Das N in *G(N)* gibt gerade die *Dimension* der Transformationsmatrix an.

8.25.4 Beispiele:

◇ **1)** Die SO(2) ist Drehgruppe im 2D-Raum. Sie wird von Pauli-Spin-Matrizen (oder alternativ den Quaternionen) generiert. Dies sind also 2×2 - Matrizen. Die $2^2 - 1 = 3$ Pauli-Matrizen heißen **Generatoren** der Drehgruppe.

◇ **2)** Dementsprechend ist die SO(3) die Drehgruppe im 3D-Raum. Die Drehungen leisten 3×3 - Matrizen.

◇ **3)** *Heisenberg* führte eine Symmetrie zwischen Proton und Neutron, den Nukleonen ein. Sie haben denselben **Isospin**, *I = 1/2*, aber unterschiedliche Projektionen dieses Isospinvektors. Die zugrunde liegende Gruppe des Isospins ist die SU(2). In Abwesenheit von elektromagnetischer Wechselwirkung wären Proton und Neutron identisch, aber infolge der vorhandenen elektromagnetischen Wechselwirkung findet eine Symmetriebrechung statt und bewirkt den geringfügigen Unterschied in den Massen dieser beiden Teilchen und den klaren Unterschied in der elektrischen Ladung.

◇ **4)** Die Quantenelektrodynamik hat eine besonders einfache Gruppenstruktur, die U(1). Die Transformationsmatrix ist demnach eine unitäre 1×1 - Matrix. Das Eichboson ist das masselose, elektrisch neutrale Photon, der Generator der U(1). Die assoziierte Symmetrie bzw. Erhaltungsgröße ist die **erhaltene elektrische Ladung**.

◇ **5)** Die **schwache Hyperladung**, eine Quantenzahl, fußt ebenfalls auf der U(1)-Gruppe.

◇ **6)** Der **schwache Isospin**, wie er ausführlich bei den Leptonen beschrieben wird und zu deren Klassifikation dient, basiert auf der SU(2)-Gruppe.

◇ **7)** Die Gruppenstruktur der Quantenchromodynamik basiert auf der SU(3) und wird also durch spezielle, unitäre 3×3 - Transformationsmatrizen beschrieben. Das **Farb-Oktett**, die acht masselosen Gluonen mit Farbladung, sind kein Zufall: sie sind gerade die $3^2 - 1 = 8$ linear unabhängige Generatoren dieser Symmetriegruppe. Die Erhaltungsgröße ist die **erhaltene Farbladung**.

◇ **8)** Eine besondere Stellung und höhere Komplexität nimmt die schwache Wechselwirkung ein. Die schwachen Austauschteilchen sind **nicht masselos**, sondern sogar sehr massereich, nämlich 86fache bzw. 97fache Protonmasse! Auch ist der 'schwache Ladung' nicht erhalten. Das gibt bereits einen Hinweis auf eine kompliziertere Gruppenstruktur. Die Teilchenphysiker fanden das direkte Produkt zweier Gruppen $SU(2) \times U(1)$ und begründeten eine **elektroschwache Theorie**. Deren Anfangszustand ist eigentlich symmetrisch und führt auf **vier masselose Bosonen**. Die Umgebung, das Quantenvakuum ist hingegen *nicht symmetrisch*. Dieses Vakuum, was durch ein masseloses Skalarfeld, dem Higgs-Teilchen beschrieben wird, bewirkt eine **spontane Symmetriebrechung** in dessen Folge die beiden W-Teilchen und das Z-Teilchen eine Masse erhalten, das Photon hingegen nicht.

◇ **9)** Das Unifikationsbestreben geht jedoch noch viel weiter, als nur bei diesen zwei Wechselwirkungen. In den Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) kann man drei der vier fundamentalen Kräfte (ohne Gravitation) in einem einheitlichen Bild beschreiben. Das direkte Produkt der einzelnen Symmetriegruppen führt auf die **SU(5)-Gruppe** 24 Eichbosonen. Somit handelt man sich 12 weitere bosonische Austauschteilchen neben

den bekannten ein, sie heißen **X-Bosonen** oder *Leptoquarks*. Die Theorie hat sicherlich einen ästhetischen Reiz, doch muss das Experiment ihre Gültigkeit untermauern. Entweder schafft man es, diesen Nachweis in Teilchenbeschleunigern zu erbringen oder die Beobachtung des Frühen Universums, nur Sekundenbruchteile nach dem Urknall bringt Indizien zur Richtigkeit der GUT.

◇ **10)** Die Spezielle Lorentz-Transformation lässt die Minkowski-Metrik invariant und ist daher eine Isometrie. Man kann die Gruppeneigenschaften anhand der Lorentz-Transformationsmatrix nachvollziehen und die **Spezielle Lorentz-Gruppe** ableiten. Dem übergeordnet ist die Poincarégruppe, die um Translationen erweitert ist. Die Lorentzgruppe ist demgemäß eine **Untergruppe** der Poincarégruppe.

Untergruppen sind auf Untermengen definiert, die jedoch ebenfalls die Kriterien einer mathematischen Gruppe erfüllen.

8.26 GUT

GUT ist das englische Akronym für die Großen Vereinheitlichten Theorien, den ***G**rand **U**nified **T**heories*. Es handelt sich dabei um eine physikalische Theorie, die auf eine Unifikation der Naturkräfte abzielt. Die GUT ist dabei die konsequente Weiterentwicklung der erfolgreichen Elektroschwachen Theorie. Während diese Theorie die elektromagnetische Kraft und die schwache Kraft vereint, vermag die GUT sogar drei Kräfte in einem vereinigenden Konzept zu beschreiben: elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung.

8.26.1 Nachwuchs im Teilchenzoo

Mit dieser Vereinheitlichung gehen notwendigerweise neue Teilchen einher, die die Physiker X-Bosonen und Y-Bosonen nennen. Sie sind gerade die Austauschteilchen der X-Kraft, derjenigen Kraft, zu der elektromagnetische, schwache und starke Kraft 'verschmolzen' sind.

Die GUT ist noch von hypothetischem Charakter und existiert in unterschiedlichen Ausarbeitungen (verschiedene Gruppenstrukturen; mit oder ohne Supersymmetrie). Ein wesentlicher experimenteller Test besteht im **Zerfall des freien Protons**, den die GUT prognostiziert. Bisher wurde er trotz erheblichen Aufwands nicht nachgewiesen.

In der Kosmologie ist die GUT von Relevanz, weil im Rahmen eines heißen Urknalls (engl. *Hot Big Bang*, HBB) eine Epoche in der Entwicklung des Universums existiert haben muss, in der die X-Kraft neben der Gravitation vorherrschte. Diesen Abschnitt bezeichnen Kosmologen als **GUT-Ära** und ordnen in zeitlich hinter der Planck-Ära bzw. Epoche der Quantengravitation und vor der Inflation ein.

Die GUT ist wesentliche Zutat der menschlichen Existenz, verursachte doch der Zerfall der X- und Y-Bosonen am Ende der GUT-Ära die **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie**. Die Anteile an Materie und Antimaterie zerstrahlten in Form von Vernichtungsstrahlung (*Annihilationsphotonen*), ließen aber aufgrund der Asymmetrie einen kleinen Teil 'normaler Materie' übrig. Das war der gerade der Keim für die ersten kosmischen Objekte, wie Sterne und Galaxien und schließlich auch für Planeten und das Leben. Uncharmant formuliert (fast eine Kakophonie) klingt das in etwa so: '*Menschen sind reprozessierte Reste von zerfallenen X-Bosonen.*'

8.27 GZK-cutoff

GZK-cutoff ist die Fachbezeichnung für einen charakteristischen Abfall in der spektralen Verteilung der kosmischen Strahlung (CR für *Cosmic Rays*). Die Hochenergiephysiker erwarten diesen Abfall bei höchsten Energien ab etwa 10^{20} eV.

8.27.1 physikalischer Grund des Abfalls

Die Erklärung dafür ist die Folgende: Die Hauptkomponente in der kosmischen Strahlung sind die Protonen. Besonders energiereiche Protonen ab Energien um 2×10^{20} eV können eine **baryonische Resonanz** zeigen, die so genannte **Deltaresonanz** bei 1232 MeV, auch als D(1232) bezeichnet. Die Lebensdauer dieser Resonanz ist mit 10^{-23} Sekunden äußerst kurz. Der Zustand zerfällt in ein Pion und ein Nukleon (**Photopionenproduktion**).

8.27.2 Nach Anregung sind die Protonen raus

Wenn nun ultrahochenergetische (UHE) Protonen (oder auch Neutronen, anderen Atomkerne) der kosmischen Strahlung mit kalten Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung (engl. *Cosmic Microwave Background*, CMB) wechselwirken und D(1232) anregen, *fehlen* höherenergetische Protonen in der Verteilung der kosmischen Strahlung. Anders gesagt entsprechen die kalten CMB-Photonen im Laborsystem heißen Gammaphotonen im Ruhesystem der Protonen. Durch Reaktionen zwischen Proton und Photon verlieren in jedem Falle die ultrahochenergetische Protonen kinetische Energie. Dies sollte sich in einem steilen Abfall des CR-Spektrums oberhalb von 10^{20} eV bemerkbar machen.

8.27.3 Ursprung des geheimnisvollen Akronyms GZK

Dies mutmaßten die Pioniere *Greisen*, *Zatsepin* und *Kuz'min* erstmals 1966. Daher nennt man diesen Abfall (engl. *cutoff*) auch **Greisen-Zatsepin-Kuz'min-cutoff** oder kurz **GZK-cutoff**.

8.27.4 Experimenteller Status

Die mittlere freie Weglänge von diesen UHE-Protonen mit 10^{20} eV liegt Berechnungen zufolge zwischen 30 und 50 Mpc bzw. 100 und 150 Millionen Lichtjahren. Nur *lokale* Quellen für UHE-Protonen kämen also in Frage, wenn Protonen mit größeren Energien detektiert würden. Es gibt wenige dieser Beobachtungen, die bis heute nicht geklärt sind. Die aktuellen Daten des Airshower-Detektors AGASA sprechen sogar eher für ein Fehlen des GZK-cutoffs. Deshalb warten die Hochenergiephysiker mit Spannung auf neue Messungen, weil erst Großprojekte wie AUGER, EUSO und OWL eine ausreichende Zahl an detektierten Ereignissen und die damit verbundene gute Statistik bringen werden (*de Marco et al.* 2003).

Es gibt noch eine zweite Prognose: *Hill & Schramm* bestimmten 1985 einen unteren Schwellwert von 5×10^{19} eV, damit Photopionenproduktion stattfinden kann. Deshalb sollte neben einem scharfen Abfall der Verteilung eine Häufung von Protonen dieser Energie mit unterem Schwellwert beobachtbar sein. Leider ist die Auswertung dieser UHE-Spektren nicht trivial und daher konnte bisher weder eine Häufung (in Form eines Buckels, *bumps*), noch der GZK-cutoff zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Die detektierten Protonen sind gemäß diesem Szenario bestenfalls 'intergalaktisch' (gerade mal etwas weiter als bis zum Virgo-Haufen) und nicht 'kosmologisch'.

8.27.5 Auswege in der Theorie

Eine mögliche Erklärung für die Abwesenheit des GZK-cutoffs sind topologische Defekte.

Es wurden einige Modelle vorgeschlagen, die UHE-Teilchen mit Energien im Bereich von 10^{11} GeV produzieren könnten. So werden Hybrid-Defekte aus Monopol und kosmischem String oder magnetische Monopole, die in intergalaktischen Magnetfeldern auf die UHE-Skala beschleunigt werden, diskutiert.

9 Lexikon H

9.1 Hadronen

Als Hadronen bezeichnet man alle Teilchen, die aus Quarks bestehen. Unterklassen der Hadronen sind die Mesonen und Baryonen.

Seit 2003 kennt man überdies - experimentell gesichert - Tetraquarks, die aus vier Quarks und Pentaquarks, die aus fünf Quarks bestehen. Die Teilchenphysiker bezeichnen sie auch als **baryonische Resonanzen**, und man kann sie als molekülartige Meson-Meson- bzw. Baryon-Meson-Systeme auffassen.

9.2 Hadronen-Ära

Die Hadronen-Ära kennzeichnet eine bestimmte Entwicklungsphase im Universum und liegt damit im Interessensgebiet der Kosmologie. Hadronen sind Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind. Diese Grundbausteine der Materie bildeten sich in der Quark-Ära, die der Hadronen-Ära voranging.

9.2.1 Wann war's?

Zeitlich ist die Hadronen-Ära auf ein Zehntel Millisekunden (10^{-4} s) nach dem Urknall einzuordnen. Die Vernichtungsstrahlung am Ende der GUT-Ära hatte zu einem 'Strahlenmeer' an Photonen geführt. Doch die minimale Asymmetrie an den Mengen von Materie zu Antimaterie ließ einen kleinen, aber entscheidenden Anteil von Urmaterie in Form von Quarks und Leptonen übrig.

9.2.2 Aus freien werden im Hadron gefangene Quarks

Anfangs waren die Quarks noch frei. Doch etwa 10^{-5} Sekunden nach dem Urknall war das Milieu mit etwa 10^{12} Kelvin oder 200 MeV 'kalt' genug, dass die freien Quarks des Quark-Gluonen-Plasmas zu Hadronen 'kondensierten' (engl. *hadron freezeout*). An die Hadronen-Ära schließt sich die **primordiale Nukleosynthese** an. In dieser Phase bildeten sich aus den einfachen Hadronen wie Proton und Neutron (siehe Nukleonen) sowie die leichten Atomkerne Wasserstoff, Deuterium, Helium und Lithium.

9.3 Hamilton-Jacobi-Formalismus

Dieser Formalismus ist ein Konzept der klassischen und relativistischen Mechanik und bei der Behandlung allgemeiner mechanischer Probleme äußerst effektiv. *Brandon Carter* hat 1968 die Separabilität der Hamilton-Jacobi-Gleichung ausgenutzt, um eine **vierte Konstante der Bewegung in der Kerr-Metrik** herzuleiten: die **Carter-Konstante**.

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} - H\left(x^{\mu}, \frac{\partial S}{\partial x^{\mu}}\right) = 0$$

Abbildung 9.1: Hamilton-Jacobi-Gleichung.

9.3.1 Rezept: Carter-Konstante für Eilige

Zunächst - wie bei mechanischen Problemen üblich - muss man die Lagrange-Funktion L kennen. In der Relativitätstheorie gewinnt man sie aus der Metrik, die als bekannt vorausgesetzt wird. Über eine *Legendre-Transformation* erhält aus L die Hamilton-Funktion H (Anmerkung: eine Legendre-Transformation ist eine Variablentransformation, die eindeutig L und H verknüpft). Dann liefert die Hamilton-Jacobi-Gleichung (siehe Gleichung in Grafik 9.1), die eine partielle, nicht-lineare Differentialgleichung erster Ordnung ist, eine Bestimmungsgleichung für eine Erzeugende, das Wirkungsfunktional S. Im Allgemeinen ist diese Differentialgleichung dann nur über einen Ansatz lösbar. Carters Verdienst war es, dass sein *Separationsansatz*, nämlich dass S in allen Koordinaten separiert, erfolgreich war. Die partiellen Ableitungen des nun bekannten Wirkungsfunktionals S liefern dann gerade die Photonenimpulse in einem speziellen Beobachtersystem, dem *Bardeen-Beobachter* oder ZAMO.

9.3.2 Anwendungsbereich

Während der Hamilton-Jacobi-Formalismus von genereller Wichtigkeit ist, benötigt man die Carter-Konstante nur in einem Spezialgebiet: so ist die Lösung der Geodätengleichung in der Kerr-Metrik über die vier Erhaltungsgrößen ein Standardverfahren, das vor allem für relativistisches Ray Tracing verwendet wird. Weil die Schwarzschild-Lösung (mit Drehimpuls null) nur ein Spezialfall der Kerr-Lösung ist, kann man das Verfahren auch für diese statische Raumzeit anwenden.

9.4 Harvard-Klassifikation

Eine Einteilung der Spektren von Sternen nach **abnehmender Oberflächen- bzw. Effektivtemperatur**. Diese Sequenz geht auf die amerikanischen Astronomen *E.C. Pickering* (1846 - 1919) und *A.J. Cannon* (1863 - 1941) der Harvard-Sternwarte zurück.

9.4.1 intensive Spektrallinien zum Sternesortieren

Die Sternspektren sind der Beobachtung sehr leicht zugänglich, viel leichter als physikalische Parameter des Sterns (Masse, Radius, mittlere Dichte, Temperatur etc.). Historisch war es daher so, dass die **relativen Stärken von Spektrallinien** diejenigen Kriterien waren, um einen Stern zu klassifizieren.

Jeder Klasse ordnete man einen Buchstaben zu. Die international anerkannte Sequenz lautete bis etwa 1999: **O, B, A, F, G, K, M, R , N, S**, was man sich mit dem Merkspruch '**O**h, **B**e **A F**ine **G**irl, **K**iss **M**e, **R**ight **N**ow. **S**mack!' ins Gedächtnis rufen kann. Mittlerweile wurde aufgrund von Entdeckungen zahlreicher ultrakalter Zwergsterne (*ultra cool dwarfs*, UCDs) die obige OBAFGKMRNS-Sequenz umbenannt in (*D. Kirkpatrick* 1999):

OBAFGKM**LT**

RNS Typen haben heute den Status einer Sonderklasse seltener Sterne.

9.4.2 feinere Unterteilung in Ziffern

Die einzelnen Klassen werden nochmals feiner durch die Abfolge der Ziffern 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 unterteilt.

Diese Harvard-Klassifikation war die Grundlage für den heute international gebräuchlichen Spektraltyp (siehe dort für spektrale Eigenschaften der verschiedenen Klassen).

9.4.3 HD-Katalog

Umgesetzt wurde diese Klassifikation im *Henry-Draper-Katalog*, der 225 300 Sterne umfasst. Am Kürzel *HD* mit nachfolgender Ziffer erkennt man Sterne dieses Katalogs.

9.5 Hauptreihe

Eine spezielle Entwicklungsphase von Sternen. Siehe dazu die Darstellung im vollen Kontext unter dem Eintrag Hertzsprung-Russell-Diagramm.

9.6 Hawking-Strahlung

Um es knapp zu sagen: Die klassischen Schwarzen Löcher als Lösung von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART) sind am Ereignishorizont absolut schwarz. Der englische Astrophysiker *Stephen W. Hawking* hat in einer Rechnung 1974 Quanteneffekte in der Umgebung Schwarzer Löcher berücksichtigt und herausgefunden, dass dann am Ereignishorizont Teilchen entstünden, die auch den Einflussbereich des Loches verließen. Diese Teilchen subsumiert man unter dem Begriff *Hawking-Strahlung* oder *Hawking-Emission*. Es handelt sich um eine rein theoretische Arbeit, und dieser *Hawking-Effekt* konnte bislang **nicht experimentell bestätigt** werden.

9.6.1 Rolle des Ereignishorizonts

Hawking-Strahlung ist aus dem folgenden Grund so schwierig nachzuweisen: Hawking-Strahlung hat eine sehr geringe Intensität, und Kandidaten für Schwarze Löcher befinden sich in astronomischen Distanzen. Andere Strahlungseffekte in der Umgebung des Loches, vor allem der leuchtende Akkretionsfluss, überwiegen den Hawking-Effekt - sollte es ihn geben - deutlich. Hawking-Strahlung ist an die Existenz des Ereignishorizonts gebunden. Gibt es keinen Horizont, so gibt es auch keine Hawking-Emission (vermutlich aber eine andere Form thermischer Emission). Mittlerweile haben Theoretiker alternative Modelle zum Schwarzen Loch vorgeschlagen, die keinen Horizont aufweisen. Beobachtet man nun den Hawking-Effekt nicht, so verleiht das diesen Alternativen geringfügig mehr Gewicht - die Forschungen auf diesem Gebiet sind jedoch nicht abgeschlossen. Die Raumzeiten ohne Horizont heißen Gravastern und Holostern.

9.6.2 Was tat Hawking genau?

Geht man in die Details dieses Effekts wird es - auch sprachlich - relativ kompliziert, wie die weiteren Ausführungen zeigen werden. Eine mathematische Ableitung erfordert Kenntnisse in der ART und der Quantenfeldtheorie. Wie vorweggenommen ist die Hawking-Strahlung kein Phänomen der klassischen Relativitätstheorie, sondern ein **Quanteneffekt**. Im Rahmen der Thermodynamik und Quantenfeldtheorie (QFT) ging Hawking über die Konzepte der klassischen Theorie Schwarzer Löcher hinaus und machte einen *semiklassischen Ansatz*, indem er Quantenfelder auf dem Hintergrund gekrümmter Raumzeiten untersuchte. Die Felder, die mit Teilchen wie Elektronen, Photonen oder Neutrinos assoziiert sind, sind quantisiert, **nicht** jedoch die Gravitationsfelder. Sie werden hingegen mit der ART beschrieben. In diesem Sinne ist Hawkings Zugang ein Konzept der semiklassischen Quantengravitation. Es muss betont werden, dass es ihm nicht gelang, die Gravitation zu quantisieren.

Die Folgen dieser Behandlung sind erstaunlich: während in der klassischen Theorie Schwarze Löcher reine Absorber von Teilchen sind, weil diese 'hinter' dem Ereignishorizont verschwinden, eröffnet der quantenfeldtheoretische Zugang die Möglichkeit, dass Schwarze Löcher auch in einer konstanten Rate Teilchen emittieren, die **Hawking-Strahlung**. Es sei angemerkt, dass der Terminus *Strahlung* nicht zwingend reine elektromagnetische Emission meint, sondern generell alle möglichen Teilchen. Im Folgenden wird in der Sprache der theoretischen Physik (es gibt hier leider keine adäquaten Alternativen) nachskizziert, wie das geschieht:

9.6.3 ...und in der mathematisch-physikalischen Sprechweise?

Die Teilchen beschreibt man wie in der Quantenfeldtheorie als **skalare Feldoperatoren**, die die *kanonischen Kommutatorrelationen* erfüllen. Die Klein-Gordon Gleichung wird dann auf gekrümmte Metriken verallgemeinert, indem man gewöhnliche Ableitungen durch kovariante Ableitungen ersetzt. Der Einfachheit halber betrachtet man masselose skalare Teilchen. Die Lösungen der **kovarianten Klein-Gordon-Gleichung** haben die vertraute Gestalt mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren und ermöglichen die Definition eines Vakuumzustands. Die Relativitätstheorie gestattet diesen Zustand in verschiedenen orthonormalen Basen zu betrachten, weil die Hyperflächen, die man im Rahmen des ADM-Formalismus wählen kann, einander gleichberechtigt sind. Mit zwei willkürlich gewählten orthonormierten Basen definiert man sich auf diese Weise **unterschiedliche Vakua** mit unterschiedlichen Vernichtungsoperatoren. Von der einen Basis kann man in die andere über die *Bogoliubov-Transformationen* wechseln. Bildet man nun den **Vakuumerwartungswert** für einen Besetzungszahloperator, bezogen auf die unterschiedlichen Vakua, so stellt man fest, dass dieser endlich wird. Er verschwindet nicht! Die Definition eines Vakuumzustands ist in der Relativitätstheorie nicht eindeutig und hängt vom Beobachter ab. Das bedeutet letztendlich, dass der **Teilchenbegriff relativ** ist: in dem einen Bezugssysteme erscheint das Vakuum mit realen Teilchen angefüllt, im anderen sieht es aus wie ein Vakuum, das mit virtuellen Teilchen angefüllt ist. Beide Beobachter haben recht!

Man kann jedoch die Vakuumerwartungswerte vergleichen, wenn man eine gekrümmte Raumzeit annimmt, die in Vergangenheit und Zukunft asymptotisch flach ist. D.h. die Metriken, die die kovariante Klein-Gordon Gleichung erfüllen, verschwinden bei unendlichen Abständen. Bei dieser Bilanz stellt man fest, dass **das Gravitationsfeld Teilchen erzeugt** hat, die man Hawking-Strahlung nennt!

9.6.4 Alles klar! Jetzt bitte mal für Menschen wie Du und ich

Nach dieser abstrakten Erklärung folgen nun zwei anschauliche Interpretationsmöglichkeiten, die einander äquivalent sind: Die erste lehnt sich an das oben beschriebene quantenfeldtheoretische Konzept eines Quantenvakuums an. Die zweite ist eher klassischer Natur und nutzt die Konzepte der Thermodynamik.

(1) Nach der Quantentheorie ist der ganze Raum, auch das Vakuum, gefüllt mit **Paaren virtueller Teilchen** und deren Antiteilchen (siehe Antimaterie). Deren Energie ist so gering, dass die Teilchen im Rahmen der Heisenbergschen Unschärferelation (Ort-Impuls-Unschärfe, Energie-Zeit-Unschärfe) eine sehr kurze Lebensdauer haben und daher nicht zu messen sind. In diesem Sinne nennt man sie *virtuell*. Ständig annihilieren, d. h. zerstrahlen diese Teilchen mit ihrem entsprechenden Antiteilchen in elektromagnetische Strahlung (virtuelle Photonen) und bilden sich in Paaren wieder neu. Das Quantenvakuum ist demnach kein ruhiger Ort, sondern ein komplexes Gebilde, das von virtuellen Teilchen bevölkert ist. [*Nebenbemerkung*: Indirekt ist dieses Phänomen bei der **Lamb-Shift**, einer Verschiebung der Spektrallinien, im Wasserstoffspektrum messbar. Das bedeutet, dass das Konzept der virtuellen Teilchenpaare keine Hypothese, sondern eine im Experiment verifizierte Tatsache ist!]

Materialisiert sich ein solches Paar nahe des Ereignishorizonts eines Schwarzen Loches, so ist es möglich, dass eines der Teilchen in das Schwarze Loch fällt, während das andere ins Unendliche entweicht (siehe Abbildung rechts, rotes Teilchenpaar). Diese Trennung kann beispielsweise durch Gezeitenkräfte bewirkt werden. Aus dem virtuellen Teilchen wird so ein reales, ein messbares Teilchen. Stammt die Energie für das virtuelle Teilchenpaar vom Schwarzen Loch, so bietet der Hawking-Effekt eine Möglichkeit Energie aus dem Schwarzen Loch zu extrahieren. Die Lebensdauer Schwarzer Löcher ist also begrenzt! Man sagt, Schwarze Löcher können durch die Emission von Hawking-Strahlung **verdampfen** (engl. Terminus *black hole evaporation*).

(2) Die zweite Interpretation begründet eine **Thermodynamik Schwarzer Löcher**, die Analoga zu den Hauptsätzen der klassischen Thermodynamik aufweist. Hawking zeigte 1973, dass man jedem Schwarzen Loch eine Temperatur zuordnen kann, die proportional zu ihrer **Oberflächengravitation** ist bzw. invers mit der Masse des Schwarzen Loches skaliert. Die **Temperatur eines Schwarzen Loches** nennt man Hawking-Temperatur, und sie ist demnach höher für kleine, leichte Schwarze Löcher. Jeder Körper endlicher Temperatur ist ein **thermischer Strahler** (Wärmestrahler, Planckscher Strahler). Deshalb ist das **Spektrum der Hawking-Strahlung** dasselbe wie dasjenige eines Planck-Strahlers (thermische Hohlraumstrahlung)!

Schwarze Löcher verdampfen also durch die Emission von Hawking-Strahlung. Die Lebensdauer ist allerdings schon für Schwarze Löcher mit Sonnenmasse (10^{30} kg) sehr hoch: es würde 10^{66} Jahre (etwa 10^{56} Hubble-Zeiten!) dauern, bis ein solches Schwarzes Loch durch Hawking-Strahlung verdampft wäre. Die Temperatur eines stellaren Schwarzen Loches ist außerordentlich gering, nämlich nur etwa ein Millionstel Kelvin. So haben supermassereiche Schwarze Löcher in den Kerngebieten von Galaxien entsprechend noch niedrigere Temperaturen! Eine **direkte Detektion** der Hawking-Strahlung scheint damit geradezu ausgeschlossen.

Aber es könnte auch massearme Schwarze Löcher geben, wie die primordialen Schwarzen Löcher oder **Mini-Löcher**. Manche Kosmologen spekulieren darüber, dass sie sich im frühen Universum bildeten. Noch kleinere Löcher werden vielleicht bald in Teilchenbeschleunigern erzeugt. All diese deutlich leichteren Löcher haben sehr viel kleinere Lebensdauern - bis zu

kleinsten Sekundenbruchteilen. Mini-Löcher emittieren mehr als sie absorbieren bzw. durch Akkretion aufsammeln. Als Konsequenz nimmt ihre Masse sukzessiv ab. Bei einer kritischen Masse von 10^{14} g - was einem kosmisch gesehen extrem kleinen Schwarzen Loch entspricht - würde das Schwarze Loch auf ultrakurzen Zeitskalen von 10^{-23} Sekunden seine ganze Ruhemasse abstrahlen. Dieser Prozess ist im Prinzip eine Explosion, die 10^{35} erg freisetzt. Diese Energieskala liegt zwar viele Dekaden unterhalb von typischen Supernovae, Hypernovae oder Gamma Ray Bursts; sie sollte jedoch auf der Distanzskala des frühen Universums beobachtbare, sicherlich stark rotverschobene Signaturen hinterlassen. Vielleicht detektiert das 2003 gestartete Infrarot-Weltraumteleskop *Spitzer* diese Spuren primordialer Schwarzer Löcher.

Die Energie der Hawking-Strahlung hängt davon ab, welche Teilchen am Horizont materialisieren. Mit Schrumpfung des Loches durch Hawking-Emission und dem damit verbundenen Temperaturanstieg, wird schließlich die Ruhemasse verschiedener Teilchenspezies überschritten, so dass ein ganzer Teilchenzoo emittiert wird.

9.6.5 Noch keine experimentelle Bestätigung!

Bisher ist der experimentelle Nachweis dieser Strahlung nicht gelungen. Der Grund ist, dass diese Strahlung sehr schwach sein muss und von anderen Strahlungsquellen, wie zum Beispiel lokalen Quellen (Akkretionsscheibe) oder der omnipräsenten kosmischen Hintergrundstrahlung überdeckt wird. Wie die Zahlenbeispiele oben zeigen, ist die direkte Verifikation der Hawking-Strahlung bei kosmischen Schwarzen Löchern höchstwahrscheinlich auszuschließen. Die Hoffnung eines Nachweises liegt nun vor allem in der Hochenergiephysik: Sollte es gelingen, **künstlich Schwarze Löcher im Labor** zu erzeugen, so müssten Signaturen der Evaporation in modernen Teilchenbeschleunigern messbar sein. Das spekulative Szenario einer **TeV-Quantengravitation**, die die Existenz weiterer Raumdimensionen (siehe Extradimensionen) fordert, rückt sogar die aktuelle Hochenergiephysik an diese kritische Schwelle. Das Verfolgen von Teilchenbeschleunigerexperimenten (Ende 2007: Large Hadron Collider, **LHC**, am CERN) ist deshalb auch aus dieser Perspektive spannend!

9.6.6 Über Hawking hinaus

Eine offene Frage ist natürlich, wie das Spektrum der Hawking-Strahlung verändert wird, wenn man über Hawkings Ansatz hinaus geht und eine **voll quantisierte Behandlung des Problems** ansetzt. Dies erfordert eine quantisierte Gravitationstheorie. Die Kandidaten einer solchen Theorie sind bereits gesichtet und heißen Stringtheorien und Loop-Quantengravitation. Der Einfluss dieser Quantengravitationen auf die Physik Schwarzer Löcher und auch der Hawking-Strahlung sind Gegenstand aktueller Forschung. Offensichtlich hat die Thermodynamik Schwarzer Löcher Fortbestand auch in den neuen Theorien. Deshalb sollte aus thermodynamischen Gründen auch ein Konzept der Hawking-Emission resultieren. Denn ein Körper endlicher Temperatur ist nun mal ein Planck-Strahler.

9.6.7 Konsequenz des Äquivalenzprinzips: Unruh-Strahlung

Die Hawking-Strahlung hat in flachen Raumzeiten ein Pendant: die **Beschleunigungsstrahlung** (engl. *acceleration radiation*). Hier geht man in analoger Weise (Hawkings Ansatz folgend) der Frage nach, welches Minkowski-Vakuum ein beschleunigter

Beobachter wahrnimmt. Man behandelt also ein masseloses Skalarfeld in einer flachen Minkowski-Metrik. Das Pendant zum Hawking-Effekt heißt **Unruh-Effekt**, der von *William Unruh* (1975) zusammen mit *Robert W. Wald* (1984) ausgearbeitet wurde. Er besagt, dass ein beschleunigter Beobachter das Minkowski-Vakuum als **thermisches Teilchenbad** wahrnimmt! Letztendlich sind Hawking-Strahlung und Beschleunigungsstrahlung als Analoga eine notwendige Konsequenz des Äquivalenzprinzips.

9.6.8 Weitere Literatur

- ◇ Originalpapier von *Stephen W. Hawking*, **Particle creation by black holes**, Commun. Math. Phys. 43, 1975, 199 - 220; auch zu finden im Buch '*Hawking on the Big Bang and Black Holes*' (1993), World Scientific Publishing

- ◇ Ein guter, kompakter Artikel über Hawkingstrahlung, der Kenntnisse der QFT erfordert, von *Markus Pössel*, AEI Potsdam.

9.7 Hawking-Temperatur

Die Hawking-Temperatur ist ein Analogon zum thermodynamischen Temperaturbegriff, die man Schwarzen Löchern im Rahmen einer Thermodynamik (Wärmelehre) zuordnen kann. Diese Ableitung gelang *Stephen Hawking* und anderen Astrophysikern in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts (Publikation: *The Four Laws of Black Holes Mechanics*, 1973). Ebenso existieren für die Entropie Analoga bei Schwarzen Löchern. Bardeen, Carter und Hawking griffen dabei auf die Doktorarbeit von *J.D. Bekenstein* (1972) zurück und verallgemeinerten die darin enthaltenen Gleichungen. Seither nennt man das Entropie-Analogon bei Schwarzen Löchern Bekenstein-Hawking-Entropie. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Analoga *nicht* zu verwechseln sind mit der gewöhnlichen, thermodynamischen Temperatur und gewöhnlichen, thermodynamischen Entropie eines Schwarzen Loches!

9.7.1 Bezug zu Eigenschaften Schwarzer Löcher

In den Rechnungen zeigte sich, dass die Hawking-Temperatur Schwarzer Löcher mit der **Oberflächengravitation** und die Bekenstein-Hawking-Entropie mit der **Oberfläche des Ereignishorizonts** assoziiert ist. Der Drehimpuls (Rotation) eines Schwarzen Loches beeinflusst beide Größen, so dass für die Schwarzschild-Lösung andere Temperaturen/Entropien resultieren als für die Kerr-Lösung: Bei gleicher Masse unterscheiden sich demnach die Hawking-Temperaturen von statischen gegenüber rotierenden Löchern.

9.7.2 Oberflächengravitation

Die Oberflächengravitation ist definiert als negativer Gradient des Logarithmus der Lapse-Funktion:

$$g_{\mathrm{H}} = -\nabla \ln \alpha.$$

Die Lapse-Funktion ist ein Maß dafür, wie für einen außenstehenden Beobachter der Zeitfluss verlangsamt wird. Ein bestimmter Beobachter, der so genannte FIDO, würde am Horizont eine verschwindende Lapse-Funktion und eine ins Unendliche gewachsene Oberflächengravitation

sehen. Eine geeignete Renormierung der Zeitbasis führt auf die Oberflächengravitation, die Hawking und andere ableiteten.

Die Oberflächengravitation nimmt mit der Rotation eines Kerr-Loches ab, was man sich durch zunehmende Zentrifugalkräfte veranschaulichen kann, die die Oberflächengravitation absenken. Im Falle eines extremen Kerr-Loches mit maximaler Drehgeschwindigkeit ($a = M$ in geometrisierten Einheiten, G = c =1) ist sie sogar null: die ganze Masse bzw. Energie steckt dann in der Rotation. In diesem Sinne sind nicht rotierende Schwarze Löcher 'heißer'.

9.7.3 Nun zur Temperatur

Für die Hawking-Temperatur wurde folgende Gleichung abgeleitet:

$$\begin{aligned} T_H &= \frac{\hbar c^3}{8\pi k_B G M} \\ &\simeq 6.2 \times 10^{-14}\ \mathrm{K}\ \left(\frac{10^6\,\mathrm{M}_\odot}{M}\right) \\ &\simeq 6.2 \times 10^{-8}\ \mathrm{K}\ \left(\frac{1\,\mathrm{M}_\odot}{M}\right) \\ &\simeq 1.2 \times 10^{11}\ \mathrm{K}\ \left(\frac{10^{15}\,\mathrm{g}}{M}\right) \\ &\simeq 7.7 \times 10^{29}\ \mathrm{K}\ \left(\frac{1\ \mathrm{TeV}}{M}\right). \end{aligned} \tag{9.1}$$

Es ist ersichtlich, dass die Hawking-Temperatur nur von der Masse des Schwarzen Loches und einigen Naturkonstanten h (Planckssches Wirkungsquantum), c (Vakuumlichtgeschwindigkeit), k_B (Boltzmann-Konstante) und G (Gravitationskonstante) abhängt. Wesentlich ist, dass die Hawking-Temperatur linear mit abnehmender Masse des Lochs zunimmt:

Leichte Löcher sind heißer.

Das machen ein paar Zahlenbeispiele für Massen von Schwarzen Löchern klar, die gegenwärtig diskutiert werden und die unter der allgemeinen Gleichung rechts eingesetzt wurden: Sie zeigen, dass ein supermassereiches Schwarzes Loch von etwa einer Million Sonnenmassen (vergleichbar schwer wie das große Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße) eine verschwindend geringe Hawking-Temperatur hat, etwa ein Zehntel Billionstel Kelvin! Ein stellares Schwarzes Loch, das am Ende der Entwicklung massereicher Sterne steht, weist dagegen schon eine deutliche erhöhte Hawking-Temperatur auf, um hundert 'Nanokelvin'. Die primordialen Schwarzen Löcher, die möglicherweise im frühen Universum existierten, wiegen soviel wie ein irdischer Berg: eine Milliarde Tonnen. Für dieses Beispiel kann man sagen, dass sie tatsächlich mit etwa 100 Milliarden Kelvin Hawking-Temperatur heiß sind. Extrembeispiel sind die (hypothetischen!) Minilöcher, die auf den Skalen der Teilchenphysik liegen. Nimmt man an, dass sie so schwer sind wie etwa 1000 Protonen, resultiert eine enorme Hawking-Temperatur von etwa 10^{30} Kelvin.

9.7.4 Wärmestrahlung

Ein Körper endlicher Temperatur emittiert immer Wärmestrahlung. Da der absolute Nullpunkt prinzipiell nicht erreichbar ist (3. Hauptsatz der Thermodynamik), gibt jedes Objekt Wärmestrahlung ab! Bei welcher Wellenlänge das Strahlungsmaximum liegt, bestimmt einzig und allein die Temperatur des Körpers (*Wiensches Verschiebungsgesetz* der Planckschen Strahlung). Extrem heiße Objekte, ab etwa eine Million Kelvin, können deshalb thermische Röntgenstrahlung abgeben; ein heißer O-Stern mit 30000 Kelvin Oberflächentemperatur (siehe dazu Spektraltyp) strahlt hingegen am meisten im UV ab.

Man kann die Hawking-Strahlung auch als Planck-Strahlung interpretieren, die ein Schwarzes Loch mit der Hawking-Temperatur aussendet. Die Zahlenbeispiele oben lassen sich dann so deuten, dass die Hawking-Strahlung von schweren Löchern kaum detektierbar sein wird, weil die Hawking-Temperatur so gering ist. Das Verschwinden von supermassereichen Schwarzen Löchern aufgrund des Verlusts durch Abstrahlung von Hawking-Emission ist ein sehr langwieriger Prozess und übersteigt das Alter des Universums bei weitem! Ganz anders stellt es sich bei den leichteren Löchern dar: Das Verdampfen durch Hawking-Strahlung, die *Evaporation*, geht hier deutlich schneller und sollte sogar nachweisbar sein. Denn das Ende des Verdampfungsprozesses ist so schnell, dass es einer Explosion gleichkommt. Die freigesetzte Leuchtkraft beträgt etwa 10^{20} erg/s (*Shapiro & Teukolsky* 1983). Eine hohe Zahl solcher Explosionen im frühen Universum sollte deutliche Spuren in der Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung hinterlassen haben - bislang wurde das jedoch nicht entdeckt.

Nullter und Dritter Hauptsatz der klassischen Thermodynamik können mit diesem Begriff der Hawking-Temperatur reformuliert werden und erhalten vollständige Analoga in der Theorie Schwarzer Löcher.

9.7.5 Weitere Literatur & Quellennachweise

- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation, besonders das Kapitel Thermodynamik und Hawking-Strahlung
- ◇ Originalpapier von *Bardeen, Carter & Hawking*, **The Four Laws of Black Holes Mechanics**, Commun. Math. Phys. 31, 161, 1973
- ◇ *M. Camenzind*, LSW Heidelberg: **Physik Rotierender Schwarzer Löcher**, Vorlesungsskript Uni Heidelberg

9.8 Helizität

Die Helizität (grch. *helix*: Schraube) ist eine Quantenzahl, die man aus der Projektion des Spinvektors eines Teilchens auf dessen Bewegungsrichtung (Impulsvektor) gewinnt. Eine solche Projektion gelingt mathematisch mit der Berechnung des Skalarprodukts dieser beiden Vektoren.

9.8.1 Rechts- und linkshändige Teilchen

Helizitäten sind wesentliche Größen der Teilchenphysik. Dabei unterscheidet man:

- ◇ **rechtshändige Teilchen** mit Helizität +1. Der Spinvektor zeigt in Bewegungsrichtung (*parallel*).

- ◇ von **linkshändigen Teilchen** mit Helizität -1. Hier zeigt der Spinvektor entgegen der Bewegungsrichtung (*antiparallel*).

9.8.2 Teilchen mit/ohne Ruhemasse

Es gibt einen entscheidenden Unterschied zwischen masselosen und massebehafteten Teilchen: Für masselose Teilchen ist die Helizität eindeutig festgelegt. Hingegen kann man für massebehaftete Teilchen Bezugssysteme finden, die verschiedene Helizität haben. Eine Ausnahme bilden die Photonen: Trotz verschwindender Ruhemasse können sie die Helizitäten -1 und +1 haben.

Chiralität und Helizität sind für masselose Teilchen identisch.

9.9 Helligkeit

Eine wichtige Größe in der Astronomie, um Sterne zu charakterisieren.

9.9.1 scheinbare vs. absolute Helligkeit

Weil sich die Sterne in unterschiedlichen Entfernungen zur Erde befinden, sagt die beobachtete oder **scheinbare Helligkeit** m nicht allzu viel über einen Stern aus, wenn man dessen Distanz nicht kennt. Daher ist es immer wichtig, diese aus *Methoden der Entfernungsbestimmung* zu ermitteln. Astronomen unterscheiden von der scheinbaren die **absolute Helligkeit** M, die so festgelegt wurde, dass es derjenigen Helligkeit entspricht, wie uns das leuchtende Objekt in einer Entfernung von zehn Parsec erscheinen würde.

9.9.2 Sprengen der klassischen Größenklassen

Historisch bedingt unterschied man die Helligkeiten zunächst in **sechs Größenklassen**. Der erste Detektor war das menschliche Auge, das sicherlich nicht voll ausgereift ist für astronomische Beobachtungen. Die hellsten Sterne definierte man mit der 1. Größe, die lichtschwächsten, gerade noch mit dem Auge sichtbaren als Sterne 6. Größe. Im Zuge besserer astronomischer Instrumente wurde diese Skala deutlich erweitert. So weisen die leuchtschwächsten Objekte, zum Beispiel extrem weit entfernte Galaxien in Tiefenfeldbeobachtungen wie dem *Hubble Deep Field North* (HDFN) etwa 30. Größe auf! Das menschliche Auge ist ein **logarithmischer Strahlungsdetektor**, daher ist die natürliche Helligkeitsskala logarithmisch und nicht linear.

9.9.3 Pogson - ein helles Köpfchen

Der britische Astronom *Norman Robert Pogson* (1829 - 1891) führte 1856 ein logarithmisches Gesetz ein, das den Zusammenhang zwischen scheinbarer Helligkeit m, der **Magnitude**, und dem Strahlungsfluss F wiedergibt. Dabei zeigte sich, dass das Verhältnis der Strahlungsflüsse aufeinander folgender Größenklassen immer konstant ist, etwa 2.512. Mit der obigen Definition, dass die absolute Helligkeit bei 10 pc zu messen ist, folgt daher das so genannte **Distanzmodul**

$$m - M = -2.5 \ \log \frac{F(r)}{F(10)} = 5 \ \log \frac{r}{10\text{pc}}.$$

Bei bekannten zwei von den drei Größen lässt sich die dritte arithmetisch ermitteln - also anhand Umstellen der Gleichung berechnen. Eine besonders wichtige Anwendung ist die **Entfernungsbestimmung** kosmischer Objekte. Die scheinbare Helligkeit m ist immer bekannt, weil man sie am Himmel direkt misst. Das entsprechende Verfahren heißt **Photometrie**, wörtlich soviel, wie Messung des Flusses der Photonen. In der Regel werden die Helligkeiten in der Einheit ^{mag} oder ^{m} für *magnitudo* angegeben.

9.9.4 Jagd auf Standardkerzen

Kann der Astronom nun die absolute Helligkeit M aufgrund theoretischer Modelle eingrenzen, so kann er über beobachtete, scheinbare Helligkeit m und Distanzmodul direkt die Entfernung r des leuchtenden Objekts ableiten. Diese Prozedur wird bei so genannten Standardkerzen exzessiv angewandt: die Astronomen suchen dabei kosmische Quellen deren intrinsische Helligkeit (die Helligkeit 'vor Ort' der Quelle) sie in irgendeiner Form ableiten können. Prominente Beispiele für Standardkerzen sind Cepheiden und Supernova vom Typ Ia.

9.9.5 Warum der Aufwand?

Die Kenntnis von Entfernungen kosmischer Objekte ist von Belang für alle Disziplinen der Astronomie. Die Entfernungen der Sterne liefern Informationen über Struktur und Aufbau unserer Heimatgalaxie; die Entfernungen der Galaxien geben Aufschluss über Struktur und Aufbau von Galaxienhaufen und -superhaufen; von besonderer Bedeutung sind Entfernungsdaten für die Kosmologie, um die relative, dreidimensionale Anordnung der Objekte im Universum aufzudecken (Stichwort: *large scale structure*). Daraus folgen die Eigenschaften des Universums, wie z. B. zunächst eine untere Grenze für seine Größe, aber auch seine Krümmung, sein Gehalt an baryonischer Materie, Dunkler Materie und Dunkler Energie oder sogar seine Topologie. Letztendlich verrät das den Kosmologen das Schicksal des dynamischen Universums: wird es sich ewig ausdehnen oder wieder in sich zusammenfallen?

9.9.6 scheinbare Helligkeiten kosmischer Nachbarn

- ◇ der Stern *Sirius* in *Canis Major* (dt. *Großer Hund*): m = -1.5
- ◇ die Sonne: m = -26.8
- ◇ und vom Vollmond: m = -12.5

9.9.7 Achtung Farbe!

Es gibt bei der Messung von Helligkeiten noch eine technische Komplikation: Astronomen messen die Helligkeiten nur in bestimmten **Spektralbereichen**. Entsprechend definierte man visuelle Helligkeit (V), Blau-Helligkeit (B), Rot-Helligkeit (R), Infrarot-Helligkeit (I), Ultraviolett-Helligkeit (U) etc. Um hier eine Einheitlichkeit zu gewährleisten, benutzt man **Filtersysteme**, also Filter, die nur einen wohl bekannten Spektralbereich durchlassen (*transmittieren*). Besonders gebräuchlich in der Astronomie ist das *Johnson-Filtersystem* (1950), bestehend aus einem UBV-System.

Die gemessenen Helligkeiten in den einzelnen Filtern kann man voneinander abziehen. So erhält den so genannten **Farbindex**, sehr gebräuchlich beispielsweise B-V. Das Hertzsprung-

Russell-Diagramm war historisch ein **Farben-Helligkeitsdiagramm** und verwendete gerade solche Farbindizes.

9.9.8 Total hell!

Als **bolometrische Helligkeit** bezeichnet man diejenige Helligkeit die sich ergibt, wenn man allen Helligkeiten der einzelnen Spektralbereiche aufsummiert. Sie ist mit dem totalen, spektralen Fluss assoziiert. Diese Größe ist jedoch keineswegs so leicht der Beobachtung zugänglich. Die **absolute bolometrische Helligkeit** hängt eindeutig mit der Leuchtkraft zusammen, einer wichtigen Zustandsgröße von Sternen, neben Effektivtemperatur, Spektraltyp, Farbe, Radius, Masse, mittlerer Dichte, Rotation, Magnetfeld, Alter und chemischen Zusammensetzung. Bezogen auf die Daten der Sonne ergibt sich die folgende Gleichung als Zusammenhang zwischen absoluter bolometrischer Helligkeit und Leuchtkraft eines Sterns

$$M_{\mathrm{bol}} - 4.72 = -2.5 \ \log \frac{L}{L_{\odot}}.$$

9.10 Herbig-Haro-Objekt

Herbig-Haro-Objekte sind ein Typus junger, stellarer Objekte, der *young stellar objects*, kurz YSOs.

9.10.1 Chemie und protostellare Jets

Es handelt sich um kompakte, helle Nebel in der Nähe von Dunkelwolken, die im Lichte des atomaren Wasserstoffs (HI, wie Astronomen sagen) und einiger Molekülspezies (Wasserstoffmoleküle H_2, Kohlenmonoxid CO etc.) leuchten. Sie zeigen außerdem auffällige, knotige Strukturen. Dies wurde mit Schockanregungen erklärt, und es sind gerade die protostellaren Jets, in denen Material, das kurz zuvor auf einen entstehenden Stern (dem Protostern) akkretiert wurde, wieder ausfließt. Dabei bilden sich im Jet innere Schocks und der prominente Bugschock aus. Diese Jets sind atomar und molekular *strahlungsgekühlt*. Der Massenverlust ist verglichen mit den extragalaktischen Makro-Jets (der Aktiven Galaktischen Kerne) sehr gering: nur im Bereich von 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr. Die Ausflüsse sind beidseitig und senkrecht zur **akkretierenden Staubscheibe** und treten je nach Orientierung zum Beobachter ein- oder zweiseitig auf.

9.10.2 ein junger Stern namens T Tauri

Im Zentrum zwischen den bipolaren Ausflüssen befindet sich ein junger Stern, meist vom T Tauri-Typus.

9.10.3 Etymologisches, ha ha

Benannt wurden Herbig-Haro-Objekte nach ihren Entdeckern, dem US-Astronomen *George Herbig* und dem mexikanischen Astronomen *Guillermo Haro*. Sie entdeckten unabhängig voneinander in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts diese Objekte in einer typischen Sternentstehungsregion, dem Orion-Nebel. Das ist die Heimat der Objekte HH 1 und HH 2.

HH2 zeigt sogar starke Röntgenemission, dadurch dass der protostellare Jet auf langsameres Umgebungsmaterial trifft. Heute kennt man etwa 300 HH-Objekte.

9.11 Hertzsprung-Russell-Diagramm

9.11.1 Begriff und Historie

Ein fundamentales Diagramm in der Stellarphysik, abgekürzt **HRD**, in dem in einer zweidimensionalen Auftragung die Leuchtkraft eines Sterns über dessen Effektivtemperatur oder alternativ über dem Spektraltyp dargestellt ist. Es ist zu beachten, dass in der Darstellung üblicherweise die höchste Temperatur bzw. der heißeste Spektraltyp (O) **ganz links** ist! Historisch geht das HRD auf die Astronomen *Ejnar Hertzsprung* (1873 - 1967) und *Henry Noris Russel* (1877 - 1923) zurück, die allerdings andere stellare Zustandsgrößen verwendeten (die zu den oben genannten proportional sind und daher das HRD in seiner Gestalt nicht verändern), nämlich absolute, visuelle Helligkeit über Farbindex (z. B. B-V, Differenz aus Helligkeit im blauen und visuellen Frequenzband). Heute nennt man diese ursprüngliche Darstellung **Farben-Helligkeitsdiagramm** (FHD).

Das HRD ist ein **Zustandsdiagramm**, das Auskunft über den Entwicklungszustand eines Sterns gibt. Damit ist es wesentliches Werkzeug der **Sternentwicklung**. Man kann aus der Position eines Sterns im HRD ziemlich eindeutig seinen Zustand charakterisieren und somit Sterne klassifizieren. Es gibt z. B. eindeutig zugeordnete Gebiete im HRD für

- ◇ Protosterne,
- ◇ Rote Riesen,
- ◇ Rote Zwerge,
- ◇ Weiße Zwerge,
- ◇ Pulsationsveränderliche wie den Cepheiden, und RR Lyrae-Sternen
- ◇ und für typische Vertreter der Yerkes-Leuchtkraftklassen.

9.11.2 Hauptreihe, Instabilitätsast, Hayashi-Linie

Vor allem aber gibt es eine charakteristische Linie, die von besonders vielen Sternen bevölkert wird: die *Hauptreihe* (engl. *main sequence*). Hier befinden sich Sterne im hydrostatischen Gleichgewicht. Gerade entstandene Sterne, die Protosterne und YSOs, zünden die Fusionsreaktionen und wandern auf die Hauptreihe. Man nennt sie daher **Alter-Null-Hauptreihensterne** oder ZAMS-Sterne (ZAMS: *Zero-age Main Sequence*). Die Sonne ist ebenfalls ein typischer Hauptreihenstern. Die Stellarphysiker können mit einfachen Modellen viele Eigenschaften von Sternen ableiten und z. B. **Masse-Radius-Beziehungen**, **Masse-Leuchtkraft-Beziehungen** oder **Masse-Temperatur-Beziehungen** bestimmen. Sie belegen, dass die Masse, der etwa von rechts unten nach links oben verlaufenden Hauptreihe im HRD nach links zunimmt: hellere Hauptreihensterne sind also auch (wie man auch sofort naiv annehmen würde) schwerer.

Nun kann man hervorragend **Entwicklungspfade** im HRD nachzeichnen und bekommt so eine Vorstellung davon, wie sich Sterne im Laufe ihres 'Lebens' entwickeln. Es stellt

sich heraus, dass der wesentliche Parameter der Sternentwicklung die **Sternmasse** ist. Sie bestimmt die Zentraltemperatur im Sterninnern und regelt die thermonuklearen Fusionsprozesse. Letztendlich bestimmen gerade diese Prozesse das Schicksal am Ende der Sternentwicklung.

Weitere charakteristische Linien im HRD sind der *Instabilitätsast*, den pulsierende Sterne wie die Cepheiden und RR Lyrae-Sterne besiedeln und die *Hayashi-Linie*. Letztere markiert *voll konvektive* Sterne, die nur in ihrer Randregion radiativ sind, d. h. Energie durch Strahlung transportieren, und nur durch ihre Masse und chemische Zusammensetzung charakterisiert sind. Die Hayashi-Linie repräsentiert eine steile Linie im HRD, die näherungsweise von rechts oben nach links unten verläuft. Sie ist nur numerisch berechenbar und wurde von dem japanischen Astronomen *C. Hayashi* entdeckt. Rechts von der Hayashi-Linie ist *kein* Stern im hydrostatischen Gleichgewicht möglich. Die jungen, noch kontrahierenden Protosterne sind in diesem Bereich zu finden.

9.11.3 Massearme Sterne

Massearme Sterne, wie die Sonne, können ihren Zustand recht lange beibehalten und haben typische Lebensdauern im Bereich von Milliarden Jahren. Im Innern läuft vor allem die pp-Reaktion ab, eine Fusion von Wasserstoffkernen zu Heliumkernen. Marginal relevant ist der CNO-Zyklus, der ebenfalls im Wesentlichen Helium produziert. Nach einer Phase des Aufblähens zu einem **Roten Riesen**, steht am Ende der Sternentwicklung massearmer Sterne ein Kompaktes Objekt: ein **Weißer Zwerg**.

9.11.4 Massereiche Sterne

Hingegen haben massereiche Sterne kürzere Lebensdauern von einigen Millionen Jahren. Sie sind so heiß, dass zahlreiche Prozesse in ihren Schalen ablaufen (**Schalenbrennen**) und sie viel schwerere Elemente bis maximal zum Element Eisen (Ordnungszahl 26) fusionieren können. Noch schwerere Elemente können nur in den r-Prozessen und p-Prozessen der Supernovae Typ II oder in den s-Prozessen bei so genannten AGB-Sternen gebildet werden.

9.12 Hierarchieproblem

Das Hierarchieproblem bezeichnet das experimentell abgesicherte Phänomen, dass die Stärken der vier fundamentalen Naturkräfte (mathematisch dargestellt durch die *Kopplungskonstante* der jeweiligen Kraft) nicht vergleichbar groß sind. Genauer gesagt ist die Gravitation **deutlich schwächer** als die anderen drei Wechselwirkungen, nämlich die starke, schwache und elektromagnetische Kraft. Das ist nicht einzusehen und scheint eine **Sonderrolle der Gravitation** widerzuspiegeln.

Das Hierarchieproblem manifestiert sich in einer gleichwertigen Formulierung darin, dass die Planck-Skala, diejenige Skala, wo Quanteneffekte der Gravitation wichtig werden, mit 10^{19} GeV **deutlich über** der Energieskala der elektroschwachen Theorie, 100 GeV bis 1 TeV, liegt.

9.12.1 Lösung des Hierarchieproblems?

Die Hochenergiephysiker haben zahlreiche Modelle vorgeschlagen, die diesen Missstand beheben bzw. das Hierarchieproblem lösen sollen. Alle diese Modelle involvieren **räumliche**

Extradimensionen, in die die Gravitation einzudringen vermag, aber nicht die anderen Felder des Standardmodells (SM) der Teilchenphysik. Die Theoretiker sagen: *SM-Felder seinen beschränkt auf die Bran.* Gravitation in höheren Dimensionen - das bedeutet, es handelt sich um modifizierte Gravitationstheorien (engl. *modified gravity*), wie beispielsweise das ADD-Szenario, die Randall-Sundrum-Modelle oder das DGP-Szenario.

Das Hierarchieproblem kann zwar durch diese neuen Gravitationstheorien erklärt werden, aber die Crux ist, dass die Existenz von Extradimensionen bislang nicht experimentell bestätigt werden konnte. Das könnte entweder daran liegen, weil der zusätzliche Raum auf zu kleinen Längenskalen kompaktifiziert ist oder weil es gar keine höheren Dimensionen gibt! Diese Unsicherheiten treiben die Forscher an, sowohl weitere Modelle zu entwickeln, als auch nach immer ausgefeilteren, experimentellen Tests der Extradimensionen zu suchen. Sensationelle Meldungen werden diesbezüglich vom Superbeschleuniger LHC am CERN erwartet, der Ende 2007 angeschaltet wird.

9.13 Higgs-Teilchen

Das Higgs-Teilchen oder Higgs-Feld wurde nach dem britischen Physiker *Peter W. Higgs* benannt, der dessen Existenz bereits 1964 prognostizierte. Es handelt sich um ein elektrisch neutrales Austauschboson mit Spin 0 (also einem Skalarfeld), dessen Masse sehr hoch sein muss. Experimentell ließ sich die **Massengrenze oberhalb von 114 GeV** (LEP-Experiment am CERN) einordnen. Zum Vergleich: die Nukleonen im Atomkern, Proton und Neutron, haben eine Masse von etwa 1 GeV.

9.13.1 Der Higgs-Mechanismus

Das hypothetische Higgs-Teilchen hat eine wichtige Funktion im Teilchenzoo der Physik: Im *Higgs-Mechanismus* stattet das Higgs-Feld, das sich unendlich im Raum erstreckt, die Teilchen mit Masse aus. Es handelt sich um eine **spontane Symmetriebrechung**, die wie folgt abläuft: Das Higgs-Boson koppelt an sämtliche Teilchen, d. h. es kann mit jedem Teilchen wechselwirken. Dabei ist die Stärke dieser Kopplung proportional zur Masse des Teilchens. Dadurch dass das Higgs-Boson nun an alle Teilchen koppelt, verschafft es ihnen Schwere: **die Teilchen erhalten eine Masse**.

9.13.2 Symmetrie bricht, Teilchenmasse da

Die meisten Teilchen, die Physiker beobachten, haben eine Masse. Der Higgs-Mechanismus hat also offensichtlich schon stattgefunden. Genauer: Die Symmetriebrechung muss bei einer höheren Temperatur, als diejenige die für unsere Umgebung typisch ist, stattgefunden haben. Im Higgs-Modell nimmt man nun an, dass die Symmetrie bei einer kritischen Temperatur gebrochen wurde und in eine Aufspaltung in die bekannten vier Naturkräfte ('*Tetralogie der Kräfte*') gemündet habe.

9.13.3 Die vier fundamentalen Wechselwirkungen heißen

- ◇ Gravitation,
- ◇ elektromagnetische Wechselwirkung,

- ◇ Schwache Wechselwirkung
- ◇ und Starke Wechselwirkung.

9.13.4 Aber das war nicht immer so...

Oberhalb der kritischen Temperatur wird die Symmetrie restauriert und es gibt **nur zwei Naturkräfte**: X-Kraft und Gravitation. Die Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) beschreiben, wie die Symmetrie zwischen elektromagnetischer, schwacher und starker Kraft im Rahmen einer SU(5)-Gruppentheorie hergestellt werden kann. Die GUT-Skala ist sehr nahe an der fundamentalen Planck-Skala: typische Energien liegen im Bereich von 10^{16} GeV, was gemäß $E = kT$ (k: Boltzmann-Konstante) Temperaturen von 10^{29} Kelvin entspricht. Das ist ein recht unangenehmes Milieu für Leben und sie war - so die gängige Auffassung in der modernen Kosmologie - im sehr frühen Universum realisiert (*GUT-Ära*).

9.13.5 Festkörper wiesen den Weg

Das Konzept, das heute Higgs-Mechanismus genannt wird, wurde von Higgs aus der Festkörperphysik übernommen. Im Festkörper gibt es ein Gitter aus positiv geladenen Atomrümpfen, die das Gitter des Festkörpers bilden. Bewegt sich nun ein Elektron durch das Gitter, so wird dessen effektive Masse signifikant gegenüber der eines freien Elektrons erhöht, weil das Elektron vom positiven Gitter angezogen wird. Das Elektron wird schwerer!

Auf analoge Weise soll das Higgs-Teilchen den schweren W^+-, W^-- und dem Z-Teilchen, den Weakonen der schwachen Wechselwirkung, ihre Masse verleihen, nur nicht dem (ruhe-)masselosen Photon. Die hohen Massen der intermediären Eichbosonen W^+, W^- und Z motivieren stark die Existenz des Higgs-Bosons in der Teilchenphysik.

9.13.6 gespenstisches Higgs-Teilchen

Gemäß der quantenmechanischen Energie-Zeit-Unschärfe nach *Werner Heisenberg* ist mit einer hohen Masse eines Teilchens eine kurze Lebensdauer assoziiert, und gerade das macht den Nachweis des Higgs-Teilchens so schwierig. Aus diesem Grund könnte man das Higgs-Teilchen auch **Geistteilchen** (engl. *ghost*) nennen, weil es kaum in Erscheinung tritt. Historisch geht die Bezeichnung 'Geistteilchen' auf *Abdus Salam* zurück, der eine anschauliche Interpretation des Higgs-Mechanismus beschrieb (sinngemäß): 'Teilchen verleiben sich Higgs-Bosonen ein, um an Masse zu gewinnen und zurück bleiben nur die Geister der Higgs-Teilchen.' Eine andere Bezeichnung ist das '*Teilchen Gottes*', weil ihm die tragende Rolle bei der Vergabe der Masse zukommt.

9.13.7 Noch keine experimentelle Bestätigung!

Es ist das letzte Teilchen im Standardmodell der Teilchenphysik, dessen **experimenteller Nachweis fehlt**! Die Ergebnisse des Fermilab sowie des CERN, wenn der neue Teilchenbeschleuniger LHC im Ende 2007 steht, bleiben mit Spannung abzuwarten. Nur sie dringen in den interessanten Energiebereich des Higgs-Teilchens vor.

9.13.8 SUSY macht mehr Higgs-Teilchen

Die Supersymmetrie (SUSY) stellt eine Erweiterung des Standardmodells dar. Sie prognostiziert weitere Teilchen, so genannte **Superpartner**, zu den beobachteten Teilchen. Diese Erweiterung betrifft auch das Higgs-Teilchen. Unter Berücksichtigung der Supersymmetrie gibt es nicht nur ein Higgs-Teilchen, sondern **fünf Higgs-Teilchen**: drei elektrisch neutrale und zwei elektrisch geladenen Higgs-Teilchen. Das **Minimale Supersymmetrische Standardmodell** (MSSM) sagt sogar eine Maximalmasse der Higgs-Teilchen voraus, die bei etwa 130 GeV liegt. Zusammen mit der experimentell am CERN verifizierten Minimalmasse von 114 GeV bleibt dem Higgs-Feld nur ein schmaler Massenbereich, den die Physiker an der Generation kommender Teilchenbeschleuniger genau sondieren werden. Möglicherweise steht Verifikation oder Falsifikation kurz bevor!

9.13.9 Verallgemeinerung zu Nambu-Goldstone-Bosonen

Der Higgs-Mechanismus ist immer mit einer spontanen Symmetriebrechung (SSB) verbunden. Bei diesen Brechungen der Symmetrie treten aber auch immer so genannte topologische Defekte (*domain walls*, kosmische Strings, magnetische Monopole etc.) auf. Der Higgs-Apparat ist jedoch weit verbreiteter in der Natur, als nur in der Festkörperphysik und Teilchenphysik. Dieses fundamentale Konzept wurde bereits in vielen anderen Disziplinen angewendet. So kann man in der Kosmologie (Phasenübergang im frühen Universum) und Quantenchromodynamik (*Peccei-Quinn-Symmetrie*) Symmetriebrechungen finden, die immer mit einem skalaren Higgs-Feld beschrieben werden können. Man nennt diese mit dem Feld assoziierten Teilchen dann allgemeiner **Nambu-Goldstone-Bosonen**. Das Higgs-Teilchen ist demnach nur eine spezielle Realisierung eines Nambu-Goldstone-Bosons.

9.13.10 Symmetriebrechung anschaulich

Die Theoretiker betrachten in der Regel ein *skalares Higgs-Feld*, das mit dem *Higgs-Potential* assoziiert ist. Das Skalarfeld im Raum- und Zeitpunkt nimmt eine bestimmte Feldenergie an, die gerade diesem Higgs-Potential entspricht. Skalarfelder sind **lorentzinvariant**, d. h. sie haben die angenehme Eigenschaft sich unter Lorentz-Transformationen nicht zu verändern: Jeder Beobachter misst den gleichen Wert für dieses Feld, unabhängig davon, wo er sich befindet oder wie schnell er sich bewegt. Der Wertebereich dieses Feldes kann wiederum reell, komplex, vektor- oder matrixwertig sein. Das Entscheidende ist, dass sich die **Vakuumzustände** des Feldes am Boden der Potentialmulde befinden - analog zu stabilen Gleichgewichtslagen in der klassischen Mechanik. Die Abbildung 9.2 illustriert den Potentialverlauf für ein reelles Higgs-Potential, parametrisiert durch die Temperatur. Die Vakuumzustände hängen von einer kritischen Temperatur ab, bei der gerade die **Symmetriebrechung** stattfindet (rote Kurve). Oberhalb dieser Temperatur existiert eine **höhere Symmetrie**: es existiert nur ein globales Minimum, nämlich dort, wo das Feld verschwindet (blaue und violette Kurven). Unterhalb der kritischen Temperatur hingegen ist diese Symmetrie gebrochen: das globale Minimum wird zum lokalen Maximum und sowohl links als auch rechts davon treten zwei neue globale Minima auf (grüne Kurve). Eine Kurvendiskussion (Analysis einer Veränderlichen) liefert die parametrisierten Koordinaten der Extrema und Wendepunkte und die Gleichung für die kritische Temperatur

$$T_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{2\lambda\eta^2}{b}}.$$

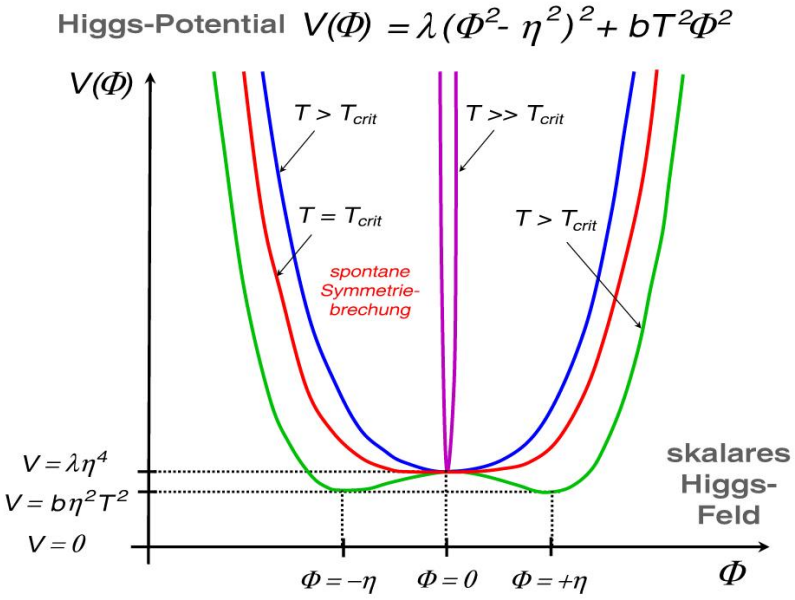

Abbildung 9.2: Higgs-Teilchen: Kurvenverlauf des reellen Higgs-Potential parametrisiert durch die Temperatur.

An der Abbildung 9.2 sieht man auch, dass der Vakuumerwartungswert des Higgs-Feldes (*Moduli*), der gerade mit der Potentialmulde assoziiert ist, nach der Symmetrieberechung absinkt. Denn das Feld wird jede Fluktuation ausnutzen, um von dem Potentialberg (instabile Gleichgewichtslage) 'abzurutschen' und in eines der beiden Minima zu gleiten, die stabile Zustände sind. Das ist eine wunderbare Analogie zu Gleichgewichtslagen in der klassischen Mechanik!

9.13.11 Und wer's komplex mag...

Die komplexe Erweiterung dieses Potentials kann einfach durch Rotation der Funktion um die y-Achse (Ordinate) generiert werden. Die entsprechende Potentialfläche hat die Gestalt eines mexikanischen Sombrero-Hutes, weshalb auch die englische Bezeichnung *Mexican hat potential* für das komplexe Higgs-Potential gebräuchlich ist. Die beiden Vakuumzustände unterhalb der kritischen Temperatur degenerieren dann. Man sagt: die **Vakuum-Mannigfaltigkeit** (*Moduli-Raum*, engl. *Moduli space*) ist ein Kreis. In einem dreidimensionalen Koordinatensystem wird die Basisfläche durch den Real- und Imaginärteil des Feldes aufgespannt. Die Vakuumzustände auf dem Kreis können durch einen **Phasenwinkel** parametrisiert werden. Die Rotationssymmetrie für komplexwertige Higgs-Felder nennt man **U(1)-Symmetrie**, gemäß der Gruppentheorie.

9.13.12 Anknüpfung an die Kosmologie

Diese mathematischen Eigenschaften des reellen Higgs-Potentials interpretiert man kosmologisch folgendermaßen: Kurz nach dem Urknall herrschten sehr hohe Temperaturen oberhalb der GUT-Skala von 10^{29} K. Das Higgs-Feld nahm im gesamten Raum den Wert null

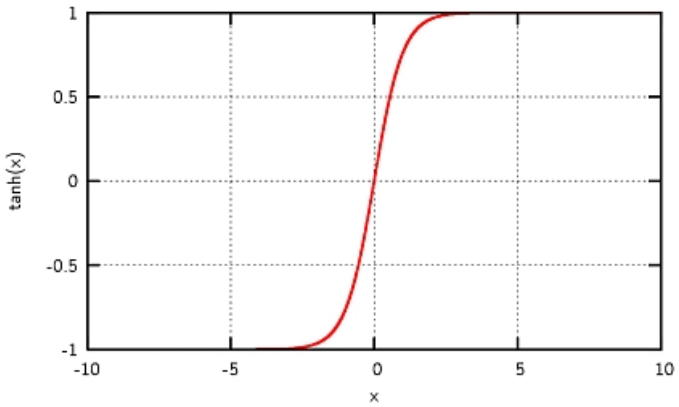

Abbildung 9.3: Higgs-Teilchen: Kurvenverlauf des Tangens Hyperbolikus.

an, weil die Symmetrie noch nicht gebrochen war (entsprechend einem globalen Minimum). Durch die Expansion des heißen Feuerballs kühlte dieser langsam ab, die Temperatur sank und näherte sich der kritischen GUT-Temperatur. Dann setzte der Phasenübergang ein: die Symmetrie wurde spontan gebrochen. Das reelle Higgs-Feld hat nun zwei mögliche Vakuumerwartungswerte, das komplexe sogar mehr, die sich durch einen Phasenwinkel unterscheiden. Das 'Spontane' an der Symmetriebrechung ist, dass a priori nicht klar ist, welchen der beiden Vakuumwerte das reelle Higgs-Feld annehmen wird. Dies unterliegt einer statistischen Verteilung. Das 'Springen' des Vakuumerwartungswertes des Higgs-Feldes von null auf einen endlichen Wert treibt gerade die **Inflation** an, eine exponentielle Expansion des Universums. Weil diese Ausdehnung schneller als das Licht sein kann, können **voneinander kausal entkoppelte Gebiete** entstehen, die verschiedene Erwartungswerte für das Vakuum haben.

9.13.13 Der falsche Hase des Nichts

Das Problem ist nun, dass das Higgs-Feld eine stetig differenzierbare Funktion ist, also keine Unstetigkeiten in Form von 'Sprüngen' aufweisen darf. Zwischen zwei verschiedenen Erwartungswerten muss es demzufolge Gebiete geben, die verschwindendes Higgs-Feld haben, aber (im Gegensatz zum globalen Minimum oberhalb der kritischen Temperatur) endliches Higgs-Potential. Diese Gebiete heißen **falsches Vakuum**. Der endliche Erwartungswert für das Vakuum impliziert *lokal eine endliche Energie*, die eingeschlossen ist. Physiker nennen sie auch *domain walls*, die ein Beispiel für topologische Defekte darstellen. In drei Dimensionen trennen sie unterschiedliche Vakua voneinander. Ihr Feldverlauf entspricht mathematisch dem Tangens Hyperbolikus, der in Diagramm 9.3 illustriert ist: Die beiden unterschiedlichen Niveaus links und rechts entsprechen den unterschiedlichen Vakua zwischen denen die *domain walls* vermitteln. Leider beobachteten die Astronomen diese *domain walls* bislang nicht.

9.13.14 Werden Gravitationswellen helfen?

Im Zuge dessen führte man das **komplexe Higgs-Feld** ein (das man sich aus zwei reellen Higgs-Felder zusammengesetzt denken kann, Real- und Imaginärteil). In dieser Erweiterung

treten ebenfalls topologische Defekte auf: die **kosmischen Strings** (die *nicht* mit den Strings der Stringtheorien zu verwechseln sind!). Sie weisen eine andere Topologie als *domain walls* auf und bestehen ebenfalls aus Einschlüssen des falschen Higgs-Vakuums. Mathematisch gesprochen handelt es bei den kosmischen Strings um *eindimensionale Vertex-Linien*. In dessen Kernen verschwindet zwar das Higgs-Feld, aber da die Gebilde ausgedehnt sind (entweder geschlossen oder unendlich lange) kann man sich vorstellen, dass sie einen nicht unerheblichen Teil an Feldenergie gespeichert haben. Weil die Theoretiker außerdem annehmen, dass die Strings oszillieren, müssen sie auch **Gravitationswellen** aussenden. Das macht dieses Szenario wieder interessant für die Astronomen, nämlich für die in den letzten Jahren mächtig vorangetriebenen Gravitationswellendetektoren.

9.13.15 andere kosmische Saiten aufziehen

1976 wurde erstmals von *T.W.B. Kibble* in Erwägung gezogen, dass kosmische Strings eine Bedeutung für die Entwicklung des Universums haben könnten. Kosmische Strings bilden ein Netzwerk aus und wechselwirken miteinander durch *Interkommutation*. Damit bezeichnet man einen Austausch von Stringstücken, wenn sich kosmische Strings nahe genug kommen. Diese Wechselwirkung und auch die Expansion der Raumzeit, auf dessen Hintergrund die Strings 'mitschwimmen', führen zu einem allmählichen Aufzehren der im String gespeicherten Feldenergie. Dieser Zerfall führt - so vermuten Kosmologen - letztendlich zu einem Verschwinden kosmischer Strings, so dass in unserem lokalen Universum nur wenige - wenn überhaupt - vorhanden sein dürften. Der Durchmesser der kosmischen Strings liegt nur drei Größenordnungen über der Planck-Länge, bei etwa 10^{-30} cm. Die Energie, die ein Kilometer String enthält, ist enorm und beträgt etwa 10^{50} GeV.

Sollte es sie im frühen Universum gegeben haben, könnten sie für die **Strukturbildung** entscheidend gewesen sein. Sowohl Beobachtung als auch numerische Simulation zeigen filament- und wabenartige Strukturen, die aus Galaxien und Galaxienhaufen bestehen. Vielleicht waren die die Netzwerke kosmischer Strings als Relikte einer Symmetriebrechung die Kondensationskeime für die Galaxien? Man kann auch darüber spekulieren, dass an kosmischen Strings superkritische Brill-Wellen emittiert wurden, die zur Bildung der ersten Generation Schwarzer Löcher führten, die danach durch Akkretion wuchsen und zu den heute paradigmatisierten supermassereichen Schwarzen Löchern wurden. Aber das ist eine sehr gewagte und unkonventionelle Hypothese.

9.13.16 Literaturquellen:

- ◇ *A. Rajantie*, **Defect formation in the Early Universe**, astro-ph/0307387 (2003),
- ◇ *Franz Embacher*, **Kosmische Strings** (1994)

9.14 Hilbert-Raum

Der Hilbert-Raum ist an sich sehr abstrakt mathematisch definiert und fällt in das Gebiet der *Funktionalanalysis*. Die Funktionalanalysis ist im Wesentlichen der mathematische Unterbau der Quantentheorie. Unendlichdimensionale Räume und Operatoren erfahren hier ihre formale Definition.

9.14.1 zuerst der Vektorraum

Um zu verstehen, was ein Hilbert-Raum ist, muss man zunächst den Begriff *Vektorraum* klären. Ein Vektorraum genügt speziellen Axiomen, wie Addition und Vielfachbildung der Elemente, die im Vektorraum liegen. Dann nennt man die Menge einen Vektorraum, wenn Distributiv-, Assoziativ- und Kommutativgesetze gelten und ein Nullelement sowie ein inverses Element existieren. An einem dreidimensionalen Vektor kann man sich diese Eigenschaften leicht klar machen.

9.14.2 Erklärung in mathematischer Sprache

Der Hilbert-Raum ist nun ein bestimmter Vektorraum, der ein **Skalarprodukt** besitzt. Dazu muss er unitär und vollständig sein. Ein Raum ist unitär, wenn man auf ihm eine Norm definieren kann, so dass die Cauchy-Schwarzsche-Ungleichung gilt. Ist der Vektorraum vollständig, aber nicht unitär, heißt er *Banach-Raum*.

9.14.3 etwas anschaulicher...

Diese Eigenschaften vermitteln nur eine abstrakt-formale Vorstellung von einem Hilbert-Raum. Um konkreter zu werden: Hilbert-Raum nennt man in der Quantentheorie denjenigen Vektorraum, der von sämtlichen Quantenzuständen der Theorie (Wellenfunktionen) aufgespannt wird. Im Allgemeinen betrachtet man nicht den kompletten Hilbert-Raum, sondern nur einen *Unterraum*, der gerade relevant ist für das physikalische Problem. So ist der Hilbert-Raum des Spins des Elektrons zweidimensional, also recht simpel. Das liegt daran, weil dieser Hilbert-Raum nur von zwei Quantenzustände des Elektrons aufgespannt wird: 'Spin nach oben' (*spin-up*) oder 'Spin nach unten' (*spin-down*). Andere Quantensysteme sind im Allgemeinen komplizierter und weisen mehr Quantenzustände auf. Dann wird auch der Hilbert-Raum komplexer. In der Loop-Quantengravitation beispielsweise wird der Hilbert-Raum von den Loops aufgespannt. Alternativ wurden als orthonormale Basiszustände die Spin-Netzwerke gefunden.

9.15 Hintergrundmetrik

Eine Hintergrundmetrik ist eine Raumzeit (= Metrik) in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die sich nicht verändert und in diesem Sinne wie ein unveränderlicher Hintergrund fungiert. Die Raumzeit bleibt einfach wie sie ist.

9.15.1 Geht das?

Eigentlich verbietet die mathematische Struktur der ART eine solche Hintergrundmetrik, denn wie aus den Einsteinschen Feldgleichungen hervorgeht, beeinflusst **jede** Energieform die Dynamik der Raumzeit, weil sie als Masse die Raumzeit lokal krümmt. Die ART ist also *hintergrundunabhängig* oder wie es hochtrabend ausgedrückt wird diffeomorphismusinvariant.

Andererseits kann man in bestimmten Fällen 'ein Auge zudrücken': Stellen wir uns ein Photon vor, das sich unschuldig in der Nähe eines Schwarzes Lochs bewegt. Lokal krümmt die Energie des Photons sicher die Raumzeit - der Effekt ist jedoch so klein, dass es zulässig ist, die Bewegung des Photons **approximativ** (näherungsweise) vor dem Hintergrund der Metrik des Schwarzen Loches zu beschreiben.

9.15.2 Einsatzgebiete von Hintergrundmetriken

In der **numerischen Relativitätstheorie**, z. B. in Simulationen zur Hydrodynamik oder Magnetohydrodynamik ist es üblich und sogar weit verbreitet, die Bewegung der Flüssigkeit (*Fluidum*) vor einer Hintergrundmetrik zu formulieren. Die Metrik bleibt wie sie ist. So ist es in Ordnung, die Ausbreitung relativistischer Jets von Aktiven Galaktischen Kernen im Rahmen einer speziell relativistischen Hydrodynamik/Magnetohydrodynamik (SRHD, SRMHD) mit der Minkowski-Metrik als Hintergrund zu beschreiben. Der Fehler ist gering, weil der optisch dünne Jet kaum die Raumzeit deformiert. Ein Jet ist eben weit davon entfernt, eine kompakte Masse zu sein.

Ähnlich verhält es sich in GRMHD-Simulationen, z. B. Akkretionsflüssen, die sich in der Umgebung Schwarzer Löcher bewegen. Die Lochmetrik ist üblicherweise eine Hintergrundmetrik.

Auch in Stringtheorien werden Strings und Branen vor Hintergrundmetriken beschrieben, so dass die Stringtheorien *nicht* diffeomorphismusinvariant sind.

9.15.3 Extreme, wo Hintergrundmetriken versagen

Im Allgemeinen muss die Rückwirkung der Massen/Energien auf die Raumzeit berücksichtigt werden. Die Relativisten sprechen in diesem Fall explizit auch von **dynamischen Raumzeiten**. Extreme Beispiele dynamischer Raumzeiten sind Paare aus Neutronensternen (engl. *binary pulsars*) oder aus Schwarzen Löchern, der Gravitationskollaps massereicher Sterne in Supernovae oder Hypernovae, Gamma Ray Bursts, die Akkretion einer massereichen, dicken Materiescheibe (z. B. Torus) auf ein kompaktes Objekt.

9.15.4 Lösung: anspruchsvolle Computercodes

Es gibt bereits numerische Codes, die die Entwicklung dynamischer Raumzeiten berechnen können. Ein modernes Beispiel ist der GRMHD-Code von *Duez, Liu, Shapiro & Stephens*, Phys. Rev. **D 72**, 024028, 2005, der das volle Einstein-Maxwell-Gleichungssystem in Achsensymmetrie löst und die Zeitentwicklung einer Anfangsmetrik ausrechnet. Dabei bilden sich wohl bekannte Störungen in der Raumzeit aus, die sich wellenförmig fortpflanzen: **Gravitationswellen**. Sie vermitteln gerade die Dynamik der Raumzeit.

Solche Codes ermöglichen das Studium interessanter, astrophysikalischer Fragestellungen auf völlig neuem Terrain. Der Vergleich mit astronomischen Beobachtungen zeigt, ob die Vorstellungen der Simulatoren richtig ist und ihr Code funktioniert.

9.16 Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung wurde 1965 von *Arno Allan Penzias* (* 1933) und *Robert Woodrow Wilson* (* 1936) entdeckt, was 1978 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt wurde.

9.16.1 Eigenschaften dieser Strahlung

Diese Strahlung wird auch Drei-Kelvin-Strahlung genannt, weil sie einem thermischen Strahler (Planckscher Strahler, *Hohlraumstrahler*, Schwarzer Körper) der Temperatur von fast drei Kelvin gleichkommt. Damit liegt sie im Spektralbereich der **Mikrowellen**. Die diffuse

Hintergrundstrahlung ist außerdem **extrem isotrop verteilt**, d. h. sieht in alle Richtungen gleich aus.

9.16.2 Die Interpretation ist ein Hammer!

Die Hintergrundstrahlung wurde so interpretiert, dass sie nicht einer irdischen Quelle oder einer fixierten kosmischen Quelle zugeordnet werden kann, sondern dem **Universum selbst**! Die Hintergrundstrahlung entspricht gerade denjenigen Photonen, die in der Rekombinationsära der Kosmologie von der gebildeten Urmaterie bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ oder etwa 400000 Jahre nach dem Urknall lösten. Der Fachmann spricht hier von der *Entkopplung der Strahlung*.

9.16.3 Warum geschah das?

Nun, das Szenario gestaltet sich wie folgt: Das Universum war in dieser Epoche deutlich kleiner und heißer, aber es dehnte sich aus. Die Strahlung war im Urplasma, das im Wesentlichen aus Elektronen und Protonen bestand, 'gefangen'. Ursprünglich entstanden die Photonen schon in der GUT-Ära, als sich Materie und Antimaterie vernichteten (Annihilation). Die 'Ursuppe' aus Elektronen, Protonen und Photonen befand sich im **thermischen Gleichgewicht**, weil die Teilchen ständig aneinander stießen und somit immer in thermischen Kontakt waren. Deshalb kann dem Urplasma eine feste Temperatur von etwa 3000 Kelvin zugeordnet werden - das ist gerade einmal die Hälfte der Temperatur des Plasmas der Oberfläche der Sonne! Der expandierende Feuerball kühlte mit der Ausdehnung ab. Schließlich wurde er kalt genug, dass die Elektronen von den Protonen eingefangen werden konnten.

9.16.4 erste Atome

Es bildeten sich die ersten Atome, allen voran **neutraler Wasserstoff** (HI). Dieser Rekombination genannte Vorgang veränderte schlagartig die Transparenzeigenschaften des Universums für elektromagnetische Strahlung. Denn die Photonen des Urplasmas wurden nicht mehr an elektrisch geladenen Teilchen gestreut. Die Strahlung wurde frei und das Universum wurde durchsichtig. Genau dieser Sachverhalt verbirgt sich auch hinter der wissenschaftlichen Formulierung der **Entkopplung von Strahlung und Materie**. Jetzt kommt wesentlich zum Tragen, dass sich das Urplasma im thermodynamischen Gleichgewicht befand: Die 'befreiten' Photonen hatten deshalb eine wohl definierte Energie und unterschieden sich kaum voneinander. Mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz (siehe Eintrag Spektraltyp) lässt sich aus der Temperatur von 3000 Kelvin die Wellenlänge der Hintergrundstrahlung zu etwa einem Mikrometer berechnen - das ist jedoch die Wellenlänge 'vor Ort', als die Photonen ausgesandt wurden. Die weitere Expansion des Kosmos kühlte diese anfangs heißen Photonen aufgrund der kosmologischen Rotverschiebung jedoch stark ab. Das Resultat wurde schließlich erstmals 1965 von Menschen beobachtet: die 2.72 Kelvin kalte, isotrope kosmische Hintergrundstrahlung. Wiederum mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz lässt sich zu den 2.72 Kelvin eine beobachtete Wellenlänge von etwa einem Millimeter berechnen. Von dieser Urstrahlung gibt es immer noch 412 Photonen pro Kubikzentimeter im lokalen Universum vor unserer Haustür.

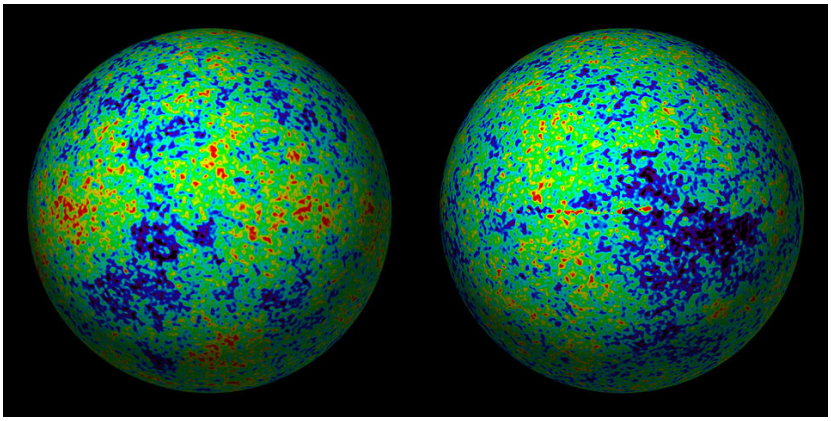

Abbildung 9.4: Hintergrundstrahlung: WMAP-Himmelskarte der Hintergrundstrahlung, projiziert auf Himmelsglobus.

9.16.5 Das älteste kosmische Signal

In der Rekombinationsära bei $z \sim 1100$ gab es weder Sterne noch Galaxien. Mit aktuellen kosmologischen Parametern (Anteil Dunkler und normaler Materie 26%, Dunkle Energie 74%, Hubble-Konstante von 72 km/s/Mpc) entspricht eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 1100$ einem Alter des Universums von nur etwa 400000 Jahren! Damit ist die kosmische Hintergrundstrahlung **das Älteste, was Menschen je beobachtet haben**! Vermutlich gehört diese Entdeckung zu den größten Errungenschaften der Menschheit. Der Mikrowellensatellit WMAP legt ein Alter des Universums von 13.7 Milliarden Jahren nahe. Die Hintergrundstrahlung ist also entsprechend 13.6996 Milliarden Jahre alt!

9.16.6 Stütze der Urknall-Theorie

Die Hintergrundstrahlung ist zusammen mit der beobachteten **Fluchtbewegung der Galaxien** (*Edwin Hubble*, 1929) - dem Hubble-Effekt - ein schwerwiegendes Argument für den Urknall. Denn etwas, das expandiert, muss zu früheren Zeitpunkten kleiner gewesen sein.

9.16.7 Nobelpreis für Physik 2006

Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (engl. *cosmic microwave background radiation*, **CMBR**) wurde sehr genau vermessen: Ballone (BOOMERANG, MAXIMA) und Satelliten (COBE, WMAP, ab 2008: PLANCK) bestimmten die Verteilung der Strahlung am Himmel sehr genau. Dabei stellte sich heraus, dass sie **geringfügige Anisotropien** auf der Skala von Mikrokelvin (10^{-6} Kelvin) aufweist. Das heißt, dass der eine Himmelsausschnitt gegenüber einem anderen eine geringfügig andere Temperatur aufweist. Kosmologen nehmen an, dass diese Fluktuationen bereits von den ersten **jungen Galaxien** aufgeprägt wurden. Denn durch die damit verbundenen geringen Über- und Unterdichten in der Materieverteilung werden die Hintergrundphotonen beeinflusst. Deshalb wird die gemessene Strahlungsverteilung am Himmel oft mit der gelungenen Wortschöpfung '**Babyfoto des Universums**' bezeichnet.

Zur Jahreswende 1989/1990 wurden mithilfe des Satelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*) die Anisotropien erstmals entdeckt. Im Oktober 2006 wurde bekannt gegeben, dass diese Leistung mit dem Nobelpreis für Physik 2006 geehrt werden soll. Der Nobelpreis ging an die an COBE beteiligten amerikanischen Wissenschaftler *John C. Mather* (Goddard Space Flight Center, NASA) und *George Smoot* (University of California, Berkeley).

Die Hintergrundstrahlung vom gesamten Himmel wird als Falschfarbenbild dargestellt, wobei jeder Position auf der Himmelskarte eine Farbe zugeordnet wird. Die Farbe ist ein Maß für die Temperatur der Strahlung: Hohe Temperaturen sind rot, tiefe hingegen blau dargestellt. Der Himmel wurde auf eine Kugel projiziert, und damit man den ganzen Himmel sieht, zeigt Abbildung 9.4 Vorder- und Rückseite der Kugel. Die Anisotropien sieht man in diesen Beobachtungsdaten als Flecken auf dem Himmelsglobus, der ein Resultat der auf COBE nachfolgenden Satellitenmission WMAP ist (Credit: NASA/WMAP Science Team, 2003). Die Mikrowellenemission der Milchstraße wurde abgezogen, weil sonst ein 'breites, rotes Band' die Äquatorialebene (d. h. die galaktische Ebene) zieren würde. Durch diese Reduktionsverfahren (auch unzählige, andere helle Punktquellen müssen herausgerechnet werden) kommen die Kosmologen an die eigentliche, kosmologische Information: die Energie der 'Urphotonen'. Der Betrachter des Himmelsglobus erkennt sofort einige Strukturen, z. B. ausgedehnte, kühle oder knotige, heiße Regionen.

9.16.8 Powerspektren: Fingerabdruck der Hintergrundstrahlung

In der Analyse gehen die Kosmologen allerdings noch präziser vor. Sie werten so genannte *Winkel-Powerspektren* (engl. *angular power spectra*) aus. Die Intensitätsverteilung der Hintergrundstrahlung am Himmel wird in **Multipole** entwickelt. Die Winkel-Powerspektren zeigen über der Ordnung l des Multipols. Bei $l \sim 220$ tritt der **erste akustische Peak** auf, bei $l \sim 540$ der zweite. Eine **Lambda-CDM-Kosmologie** bestehend aus einem dominanten, hohen Anteil an Dunkler Energie (73%) und Dunkler Materie (23%), aber nahezu verschwindendem Anteil baryonischer Materie (4%) erklärt diese Powerspektren recht gut. Doch kürzlich wurden Zweifel an diesen gemessenen Anteilen laut, weil die Hintergrundstrahlung bei ihrer Propagation Streueffekten unterliegt, die ihre Signatur verfälschen können. Man nennt dieses Phänomen den **Sunyaev-Zel'dovich-Effekt** und meint damit, dass die CMB-Photonen aus der Rekombinationsära bei ihrer Propagation ins lokale Universum an der Materie von mittlerweile entstandenen **Protogalaxien** gestreut werden. Es handelt sich um **Compton-Streuung** (vergleiche Comptonisierung), wo die Photonen insbesondere an Elektronen im heißen Clustergas von Galaxienhaufen gestreut werden. Dieser Streuprozess könnte sich stärker bemerkbar machen, als bisher angenommen. Es muss daher detailliert untersucht werden, wie die gemessenen Powerspektren durch Streueffekte modifiziert werden, so dass daraus wiederum die **kosmologischen Parameter** eindeutig abgeleitet werden können. Dies ist ein Gegenstand der aktuellen kosmologischen Forschung.

9.16.9 weitere Spuren aus der Polarisation

Ein zweiter ist die **Polarisation der Hintergrundstrahlung**. Polarisation ist eine Eigenschaft elektromagnetischer Wellen. Bei polarisiertem Licht schwingen die Feldvektoren in einer Vorzugsrichtung, z. B. in einer Ebene bei linear polarisiertem Licht. Eine Sonnenbrille ist nicht anderes als ein Polarisationsfilter, der eine bestimmte Polarisationsebene des

unpolarisierten Sonnenlichts 'ausblendet': die Intensität hinter der Brille nimmt ab. Streuung von elektromagnetischen Wellen an geladenen Teilchen ruft ebenfalls eine Polarisation hervor. Auch Synchrotronstrahlung ist immer linear polarisiert. Im Zusammenhang mit der Hintergrundstrahlung tritt Polarisation dann auf, wenn die Hintergrundphotonen an Elektronen gestreut werden. Die Elektronen wurden zwar in der Rekombinationsära an Protonen gebunden. In der kosmologisch nachfolgenden Reionisationsära allerdings wurde das neutrale Umgebungsmedium **erneut** z. B. durch die ersten Sterngenerationen ionisiert. Das intergalaktische Medium ist deshalb wieder von Elektronen bevölkert, die als Streuzentren für die Hintergrundstrahlung wirken. Hintergrundstrahlung trägt also zweierlei Information: Temperaturfluktuation und Polarisation. Die Kosmologen nutzen diesen zweiten Informationsgehalt natürlich aus, denn so können sie aus der Polarisation etwas über den Zustand der Elektronen im frühen Universum erfahren.

9.17 HLX

Ein Akronym der Fachbezeichnung ***h**yper**l**uminous **X**-ray source*, das die **leuchtkräftigsten aller Röntgenquellen** bezeichnet. HLXs haben Röntgenleuchtkräfte von mehr als 10^{41} erg/s!

9.17.1 Wie viele HLXs gibt es?

Derzeit ist nur eine solche Quelle mit großer Sicherheit bekannt, die in der Galaxie M82 entdeckt wurde (*Matsumoto et al.* 2001). Sie wird dadurch erklärt, dass ein mittelschweres Schwarzes Loch akkretiert. Gelegentlich spricht man bei diesem Objekt auch von einem **ULX**, weil die Leuchtkraft gerade am Übergangsbereich von ULX nach HLX liegt. Eine detaillierte Beschreibung dieser Quelle gibt es unter mittelschweres Schwarzes Loch.

9.18 HMXB

Dieses Akronym steht für ***H**igh-**M**ass **X**-ray **B**inary*, übersetzt entsprechend Röntgendoppelsterne mit stellarer Komponente hoher Masse. Röntgendoppelsterne werden allgemein als **XRBs**, ***X**-**R**ay **B**inaries* bezeichnet.

9.18.1 Wirt & Parasit

HMXBs sind Systeme aus einem Wirtstern und einer kompakten Komponente, z. B. einem Neutronenstern oder einem stellaren Schwarzen Loch. Der Namenszusatz *high-mass* bezieht sich darauf, dass der Begleitstern schwerer ist als zwei Sonnenmassen, typischerweise ist es ein **Riesenstern**, z. B. ein Roter Riese. Er stellt als Wirt die Materie, die den 'Parasiten', die kompakte Komponente, füttert. Dabei entstehen charakteristische Röntgenspektren. Das Überfließen der Sternmaterie, getrieben durch die Gravitationskräfte der kompakten Komponente, kann entweder geschehen, wenn der Begleitstern sein Roche-Volumen überschreitet oder wenn **Wind-Akkretion** vorliegt. Im ersten Fall berührt oder überschreitet die Sternoberfläche des Riesen den inneren Lagrange-Punkt (L1) des Doppelsternsystems. In diesem Punkt heben sich gerade die effektiven Gravitationskräfte von stellarer und kompakter Komponente auf: die Sternmaterie ist ungebunden und verlässt den Stern. Dann kann sie aber von der kompakten Komponente eingefangen werden. Im

zweiten Fall, Wind-Akkretion, bläst der Riese einen so heftigen Sternenwind ab, dass dieser vom nahen kompakten Begleiter eingefangen werden kann.

9.18.2 rotierende Materiescheibe

Beide Sterne rotieren. Die Sternmaterie besitzt also Drehimpuls. Aus diesem Grund fällt sie nicht direkt auf kürzestem Wege auf die kompakte Komponente ein, sondern beschreibt eine kurvenförmige Bahn. Auf diese Weise bildet sich eine Akkretionsscheibe aus, im Allgemeinen eine Standardscheibe. Der Motor für die hohe Leuchtkraft dieser Objekte ist demnach die Akkretion.

9.18.3 weitere Einträge

Unter dem Eintrag Röntgendoppelstern findet sich eine zusammenhängende Beschreibung mit einer Abgrenzung von Typen anderer Röntgendoppelsterne (LMXBs, Mikroquasare, AXPs, CVs etc.).

9.19 Holostern

Der Holostern (engl. *holostar*) ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Die Raumzeit der Holosterne wurde von dem Physiker *Michael Petri* 2003 vorgeschlagen. Alternative Bezeichnungen lauten *holographisches Objekt*, *holographische Raumzeit* oder *holographische Lösung*. Die holographische Lösung ist von Interesse in der relativistischen Astrophysik, weil diese Objekte astronomisch nach außen hin wie nicht rotierende Schwarze Löcher erscheinen, aber im Innern völlig andere Eigenschaften haben. Sie könnten sich auch relevant für die Kosmologie erweisen.

9.19.1 Eigenschaften

Die holographische Lösung ist eine **statische und kugelsymmetrische** Raumzeit. Die Raumzeit besteht aus drei unterschiedlichen Bereichen: die äußere Metrik entspricht der Schwarzschild-Lösung - das ist eine Folge des Birkhoff-Theorems. Im Gegensatz zum Schwarzen Loch haben Holosterne **keinen Ereignishorizont**. Der Krümmungsskalar (*Ricci-Skala*) divergiert bei Radius null. In diesem Sinne haben Holosterne eine **Krümmungssingularität** im Innern. Diese unterscheidet sich insofern von derjenigen Schwarzer Löcher, dass man die Singularität durch ein Quantenobjekt (z. B. einen String) ersetzen kann - bei Schwarzen Löchern funktioniert das nicht. Es gibt **kein Entropie- bzw. Informationsparadox**: Information geht nicht im Gravitationskollaps verloren, sondern bleibt bei der holographischen Lösung erhalten. Das sind entscheidende Unterschiede zum Schwarzen Loch! In den Augen einiger Astrophysiker sind das sehr attraktive Eigenschaften.

Holosterne weisen damit erstaunlich viele Ähnlichkeiten zu den Gravasternen (*Mazur & Mottola* 2001) auf. Es sei angemerkt, dass die Bezeichnung *-stern* in beiden Fällen, Holo*stern* und Grava*stern*, etwas irreführend ist: Beide Objekte können - laut Theorie - ohne weiteres weit höhere Massen annehmen als Sterne. Damit kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie - anstelle von supermassereichen Schwarzen Löchern - die Zentren von Galaxien bevölkern.

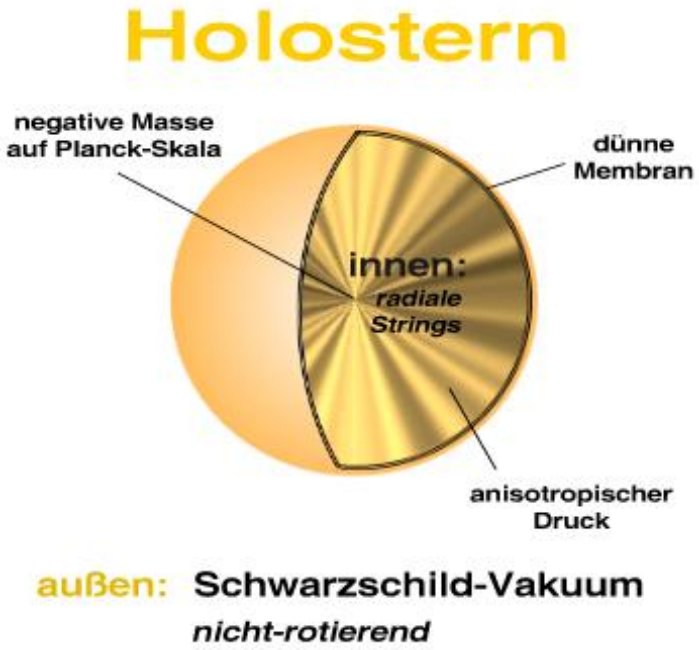

Abbildung 9.5: Struktur eines Holosterns.

9.19.2 Anpirschen an den Holostern

Nähern wir uns nun von außen nach innen der Holostern-Metrik. Der Holostern wird im Außenbereich durch die klassische **Schwarzschild-Metrik** der ART beschrieben – siehe Illustration 9.5. Bei Erreichen eines Abstands, der vergleichbar mit dem Schwarzschild-Radius ist, gibt es etwas Neues: anstelle des Ereignishorizonts befindet sich hier, bei einem Radius r_h, eine **Membran**. Die Membran hat eine Dicke von null und kann als masselos betrachtet werden. Aber sie weist einen tangentialen (poloidalen) Druck auf. In der Membran herrscht eine Oberflächenspannung, weil sich der Druck in radialer Richtung abrupt ändert - das ist analog zur Oberflächenspannung eines Wassertropfens. Im Innern dieser Haut gibt es einen Bereich, in dem die Energiedichteverteilung einem $1/r^2$-Gesetz folgt. Solche Dichteverteilungen sind gerade das Wesen der holographischen Lösung. Petri zeigte 2006, dass ein reguläres, kugelsymmetrisches, holographisches Objekt eindeutig durch ein solches Gesamtenergiedichteprofil charakterisiert ist. Wie wir detaillierter besprechen werden, hat das Innere des holographischen Objekts Eigenschaften wie **Stringmaterie**.

9.19.3 Bezug zum holographischen Prinzip

Die Masse des Holosterns kann wie bei einem gewöhnlichen Stern durch die Summation über die Materiedichteverteilung berechnet werden. Alternativ kann die Masse ausschließlich durch die Betrachtung der Membran, also des Holosternrands, gefolgert werden. Die Äquivalenz beider Betrachtungsweisen ist gerade eine Konsequenz des *holographischen Prinzips*, dem der Holostern seinen Namen verdankt: Wie bei einem Hologramm können Eigenschaften eines Objekts höherer Raumdimension auf ein Abbild niedrigerer Raumdimension übertragen werden. Diese Projektion kennt man von der AdS/CFT-Korrespondenz in den Feldtheorien

(*'t Hooft & Susskind* 1993/94; *Maldacena* 1997). Die AdS/CFT-Korrespondenz besagt, dass eine Quantengravitation auf dem Hintergrund einer Anti-de-Sitter (AdS) Raumzeit in fünf Dimensionen äquivalent ist zu einer konformen Feldtheorie (CFT) **ohne** Gravitation auf dem Rand der AdS-Raumzeit, also in nur vier Dimensionen. Beim Holostern geschieht Ähnliches: Die **Fläche** seiner Membran ist entscheidend und bestimmt seine Masse. An dieser Stelle schließt sich der Kreis von holographischen Lösungen zur Thermodynamik Schwarzer Löcher, denn sie - insbesondere der Zusammenhang zwischen Fläche des Ereignishorizonts und Bekenstein-Hawking-Entropie - war gerade der Ausgangpunkt für *'t Hooft's* und *Susskind's* Überlegungen zum holographischen Prinzip.

9.19.4 Kein gleicher Druck in alle Richtungen

Der entscheidende Unterschied zum Gravastern ist nun eine **anisotrope Druckverteilung im Innern** des Holosterns, also innerhalb des Bereichs, der von der Membran umschlossen wird: Die radiale Druckkomponente entspricht gerade der negativen Dichte. Die senkrechte Druckkomponente ist eine Delta-Distribution, die am Membranradius einen Wert von $1/(16\pi \, r_h)$ annimmt. Im Innern verschwindet daher die (zum Radius) senkrechte Druckkomponente. Holosterne gehören also zur Klasse der anisotropen, kompakten Objekte. Die Anisotropie bezieht sich auf den Drucktensor, der als solcher der räumliche Anteil (Indizes i,k = 1,2,3) des Energie-Impuls-Tensors ist.

Der negative radiale Druck wurde anfangs so interpretiert, dass ein Teilchenstrom kontinuierlich radial in das Innere des Holosterns strömt. Petri favorisierte zunächst supersymmetrische (SUSY-) Teilchen, die einfallen und den negativen radialen Druck generieren - doch das ist nur ein möglicher Vorschlag, um die anisotrope Druckverteilung zu erklären. In diesem Szenario müsste es einen Mechanismus geben, der gewöhnliche, baryonische Materie in SUSY-Materie umwandelt. Womöglich spielt dabei die Membran die Schlüsselrolle.

9.19.5 Interpretation mit Strings

In einer weiteren Veröffentlichung griff Petri 2004 die Konzepte der Stringtheorien, insbesondere von *Samir Mathur* auf. Er erklärte den radialen Anteil des anisotropen Drucktensors im Innern des Holosterns dadurch, dass er möglicherweise mit **radialen, fraktionierten Strings** angefüllt sei. Fraktionierte Strings oder Branen sind String- bzw. Branenstücke, die Mathur eingeführt hat. Der Stringhypothese für Holosterne folgend, würden sich die Strings vom Zentrum bis nach außen zur Membran des Holosterns erstrecken. Die Zustandsgleichung dieser Stringmaterie hat gerade einen **negativen radialen Druck**. Wie aus der Kosmologie im Zusammenhang mit der Dunklen Energie bekannt, haben solche Zustandsgleichungen eine antigravitative Wirkung. Die Stringinterpretation ist jedoch nicht zwingend bei der holographischen Lösung; insofern wäre es falsch zu behaupten, dass Holosterne Stringmodelle sind - das innere Dichteprofil bietet allerdings eine interessante Assoziation mit Strings an.

Der Holostern hat rein formal eine Punktsingularität bei $r = 0$, weil dort der Ricci-Skalar unendlich wird. Dies ist sicherlich eine Eigenschaft von Holosternen, die diskutiert werden muss.

9.19.6 thermodynamische Aspekte

Die weitere Auswertung der Holostern-Lösung zeigte, dass deren Entropie bzw. Temperatur mindestens proportional, vielleicht sogar identisch mit Bekenstein-Hawking-Entropie bzw. Hawking-Temperatur sind (*Petri* 2003, 2004).

2006 betrachtete Petri die **thermodynamische Stabilität** der holographischen Lösung. Die freie Energie ist dabei die wesentliche Größe, weil ein thermodynamisch stabiles Objekt die freie Energie (und nicht nur die innere Energie) minimiert. Die freie Energiedichte ist im gesamten Holostern null, was als hohe thermodynamische Stabilität interpretiert werden kann. Allerdings ist thermodynamische Stabilität nicht gleich *metrische Stabilität*. Um diese Stabilität der Raumzeit zu zeigen, müssen Methoden der ART benutzt werden. Es wäre dann zu untersuchen, ob die holographische Metrik beispielsweise bei einer radialen Störung oszilliert und wieder in die statische Holosternmetrik zurück schwingt oder ob sie zur Schwarzschildmetrik kollabiert. Im letztgenannten Fall wäre der Holostern metrisch instabil.

9.19.7 Kosmologie mit holographischer Lösung

Petri schlägt sogar vor, die holographische Lösung anstelle der Friedmann-Weltmodelle in der Kosmologie als Modell für das ganze Universum zu verwenden. Das mag zunächst verwundern, weil man einen Widerspruch zwischen Ergebnissen der experimentellen Kosmologie mit *expandierendem* Kosmos und *statischer* Metrik der holographischen Raumzeit sehen könnte. Doch Petri zeigte, dass ein Beobachter auf einer Geodäte in einer ausreichend großen holographischen Metrik ein isotrop expandierendes Universum wahrnehmen würde. Der anisotrope Druck übernehme dabei die Rolle der kosmologischen Konstante als Antrieb der Expansion.

Interessanterweise reproduziert die holographische Raumzeit das beobachtete Verhältnis von Photonenzahl zu Elektronenzahl, nämlich eine Milliarde zu eins.

Wie weit **holographische Universen** tragen ist Gegenstand der Forschung.

9.19.8 Weitere Formen holographischer Raumzeiten

Es existiert in Analogie zur Reissner-Nordstrøm-Lösung auch der **elektrisch geladene Holostern** (*Petri* 2003). Die deutlich wichtigere **rotierende Verallgemeinerung** steht noch aus!

9.19.9 Welche Struktur hat das Vakuum?

Was Gravastern und Holostern so interessant für die Astrophysik macht, ist der Umstand, dass sie möglicherweise **Alternativen zu den Schwarzen Löchern** darstellen. Sie tragen der komplizierten Struktur des Vakuums Rechnung. Das relativistische Vakuum wird durch ein identisches Verschwinden des Energie-Impuls-Tensors realisiert. Die neueren Erkenntnisse über die Struktur des Vakuums im Rahmen der Quantentheorie (z. B. Casimir-Effekt) und der Stringtheorien legen nahe, dass für den Energie-Impuls-Tensor ein anderer Ansatz näher an der Natur ist, als der identisch verschwindende Energie-Impuls-Tensor in der klassischen Theorie. Während die Gravasterne Ausfluss der Quantengravitation von *Mazur & Mottola* sind, verfolgt Petri bei den Holosternen einen thermodynamischen Ansatz, der mit den Stringtheorien verträglich zu sein scheint.

9.19.10 Verhaltene Skepsis in der scientific community

Trotz dieser interessanten und diskussionswerten Eigenschaften der holographischen Raumzeiten, ist die Reaktion der meisten Wissenschaftler recht zurückhaltend. Das hat unterschiedliche Gründe: Generell gilt, dass sich neue Vorschläge schwer etablieren - es sei denn ihre Brauchbarkeit erweist sich unmittelbar, z. B. weil sie ein Experiment bestens erklären. Im Falle von Grava- und Holostern gibt es zwei Gründe für die Skepsis: Zum einen wurde noch nicht überzeugend dargelegt, dass diese Raumzeiten wirklich **metrisch stabil** sind. Es genügt nicht Lösung der Einsteinschen Feldgleichung zu sein, die Lösung darf 'nicht in sich zusammenfallen' und dann beispielsweise doch wieder der Schwarzschild-Metrik entsprechen. Zum anderen **rotieren die Grava- und Holosterne nicht**. Insofern repräsentieren sie nur eine echte Alternative zur Schwarzschild-Lösung. Sie können also bislang *nicht* die Eigenschaften rotierender Raumzeiten wie der Kerr-Lösung ersetzen. Die Astrophysik der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) zeigt jedoch, dass diese Rotationseigenschaft unabdinglich ist, um die Jets magnetohydrodynamisch zu erzeugen. Die Magnetosphärenphysik in der Ergosphäre (z. B. Blandford-Znajek-Mechanismus, Penrose-Prozesse) ist der Schlüssel, um magnetisch getriebene Jets zu erhalten. Die Bildung dieser Plasmaströme, wie man sie in Radiogalaxien, radiolauten Quasaren und Blazaren beobachtet, folgt aus dem AGN-Paradigma. Auch bei Mikroquasaren und Gammastrahlenausbrüchen wird die schnell rotierende Raumzeit zum Antrieb der stellaren Jets benötigt. Gelänge es Grava- und Holosterne rotieren zu lassen, würde das ihre Stellung in der Wissenschaft stärken.

9.19.11 Krise Schwarzer Löcher?

Wie die Gravasterne 2001, forcieren auch die Holosterne **Widersprüche in der Physik Schwarzer Löcher**. Eine besondere Problematik dabei ist, dass die astronomische Beobachtung es derzeit nicht gestattet, Kandidaten für *statische* Schwarze Löcher von Gravasternen oder Holosternen zu unterscheiden. Denn: die Gravitationsrotverschiebung verhindert eine gute Sicht für einen Außenbeobachter auf die Umgebung nahe dem Ereignishorizont! Die Hoffnung besteht darin, dass neue Unterscheidungskriterien bei der Erforschung der alternativen Raumzeiten offen gelegt werden. So sind Unterschiede in der Akkretion und bei der Emission von Gravitationswellen zu erwarten. Theoretische Studien haben gezeigt, dass die beobachteten Gravitationswellenformen es im Prinzip erlauben, den Ereignishorizont nachzuweisen (*Berti* & *Cardoso* 2006). Doch leider wurden Gravitationswellen bislang nicht direkt beobachtet, sondern nur indirekt - ohne Chance, auf die Wellencharakteristik schließen zu können.

In den Fällen, wo die Astronomen eine Rotation von Schwarzen Löchern nachgewiesen haben - und das sind bereits einige - können die Theoretiker derzeit nur die Kerr-Raumzeit zur Erklärung der Beobachtung heranziehen.

9.19.12 Papiere

- ◇ *Petri, M.*: The holostar - a self-consistent model for a compact self-gravitating object, 2003; Preprint unter gr-qc/0306066
- ◇ *Petri, M.*: Holostar thermodynamics, 2003; Preprint unter gr-qc/0306067
- ◇ *Petri, M.*: Charged holostars, 2003; Preprint unter gr-qc/0306068

◇ *Mathur, S.D.*: Where are the states of a black hole?, 2004; Preprint unter hep-th/0401115

◇ *Petri, M.*: The holographic solution - Why general relativity must be understood in terms of strings, 2004; Preprint unter gr-qc/0405007

◇ *Petri, M.*: On the thermodynamic origin of the Hawking entropy and a measurement of the Hawking temperature, 2004; Preprint unter gr-qc/0405008

◇ *Petri, M.*: Holographic spherically symmetric metrics, 2006; submitted to IJMPE

9.20 Homogenitätsproblem

Ein Problem in der Kosmologie, das durch die **Inflation** gelöst wird. Unter dem Eintrag Inflation werden Problem und Auflösung erläutert.

9.21 Horizont

Horizont ist ein Wort, das aus dem Griechischen kommt: Vollständig heißt es eigentlich *όρίζων κύκλος*, *horizon kyklos* und bedeutet 'begrenzender Kreis'. Das führt bereits auf den Inhalt, den man für gewöhnlich mit dem Begriff Horizont verbindet. Ein Beobachter, der sich auf der Erde unter freiem Himmel befindet, sieht den Horizont als Berandungslinie von Erde und Himmel. Diese Peripherielinie hat eine Kreisform, wenn der Beobachter sich um 360 Grad um seinen Beobachtungsort dreht. Präzise lässt sich folgendermaßen formulieren:

*Der **(scheinbare) Horizont** ist die Schnittfigur der Himmelskugel mit einer Ebene, die senkrecht zum Lot durch den Beobachtungsort und durch den Beobachtungsort selbst verläuft.*

Das ist eine geometrische Definition. Sie macht klar, dass der Horizont *beobachterabhängig* ist, weil es darauf ankommt, wo er steht. Sehr allgemein kann man formulieren:

Ein Horizont trennt Beobachtbares von Unbeobachtbarem.

9.21.1 Der vertraute Horizont

Das rechtfertigt den fast tautologischen Begriff **Beobachtungshorizont**. Sehr anschaulich wird diese Auffassung am Meer, wenn man Schiffe beobachtet. Nehmen wir an, man befinde sich in einem Hafen und beobachte ein auslaufendes Schiff (siehe Illustration 9.6). Es ist - gute Sichtbedingungen vorausgesetzt - sichtbar, weil es sich vor dem Horizont befindet. Nun geht das Schiff aber auf eine weite Reise über das Meer. Es entfernt sich vom Beobachter und wird immer kleiner. Das Schiff nähert sich der Horizontlinie. Schließlich verschwindet zuerst der untere Teil des Schiffs, weil die Erdoberfläche gekrümmt ist. So sieht der Beobachter nur noch den Schiffsmast, bis auf derjenige verschwindet. Das Schiff ist nun unbeobachtbar, denn sich unterhalb des Horizonts. Deshalb trennt der Horizont Beobachtbares von Unbeobachtbarem. Wir werden sehen, dass diese Definition auch für andere Horizontbegriffe zutrifft.

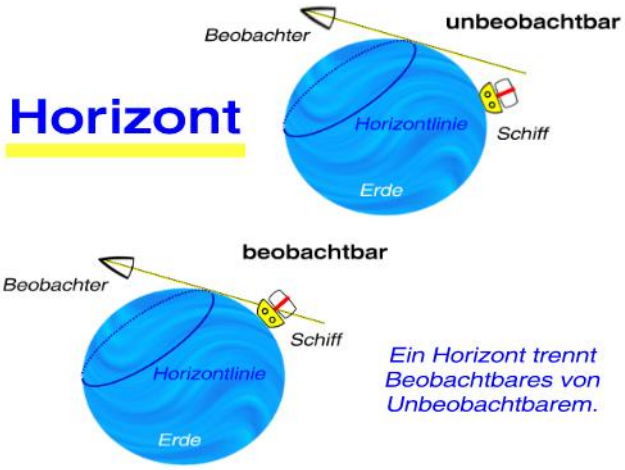

Abbildung 9.6: Anschauliche Darstellung eines Horizonts.

9.21.2 Der natürliche Horizont

Eine leichte Modifikation erhält die obige Definition des scheinbaren Horizonts unter Berücksichtigung der lokalen Morphologie der Landschaft. So beeinflussen Berge, Bäume, Gebäude etc. den Verlauf der Horizontlinie. Der daraus resultierende Horizontbegriff heißt *natürlicher Horizont*.

9.21.3 Der künstliche Horizont

In der Aeronautik ist der *künstliche Horizont* von Bedeutung. Hier dient die Oberfläche einer Flüssigkeit (*Meniskus*) als präzise Abbildung der lokalen Horizontalfläche. Mit künstlichen Horizonten wird eine genaue Navigation von Flugzeugen, Schiffen und U-Booten möglich.

9.21.4 Horizonte in der Astronomie

In der Astronomie sind besonders scheinbarer, wahrer und natürlicher Horizont von Belang. Der **wahre Horizont** unterscheidet sich vom scheinbaren nur dadurch, dass der Bezugspunkt nicht durch den Beobachterstandort (*topozentrisches System*), sondern durch den Erdmittelpunkt (*geozentrisches System*) geht. Der Unterschied macht sich nur bei erdnahen Objekten bemerkbar. Der Horizont spielt dann eine Rolle, wenn es um die **Sichtbarkeit von Gestirnen** geht. Die Erdrotation sorgt für die scheinbare Rotation des Himmelsgewölbes. Deshalb bleiben die Gestirne in der Regel nicht am gleichen Ort. Eine banale Folge dessen ist der **Tagbogen der Sonne**. Der Lauf der Sonne beschreibt Tag für Tag einen Bogen an der Himmelskugel, dessen Höhe jahreszeitlich variiert (Ursache: Schiefe der Ekliptik). Es gibt jedoch auch exakt zwei Punkte, die ihren Ort trotz Rotation nicht verändern. Diese Fixpunkte nennt man **Himmelspole**. Man findet sie dort, wo die verlängerte Erdachse das Himmelsgewölbe durchstößt. Auf der Nordhalbkugel ist diesem Fixpunkt der Polarstern (*Polaris*) im Sternbild *Ursa Minor* (dt. *Kleiner Bär*) sehr nahe. Er befindet sich nur 55 Bogenminuten (fast ein Grad) davon entfernt. Es scheint, dass der Rest des

Nordhimmels um den Polarstern rotiert, was man eindrucksvoll mit Strichspuraufnahmen in der Astrophotographie demonstrieren kann. Ein Pendant zu *Polaris* gibt es am Südhimmel nicht. Das Sternbild *Crux* (dt. *Kreuz des Südens*) enthält den südlichen Fixpunkt.

Allerdings sind die Fixpunkte nicht ganz fix: Die Erde ist ein Kreisel und unterliegt wie jeder rotierender Körper der Nutation und Präzession. Diese 'Nickbewegungen' des Kreisels führen dazu, dass die Erdachse schwankt und deshalb *Polaris* scheinbar eine Ellipse am Firmament beschreibt. Die Erdrotation und die Kenntnis von Fixpunkten ist wichtig, um zu verstehen, weshalb Gestirne untergehen können. Denn während *Polaris* für den Beobachter der nördlichen Hemisphäre im Prinzip ständig (auch tagsüber) beobachtbar ist, ist er für die Antipoden der südlichen Hemisphäre immer unbeobachtbar! In analoger Schlussweise hat ein Beobachter in nördlichen, gemäßigten Breiten nie das *Kreuz des Südens* oder die *Magellanschen Wolken* (Begleitgalaxien der Milchstraße) gesehen. Die Ursache besteht darin, dass die unterhalb des Horizonts liegen - das ganze Jahr über. Im intermediären Bereich gibt es Gestirne und Sternbilder, die niemals untergehen, aber um den Himmelspol rotieren. Diese Objekte sind **zirkumpolar** und immer oberhalb des Horizonts. Eine Sonderrolle spielt der Äquator. Hier sind alle Himmelsobjekte in Bewegung. Die Fixpunkte sind unbeobachtbar, zirkumpolare Gestirne gibt es dort nicht. Die Tageslänge variiert nicht jahreszeitlich, sondern liegt konstant bei etwa 12 Stunden. Die Dämmerung ist kurz, weil die Sonne stets senkrecht zur Horizontalebene des lokalen Äquatorialbeobachters untergeht.

Das bisher Beschriebene behandelte **irdische Horizonte** und damit verbundene Effekte. Es ist klar, dass diese Horizontbegriffe *relativ* sind, weil sie vom Standort des Beobachters auf der Erdoberfläche abhängen.

9.21.5 relativistische Horizonte

In der Astrophysik gibt es noch zwei Bereiche, wo Horizontbegriffe eine zentrale Rolle spielen: die relativistische Kosmologie und die Theorie Schwarzer Löcher. So unterscheidet man in der Kosmologie **Teilchenhorizont** und **Ereignishorizont**.

Teilchenhorizont

Der *Teilchenhorizont* kann im Rahmen der Friedmann-Weltmodelle für das Universum abgeleitet werden. Die Ausgangsfrage ist, ob man als Astronom den ganzen Kosmos überschauen kann oder der Blick nur mit endlicher Tiefe in die Weiten des Universums gelingt. Die Relativitätstheorie steckt den Rahmen ab. Gemäß dieser Theorie ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit c von knapp 300 000 km/s das universelle Tempolimit für Teilchen und für Licht. Deshalb kann ein Astronom nur das beobachten, was seit seiner Entstehung oder Emission bis heute (bzw. bis ins lokale Universum) zu ihm gelangt ist. Der Teilchenhorizont $\boldsymbol{R}_H$ kann unter Zugrundelegung der Robertson-Walker-Metrik berechnet werden und liefert für ein flaches und strahlungsdominiertes Universum

$$R_{\mathrm{H}} = \frac{2\mathrm{c}}{\mathrm{H}_0}.$$

Darin sind c die Vakuumlichtgeschwindigkeit und $\mathbf{H}_0$ die Hubble-Konstante, die ein Maß für die Expansionsgeschwindigkeit des lokalen Universums ist. Mit den aktuellen Zahlenwerten erhält man für $\boldsymbol{R}_H$ 8.3 Gpc oder 27.1 Mrd. Lichtjahre. Alles was hinter dem Teilchenhorizont liegt, also größeren Abstand als $\boldsymbol{R}_H$ hat, ist **kausal entkoppelt**. D.h. es kann nicht-lokale

Ereignisse beeinflussen oder verursachen. Die Berücksichtigung des Teilchenhorizonts löst auch den Widerspruch im Olbers-Paradoxon auf.

Vorsicht - ein technisches Detail: Der Teilchenhorizont hängt allerdings von der jeweiligen Epoche, also von der kosmologischen Rotverschiebung z ab. Man kann auch sagen: der Teilchenhorizont ist zeitabhängig. Der Zahlenwert oben gilt *nur für die strahlungsdominierte Ära*. In einem späteren Entwicklungsstadium des Universums, z. B. der *staubdominierten Phase*, skaliert der Hubble-Parameter anders mit dem Skalenfaktor (oder Weltradius). Das verändert das Integral zur Berechnung des Teilchenhorizonts und führt zu einem anderen Resultat. Generell gilt: *Je später die Epoche, desto größer der Teilchenhorizont.* Für Einzelheiten sei das Papier von *Davis & Lineweaver* 2003, astro-ph/0310808, empfohlen.

kosmologischer Ereignishorizont

Der *kosmologische Ereignishorizont* untersucht im Prinzip die Frage, ab welchem raumzeitlichen Abstand zwei Beobachter keine Signale mehr austauschen können. Grundlage dieser Überlegung ist wieder die Robertson-Walker-Metrik. Nimmt man ein Lichtsignal an, das die Beobachter austauschen mögen, gilt für Nullgeodäten, dass das Linienelement verschwindet: $ds^2 = 0$. Bei rein zeitlichem und radialem Abstand verschwinden die Winkelanteile im Linienelement und man erhält direkt eine differenzielle Bedingung für den kosmologischen Ereignishorizont. Dies lässt sich in ein Integral umwandeln, wobei man als Grenzen die (radialen) Orte und die Epochen (Zeiten) der Beobachter nun festlegt. Es stellt sich heraus, dass ein Wert dafür in Friedmann-Universen nicht existiert. Im (unphysikalischen, da materiefreien) de-Sitter-Kosmos beträgt er gerade c/H und heißt **Hubble-Radius**. Im Wesentlichen ist es der Kehrwert des Hubble-Parameters.

Ereignishorizont Schwarzer Löcher

In der Theorie Schwarzer Löcher findet man ebenfalls den Begriff Ereignishorizont. Er markiert bei einem Schwarzen Loch den Bereich, ab dem nichts mehr dem Loch entkommen kann - weder Materie, noch Licht. Dieser Horizont trennt also auch Beobachtbares von Unbeobachtbarem. Aus diesem Grund ist der Blick auf die intrinsische Singularität für den neugierigen Außenbeobachter prinzipiell verwehrt. Der Mathematiker *Roger Penrose* nennt dies **kosmische Zensur** (engl. *cosmic censorship*) und fordert, dass sämtliche intrinsische Singularitäten von Ereignishorizonten verhüllt sein müssten. Die Beobachtbarkeit ist in praxi bereits schon weit vor dem Ereignishorizont wesentlich erschwert, dadurch dass der Rotverschiebungsfaktor g sehr klein wird. Erst am Horizont selbst wird er exakt null. Dieser Faktor geht in hoher Potenz bei **jeder** Emission in der Umgebung Schwarzer Löcher ein und unterdrückt deshalb schon vor dem Horizont die Strahlung. Dies zeigen Simulationen mittels Ray Tracing um rotierende Löcher (z. B. *Andreas Müller*, Diplomarbeit 2000, Landessternwarte Heidelberg).

Der Ereignishorizont Schwarzer Löcher hat - betrachtet man nur die Koordinaten - immer die Form einer Kugelschale. Dieser Radius schrumpft jedoch, wenn das Loch leichter ist oder wenn es rotiert. Deshalb sind Löcher vom Schwarzschild-Typ bei gleicher Masse immer größer als Löcher vom Kerr-Typ, wenn man den Ereignishorizont als Größenkriterium annimmt. Der Ereignishorizont wird auch als **äußerer Horizont** bezeichnet. Denn sobald ein Schwarzes Loch rotiert, bildet sich auch ein **innerer Horizont** aus. Diesen nennt man auch Cauchy-Horizont. Die Ringsingularität rotierender Schwarzer Löcher befindet sich immer **innerhalb**

des Cauchy-Horizonts, nämlich *immer bei $r = 0$*; das sieht man allerdings erst in der Diskussion von Krümmungsinvarianten wie dem Kretschmann-Skalar. Im extremen Kerr-Fall maximaler Rotation ($a = M$ in geometrisierten Einheiten) fallen beide Horizonte zusammen. In diesem Grenzfall gibt es eine *nackte Singularität*, die gemäß der kosmischen Zensur nach *Roger Penrose* verboten ist. Die Physik am Cauchy-Horizont ist sehr befremdlich: Sollte ein Beobachter jemals einer Cauchy-Fläche begegnen, erleidet er einen Strahlungstod durch eine unendliche Blauverschiebung (s. u. Chandrasekhars Buch).

Der Ereignishorizont eines Schwarzen Loches wird gerne als eine rein räumliche Hülle des Schwarzen Loches betrachtet. Das ist jedoch nur die halbe Wahrheit - wie sich im Verlauf dieses Eintrags zeigt, gibt es auch bessere Horizontbegriffe. Die Effekte Gravitationsrotverschiebung und gravitative Zeitdilatation legen noch eine andere Interpretation nahe: Das, was ein ruhender Außenbeobachter in ein Schwarzes Loch fallen sieht, wird ab einer kritischen Nähe in seiner Bewegung 'eingefroren' (engl. *freezing effect*). Die Ursache ist die gravitative Zeitdilatation: Zeitintervalle, in denen der Außenbeobachter etwas einfallen sieht, werden gedehnt und zwar ins Unendliche, wenn der Ereignishorizont erreicht wird. Vollkommen äquivalent ist es zu sagen, dass am Ereignishorizont die Rotverschiebung unendlich bzw. der Rotverschiebungsfaktor null wird. Das rechtfertigt andererseits zu sagen, dass der Einfall in der unendlichen Zukunft des Außenbeobachters liegt. Dieser zeitliche Aspekt des Ereignishorizontes wird gerne unterschlagen. Pointiert lässt sich sagen:

Schwarze Löcher und deren Ereignishorizonte liegen in unserer Zukunft!

neue Horizontbegriffe

Im Rahmen der Theorie Schwarzer Löcher wurden weitere Horizontbegriffe vorgeschlagen: Der absolute, der scheinbare, der isolierte, der gestreckte und der dynamische Horizont. Ihre Definitionen sind am einfachsten in direkten Gegenüberstellung zu verstehen. Chronologisch wurde zuerst der **scheinbare Horizont** (engl. *apparent horizon*) betrachtet. Er resultierte aus den ersten Betrachtungen Schwarzer Löcher und des stellaren Gravitationskollapses, vor allem unter der Führung von *Roger Penrose*. Der scheinbare Horizont wird definiert als die äußerste Berandungszone, wo Photonen, die dem Loch versuchen zu entkommen, gravitativ eingefangen werden. Es stellt sich heraus, dass diese Definition ein **relatives Konzept**, also nicht absolut ist, denn er hängt vom Bezugssystem des Beobachters ab. So wird der scheinbare Horizont für einen entfernten, ruhenden Außenbeobachter ein anderer sein, als für einen nahen, einfallenden Beobachter (FFO). Wächst das Loch durch Akkretion von Materie, so kann der scheinbare Horizont sogar von einem Ort zum anderen 'springen'.

Der **absolute Horizont** hingegen ist unabhängig vom Bezugssystem und wurde von *Stephen Hawking* eingeführt. Die Definition des absoluten Horizonts ist, dass er die Grenzfläche darstellt, die Ereignisse, die im entfernten Universum beobachtbar sind, von denjenigen Ereignissen trennt, die nicht mehr beobachtbar sind. Wie eingangs formuliert trennt er also Beobachtbares von Unbeobachtbarem. Der absolute Horizont kann kontinuierlich wachsen, wenn beispielsweise das Loch Materie aufsammelt oder mit anderen Löchern verschmilzt. Insbesondere kann der absolute Horizont nur wachsen, weil jede Energieform, die ins Loch fällt, es mit Masse anreichert und den Horizont vergrößert.

Demgegenüber bleibt der **isolierte Horizont** unverändert: Das Schwarze Loch ist im Gleichgewicht und wächst nicht. Das ist eine idealisierte Betrachtung, weil reale Schwarze Löcher *immer* mit ihrer Umgebung wechselwirken und durch Akkretion von Materie und

Einfang von elektromagnetischer Strahlung und Gravitationswellen wachsen. Zu dynamischen Schwarzen Löchern fand Hawking in den frühen 1970er Jahren das **Flächen-Theorem**, das mit der Bekenstein-Hawking-Entropie verknüpft ist und eine Analogie zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik aufweist.

Der absolute Horizont hat die verblüffende Eigenschaft, dass er die Kausalität verletzt! Einfallende Materie und Strahlung lassen den absoluten Horizont anwachsen, *bevor* sie den die Materie ihn erreicht! In Anlehnung an die Philosophie nennt man dies einen **teleologischen Charakter**. Die Teleologie wurde in der Philosophie vom Rationalisten *Christian Wolff* (1679 - 1754) eingeführt. Dort besagt dieses Prinzip, dass alle Geschehnisse auf ein bestimmtes Ziel, *Telos* (grch. Zweck), gerichtet sind. Es bezeichnet also eine Form von Fatalismus, einer Ergebenheit in das Schicksal: Alles hat einen Sinn und verfolgt einen bestimmten Zweck. Der absolute Horizont ist teleologisch, weil er von der Zukunft abhängt, nämlich ob Signale das entfernte (in der Zukunft liegende) Universum erreichen oder nicht. Trotz dieser seltsamen Eigenschaft, eignet sich der Begriff des absoluten Horizonts, um Entwicklungsgleichungen für das Wachstum des Horizonts eines Schwarzen Loches abzuleiten. Dies gelang Hawking und seinem Kollegen *James Hartle* 1972.

Der absolute Horizont weist die Schwäche auf, dass er **nicht lokal** und **teleologisch** ist. Deshalb könnte sich hier und jetzt ein Ereignishorizont ausbilden, weil in ferner Zukunft hier in der Nähe ein Gravitationskollaps stattfindet! Diese Eigenschaften sind hinderlich, wenn die Entstehung Schwarzer Löcher (beispielsweise aus dem Gravitationskollaps eines massereichen Sterns oder in der Verschmelzung zweier Neutronensterne in einem Binärsystem) auf dem Computer simuliert werden soll. Hierzu benötigt man lokale Horizontbegriffe. Diesem Kriterium genügt der **dynamische Horizont**, der von *Abhay Ashtekar* 2003 entwickelt wurde. Es handelt sich beim dynamischen Horizont um eine dreidimensionale, raumartige Mannigfaltigkeit, die in zweidimensionale Kugeln zerlegt werden kann. Dieses Verfahren ist ein **2+1 Split** und verwandt mit dem ADM-Formalismus. Das Auftreten dynamischer Horizonte legt gemäß der kosmischen Zensur nahe, dass sie (oder durchaus auch mehrere) *innerhalb* von Ereignishorizonten liegen müssen. So weisen dynamische Horizonte auf die Existenz Schwarzer Löcher hin. Dieses Gebiet ist ein Aspekt der aktuellen Forschung in der Theorie Schwarzer Löcher.

Für Untersuchungen im Rahmen der Elektrodynamik und Magnetohydrodynamik Schwarzer Löcher eignet sich der Begriff des **gestreckten Horizonts** (engl. *stretched horizon*). Gemäß des Membran-Paradigmas wird dabei der an sich beliebig dünne Horizont zu einer Membran endlicher Dicke gedehnt. Diese Haut hat typische Eigenschaften, wie eine Spannung, einen elektrischen Widerstand (bzw. Leitfähigkeit), eine Oberflächengröße, einen Oberflächendruck, eine Entropie, eine Temperatur etc. Diese Sichtweise offenbart völlig neue Aspekte und Erklärungsmuster in der Physik Schwarzer Löcher.

9.21.6 Literatur

- ◇ Publikation von *J. Hartle* und *S.W. Hawking*: **Energy and angular momentum flow into a black hole**, Commun. Math. Phys. 27, 283-290 (1972)
- ◇ Publikation von *A. Ashtekar*: **How black holes grow** (2003), gr-qc/0306115
- ◇ Publikation von *A. Ashtekar* und *B. Krishnan*: **Dynamical Horizons and their properties** (2003), gr-qc/0308033

- ◇ Buch von *Kip S. Thorne*: **Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy** (1994), Papermac London
- ◇ Buch von *S. Chandrasekhar*: **The Mathematical Theory of Black Holes** (1983), Clarendon Press, New York

9.22 Horizontproblem

Ein Problem in der Kosmologie, das durch die **Inflation** gelöst wird. Unter dem Eintrag Inflation werden Problem und Auflösung erläutert.

9.23 Horn-Universum

Das Horn-Universum ist eine faszinierende und außergewöhnliche Alternative zu flachen Modell-Universen der Kosmologie. Es handelt sich dabei um ein **hyperbolisches Universum** (negative Krümmung) mit hornförmiger Topologie, das geringfügig vom allgemein angenommenen flachen Universum abweicht. Die Idee wurde 2004 von theoretischen Physikern aus Ulm (*Aurich et al.* 2004, astro-ph/0403597 sowie astro-ph/0412407) präsentiert.

9.23.1 zuächst zur Standardkosmologie

Die Eigenschaften des Universums können anhand der gemessenen Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am gesamten Himmel ermittelt werden. Sie weist sehr schwache, richtungsabhängige Unregelmäßigkeiten (*Anisotropien*) auf. In diesen Strukturen sind Informationen aus der Frühphase des Kosmos aufgeprägt, insbesondere Informationen über die Rekombinationsepoche bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$. Aus den Daten folgt ein **Satz kosmologischer Parameter**, der die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums in Form der Hubble-Konstante sowie die Einzelbeiträge unterschiedlicher Energieformen, wie der Dunklen Energie, der Dunklen Materie und der gewöhnlichen Materie umfasst. Der amerikanische NASA-Satellit WMAP liefert diesbezüglich zurzeit die besten Daten. Doch die Daten lassen noch einen Spielraum, den die Kosmologen ausnutzen, um verschiedene kosmologische Modelle anzupassen. Die Hoffnung ist, dass Hypothesentests und noch präzisere Daten eines der Modelle als unsere Vorstellung vom Universum auserwählen. Das einfachste Modell nennt man das **Konsens-Modell** (engl. *concordance model*). Hier geht man vom nahe liegenden Fall aus, dass das Universum global flach ist (Krümmung null) und eine triviale Topologie besitzt. Außerdem wird hier ein unendliches Universum angenommen.

9.23.2 topologische Freiheiten

Doch es gibt eine gewisse Freiheit bei der **Topologie des Kosmos** und nicht-triviale Topologien können nicht ausgeschlossen werden. Freilich ist die Analyse alternativer Toplogien ein schwierig zu bestimmender Sachverhalt. Unter 'kosmischer Topologie' kann man sich vorstellen, wie Teile des Universums miteinander verknüpft sind. Es sind durchaus Mehrfachverknüpfungen ganz unterschiedlicher Bereiche des Kosmos denkbar, die zu erstaunlichen Effekten und kosmischen optischen Täuschungen führen können. Eine topologische Variante besteht im Dodekaeder-Universum, das 2003 von *Luminet et al.*

vorgeschlagen wurde. Das Universum kann man sich hier zergliedert in Pentagon-Dodekaeder vorstellen, deren Berandungsflächen aneinander anschließen.

9.23.3 nun zum Horn

Eine ganz andere Realisierung besteht nun im Horn-Universum. Es ist wie das Dodekaeder-Universum hyperbolisch, also negativ gekrümmt und endlich, hat also ein begrenztes Volumen. Die Form kann man sich vorstellen wie eine gebogene Schultüte mit einer Spitze. Es ist anschaulich klar, dass es an der Spitze zu faszinierenden topologischen Effekten kommen muss. Die Verteilung der Hintergrundstrahlung (CMB-Karte) kann man in **Multipole** entwickeln. Die Daten von WMAP belegen, dass Multipole niedriger Ordnung stark unterdrückt sind. Genau dieses Phänomen vermag das Horn-Universum zu erklären. Bisher nahm man an, dass Horn-Universen **auffällige Flecken** auf der CMB-Karte erzeugen müssten. Weil man solche Flecken nicht beobachtete, fand das Horn-Universum nicht weiter Beachtung. *Aurich et al.* konnten zeigen, dass die Berücksichtigung von Moden höherer Wellenzahlen diese Flecken verschwinden lassen. Dieser Umstand 'rettet' das Horn-Universum und belebt es als Alternative für ein Modell-Universum wieder.

Die mathematischen Grundlagen des Horn-Universums gehen bereits auf das 19. Jahrhundert zurück: Nach dem französischen Mathematiker *Charles Emile Picard* (1856 - 1941) wurde das Picard-Modell benannt (Originalpapier, 1884). Das Horn hat eine unendliche Länge, aber **endliches Volumen**.

Die Intensität der Mikrowellen in der Hintergrundstrahlung bilden im Prinzip am ganzen Himmel eine **Temperaturverteilung** des frühen Universums ab. Diese Information stellen die Kosmologen in Form der **winkelabhängigen Temperatur-Autokorrelationsfunktion** dar. Die Satellitendaten von COBE (1990) und WMAP (2003) belegen eine schwache Korrelation bei großen Winkeln zwischen etwa 70 und 150 Grad. Es stellt sich heraus, dass unter Zugrundelegung des Horn-Universums gerade diese Beobachtung erklärt werden kann. Das konservative Konsens-Modell vermag das nicht! Zukünftige Beobachtungen mit dem **Satelliten PLANCK** (Start 2008) werden hoffentlich Klarheit über die exakte Krümmung und Topologie des Universums verschaffen.

9.24 Hubble-Gesetz

Dies ist ein zentrales Gesetz der Kosmologie, das 1929 vom amerikanischen Astronomen *Edwin Hubble* anhand von Beobachtungen einiger Galaxien gefunden wurde.

9.24.1 In einem Diagramm ist das Gesetz eine Gerade

Es besagt, dass die kosmologische Rotverschiebung z eines kosmischen Objekts *linear* mit der Entfernung D zunehme

$$\mathrm{c}z = \mathrm{H}_0 D.$$

Die Proportionalitätskonstante bei diesem linearen Zusammenhang nennt man **Hubble-Konstante** H_0. Die Linearität gilt allerdings nur bis zu einer Rotverschiebung von $z \sim 0.1$ oder äquivalent einer Distanz von gut 400 Mpc! Für weiter entfernte kosmische Objekte gilt das Hubble-Gesetz nicht mehr und ein detailliertes kosmologisches Modell muss herangezogen werden, um einem z eine Entfernung zuordnen zu können. Die Hubble-Konstante ist also

eigentlich nicht konstant, sondern variiert in kosmologischen Zeiträumen. Der Index 0 charakterisiert, dass es sich um den Hubble-Parameter im lokalen (also nahen) Universum handelt. Bei großen Rotverschiebungen bzw. Entfernungen gibt es Abweichungen, weil der **Hubble-Parameter H(t)** (ohne Index 0!)

$$H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$$

hier einen anderen Wert hatte und Abbremsungseffekte wichtig werden.

9.24.2 Herkunft der Linearität

Die Linearität im Hubble-Gesetz lässt sich schnell in der theoretischen, relativistischen Kosmologie zeigen: es genügt die Kenntnis der Robertson-Walker-Metrik, die als Linienelement des Kosmos angesehen werden kann. Da sich die Strahlung auf Nullgeodäten, d. h. auf dem Lichtkegel, bewegt, verschwindet für Photonen das Linienelement, $ds^2 = 0$. Bei konstant angenommenen Winkelkoordinaten der kosmischen Quelle verschwinden auch die Winkelterme (Poloidalwinkel und Azimut) im Linienelement. Integration und Taylorentwicklung enthüllen schließlich das Hubble-Gesetz (siehe Gleichung oben; c: Lichtgeschwindigkeit). Diese Rechnung legt auch gerade den physikalischen Gehalt des Hubble-Parameters offen: **H(t)** kann als **Expansionsgeschwindigkeit des Universums** interpretiert werden. Diese Expansion war nicht immer gleichförmig, sondern in früheren Entwicklungsphasen des Universums beschleunigt (z. B. in der Inflationsära). Abbremsungen dieser Expansionsbewegung sind ebenfalls bei genügend Materie denkbar. Denn die gravitative Wechselwirkung wirkt der Expansion des Universums entgegen. Generell können zeitliche Veränderungen des Hubble-Parameters, also Beschleunigungen, mit dem **Abbremsparameter q(t)** quantifiziert werden:

$$q(t) = -\frac{\ddot{R}(t)}{H^2(t)R(t)}.$$

Die Bestimmung solcher kosmologischer Parameter und deren Bedeutung für die Entwicklung und Dynamik des Universums sind gerade Gegenstand der Friedmann-Weltmodelle.

9.24.3 Ein langer Kosmologen-Streit

Der tatsächliche Wert der Hubble-Konstanten H_0 hat viele Jahre für einen Streit zwischen Astronomen gesorgt, weil der Messwert - je nach Messverfahren - beträchtlich variierte (etwa um einen Faktor 2). Die Messmethoden (Cepheiden, Supernova Typ Ia, *Tully-Fisher*- und *Faber-Jackson-Beziehung*, Winkeldurchmesser von HII-Regionen etc.) wurden immer besser, der Überlappungsbereich immer kleiner, so dass sich nun der aktuelle und anerkannte Wert auf $\mathbf{72\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$ (H0KP, *Freedman et al.* 2001) bzw. $\mathbf{73\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$ (WMAP 3^{rd} year data, *Spergel et al.* 2006) beläuft. Das H_0 *key project* (H0KP) hatte gerade zum Ziel die Hubble-Konstante exakt mithilfe des Hubble Weltraumteleskops (HST) zu vermessen. Die etwas seltsam anmutende Einheit des Hubble-Parameters entspricht in ihrer Dimension einer inversen Zeit. Die verwendete Einheit erleichtert den Astronomen eine praxisnahe Interpretation des Zahlenwerts: So hätte eine Galaxie in einer Entfernung von einer Mpc (entsprechend 3.26 Mio. Lj) gerade eine Fluchtgeschwindigkeit von 72 km/s $\sim$ 260 000 km/h *allein* aufgrund der Expansion des Universums!

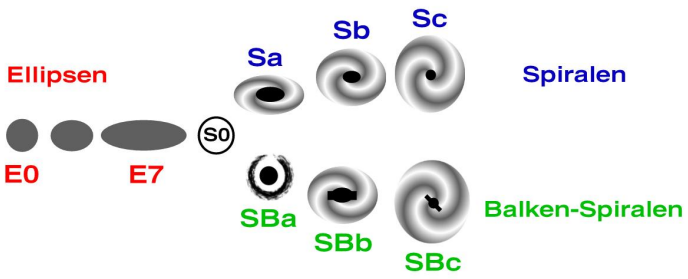

Abbildung 9.7: Hubble-Klassifikation in Ellipsen, Spiralen und Balkenspiralen.

9.24.4 Hubble-Zeit

Die Inverse des Hubble-Parameters $\mathbf{H}_0$ nennt man *Hubble-Zeit*. Sie ist gerade die Obergrenze für das Alter des Universums und liegt aktuell relativ nahe beim gemessenen Wert (WMAP) von 13.7 Milliarden Jahren.

9.25 Hubble-Klassifikation

Diese morphologische Klassifikation aller Galaxien geht auf den amerikanischen Astronomen *Edwin Hubble* zurück, der 1936 eine Einteilung in

- ◇ **elliptischen Galaxien**,
- ◇ **Spiralgalaxien** und
- ◇ **Balkenspiralgalaxien**

vorschlug. Daneben gibt es noch den Typus **irregulärer Galaxien**, die morphologisch nicht in einen der obigen Typen eingeordnet werden können. Abbildung 9.7 zeigt eine Übersicht aller Hubble-Typen.

9.25.1 Ellipsen

Elliptische Galaxien (engl. *ellipticals*) haben eine Flächenhelligkeit, die vom Zentrum der elliptischen Form nach außen hin abnimmt. Diese Abnahme wird durch das *De Vaucouleur-Gesetz* (oder auch $r^{1/4}$-Gesetz genannt) beschrieben. Untersuchungen vieler Ellipsen anhand dieses Gesetzes liefern sehr einfach ihre totale Leuchtkraft. Im Gegensatz zu den Kugelsternhaufen nimmt die Flächenhelligkeit bei Ellipsen mit zunehmender Größe (Radius) ab! Bei Kugelsternhaufen gilt hingegen, dass sie heller werden, wenn sie dichter sind. Die Helligkeitsprofile dienen daher als wichtiges Unterscheidungsmerkmal der morphologisch sehr ähnlichen elliptischen Galaxien und Kugelsternhaufen.

Elliptische Galaxien sind sehr alte Galaxien, die nach einer gängigen Vorstellung aus der Verschmelzung junger Spiralgalaxien hervorgegangen sind. Sie besitzen kaum noch interstellares Gas und ihre zentralen supermassereichen Schwarzen Löcher sind sehr schwer (Größenordnung: Milliarden Sonnenmassen!), weil sie über einen langen Zeitraum durch Akkretion wachsen konnten. Genau dieser Sachverhalt, erklärt auch das geringe Vorhandensein von Gas: es wurde aufgesammelt und verschwand im Schwarzen Loch.

Abbildung 9.8: Ellipse NGC 1316, HST 2005.

Die Ellipsen werden nach ihrer Abplattung nochmals klassifiziert und nach Typen E0 bis E7 benannt. E steht offensichtlich für *Ellipse*, während die nachgestellte Ziffer den Abplattungsgrad der Ellipse beschreibt: je größer die Zahl, umso stärker die Abplattung. Die Berechung dieser Zahl gestattet folgender Quotient $(a\text{-}b)/a$, wobei a und b die große und kleine Halbachse der Ellipse bezeichnet und nach Vereinbarung aufgerundet wird.

Im Wesentlichen gibt es zwei Klassen von elliptischen Galaxien: die großen Ellipsen oder **Riesenellipsen** (*giant ellipticals*, **gE**) zeigen **keine Rotation** der Sterne um das galaktische Zentrum! Hingegen zeigt die zweite Klasse der lichtschwächeren **Zwergellipsen**(*dwarf ellipticals*, **dE**) eine schnelle Rotation. Diese Ellipse sind eher scheibenförmig.

Ein Beispiel zeigt das Foto 9.8, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop *Hubble*: die elliptische Galaxie NGC 1316 (Credit: *P. Goudfrooij*, NASA/STScI/AURA 2005). NGC 1316 befindet sich in 23 Mpc Entfernung im Sternbild *Fornax*. Die auffälligen, dunklen Strukturen sind nicht typisch für Ellipsen; es handelt sich dabei um Staub im Vordergrund, der das Licht der Galaxie absorbiert.

9.25.2 Extrawurst für S0

Der Hubble-Typ **S0** ist ein intermediärer Typus, an dem die Bifurkation in Spiralen und Balkenspiralen ansetzt. S0-Galaxien werden auch **Linsengalaxien** genannt. Sie sind ausgezeichnet durch eine auffällig helle Kernregion (*bulge*) und einer gasarmen, galaktischen Scheibe, die daher kaum eine Ausprägung besitzt. Vermutlich gehen sie wie die Ellipsen aus Spiralgalaxien hervor.

9.25.3 Spiralen

Die Spiralgalaxien (engl. *spirals*) sind junge Galaxientypen und zeichnen sich durch auffällige *Spiralarme* aus. Sie werden durch Dichtewellen gebildet und in ihrer Dynamik durch Magnetfelder, die im galaktischen Dynamo erzeugt und verstärkt werden, beeinflusst. Die Spiralarme sind Orte der Sternentstehung, weil hier das interstellare Gas besonders verdichtet wird. Auf optischen Aufnahmen entdeckt man daher hier eine Vielzahl massereicher, junger blauer oder blauweißer Sterne (Spektraltyp O, B). Neben den Spiralarmen gibt es in der Morphologie der Spiralen eine helle Kernregion, den **Bulge** (engl. Verdickung, Wölbung), die **galaktische Scheibe**, die sich nach außen an den Bulge anschließt und den sphäroiden **Halo**, der Randregion einer Spirale. Der Bulge ist im Prinzip eine Ellipse bzw. sind Ellipsen nur Bulges ohne Scheibenkomponente. Sehr wesentlich für die Massenbestimmung supermassereicher Schwarzer Löcher ist die Korrelation von Masse des Schwarzen Loches mit der Geschwindigkeitsverteilung (*Geschwindigkeitsdispersion*) umgebender Sterne. Diese Geschwindigkeitsdispersion ist wiederum ein Maß für die Masse des Bulges (M-σ^4-Relation). So kann man aus der Beobachtung der Kinematik von Sternen (Rotationskurven) auf die Masse des Schwarzen Loches schließen. Im Halo finden sich außerdem die ältesten Objekte einer Spiralgalaxie, die **Kugelsternhaufen**, die jeweils aus etwa 100 000 Sternen bestehen. Diese Sterne sind sehr alt und haben den bekannten RR Lyrae-Typus. Vor wenigen Jahren gab es Anzeichen dafür, dass im Zentrum der Kugelsternhaufen **mittelschwere Schwarze Löcher** mit 1000 bis 10000 Sonnenmassen zu finden sind. Mit dem Weltraumteleskop *Hubble* wurde ein sehr bekannter Kugelsternhaufen der Milchstraße, M15, und einer unserer Begleitgalaxie, der Andromedagalaxie, untersucht, der den Namen G1 trägt.

Das Foto 9.9, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop *Hubble*, zeigt die wunderschöne

Abbildung 9.9: Spirale NGC 4622, HST 2002.

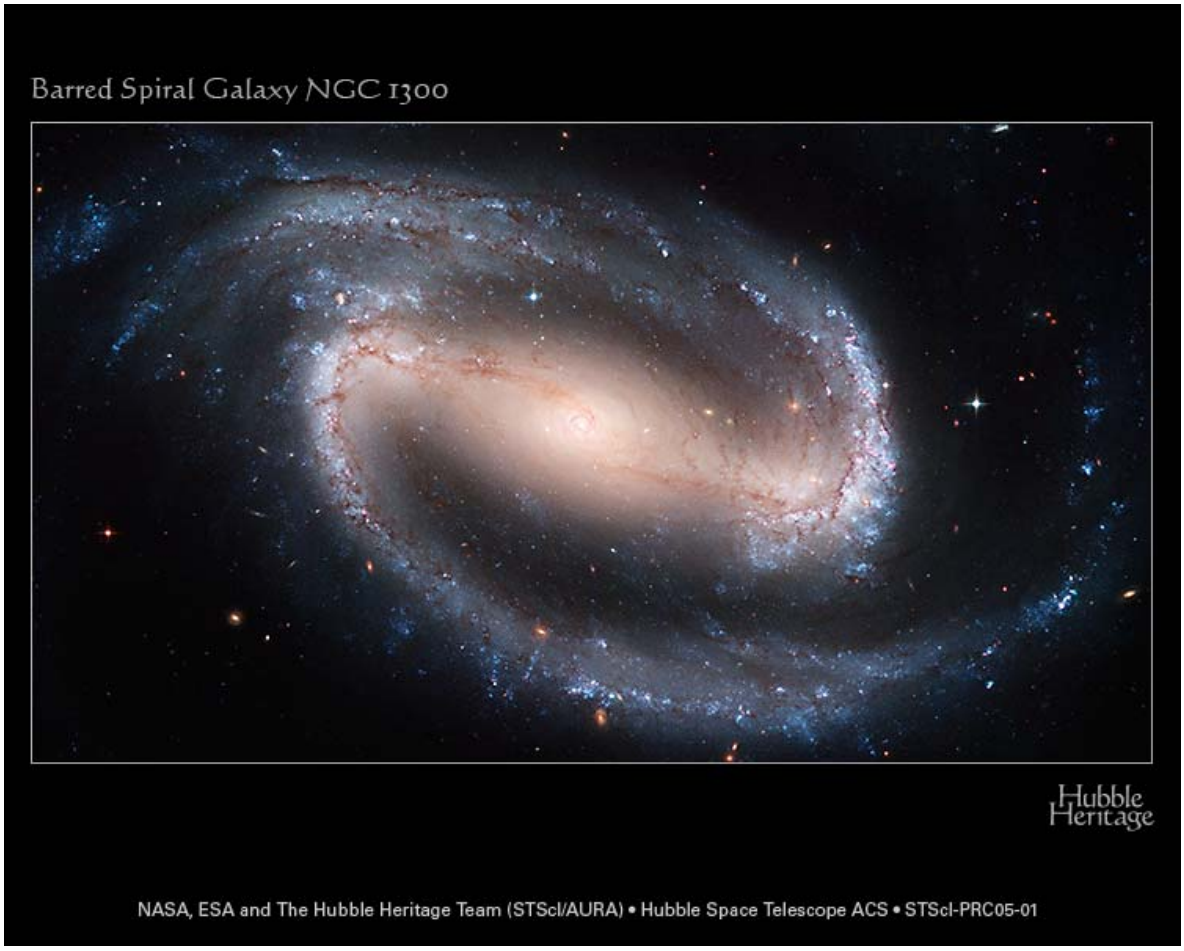

Abbildung 9.10: Sb-Galaxie NGC 1300, HST 2005.

Spiralgalaxie NGC 4622 (Credit: *Buta, Byrd & Freeman*, NASA/STScI/AURA 2002). NGC 4622 befindet sich in 34 Mpc Entfernung im Sternbild *Centaurus*. Die auffälligen, mehrfach gewundenen Spiralarme sind gut zu sehen.

Die Öffnung der Spiralarme und die Größe des Bulges bestimmen nun die Unterklassifikation der Spirale:

- ◇ **Sa** hat eng am Kern anliegende Spiralarme und einen einen hellen Bulge;
- ◇ **Sb** hat weiter geöffnete Arme und einen weniger hellen Bulge;
- ◇ **Sc** besitzt einen kleinen Bulge und weit geöffnete Spiralarme.

Im Prinzip kann dieses Schema weitergeführt werden (SBd, SBe etc). Die Klassifikation wird bei hoher Neigung (Inklination) des Systems erschwert, weil man hier weder Öffnung der Arme, noch Helligkeit des Bulges, noch Vorhandensein von Balken einsehen kann. Unsere Milchstraße und auch die bekannte Nachbargalaxie Andromedanebel (M31) sind Vertreter typischer Spiralgalaxien.

9.25.4 Balkenspiralen

Die Balkenspiralgalaxien (engl. *bar spirals*) besitzen neben den oben geschilderten Eigenschaften der Spiralgalaxien einen auffälligen Balken, der quer durch das Kerngebiet verläuft. Die Nomenklatur ist analog SBa, SBb, SBc etc. Die Spiralarme greifen senkrecht am Balken an. Neue Untersuchungen mit optischen und infraroten Aufnahmen von Spiralgalaxien zeigen, dass viel mehr Galaxien einen Balken besitzen, als früher angenommen. So tauchen auf IR-Aufnahmen Balken auf, die optisch unsichtbar sind! Erklärt wird dieser Umstand dadurch, dass im Balken vor allem Protosterne in Staub eingebettet sind und daher durch interstellare Extinktion (siehe auch optische Tiefe) optisch nicht beobachtet werden können. Etwa ein Drittel der Spiralgalaxien in der Umgebung der Milchstraße zeigen diesen Balken, von dem man annimmt, dass er durch die gravitative Wechselwirkung (Gezeitenkräfte) sich nähernder Galaxien ausgebildet wird. Demnach sind besonders **Haufengalaxien** aussichtsreiche Kandidaten für Balkengalaxien. Vielleicht werden detaillierte Studien zeigen, dass eine Unterscheidung in Spiralgalaxien und Balkengalaxien nicht mehr haltbar ist, weil *alle* Spiralgalaxien mehr oder weniger einen Balken enthalten.

Ein Beispiel zeigt das Foto 9.10, ebenfalls aufgenommen mit dem Weltraumteleskop *Hubble*: die Balkenspiralgalaxie NGC 1300 (Credit: *P. Knezek, WIYN*, NASA/ESA/STScI/AURA 2005). NGC 1300 befindet sich in 21 Mpc Entfernung im Sternbild *Eridanus*. Der fasst waagerecht verlaufende Balken ist deutlich zu erkennen; ebenso die geöffneten Spiralarme.

9.25.5 Irreguläre

Die **irregulären Galaxien** (Abkürzung **Ir**) zeigen keine besondere Symmetrie. Oft handelt es sich um gravitativ wechselwirkende Systeme, deren ursprüngliche Gestalt (Ellipse, Spirale) stark deformiert wird. Die Magellanischen Wolken (*Small Magellanic Cloud*, SMC und *Large Magellanic Cloud*, LMC) am Südhimmel sind Beispiele solcher irregulärer Systeme, die durch andere Galaxien der Lokalen Gruppe verändert wurden und werden. Ein besonders hübsches Exemplar sind die Antennengalaxien NGC 4038 und NGC4039, von denen ein Beobachtungsfoto unter dem Eintrag Gezeitenkräfte gibt.

9.25.6 Galaxienstatistik

Mithilfe von großen Aufnahmen des Himmels betreibt man nun **Galaxienstatistik** und zählt die verschiedenen Hubble-Typen im beobachteten Ausschnitt. Diese Untersuchungen dienen dazu, um die Galaxienentwicklung und Galaxiendynamik zu studieren. Auf diese Weise kann man die Entwicklungswege von Galaxientypen aufzeigen und deren Korrelationen aufdecken. Mit so genannten Tiefenfeldbeobachtungen (*deep fields*, z. B. *Hubble Deep Field North*, HDFN; *Hubble Deep Field South*, HDFS mit dem Hubble Weltraumteleskop; *FORS Deep Field*, FDF mit dem VLT) machen Astronomen sehr lang belichtete Aufnahmen eines sehr dunklen und kleinen Bereichs der Himmelssphäre (wenig Vordergrundsterne). Diese Bilder offenbaren eine Fülle von Galaxien in unterschiedlicher Entfernung und verschiedenen Typs. Bei ausreichender Zahl und möglicher Entfernungsbestimmung kann man eine gute Statistik und kosmologische Studien durchführen.

9.25.7 Typische Vertreter ihres Hubble-Typs:

- E0: M87

- ◇ E6: NGC 3377
- ◇ Sa: Sombrero-Nebel
- ◇ Sb: M81
- ◇ Sc: NGC 2997, NGC 300
- ◇ SBa: NGC 175
- ◇ SBb: NGC 1365
- ◇ SBc: NGC 1073
- ◇ SBd: NGC 4242

Aus dieser Beschreibung wird klar, dass die Hubble-Klassifikation eine *rein morphologische Einteilung* ist und nicht mit Galaxienentwicklungsstufen assoziiert ist.

9.26 Hubble-Konstante

Eine fundamentale Konstante der Kosmologie, die ein **Maß für die Expansionsgeschwindigkeit des (lokalen) Universums** ist. Näheres dazu unter den Einträgen Hubble-Gesetz und Friedmann-Weltmodelle.

9.27 Hydrodynamik

In vielen Bereichen der theoretischen Astrophysik und generell in der Strömungsmechanik benutzt man die Gleichungen der **Hydrodynamik** (HD) und Magnetohydrodynamik (MHD). In der Astrophysik haben sie sich bewährt, um die Dynamik zahlreicher kosmischer Objekte auf dem Computer zu simulieren. Die Gleichungen können auf ganz unterschiedlichen Längenskalen eingesetzt werden. So kann man den gesamten Bereich von der Skala einzelner Sterne, über Galaxien, bis hin zum ganzen Universum abdecken

9.27.1 Das Universum als Flüssigkeit

Theoretische Astrophysiker simulieren mit hydrodynamischen Gleichungen inklusive Gravitationskräften die großräumige Struktur des Universums (engl. *large scale structure*, **LSS**). Sie sind im Rahmen der Kosmologie an der Ausbildung und dem Wachstum dieser Strukturen interessiert. So stellt sich heraus, dass aufgrund der **gravitativen Instabilität** ('Massen ziehen sich immer an') aus einem anfangs homogen, verteilten, dünnen Gas kompakte, dichtere 'Masseklumpen' werden. Diese Monolithen können in Einzelteile zerfallen (*Fragmentation*), sich wieder neu formieren und Sterne bilden. Eine tragende Rolle spielt in dieser Dynamik die Dunkle Materie. Ohne sie als kosmologischem Bestandteil gelingt nicht die Bildung von klumpenartigen Strukturen, weil 'normale', baryonische Materie nicht ausreichen würde, um den benötigen Gravitationsdruck aufzubauen. Die so genannten *Dunklen Materie Halos* (engl. *dark matter haloes*) stellen ein tiefes Gravitationspotential, in dem sich schließlich die baryonische Materie sammelt.

Besonders faszinierend ist, dass sich eine **wabenförmige Struktur** ausbildet. An den Rändern der wabenförmigen Zellen sammeln sich Protogalaxien und Galaxien an. Astronomen subsumieren sie unter dem Begriff **Feldgalaxien**. An den Knotenpunkten, wo Wabe an Wabe grenzt, findet man die **Galaxiensuperhaufen** und **Galaxienhaufen**. Die hier ansässigen Galaxientypen heißen **Haufengalaxien** (*Clustergalaxien*). Das Innere der Wabe ist leer. Diese Bereiche werden Voids oder Leerräume genannt und haben typische Durchmesser von 50 Mpc.

Als Beispiel von Simulationen der großräumigen Struktur im Kosmos seien die Arbeiten von *Gnedin* (2000) und *Bromm et al.* (2001) erwähnt. Im Sommer 2005 sorgten die Ergebnisse der größte Simulation dieser Art, die so genannte **Millennium Simulation**, für großes Interesse: Unter der Leitung von *Volker Springel* (MPA Garching) wurde die zeitliche Entwicklung und Wechselwirkung von 2160^3 Teilchen in einem würfelförmigen Volumen gigantischen Ausmaßes (Kubus mit Kantenlänge von knapp 700 Mpc) von einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 127$ bis ins lokale Universum bei $z = 0$ verfolgt! Diese Simulation konnte (abermals) zeigen, dass die kalte Dunkle Materie tatsächlich die Hauptrolle bei der Ausbildung der großen, kosmischen Strukturen spielt. Darüber hinaus konnte die wabenförmige Struktur des Universums belegt werden. Ein beeindruckendes Resultat war auch, dass die Zentren der schwersten Galaxienhaufen wie beispielsweise des Virgo-Haufens, die besten Orte im Universum sind, um nach den ältesten Sternen (der Population III) und den 'Nachfahren' der ersten supermassereichen Schwarzen Löcher zu suchen. Damit weist die Theorie der Beobachtung abermals den Weg! (*Springel et al.*, nature 435, 629, 2005).

Zu dieser Thematik gehört meine Präsentation The first sources of light in the Early Universe and the highest plausible redshift of luminous Quasars (Stand 2001).

9.27.2 Galaxien als magnetisierte Flüssigkeit

Die Dynamik einzelner und verschmelzender **Galaxien** wird auch mit hydrodynamischen und magnetohydrodynamischen Methoden untersucht. Von besonderem Interesse ist die Ausbildung der Spiralarme in Spiralgalaxien. Es stellt sich heraus, dass bei dieser Dynamik die galaktischen Magnetfelder eine wesentliche Rolle spielen.

Der zentrale Bereich aktiver Galaxien, die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) werden auch mit HD/MHD-Verfahren simuliert. Der Materieeinfall auf ein supermassereiches Schwarzes Loch im Rahmen der Akkretionsphysik wird analysiert und mit Beobachtungen verglichen.

9.27.3 Sternplasma als Flüssigkeit

Auf der stellaren Skala gibt es eine ganze Reihe von Anwendungen der HD und MHD. Zum Beispiel die Simulation von Sternexplosionen, den Supernovae und Gamma Ray Bursts. Oder die Simulation von stellaren Jets bei jungen Sternen (YSO) und Weißen Zwergen (kataklysmische Veränderliche, CVs). Auch die Dynamik von **Gasnebeln** kann hydrodynamisch, vor allem unter Berücksichtigung von Strahlung simuliert (*radiative Hydrodynamik*, *Strahlungstransport*) werden.

9.27.4 Hydrodynamik - ein wichtiges Werkzeug der theoretischen Astrophysik

Die Konzepte der Hydrodynamik spielen demnach in der Astrophysik eine große Rolle. Sie werden durch andere Theorien wie der Elektrodynamik, der Relativitätstheorie (Spezielle Relativitätstheorie oder Allgemeine Relativitätstheorie) sowie der Strahlungsphysik ergänzt.

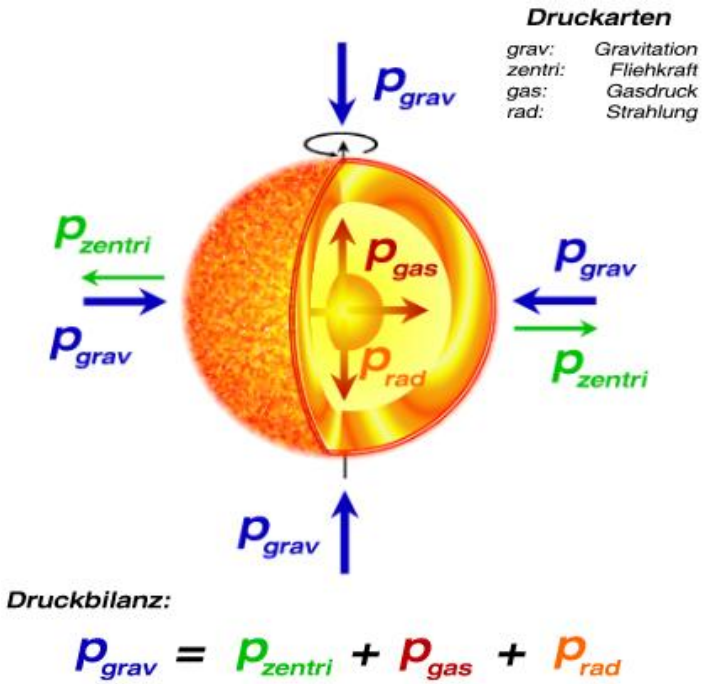

Abbildung 9.11: hydrostatisches Gleichgewicht der Drücke.

9.28 hydrostatisches Gleichgewicht

Das hydrostatische Gleichgewicht kennzeichnet einen stationären Gleichgewichtszustand von Sternen, wie er auch bei der Sonne vorherrscht.

9.28.1 Es drückt und zieht am Sternplasma

Sterne sind 'Gasbälle', die einer Vielzahl von Kräften unterliegen. Eine Kraft auf eine Fläche bezeichnet in der Physik gerade einen Druck. Deshalb kann man diese Bilanz auch als Gleichung mit Drücken schreiben. Sämtliche Drücke sind in Grafik 9.11 illustriert und darunter als Druckbilanz zusammengefasst worden:

- ◇ Ein Stern hat eine bestimmte Masse. Unter seinem Eigengewicht gibt es daher den **Gravitationsdruck** auf das Sternengas, der auf das Zentrum (den Schwerpunkt) radial nach innen gerichtet ist.
- ◇ Sterne rotieren. Deshalb gibt es die von der Drehachse aus immer nach außen gerichtete **Zentrifugalkraft**. Sie ist besonders stark am Äquator des Sterns und schwach an den Polen. Wie bei der Erde führt diese Kraft zur Abplattung des rotierenden Sterns, zu einer oblaten Form.
- ◇ Das Sternplasma hat eine bestimmte Temperatur und weist entsprechend der Zustandsgleichung des Gases einen bestimmten **Gasdruck** auf. Eine gute Beschreibung des Sterninnern gelingt mit der Zustandsgleichung *idealer Gase*, deren Konstituenten kaum wechselwirken.

◇ Sterne sind charakterisiert durch Brennprozesse, die in ihrem Innern ablaufen. Diese thermonukleare Fusion setzt Strahlung in Form von Photonen frei, die sich durch das Innere des Sterns bewegen und dabei Energie auf- und abgeben (Strahlungstransport). Photonen erzeugen beim Auftreffen auf Flächen oder andere Objekte einen Druck, den so genannten **Strahlungsdruck** oder *radiativen Druck*. Dies ist die letzte wesentliche Komponente, die zur Formulierung des hydrostatischen Gleichgewichts beiträgt. Die Druckbilanz steht dann in der Abbildung ganz unten. In Berechnungen werden die Größen meist differentiell ausgedrückt. Die Zustandsgleichungen eines Sterns folgen dann durch Integration über geeignete Sternschalen.

9.28.2 Sterne zappeln immer

Ein Stern unterliegt immer dem hydrostatischen Gleichgewicht. In der Regel variieren die einzelnen Druckkomponenten, so dass der Stern als Ganzes ständigen Zustandsänderungen unterliegt, um das Gleichgewicht wiederherzustellen. Streng genommen sind alle Sterne Veränderliche. Doch nur bei großen Zustandsänderungen der Leuchtkraft ist dieser Terminus gebräuchlich.

9.28.3 Sterne regulieren sich selbst

Das hydrostatische Gleichgewicht ist ein schönes, anschauliches Beispiel, wie die Natur nur durch physikalische Gesetze die Stabilität von Gebilden steuert. Das hydrostatische Gleichgewicht kann als *Autoregulativum* von Sternen aufgefasst werden, bei dem die Masse des Sterns die wichtigste kontrollierende Zustandsgröße ist.

9.28.4 Gravitationskollaps: ein Stern fällt in sich zusammen

Was passiert zum Beispiel mit dem Stern, wenn eine Fusionskette unterbrochen wird, dadurch dass der Brennvorrat an leichten Elementen erschöpft ist? - Wie die Druckbilanz zeigt, muss dann der Strahlungsdruck rapide absinken; weil der Gasdruck an den Strahlungsdruck gekoppelt ist, dadurch dass die Photonen das Gas durch Streuprozesse aufheizen, sinkt auch der Gasdruck. Es resultiert demnach ein **Ungleichgewicht**, in dem der Gravitationsdruck dominiert. Als Folge dessen kontrahiert der Stern oder auch nur eine Sternschale oder nur der Sternkern, je nachdem welche Brennschale zur Neige geht. Mit der Kontraktion ist aber eine Aufheizung verbunden, so dass nun neue Brennzyklen zünden können, die erst bei höheren Zündtemperaturen beginnen (siehe Daten unter thermonukleare Fusion). Auf diese Weise fusioniert der Stern immer schwerere Elemente, die immer höhere Brenntemperaturen erfordern. Das könnte bei sehr schweren Sternen *ad infinitum* so weiter gehen, wenn da nicht die Problematik wäre, dass ab einer bestimmten Grenze keine Nettoenergie im Brennzyklus mehr frei wird. Sehr leichte Sterne können nur ein bestimmtes Maximum an Gravitationsdruck aufbauen, das durch ihre Masse limitiert ist. So enden die Brennzyklen im maximalen Fall beim Siliziumbrennen. In dieser Fusionsreaktion werden die Elemente Nickel, Eisen und Kobalt erzeugt, die nicht mehr unter Energiegewinn fusioniert werden können.

Das hydrostatische Gleichgewicht ist deshalb in diesem Sternstadium dauerhaft gestört. Die Gravitation gewinnt die Oberhand, und die Sternhüllen kollabieren im Gravitationskollaps. Hier bestimmt auch wieder die Ausgangsmasse des Sterns, wie dieser Gravitationskollaps endet:

9.28.5 Weißer Zwerg

Bei kleinen, kollabierenden Massen, die unterhalb der Chandrasekhar-Grenze von etwa 1.46 Sonnenmassen liegen, kann der Kollaps aufgehalten werden. Die Elektronen stellen aufgrund des Pauli-Prinzips der Quantentheorie (genauer: der relativistischen Quantenmechanik) eine neue Druckkomponente, den **Entartungsdruck**, zur Verfügung, der dem Gravitationsdruck von Massen unterhalb des Chandrasekhar-Limits Paroli bieten kann. Das so stabilisierte kompakte Objekt heißt Weißer Zwerg.

9.28.6 Neutronenstern & Quarkstern

Für Massen darüber finden aufgrund der enorm hohen Materiedichten weitere kernphysikalische Umwandlungsprozesse der Sternmaterie in Neutronenmaterie (*Neutronisierung*) statt. Dann kann der Entartungsdruck der ebenfalls fermionischen Neutronen den Gravitationsdruck ausgleichen, wenn die Masse nicht einen Wert von etwa 1.45 bis 1.65 Sonnenmassen überschreitet. Die daraus stabil gehaltenen noch kompakteren Objekte heißen Neutronensterne (in ihren Ausprägungen als Magnetar oder Pulsar).

Eine weitere Form kompakter Sterne stellen die Quarksterne und Strange Stars dar. Es ist nicht ganz klar, ob sie einen Nebenzweig in der stellaren Entwicklung zu den Neutronensternen repräsentieren oder sich erst bei Massen darüber anschließen. Die Modellrechnungen der hier anzuwendenden Quantenchromodynamik sind nicht eindeutig und unterschieden sich in ihrem perturbativen bzw. nicht-perturbativen Regime. Man nimmt jedoch an, dass tief im Innern von Neutronensternen ein Quarkkern aus Quark-Gluonen-Plasma existiert. Die Quarksterne kann man also vermutlich als 'nackte Kerne' von Neutronensternen auffassen.

9.28.7 stellares Schwarzes Loch

Wenn der Vorläuferstern besonders massereich war und wenig Materie durch das Abblasen von Sternenwinden verloren hat, so sind auch Neutronensterne und Quarksterne nicht mehr stabil. Dann kann der Gravitationskollaps durch nichts aufgehalten werden, und es bildet sich ein stellares Schwarzes Loch. Der sterbende Stern kollabiert gewissermaßen zu einer Punktmasse, einer Singularität in der Raumzeit. Diese Formulierung ist etwas unpräzise. Da Sterne rotieren und Drehimpuls auch durch Gravitationswellen (die im Kollaps frei werden) kaum 'abgestrahlt' werden kann, sammelt sich die Restmasse in der Ringsingularität der Kerr-Lösung: das Schwarze Loch muss rotieren. Wie im Detail der Übergang von normaler baryonischer Materie bzw. Quarkmaterie in diesen singulären Zustand abläuft ist von theoretischer Seite nicht klar. Es handelt sich um eine Domäne, wo sowohl Gesetzmäßigkeiten der Allgemeinen Relativitätstheorie, als auch der Quantentheorie berücksichtigt werden müssen. Die Fortschritte auf dem Gebiet der Quantengravitation (Loop-Quantengravitation oder Stringtheorien) sind noch nicht so weit gediehen, als dass man diesen Übergang beschreiben könnte. Es ist sogar möglich, dass sich ein Paradigmawechsel einstellt und Singularitäten in dieser Form nicht mehr in einer neuen, adäquaten Theorie auftreten.

9.28.8 Sternexplosionen

Der Gravitationskollaps ist zwar eine Implosion, doch ist diese auch immer verbunden mit einer **Explosion**, weil einlaufende Schockwellen am massiven Kern des Sterns (*hard core*) reflektiert werden und wieder nach außen laufen. Die Schockwellen treffen dabei auf das

interstellare Medium (ISM) und heizen es auf. Bei der Bildung von Weißen Zwergen ist das Ereignis vergleichsweise unspektakulär: die äußeren Schalen des Sterns strömen nach außen und bilden planetarische Nebel. Deutlich heftiger sind da die Sternexplosionen, die man als Supernovae bezeichnet. Sie sind in der Regel mit der Bildung eines Neutronensterns oder Schwarzen Loches verbunden. Sie werden nur noch von den Hypernovae übertroffen, die bei den massereichsten Sternen, z. B. Wolf-Rayet Sternen oder anderen sehr massereichen Sternen (engl. *very massive stars*, VMS), geschehen. Hypernovae sind in einem favorisierten Modell assoziiert mit den langzeitigen Gamma Ray Bursts, also Strahlungsausbrüchen im höchsten Energiebereich elektromagnetischer Strahlung.

9.29 Hyperladung

Die schwache Hyperladung ist eine Teilcheneigenschaft (häufig symbolisiert durch ein Y), die **alle** Teilchen tragen. In der Theorie der schwachen Wechselwirkung ist sie das Analog zur bekannteren elektrischen Ladung, die eine elektromagnetische Wechselwirkung (Abstoßung, Anziehung und Austausch von Photonen) nach sich zieht: Teilchen mit nicht verschwindender Hyperladung wechselwirken schwach. Diese schwache Kraft wird durch den Austausch von Weakonen, einem neutralen Z-Teilchen, einem positiv oder negativ geladenen W-Teilchen vermittelt.

Die schwache Hyperladung und andere Teilcheneigenschaften, die Physiker unter dem Begriff Quantenzahlen subsumieren, ermöglichen eine übersichtliche Klassifikation des Teilchenzoos.

9.30 Hypernova

Ein Begriff, der in Anlehnung an den der Supernova geprägt wurde. Astronomen verstehen unter *Hypernova* also ein verwandtes Phänomen, eine Sternenexplosion noch gewaltigeren Ausmaßes.

9.30.1 Das Leben schwerer Sterne

Betrachten wir das Schicksal eines sehr massereichen Sterns, beispielsweise eines Wolf-Rayet-Sterns: Wie aus der Stellarphysik bekannt ist, haben massereiche Sterne eine recht kurze 'Lebensphase'. Der Grund ist letztlich die hohe Masse, denn sie ruft über den Gravitationsdruck, der das Sternplasma heftig zusammenpresst, enorm hohe Temperaturen im Sterninnern hervor. Durch diese Hitze laufen die thermonuklearen Fusionsprozesse sehr schnell ab; die Fusion kann auch bis zum schwersten Elementen führen, das Sterne in der stellaren Nukleosynthese herstellen können: Eisen. Irgendwann liegt also ein massereicher Stern mit einem Eisen-Nickel-Kern vor, in dessen Sternschalen leichtere Elemente fusioniert werden. Aber wie geht es weiter? Der Stern hat nun ein Problem, weil im Innern keine schwereren Elemente verschmolzen werden können. Die zentrale Energiequelle versiegt, das hydrostatische Gleichgewicht wird empfindlich gestört und die Gravitation gewinnt nun gegenüber dem Gas- und Strahlungsdruck im Sternkern.

9.30.2 Der Kollapskrimi

Die Folge: der Sternkern stürzt in sich zusammen. Dieser Vorgang heißt Gravitationskollaps. In diesem Stadium wird der massereiche, sterbende Stern Kollapsar genannt. Voraussetzung für eine Hypernova ist nun, dass der kollabierende Sternkern schwer ist als etwa drei Sonnenmassen (konservative Grenze; vielleicht ist dieser Zahlenwert etwas kleiner, wie unter Neutronenstern diskutiert wird). Dann nämlich besagt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, dass nichts die Gravitation aufhalten kann: der massereiche Sternkern wird zum stellaren Schwarzen Loch.

Von all diesen Vorgängen tief im Innern des Sterns haben die Sternhüllen 'noch gar nichts gemerkt'. Der Kollaps des Sternkerns ging so schnell, dass in den trägen Sternschalen weiter die Fusionsreaktionen leichter Elemente ablaufen. Nun geschieht etwas, was ein klarer Unterschied zu den Vorgängen in einer Supernova ist: das gerade geborene Schwarze Loch wird aktiv! Der Parasit im Sternkern sammelt nun das umgebende Sternmaterial auf, und es bildet sich ein Akkretionsfluss aus. Dieser Materiestrom nimmt durch die Rotation die Gestalt einer Scheibe, der so genannten Standardscheibe an. Die hier ablaufenden Prozesse müssen mit den Methoden der allgemein relativistischen Magnetohydrodynamik (GRMHD) beschrieben werden. Das Schwarze Loch muss übrigens ein Kerr-Loch sein, weil es bei seiner Entstehung die Rotation des Sternmaterials (seinen *Drehimpuls*) angenommen hat. Durch die Akkretion wird es 'weiter aufgezogen' und rotiert mit spezifischen Drehimpulsen von etwa $a \sim 0.9\ M$ - also nahe am Maximalwert. Man kann sich leicht vorstellen, dass ein Materie aufsammelndes Schwarzes Loch, kein gutes Ende für den mittlerweile ausgehöhlten, massereichen Stern bedeuten kann.

9.30.3 gewaltigste Sternexplosion

Die Folgen sind spektakulär! Die Astrophysiker wissen, dass akkretierende Schwarze Löcher nicht nur alles verschlingen. Sie beobachten bei den Radiogalaxien und den radiolauten Quasaren ausgeprägte und beinahe lichtschnelle Jets. Diese Materiestrahlen werden vom supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum des jeweiligen Aktiven Galaktischen Kerns (AGN) in die Weite des Alls geschossen. Dieselbe Physik geschieht im Innern eines schweren, sterbenden Sterns! Das aktive, stellare Schwarze Loch schießt zwei ultrarelativistische Jets auf die umgebenden Sternhüllen! Sie zeigen etwa entlang der Rotationsachse des Kerr-Loches. Diese fast lichtschnellen Teilchenstrahlen haben einen Lorentz-Faktor von etwa 100 bis 1000 - mehr als bei den AGN. Die Jets verdrängen das einfallende Material, brechen durch die Sternoberfläche durch und zerstören damit auch die Sternhüllen. Dann breiten sie sich mit enorm großer Geschwindigkeit in der Umgebung des ehemaligen Sterns aus. Dabei wird die umgebende Materie geschockt und unglaublich heiß, etwa 10 Milliarden Kelvin. Es breiten sich nun Schockwellen aus, und da es in der Umgebung auch Magnetfelder gibt, wird nun entlang der Schockfronten Synchrotronstrahlung emittiert. Genau das ist zu Beginn des Ausbruchs die Hypernova, die spektakulärste Sternexplosion. Die Astrophysiker favorisieren, dass diese Hypernovae gerade als **langzeitige Gamma Ray Bursts (GRBs))** in Erscheinung treten. Dieses so genannte *Collapsar model* wurde von *MacFadyen & Woosley* 1999 publiziert. Im Lexikoneintrag GRB sind weitere Einzelheiten nachzulesen. Außerdem gibt es dort eine Illustration des **anisotropen Feuerballmodells**, das die Ausbreitung der beiden Jets illustriert.

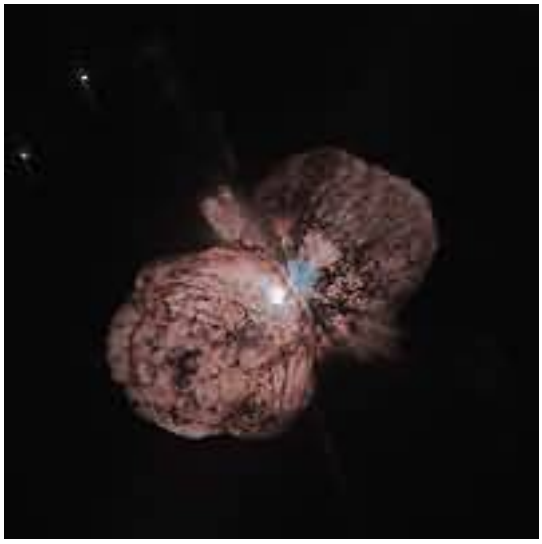

Abbildung 9.12: Superstern Eta Carinae im Homunculus-Nebel.

9.30.4 Der Sternenmops η Car

Ein aussichtsreicher Kandidat für eine **Galaktische Hypernova** ist der 'Superstern' η *Carinae* (gesprochen: 'eta karinä'), der etwa 100 Sonnenmassen aufweist. η Carinae befindet sich im Sternbild *Carina* (dt. *Schiff*) am Südhimmel und ist 7500 Lj entfernt. Das Bild 9.12 zeigt eine Komposit-Aufnahme aus optischen und ultravioletten Beobachtungsdaten des sehr aktiven Sterns, die mit dem Weltraumteleskop Hubble gewonnen wurde (Credit: *Jon Morse*, University of Colorado, and NASA, 1996). η Carinae gehört zu einer speziellen Sternklasse, den **leuchtkräftigen, blauen Veränderlichen** (engl. *Luminous Blue Variables*, LBVs) und ist in vielerlei Hinsicht ein besonderer Stern. 1841 erreichte die Erde das Licht, das verriet, dass sich bei η Carinae eine heftige Explosion ereignet haben muss. Der Stern strahlte dabei soviel Licht ab, wie bei einer Supernova, überstand jedoch erstaunlicherweise die Explosion. Das Relikt dieser Explosion ist der **Homunculus Nebel**, eine bipolare plus einer scheibenartigen Struktur, die den Stern verhüllen. Im ultravioletten und blauen Spektralbereich ist das ausgeworfene Material allerdings durchsichtig, wie die Abbildung eindrucksvoll belegt: Hier kann η Carinae durchscheinen.

9.30.5 η Car - eine kosmische Gefahr?

Es ist eine interessante Frage, ob dieser Stern eine Gefahr für die Menschheit darstellen könnte, sollte er als Gamma Ray Burst eines Tages aufleuchten. Wie bei radioaktiven Prozessen im Rahmen des Strahlenschutzes, kann man die Gefährlichkeit von GRBs für Leben berechnen: Eine **Abschätzung für die Äquivalentdosis** bei bekannten Parametern und plausiblen Annahmen (z. B. ein 100 Sekunden dauernder Burst) ergibt einen Wert von etwa 1 Sv (Sievert), bezogen auf einen Tag. Dies entspricht fast dem 300fachen der üblichen Jahresbelastung (3 mSv) eines Menschen. Generell wissen Radiologen, dass eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv nach wenigen Tagen zum Tode führt. Bei einem wirklich langen GRB von etwa 1000 Sekunden wäre also die Gefährdung irdischen Lebens durch η

Carinae tatsächlich nicht von der Hand zu weisen!

Zur Bedrohung von Leben durch GRBs gibt es noch eine andere Spekulation: Vor 440 Millionen Jahren, als das Erdzeitalter *Ordovizium* ins *Silur* überging, soll ein GRB für ein Massensterben gesorgt haben (*Melott et al.* 2003, astro-ph/0309415). Die Paläontologie dokumentiert, dass eine besondere Form von Urkrebsen, *Trilobiten*, im ordovizischen Zeitalter Opfer einer großflächigen Vernichtung wurden. *Melott et al.* erklären dies zumindest anteilig durch einen GRB, der nur etwa eine Minute gedauert haben möge. Die Folge dieses kosmischen Ereignisses sei eine radioaktive Kontamination durch Gammastrahlen gewesen, die 'nur' die dem GRB zugewandten Seite der Erde betraf. Die Gammastrahlung wird in einem solchen Szenario zum Teil von der Erdatmosphäre absorbiert, erreicht aber auch die Meeres- und Erdoberfläche. Hier seien vor allem Lebewesen der oberen Schichten von Gewässern der Strahlung ausgesetzt gewesen. Die eine Konsequenz sei das ordovizische Massensterben gewesen; eine andere, dass es zu einer globalen Abkühlung des Erdklimas gekommen sei ('nuklearer Winter'). Das habe das Wachstum von Gletschern forciert. GRBs können über folgende Kausalkette für eine globale Abkühlung sorgen: Die hochenergetische Gammastrahlung ionisiert Schichten der Hochatmosphäre. Molekularer Stickstoff stellt bekanntermaßen den größten Anteil im Gasgemisch Luft. Bei der Ionisation von Stickstoffmolekülen entstehen aggressive Stickstoffverbindungen, wie Stickstoffdioxid. Stickstoffdioxid wiederum ist ein guter Absorber für Sonnenlicht, wie Klimaforscher zeigen konnten. Die Absorption unterbindet die Erwärmung der Erdatmosphäre und -oberfläche: Es wird global kälter. In der Tat schließt sich an das Ordovizium eine Kälteperiode an.

Die Gefährlichkeit von GRBs für die Biosphäre und ihr Einfluss auf die Evolution von irdischem Leben sind somit diskutabel.

9.31 Hyperonen

Die Hyperonen sind eine Klasse besonders **schwerer Baryonen**, von denen man in der Teilchenphysik sieben kennt. Alle Hyperonen sind *seltsame Teilchen*, also Teilchen mit der Quantenzahl **Seltsamkeit** (engl. *Strangeness*) verschieden von null. Man kann leicht ihre Seltsamkeit herausfinden, indem man für jedes im Hyperon enthaltene strange-Quark jeweils $S = -1$ rechnet und für jedes strange-Antiquark $S = +1$ hinzuaddiert. Die Summe aller Seltsamkeiten ergibt die resultierende Seltsamkeit des Hyperons.

Die Symbole für alle sieben Hyperonen (ohne Antiteilchen) sind

$$\Lambda\ \Sigma^-\ \Sigma^0\ \Sigma^+\ \Xi^-\ \Xi^0\ \Omega^-.$$

9.31.1 7 Hyperonen in aufsteigender Masse

- Das **Lambda-Hyperon** mit einer Masse von 1115.683 MeV, Quarkgehalt *uds* (daher elektrisch neutral), Spin 1/2, Strangeness ('Gehalt an Strange-Quarks') -1 und einem Isospin von I = 0. Es handelt sich also um ein **Isospinsingulett**, also wegen 2I+1=1, einem Teilchen.

- Drei **Sigma-Hyperonen** mit zugehörigen Antiteilchen. Die Sigma-Hyperonen bilden ein **Isospintriplett** (I = 1). Alle haben Strangeness -1 und Spin 1/2. Das negativ geladene Sigma-Hyperon hat eine Masse von 1197.449 MeV, Quarkgehalt *dds*. Das neutrale Sigma-Hyperon hat eine Masse von 1192.642 MeV, Quarkgehalt *uds*. Das

positiv geladene Sigma-Hyperon hat schließlich eine Masse von 1189.37 MeV und Quarkgehalt *uus*.

- ◇ Zwei **Xi-Hyperonen** mit jeweiligen Antiteilchen. Sie bilden ein **Isospindublett** (I = 1/2). Beide haben Strangeness -2 und Spin 1/2. Das negative Xi-Hyperon hat eine Masse von 1321.31 MeV und Quarkgehalt *dss*, während das neutrale Xi-Hyperon Masse von 1314.83 MeV und Quarkgehalt *uss* hat.

- ◇ Das schwerste Hyperon ist das **Omega-Hyperon**, das negativ geladen ist und ein **Isospinsingulett** ist (I = 0). Das Omega-Hyperon hat eine Masse von 1672.45 MeV und ist damit fast 1.8fach schwerer als das Proton. Die Strangeness ist unter den Hyperonen mit einem Wert von -3 ebenfalls am höchsten. Der Spin beträgt 3/2 und Quarkgehalt *sss*.

  (**Datenquelle:** *Particle Physics Booklet*, Stand Juli 2002)

9.31.2 Wo gibt's denn sowas?

Unter normalen, irdischen Bedingungen findet man keine Hyperonen. Sie bilden sich erst bei **sehr hohen Teilchendichten**, die vergleichbar sind mit der Kernmateriedichte, die bei 2.5×10^{14} g cm^{-3} liegt. So spielen die Hyperonen im Innern von Neutronensternen und Quarksternen eine Rolle, wenn eine kritische Übergangsdichte von etwa **zwei- bis dreifacher Kernmateriedichte** überschritten wird: dann setzt die **Hyperonisierung** ein und stellt einen Beitrag zur Zustandsgleichung dieser ultradichten Materie. Die Kernphysiker umschreiben das so: *Die Materie erhält hyperonische Freiheitsgrade.*

10 Lexikon I

10.1 IC

Eine gebräuchliche Abkürzung im Jargon der Astrophysiker. Dahinter verbirgt sich der Terminus ***I**nverse **C**ompton-Streuung*, also ein Vorgang der umgekehrt abläuft als die Compton-Streuung. Bei der normalen Compton-Streuung verliert ein Photon, das an einer elektrischen Ladung (häufig ein Elektron) gestreut wird Energie. Beim **Compton-Effekt** ist die gestreute Strahlung also langwelliger.

10.1.1 umgekehrte Compton-Streuung

Umgekehrt ist es bei der IC: Hier gewinnt das Photon im Streuakt Energie, die es von der Ladungen erhält. Anschaulich gesprochen **kühlt** sich das Elektronengas ab, während die Photonen **Comptonisiert** werden. '*Comptonisieren*' meint hier, dass die Photonen Energie gewinnen. Hier werden vor allem mehrmalige Streuprozesse wichtig, die durch den so genannten *Compton-Y-Parameter* parametrisiert werden.

Bei diesem Streuprozess ist es wichtig, wie die Teilchen aufeinander treffen, d. h. unter welchem Winkel, dem so genannten **Streuwinkel**. Er ist gerade die Abweichung im Winkelmaß von ein- zu auslaufendem Photon. Wie sich leicht aus geometrischen Überlegungen beim klassischen Streuakt ablesen lässt, findet ein *maximaler Energieübertrag* bei einem Streuwinkel von 180 Grad statt. Dann tritt **Rückstreuung** ein, und das Photon wird sozusagen am Elektron reflektiert.

10.1.2 quantenmechanische Behandlung

Eine korrekte quantenmechanische Erweiterung hat dieser Streuvorgang in der **Klein-Nishina-Formel** gefunden. Hier wird der Compton-Effekt auf der Basis der Quantenelektrodynamik beschrieben (*Heitler* 1954).

10.1.3 mal Welle, mal Teilchen

Dieser Compton-Streuprozess ist zusammen mit dem Photo-Effekt ein starkes Indiz für den **korpuskularen Charakter** des Photons. Zusammen mit Experimenten (Doppelspalt etc.), die nur durch den **Wellencharakter** erklärbar sind, ergibt sich der fundamentale **Welle-Teilchen-Dualismus**.

10.1.4 Anwendung in der Astrophysik

In der Astronomie ist die Comptonisierung wichtig bei der Strahlungsphysik von Akkretionsflüssen, insbesondere im Innern heißer Gebiete, so genannten Koronen. Außerdem findet IC im Plasma von Jets statt. Ein typisches Szenario ist hier, dass im leptonisches

Jetplasma die kosmische Hintergrundstrahlung gestreut wird und so Energien erreicht, die im Bereich der Röntgenstrahlung liegen.

10.2 Inertialsystem

Ein Inertialsystem (lat. *inert*: 'träge, untätig') ist ein besonderes Bezugssystem, in dem sich eine kräftefreie Masse gleichförmig geradlinig, also mit konstanter Geschwindigkeit, bewegt. Ein besonderes Inertialsystem ist das **Ruhesystem** (engl. *rest frame*), in dem sich die Masse relativ zum Beobachter in Ruhe befindet. Man nennt es manchmal auch *mitbewegtes System* (engl. *comoving frame*).

10.2.1 Beispiele und Gegenbeispiele

Ein einfaches Beispiel für ein Inertialsystem ist ein Zug, der mit konstanter Geschwindigkeit auf geraden Gleisen fährt. Gegenbeispiele, also **Nicht-Inertialsysteme**, sind alle rotierenden Systeme, wie ein Karussell, die Erde etc. In diesen Nicht-Inertialsystemen treten Trägheitskräfte auf, die für einen inertialen Beobachter die Geradlinigkeit der Bewegung gewährleisten. Der nicht-inertiale Beobachter hingegen, der mit dem Nicht-Inertialsystem rotiert, ist völlig den Trägheitskräften (wie Zentrifugal- oder Corioliskraft) ausgeliefert.

10.2.2 Galilei & Newton

Der Begriff des Inertialsystems ist bereits eine wichtige Zutat in der Newtonschen Physik. Die Newtonschen Gleichungen sind **galilei-invariant**, d. h. verschiedene Inertialsysteme können mittels einer Galilei-Transformation ineinander überführt werden. Die entsprechende Symmetriegruppe heißt **Galilei-Gruppe**. Der Galilei-Transformation liegt eine **absolute Zeit** zugrunde, weil sich diese identisch von einem in das andere System transformiert ($t = t$').

10.2.3 Lorentz, Relativitätstheorie

Hingegen fußen Relativitätstheorie und auch schon klassische Elektrodynamik auf der Lorentzgruppe. Die damit assoziierte Lorentz-Transformation transformiert die Zeit anders und führt auf Effekte wie Zeitdilatation und Längenkontraktion. Der Zeitbegriff wird relativ. Die Ursache für diese neuen Gesetzmäßigkeiten ist die **Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** in allen Inertialsystemen. Das bestätigte in praxi das Michelson-Morley-Experiment (1881/87).

Gemäß des Relativitätsprinzips der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) sind alle gleichförmig geradlinig bewegten Systeme oder Beobachter inertial. Im Äquivalenzprinzip der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wurde diese Aussage auf beschleunigte Systeme erweitert. In der ART kann man nur noch lokal ein Inertialsystem finden. Hier gilt nur noch die **lokale Lorentzinvarianz**.

10.3 Inflation

Inflation, *Inflationäre Phase*, *Inflationäres Szenario* oder *Inflationäres Universum* bezeichnet ein Modell in der Kosmologie, das das klassische Urknall-Modell (engl. **Big Bang**)

ergänzt. Verkürzt gesagt, ist Inflation **eine Phase extrem schneller und großskaliger Ausdehnung des Kosmos** (lat. *inflationis*: Anschwellen, Aufblasen).

10.3.1 Was motiviert Inflation?

Die Inflation wurde erfunden, um spezielle Probleme in der Kosmologie zu lösen. Diese Probleme kursieren unter den Bezeichnungen Homogenitätsproblem, Flachheitsproblem, Horizontproblem und Fehlen magnetischer Monopole - sie werden im Weiteren erläutert. Die Idee zur Inflation geht in ihren Grundzügen auf den US-amerikanischen Physiker *Alan H. Guth* zurück (1981) und wurde später von *Andrei D. Linde* modifiziert (1982). In der Folgezeit wurden Inflationäre Modelle weiter ausgearbeitet (z. B. auch von *A.A. Starobinsky, S.W. Hawking, A. Vilenkin, P.J. Steinhardt, L. Randall, R. Brandenberger* und anderen). Nach wie vor sind Inflationäre Modelle Gegenstand aktueller Forschung.

10.3.2 Das ursprüngliche Inflationsmodell nach Guth

In der ersten Version der Inflation ist ein **falsches Vakuum** die wesentliche Zutat im Modell. Guth nahm an, dass die temperaturabhängige Energiedichte im Universum eine Parabelform hat, $\rho \propto T^4$. Allerdings forderte er, dass im Grenzfall $T \to 0$ (Abkühlung) die Energiedichte *nicht* verschwindet, sondern einen konstanten Wert ρ_0 annehme. Das ist nichts anderes als ein Phasenübergang. Der Zustand mit der Energiedichte ρ_0 ist gerade das falsche Vakuum. Im Prinzip ist so ein Übergang verwandt mit der Abkühlung von flüssigem Wasser, das zu festem Wassereis wird - jedoch mit dem Unterschied, dass das falsche Vakuum ein *metastabiler Zustand* ist.

Guth benutzte die Friedmann-Gleichung und formulierte sie so um, dass sie von Temperaturen und deren Zeitableitungen abhing. Die Lösungen für die Temperaturentwicklung lassen sich auf den Skalenparameter *a(t)* der Kosmologie umrechnen. Bei der Abkühlung geschieht nun Folgendes: Irgendwann dominiert die Energiedichte des falschen Vakuums. Der Druck des falschen Vakuums ist *negativ* ($p = -\rho_0$), so dass es **antigravitativ** wirkt. Daher treibt das falsche Vakuum im stark unterkühlten Universum eine **exponentielle Expansion** - die Inflation. Diese Expansion kann **sogar schneller als das Licht** sein (*Superluminalexpansion*), ohne die Prinzipien der Relativitätstheorie zu verletzen. Denn es werden keine Informationen/Signale mit Überlichtgeschwindigkeit ausgetauscht oder anders gesagt: es herrscht kein kausaler Kontakt zwischen den superluminal expandierenden Bereichen. Nur die Raumzeit selbst expandiert superluminal. Die Gleichung für exponentielles Wachstum des Universums lautet:

$$a(t) \propto e^{\chi t} \text{ mit } \chi^2 = \frac{8\pi \mathrm{G}}{3}\,\rho_0,$$

mit

$$\rho_0 \simeq (2 \times 10^{16}\,\mathrm{GeV})^4 \to \chi^{-1} \simeq 10^{-38}\,\mathrm{s}.$$

Die konstante Energiedichte ρ_0 ist ein freier Parameter im Modell. In der zweiten Zeile wurde für diese Energiedichte des falschen Vakuums die GUT-Energieskala von $\sim 2 \times 10^{16}$ GeV eingesetzt. Daraus folgt die atemberaubende Zeitkonstante von $1/\chi = 10^{-38}$ Sekunden. Anders gesagt: Die Expansion vollzieht sich in rasantem Tempo und in den ersten Sekundenbruchteilen des frühen Universums.

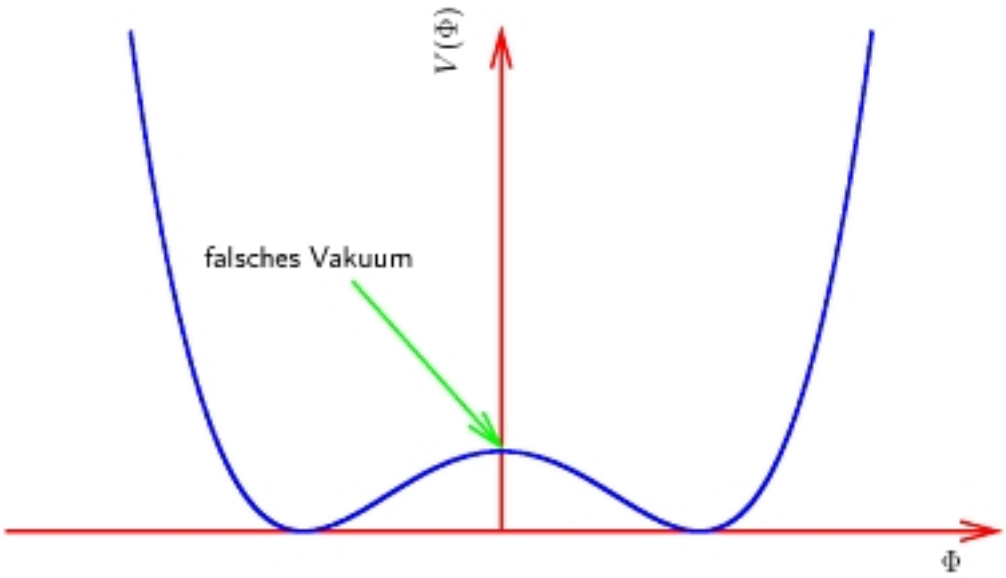

Abbildung 10.1: Potentialverlauf bei neuer Inflation.

Bereits in der ersten Veröffentlichung zum Inflationsmodell zeigte Guth Probleme seines Vorschlags auf: die Inflation war in diesem ersten Ansatz noch nicht effektiv genug - viele dieser schnell expandierenden Vakuumblasen mussten erst miteinander verschmelzen. Außerdem produzierte dieses Modell zu große Inhomogenitäten, die sich nicht mit den astronomischen Beobachtungen vereinbaren ließen.

10.3.3 Linde lindert Probleme

Linde und auch Albrecht sowie Steinhardt konnten in der so genannten **neuen Inflation** mit einem neuen Ansatz die Unzulänglichkeiten des Guth-Modells bereinigen. Das falsche Vakuum kann mit einem *Skalarfeld* assoziiert werden. In Inflationsmodellen heißt es **Inflaton**. Skalarfelder haben eine potentielle Energie V(Φ). Im neuen Ansatz wurde eine andere Potentialform verwendet, die nicht mehr Parabelform hat, sondern die Gestalt des Buchstaben W, die in Diagramm 10.1 dargestellt ist. Bei Abkühlung driftet der Vakuumzustand wieder in das falsche Vakuum. Dieser *metastabile* Zustand verhält sich wie ein Niveau niedrigster Energiedichte, hat aber tatsächlich eine Energiedichte, die größer ist, als diejenige des echten Vakuumzustandes. Das echte Vakuum befindet sich in den beiden Mulden des W-förmigen Potentials. Das lokale Maximum des W-Potentialverlaufs entspricht gerade dem falschen Vakuum.

Das falsche Vakuum zerfällt nun, d. h. seine potentielle Energie wird abgebaut. Anschaulich 'rollt' das Inflatonfeld vom lokalen Minimum des falschen Vakuums hinunter in das echte Vakuum, also in die linke oder rechte Mulde. Damit endet die inflationäre Phase. Die im Inflaton gespeicherte Energie wird freigesetzt. Physiker nennen das *Thermalisierung*. Da das Inflaton im Allgemeinen an andere Felder koppelt, entstehen im Zerfall des Inflatons neue Teilchen. **In diesem Stadium treffen sich Inflationsmodell und**

Standard-Urknallmodell. Dabei erklärt Inflation sehr elegant den Ursprung der 'heißen Teilchensuppe'.

10.3.4 Woher stammt die Energie für die Inflation?

Die Energie für die inflationäre Ausdehnung stammt von der Gravitation! Das funktioniert, weil die Gesamtenergie des Gravitationsfeldes *nicht definiert* ist. Sie kann z. B. beliebig groß und negativ sein und daher als 'Energiespender' fungieren.

10.3.5 Chaotische Inflation

Linde publizierte bereits 1983 ein weiteres Inflationsmodell, das einen anderen Potentialverlauf involviert. Das Potential V(Φ) hat hier eine wieder eine Parabelform. Es gibt in dieser so genannten chaotischen Inflation *kein* falsches Vakuum, sondern das Inflaton startet bei einem Zustand definierter potentieller Energie (die groß genug sein muss) 'auf der Parabel'. Wie beim W-Potential beginnt die Inflation, wenn das Inflaton 'in die Mulde hinabrollt'.

Der Begriff *chaotische Inflation* ist nicht sehr treffend - gemeint ist, dass diese Form der Inflation frei ist von speziellen Anfangsbedingungen. Denn während beim W-Potential das lokale Minimum eine ausgezeichnete Startbedingung ist, ist beim U-Potential nur eine Startbedingung abseits des Minimums notwendig.

10.3.6 weitere Inflationsmodelle

Guths ursprüngliche Inflation, Lindes neue Inflation und auch die chaotische Inflation sind Modelle mit *einem* Inflaton-Skalarfeld. Alle involvieren eine *Super-Planck-Physik* (siehe Planck-Skala), weil die Energiedichte des Feldes die Planck-Masse übersteigt. Die so genannte **Hybrid-Inflation** (engl. *hybrid inflation*) hat nicht diesen Nachteil, dafür sind jedoch mehrere Inflatonfelder notwendig (*Linde* 1993). Bisweilen heißen diese Modelle auch 'Wasserfall-Modelle' (engl. *waterfall models*), weil sie im Gegensatz zu Modellen mit 'langsamem Rollen' (engl. *slow rolling*) stehen.

Eine andere Variante ist die **übernatürliche Inflation** (engl. *supernatural inflation*), die ebenfalls zwei Inflatonfelder erfordert (*Randall, Soljacic & Guth* 1995). Übernatürliche Inflation wird durch die Supersymmetrie motiviert. Der Vorteil dieser Variante ist, dass sie *ohne kleine Parameter* auskommt - herkömmliche Inflationsmodelle benötigen kleine Parameter, die dafür sorgen, dass der Potentialverlauf flach genug ist, um Inflation zu treiben.

10.3.7 Blick in eine der ersten Epochen des Universums

Die Inflation wird in der modernen Kosmologie in der GUT-Ära, also im sehr frühen Universum, angesiedelt. Zeitlich gesehen ereignete sie sich nur 10^{-36} bis 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall. Zu dieser Zeit war das Universum sehr klein, heiß (etwa 10^{30} K) und hatte den riesigen Energieinhalt von 10^{16} GeV. Bei diesen hohen Energien unterscheiden sich die elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung nicht voneinander: Sie sind zur **X-Kraft** der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) vereinigt geworden. Neben der X-Kraft herrschte nur die Gravitation, so dass es in der Inflationsära nur zwei fundamentale Kräfte gab.

Doch 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall war das Universum auf 10^{27} K soweit abgekühlt, dass es zur Symmetriebrechung kam und die X-Kraft in die elektromagnetische, schwache

und starke Kraft aufbrach. Das Higgs-Feld war für diese Symmetriebrechung verantwortlich, weil plötzlich sein Erwartungswert von null auf einen endlichen Wert anwuchs. Solche Symmetriebrechungen sind denen der Festkörperphysik phänomenologisch sehr ähnlich. Dort kennt man beispielsweise eine *spontane Magnetisierung* unterhalb der Curie-Temperatur; es findet hier ein plötzlicher Übergang zum Ferromagneten statt.

Mit spontanen Symmetriebrechungen gehen *immer* topologische Defekte einher, die beim Übergang von X-Kraft und Gravitation in die aktuell verifizierbare Tetralogie (Vierteilung) der Kräfte auch für die heute beobachtbare großräumige Struktur des Universums verantwortlich sein könnten.

Die geeignete Symmetriegruppe der GUT, die SU(5), wird daher auf die Untergruppen SU(3) × SU(2) × U(1) gebrochen, wobei die Untergruppen jeweils mit den uns vertrauten Wechselwirkungen (SU(3) - stark, SU(2) - schwach, U(1) - elektromagnetisch) assoziiert sind. Quarks und Leptonen 'frieren' als Folge dieser Symmetriebrechung aus (*Leptogenesis* oder auch Leptonen-Ära). Dieser Vorgang ebnete den Weg für die Bildung der gewöhnlichen, baryonischen Materie, aus der wir bestehen (*Barogenesis* oder Baryogenese).

10.3.8 Leistungen des Inflationsmodells

Im Folgenden sollen die eingangs erwähnten Probleme der Kosmologie angesprochen werden, die durch die Inflation gelöst werden. Damit wird die Inflation durch folgende Beobachtungen der experimentellen Kosmologie gestützt:

1) Inflation erklärt Größe des Universums

Wir leben in einem riesigen Universum, dessen sichtbarer Teil allein aus etwa 10^{90} Teilchen besteht. Ohne Inflation ist es kaum zu erklären, wie ein solch großer Kosmos entstehen konnte. Die enorme Expansion, die die Inflation leistet, verbunden mit der hohen Teilchenproduktion durch den Zerfall des Inflatons erklären diese Beobachtung recht gut.

2) Inflation & Hubble-Expansion

Inflation bietet eine Erklärung an, wie der beobachtete Hubble-Effekt begann. Eine repulsive Gravitation (Antigravitation) getrieben durch ein falsches Vakuum 'zündete die Expansion'.

3) Homogenität & Isotropie

Die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am Himmel ist extrem gleichförmig und isotrop. Die Uniformität wurde bereits auf der mikroskopischen Skala durch einfache, thermische Gleichgewichtsprozesse erzeugt. Die Inflation blähte diese Uniformität auf makroskopische Skalen auf, wie wir es heute astronomisch beobachten. Inflation löst das **Homogenitätsproblem** und das **Horizontproblem**.

4) Lösung des Flachheitsproblems

Lindes Inflationsmodell liefert einen **Expansionsfaktor** von $A = \exp(100) \sim 10^{50}$! Eine einzelne Vakuumblase kann sich somit von Quantenskalen auf astronomisch relevante, makroskopische Skalen über den Apparat der Inflation ausdehnen. Der enorme Expansionsfaktor unterdrückt dabei den Krümmungsterm in den Friedmann-Gleichungen, so

dass das **Flachheitsproblem** gelöst ist: alle gekrümmten Modell-Universen werden durch Inflation geglättet, also flach. Ohne Inflation bliebe dies unverständlich. Die Beobachtung belegt, dass das heutige Universum flach ist, was die Inflation bewirkt zu haben scheint.

5) Fehlen magnetischer Monopole

Magnetische Monopole sind sehr massereiche Teilchen (etwa 10^{15} GeV Masse!), die eine magnetische Ladung tragen. Sie wurden von dem Quantenphysiker *Paul Dirac* schon 1931 mit dem Ziel eingeführt, eine Symmetrie zwischen elektrischen und magnetischen Ladungen herzustellen. GUT sagt die Existenz vieler solcher magnetischer Monopole im frühen Kosmos voraus (*Preskill* 1979). Sie wurden jedoch nie beobachtet bzw. würden die vielen schweren, magnetischen Monopole das Alter des Universum auf sagenhafte 30000 Jahre verkürzen, was selbstverständlich nicht mit unseren Beobachtungen vereinbar ist. Wie verschwanden die Monopole, die es laut GUT geben sollte? Die Inflation löst diese Problematik sehr elegant: während der Erzeugungsphase magnetischer Monopole oder danach blähte die Inflationsepoche die Raumzeit so sehr auf, dass die Monopoldichte extrem (exponentiell) ausgedünnt wurde. Als Konsequenz verschwanden die Monopole.

6) Anisotropie der Hintergrundstrahlung

Wie oben ausgeführt ist die Verteilung der Hintergrundstrahlung sehr isotrop - dennoch gibt es extrem kleine Variationen in den unterschiedlichen Richtungen. Diese Anisotropien liegen ausgedrückt in Temperaturen auf der Mikrokelvinskala. Der Bezug zur Inflation sei, dass diese Unregelmäßigkeiten im Muster der Hintergrundstrahlung ihren Ursprung in Quantenfluktuationen des Inflatons haben: Als die Inflation endete, prägten sich die Feldfluktuationen ein, die noch heute als Anisotropien sichtbar seien.

10.3.9 ewige Inflation

Der Begriff **ewige Inflation** (engl. *eternal inflation*) kam bereits 1983 auf, als klar wurde, dass der Zerfall des falschen Vakuums ein Zufallsprozess wie der radioaktive Zerfall ist. Der entscheidende Unterschied zur Radioaktivität ist jedoch, dass das falsche Vakuum dabei gleichzeitig expandiert. Tatsächlich ist seine exponentielle Expansion schneller als sein exponentieller Zerfall. Die logische Konsequenz: das falsche Vakuum verschwindet eigentlich nie; es ist in diesem Sinne *ewig*, und es gibt eine **unendliche Zahl inflationärer Universen**. Dieses Multiversum hat eine **fraktale Struktur**. Leider wird die fraktale Struktur auf so großen Längenskalen vorhergesagt, dass das nicht beobachtbar sein kann.

Ewige Inflation hat entscheidende Folgen. Erstens: Salopp gesprochen 'verliert das Universum jede Erinnerung' an seinen Anfangszustand. Das soll heißen, dass sich die späten Zustände (und damit auch die Beobachtungen) völlig von den Anfangsbedingungen entkoppeln. Zweitens: Die Wahrscheinlichkeit für Inflation wird bedeutungslos. Ist die Wahrscheinlichkeit nur geringfügig verschieden von null, so setzt Inflation auf jeden Fall ein.

10.3.10 Problem beim Inflationsmodell

Das Inflationsmodell versagt jedoch bei der Erklärung des heutigen Werts der kosmologischen Konstante Λ: Zwischen dem Wert während der Inflationsära und heutigem Wert liegen etwa **120 Größenordnungen**! Ausweg aus diesem **Problem der kosmologischen Konstante**

verspricht die Annahme einer zeitlichen Variabilität für ihren Wert. Einsteins Λ wäre demnach nicht konstant. Kosmologen nennen das Quintessenz-Modelle, die eine Form von Dunkler Energie darstellen.

10.3.11 Alternative 1: Inflation mit anderem Feld

Das Zyklische Universum von *Paul Steinhardt* und *Neil Turok* ist eine konkurrierende Theorie zur Inflation. Hier liegt ein anderes Skalarfeld vor. Eine Entscheidung darüber, welches der Modelle die Natur richtig beschreibt, erhoffen sich die Kosmologen von der Detektion von Gravitationswellen oder Neutrinos, die noch weit **vor** der Epoche der Rekombination ausgesandt wurden. Denn im Ekpyrotischen Szenario erwartet man keine Gravitationswellensignatur.

10.3.12 Alternative 2: Inflation ohne Inflaton, aber mit Quantengravitation

Ein viel versprechender, neuer Zugang wurde mit der Loop-Quantengravitation (*Quantengeometrie*) eröffnet, der **kein zusätzliches Skalarfeld** erfordert (*Bojowald* 2002). Die Inflationsära ist in diesem Modell eine zwingende Folge der quantisierten Raumzeit! Im Prinzip hat diese 2002 erschienene Publikation eine Hoffnung erfüllt, die Guth in seinem Reviewpapier 2000 formuliert hat, nämlich dass die Kosmologen sich einer Quantengravitation stellen müssen, um die Inflationsphysik zu verstehen.

10.3.13 wissenschaftliche Arbeiten

- ◇ *Alan H. Guth*: Inflationary Universe, a possible solution to the horizon and flatness problems, Phys. Rev. D23, 347, 1981
- ◇ *Andrei D. Linde*: A new inflationary Universe, Phys. Lett. B108, 389, 1982
- ◇ *Andrei D. Linde*: Hybrid Inflation, Phys. Rev. D49, 748, 1994; Preprint: astro-ph/9307002
- ◇ *Randall, Soljacic & Guth*: Supernatural Inflation: Inflation from Supersymmetry with No (Very) Small Parameters, Nucl. Phys. B472, 377, 1996; Preprint: hep-ph/9512439
- ◇ *Alan H. Guth*: Inflation and eternal inflation, Phys. Rep. 333, 555, 2000
- ◇ *Martin Bojowald*: Inflation from Quantum Geometry, Phys. Rev. Lett. 89, 261301, 2002; Preprint: gr-qc/0206054

10.4 Inflaton

In Kosmologie bezeichnet das Inflaton ein Skalarfeld oder Teilchen, das mit der **Inflation** zusammenhängt und sie letztendlich hervorruft.

10.4.1 Wie geht das genau?

Das Inflaton ist ein skalares Boson. Bei einer kritischen Temperatur in der Frühphase unseres Universums findet eine spontane Symmetriebrechung statt. Dabei ändert sich der Vakuumerwartungswert des Inflatons, denn er springt auf einen endlichen Wert springt. Dies steht in Analogie zum Higgs-Mechanismus. Dieser Vorgang im frühen Universum treibt ein **exponentielles Wachstum** des Universums an, das sogar superluminal (d. h. überlichtschnell) gewesen sein muss: die Inflation.

10.4.2 Keine Probleme mit Einstein

Die überlichtschnelle Expansion steht nicht im Widerspruch zur Relativitätstheorie, weil es der Raum selbst war, der so rasant expandierte und keine Information superluminal übertragen wurde.

10.4.3 Geht es auch ohne Inflaton?

Die Loop-Quantengravitation, eine Theorie der Quantengravitation, kann auf das Inflaton verzichten. Die Inflation ist in diesem Szenario eine zwingende Folge quantisierter Raumzeit! Das ist eine reizvolle Eigenschaft dieser Theorie, deren Überzeugungskraft an der Natur getestet werden muss. Zurzeit wird erforscht, welche Theorie die Verhältnisse und Beobachtungen am besten erklärt. Sicher sind dazu weitere und anspruchsvollere astronomische Beobachtungen erforderlich.

10.4.4 Weiter mit...

...dem Eintrag Inflation, der viele Einzelheiten zum Inflatonfeld vorstellt.

10.5 intergalaktisch

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Galaxien befindlich*' meint. Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich zwischen Galaxien beschränkt ist. So kennt man beispielsweise das **intergalaktische Medium (IGM)**. Es handelt sich um ein dünnes Gas, das sich zwischen den Sternsystemen auf der Kilo- und Megaparsec-Skala befindet. In Galaxienhaufen (*Galaxienclustern*), also Ansammlungen vieler Galaxien, wie der Lokalen Gruppe oder dem Virgo-Cluster, ist dieses Gas dichter und heißt *Clustergas*. Das IGM wird von den Jets der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) gespeist, deformiert, aufgeheizt und zur elektromagnetischen Emission angeregt.

10.6 intermediate-mass black hole

In der Fachsprache ist der Begriff *intermediate-mass black hole* (IMBH), was übersetzt soviel heißt wie 'Schwarzes Loch mittlerer Masse' sehr gebräuchlich. Für den deutschsprachigen Raum hat sich die Bezeichnung **mittelschwere Schwarze Löcher** bewährt.

10.7 interplanetar

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Planeten befindlich*' meint. Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich des Sonnensystems beschränkt ist. So kennt man beispielsweise **interplanetares Gas**, das in der Ekliptik (Hauptebene im Sonnensystem, in der nahezu alle Planeten um die Sonne kreisen) verteilt ist und durch Streuprozesse das so genannte Zodiakallicht erzeugt. Das Zodiakallicht ist vor allem in den Tropen als dreieckförmige Aufhellung beobachtbar, entweder kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang.

10.8 interstellar

Eine Bezeichnung in der Astronomie, die wörtlich '*zwischen den Sternen befindlich*' meint (stēlla, lat.: Stern). Es handelt sich um eine Orts- bzw. Skalenangabe, die auf den Bereich zwischen Sternen oder innerhalb einer Galaxie beschränkt ist. So kennt man beispielsweise das **interstellare Medium (ISM)**. Es handelt sich um dünnes, verteiltes Gas, das sich zwischen den Sternen auf der parsec-Skala befindet. Stellare Prozesse wie Supernovae oder Sternewinde (siehe Roter Riese, Wolf-Rayet-Stern) reichern das ISM mit 'Metallen' (in der Astronomie: Elemente schwerer als Helium!) an und erhöhen dessen Metallizität.

Das ISM rotiert auch mit der jeweiligen Galaxie und kann als Indikator dienen, um *Geschwindigkeitsdispersionen* (also die Verteilungen von Geschwindigkeiten der Gasteilchen) zu messen. Solche Messungen eignen sich zur Bestimmung der Zentralmassen (typischerweise im *Bulge*) von Galaxien.

10.9 Isometrien

Das Studium von Symmetrien physikalischer Systeme ist ein sehr wichtiger und weitreichender Aspekt in der theoretischen Physik.

10.9.1 Symmetrie - Erhaltungsgröße

Nach dem **Noether-Theorem** ist mit jeder Symmetrie eine physikalische Erhaltungsgröße assoziiert. An diesen ist man besonders interessiert, weil sie das physikalische Problem stark vereinfachen und auch den analytischen Zugang erleichtern.

10.9.2 Beispiele

Beispiele gibt es unzählige in der Physik: schon mit den Mitteln der klassischen Mechanik kann gezeigt werden, dass axialsymmetrische Systeme eine Erhaltung des Drehimpulses zeigen; moderne Theorien der Elementarteilchenphysik fordern eine Supersymmetrie der Teilchen, die eine Klassifikation des 'Teilchenzoos' ermöglicht, aber auch um viele neue bisher nicht entdeckte Teilchen erweitert.

10.9.3 Symmetrien in Einsteins Theorie

Das Studium der Symmetrien von Raumzeiten im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ist ebenso ratsam wie erfolgreich. Es gilt dabei, alle

Koordinatentransformationen zu untersuchen, die die Metrik **(form)invariant** lassen. Das heißt, dass sich die Metrik vor der Transformation von der nach der Transformation nicht unterscheidet. Koordinatentransformationen, die diese Eigenschaft haben, heißen **Isometrien** (*iso*, grch. 'gleich'; *metros*, grch. 'Maß'). Infinitesimale Koordinatentransformationen mit einem additiven Zusatzterm in Form eines Vektorfelds führen dabei auf die so genannte **Lie-Ableitung**. Verschwindet die Lie-Ableitung des metrischen Tensors, so liegt eine Isometriebedingung vor. Diese Gleichung heißt **Killing-Gleichung** und deren Lösungen Killing-Vektorfelder. Die Kenntnis **aller** Killing-Felder beschreibt also sämtliche raumzeitlichen Symmetrieeigenschaften der Metrik. Als Beispiel möge die Kerr-Metrik dienen: *Stationarität* ist eine Symmetrie, die die **Erhaltung der Energie** nach sich zieht; *Axialsymmetrie* bewirkt die **Erhaltung des Drehimpulses**. Es existieren demnach in diesem Fall zwei Killing-Vektorfelder.

Noch höher ist die Symmetrie der Minkowski-Metrik, die die flache, materiefreie Raumzeit beschreibt: Sie besitzt sogar zehn Killing-Vektorfelder!

10.10 Isospin

Der Isospin ist eine wichtige Eigenschaft von Teilchen in der Kern- und Teilchenphysik, der zu ihrer Klassifizierung dient. Mathematisch gesehen handelt es sich um einen *Drehimpuls*; das ist so zu verstehen, dass der Isospin ein wohl definierten **Drehimpulsalgebra** und Gruppe gehorcht. Die Quantentheorie stellt für Drehimpulse einen ganzen mathematischen Apparat zur Verfügung (*Kommutatorrelationen*), der gezielt verwendet werden kann. Das gilt für den Spin, ebenso wie für den Isospin. Beides sind Eigenschaften von Teilchen, die in der Teilchenphysik als Quantenzahlen bezeichnet werden.

10.10.1 Heisenbergs Idee

Der deutsche Quantenphysiker Werner Heisenberg hat den Isospin vorgeschlagen, um Proton und Neutron einheitlich zu beschreiben. Beide Nukleonen mögen den Gesamtisospin 1/2 haben, sich aber in der dritten Komponente des Isospins, der so genannten *Isospinprojektion*, unterscheiden: Ist die dritte Komponente dieses Nukleons -1/2, so spricht man vom Neutron; ist er +1/2, so handelt es sich um das Proton (Vorzeichen können je nach Konvention auch umgekehrt zugeordnet werden).

Zu einem Isospin I gehören 2I+1 Isospinzustände. Ein Gesamtisospin I=1/2 ermöglicht entsprechend $2 \times 1/2 + 1 = 2$ Zustände, nämlich +1/2 (*isospin up*) oder -1/2 (*isospin down*). In der Sprache der Teilchenphysik kennzeichnet das gerade ein **Isospindublett**.

10.10.2 Proton = Neutron?

Der Witz ist, dass in Abwesenheit von elektromagnetischen Kräften zwischen Proton und Elektron an sich kein Unterschied besteht. Der Massenunterschied, die so genannte *Massenentartung*, entsteht erst durch die Symmetriebrechung, das eine elektrische Ladung zugeordnet wird. Ohne Elektromagnetismus sind Proton und Neutron im Rahmen der Vereinheitlichung als Nukleon zu beschreiben.

10.10.3 Isospin anderer Teilchen

Die Kaonen haben die gleiche Isospinsymmetrie wie die Nukleonen (Isospindublett), aber dagegen einen Spin null (skalare Teilchen). Der Gesamtisospin der Pionen ist 1; es handelt sich in der Terminologie daher um ein **Isospintriplett** ($2 \times 1 + 1 = 3$). Analog kann der Isospin für weitere Teilchen verallgemeinert werden.

10.11 Isotop

Ein Atom besteht aus einer Atomhülle und einem Atomkern. In der Atomhülle befinden sich elektrisch negativ geladene Elektronen, die zur Familie der Leptonen gehören. Im Atomkern gibt es elektrisch positiv geladene Protonen und elektrisch neutrale Neutronen; beide Teilchensorten werden als Nukleonen (*Kernteilchen*) zusammengefasst.

Die Atome können zu unterschiedlichen chemischen Elementen gehören, die alle im **Periodensystem der Elemente (PSE)** aufgelistet sind. In der Kernphysik charakterisiert man *eindeutig* den Atomkern, der ja nur aus Nukleonen besteht, durch die Angabe der Protonenanzahl und der Neutronenzahl. Um sofort die Elementinformation zu haben, geben die Kernphysiker folgende Zahlen an:

- ◇ Protonenanzahl oder **Kernladungszahl** Z,
- ◇ **Atommasse** A,
- ◇ und **Elementsymbol** X.

Diese drei Angaben werden in der Form ${}^{A}_{Z}X$ notiert; da eigentlich eine Zahl überflüssig ist, liest man auch häufig nur X-A.

10.11.1 Zur Atommasse

Die Atommasse A ergibt sich gerade als Summe der Protonenzahl und Neutronenzahl. Sie wird in *atomaren Masseneinheiten* u angegeben. Eine atomare Masseneinheit ist definiert als der zwölfte Teil der Masse eines Kohlenstoffatoms mit der Bezeichnung C-12. Möchte man die Atommasse in die Si-Einheit Kilogramm oder in die Energieeinheit Elektronenvolt umrechnen, so gilt:

$$1\,u = 1.6605402 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg} \sim 931.4943\,\mathrm{MeV} \tag{10.1}$$

10.11.2 Beispiele

Nehmen wir an, es handelt sich um Kohlenstoff, der sechs Protonen und sechs Neutronen, also 12 Nukleonen hat. Die erste Schreibweise ist ${}^{12}_{6}C$ und die zweite C-12. Ein Beispiel eines besonders schweren Elements ist Uran mit 92 Protonen und 146 Neutronen, also 238 Nukleonen. Hier schreibt man ${}^{238}_{92}U$ bzw. U-238.

10.11.3 Was sind nun Isotope?

Das Isotop eines Elements hat nun die **gleiche Anzahl an Protonen im Atomkern** (also die gleiche Kernladungszahl Z) wie das betreffende Element, aber eine **unterschiedliche Anzahl an Neutronen** (also eine andere Atommasse A).

Bezogen auf das obige Beispiel Kohlenstoff gibt es beispielsweise die Kohlenstoffisotope C-12 und C-14. C-14 hat zwei Neutronen mehr im Atomkern als C-12 und ist entsprechend schwerer, hat also eine größere Atommasse A. Bei Wasserstoff, Elementsymbol H, gibt es drei Isotope: einfacher Wasserstoff H-1 mit nur einem Proton, schwerer Wasserstoff H-2 mit einem Proton plus einem Neutron (**Deuterium**) und überschwerer Wasserstoff H-3 mit einem Proton und zwei Neutronen (**Tritium**).

10.11.4 Etymologie

Das Wort Isotop kommt aus dem Griechischen und bedeutet *iso*: 'gleich' und *topos*: 'Ort' - gemeint ist der **gleiche Ort im Periodensystem der Elemente**, denn Isotope verhalten sich **chemisch gleich**, weil sie alle dieselbe Protonenzahl haben. Sie unterscheiden sich nur in ihrem Gewicht und ihrem kernphysikalischen Verhalten.

10.11.5 Isotope in der Astrophysik

Die genaue Kenntnis des Isotops ist natürlich wichtig in der Kernphysik. Ein einfaches Beispiel ist die Bilanz in der **Radioaktivität**, wie α-Zerfall, β-Zerfall und γ-Zerfall.

In der Astronomie spielen Isotope eine wichtige Rolle in der **Stellarphysik**, nämlich bei der thermonuklearen Fusion im Innern von Sternen (stellare Nukleosynthese), in den Winden von Roten Riesen bzw. AGB-Sternen und bei kernphysikalischen Prozessen in Sternexplosionen wie den Supernovae. In der Kosmologie gab es eine frühe Epoche der kernphysikalischen Elementherstellung in der **primordialen Nukleosynthese**.

10.12 ITER

Seit Jahrzehnten plant ein internationales Konsortium ein ehrgeiziges und teueres Projekt: den Bau und die Inbetriebnahme von **Fusionskraftwerken**. In solchen Kraftwerken soll das Prinzip der Energieumwandlung genutzt werden, wie es auf der Sonne seit Jahrmilliarden abläuft: die thermonukleare Fusion.

10.12.1 ITER auf dem Weg

Die Planungsphase ist nun endlich in den Beginn der Bauphase übergetreten: Im Juli 2005 wurde beschlossen die internationale Fusionstestanlage **ITER** (lat. für 'Weg' oder 'Reise') in *Cadarache* (Südfrankreich) zu bauen. Man darf den Projektnamen wohl so verstehen, dass die internationale Kollaboration die wirtschaftliche Nutzung von Fusionsenergie *auf den Weg bringen will*. Das internationale Projekt steht zurzeit unter der Beteiligung der EU, der USA, Russland, Japan, China und Südkorea. Sie teilen sich die Baukosten von 4.6 Mrd. Euro für die Umsetzung des Projekts. Die Betriebskosten des Fusionskraftwerks werden sich jährlich wahrscheinlich auf 265 Mio. Euro belaufen.

10.12.2 Ziel: Machbarkeitsstudie der Fusionsenergie

Erklärtes Projektziel ist es, die Machbarkeit (den *proof of concept*) eines Fusionskraftwerks zu beweisen. Vor allem soll demonstriert werden, dass die kontrollierte Fusion Energie liefert, die wirtschaftlich genutzt werden kann. Ziel ist insbesondere ein **Energiegewinnungsfaktor**

von mindestens 10, d. h. das Zehnfache der zur Plasmaheizung benötigten Energie soll wieder als Fusionsenergie frei werden. Nur dann sind Fusionskraftwerke wirtschaftlich lukrativ.

10.12.3 Prinzip des Fusionskraftwerkes

Das Prinzip des Fusionskraftwerkes ist es, das leichteste und häufigste Atom - Wasserstoff - zu Helium zu verschmelzen. Es handelt sich demnach um das oben beschriebene Wasserstoffbrennen, das nach dem Motto '*Pack die Sonne in den Tank*' dauerhaft auf die Erde geholt werden soll. Das Brennstoffgemisch besteht aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium, die aus einem Proton und einem Neutron bzw. einem Proton und zwei Neutronen bestehen. Auf der Erde müssen allerdings **deutlich höhere Zündtemperaturen als im Sonneninnern** ermöglicht werden, weil das irdische Plasma eine viel kleinere Dichte (10^{14} Teilchen/cm^3) aufweist: **100 Millionen Grad** sind nötig!

10.12.4 Herausforderung: Plasma soll extrem heiß bleiben

Um ein Abkühlen des Plasmas zu vermeiden, darf es auf keinen Fall die Wände des Reaktors berühren. Genau das ist ein gravierendes, technisches Problem. Das extrem erhitzte Plasma wird in einem schlauchförmigen Gebilde (Torus) mithilfe von starken Magnetfeldern eingeschlossen. Die Kunst besteht darin, die richtige Konfiguration der Magnetfelder zu ermitteln.

Im ITER-Projekt wurden folgende Eckdaten niedergelegt: In einem Plasmavolumen von 840 m^3 soll für die Dauer von etwa fünf Minuten eine Fusionsleistung von 500 Megawatt produziert werden. **Die aktuellen Energieprobleme wären mit Fusionskraftwerken gelöst**: Nur ein Gramm des Brennstoffs könnte 90 Megawattstunden Energie freisetzen; das entspricht der Verbrennungswärme von elf Tonnen Kohle! Einziger Wermutstropfen ist, dass die Reaktorwände radioaktiv werden und sie ebenso wie der radioaktive Abfall der herkömmlichen Kernkraftwerke (Fissionskraftwerke) zwischengelagert werden müssen. Zum Glück ist die Halbwertszeit recht kurz.

10.12.5 Projektstatus & Ausblick

Nach dem nun beschlossenen Standort von ITER, wird es weitere zehn Jahre dauern bis der Bau abgeschlossen ist. Dann werden etwa 600 Mitarbeiter zwanzig Jahre lang am Projekt arbeiten. Wirtschaftlich nutzbar wird die Energie aus Fusion auf der Erde vermutlich **erst in etwa 50 Jahren!** Es ist sowohl zeitlich, als auch finanziell ein Mammutvorhaben, das jedoch hoffentlich eine 'astronomische Rendite' haben wird.

Energiewirtschaftlich gibt es langfristig kaum Alternativen, da fossile Brennstoffe wie Erdöl und Kohle, aber auch spaltbares Uran (U-235) begrenzt sind. Regenerative Energieressourcen wie die Solartechnik, Wind- und Gezeitenkraftwerke sind langfristig nach der aktuellen Einschätzung nur ein Additiv in der Energiewirtschaft, die den steigenden Energiebedarf einer modernen Zivilisation kaum decken wird.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching begann schon seit den 1960er Jahren mit der Fusionsforschung und ist maßgeblich an ITER beteiligt. Die Pressemitteilung vom 01. Juli 2005 diente auch hier als Informationsquelle.

11 Lexikon J

11.1 Jahreszeiten

Alljährlich kehren sie in mittleren Breiten wieder: die Jahreszeiten Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Dieser Jahreszyklus ist ein Hinweis darauf, dass Jahreszeiten etwas mit dem Lauf der Erde um die Sonne zu tun haben müssen - nach 365 Tagen oder einem Jahr hat die Erde die Sonne umrundet und der Zyklus beginnt von neuem. Aber warum wird es (in mittleren Breiten) in diesem zyklischen Wechsel mal kälter und mal wärmer? Das hat in der Tat kosmische Gründe, wie wir sehen werden.

11.1.1 Der Tagbogen

Einen weiteren Hinweis liefert uns der **scheinbare Lauf der Sonne** am Firmament. Der aufmerksame Beobachter wird über den Jahreszyklus zwei Dinge feststellen: Zum einen geht die Sonne jeden Tag an einer geringfügig verschobenen Position auf und unter - das fällt besonders nach einigen Wochen auf, wenn man sich z. B. einen speziellen Bezugspunkt in der Landschaft gemerkt hat. Zum anderen variiert die Höhe unseres Tagesgestirns über dem Horizont nicht nur innerhalb eines Tages, sondern auch von Tag zu Tag, Woche zu Woche, Monat zu Monat - das merkt man besonders, wenn man die Länge der Schatten an verschiedenen Tagen vergleicht.

Die scheinbare Bahn der Sonne am Himmel nennt man den **Tagbogen**. Der Tagbogen ist besonders lang im Sommer und kurz im Winter. Die Sonne erreicht einen größeren Abstand zum Horizont im Sommer und bewegt sich nahe am Horizont im Winter. Die unterschiedlichen Längen des Tagbogens sind auch der Grund dafür, weshalb es im Sommer länger hell ist, als im Winter.

11.1.2 Der Sonnenstand

Eine Konsequenz des variierenden Tagbogens ist, dass die Sonnenstrahlen im Sommer mehr Zeit haben, um die (Sommerhalbkugel der) Erde zu beleuchten, und die Strahlen treffen außerdem unter Winkeln auf die Erdoberfläche, die senkrecht oder nahezu senkrecht sind. Daher erwärmt sich die Erdoberfläche viel mehr im Sommer (auf der betreffenden Hemisphäre). Im Winter wird (auf der entsprechenden Winterhalbkugel) die Erdoberfläche kürzer beleuchtet und die Strahlen treffen auch flacher auf, so dass sie kaum von der Oberfläche absorbiert werden.

11.1.3 Ursache der scheinbaren Sonnenbahn

Als Erdenbewohner sehen wird die Sonne in Bewegung - jemand, der sich auf der Sonnen befände, wurde hingegen die Erde in Bewegung sehen: die Erde kreist um die Sonne - tatsächlich kreisen beide um den gemeinsamen *Schwerpunkt*, doch liegt dieser viel näher bei der Sonne, weil sie mehr als 300000mal schwerer ist als die Erde (eigentlich ist sogar

Abbildung 11.1: Jahreszeiten auf der Erde.

der Schwerpunkt des Sonnensystems entscheidend, doch liegt auch dieser noch innerhalb der Sonnenoberfläche, weil die Sonnenmasse im Sonnensystem dominiert).

11.1.4 Ursache der Jahreszeiten

Das alles erklärt noch nicht die Ursache der Jahreszeiten. Die Erde bewegt sich in einer Bahnebene um die Sonne, die **Ekliptik** genannt wird. Auch die anderen Planeten kreisen mehr oder weniger in dieser Ebene (warum das so ist, wird ebenfalls unter dem Eintrag Ekliptik erklärt). Nun weist die Erde bei ihrer Bewegung eine Besonderheit auf: Sie rotiert an einem Tag um sich selbst, und diese Drehachse steht nicht senkrecht auf der Bahnebene, sondern ist geneigt. Der *Himmeläquator*, die Projektion des Erdäquators an die Himmelskugel, ist um **23 Grad und 27 Minuten** gegenüber der Ekliptik geneigt. Das nennt man in der Himmelmechanik die **Schiefe der Ekliptik**.

Die Neigung hat entscheidende Konsequenzen für die Beleuchtung der Erde bei ihrem Lauf um die Sonne. Wie die Illustration 11.1 zeigt, treffen die nahezu parallelen Sonnenstrahlen mal die Südhalbkugel und mal die Nordhalbkugel mehr oder weniger senkrecht. Dort, wo das geschieht ist Sommer, während auf der gegenüberliegenden Halbkugel (bei den *Antipoden*) Winter ist. Die Sonnenstrahlen treffen übrigens deshalb nahezu parallel ein, weil die Sonne so weit entfernt ist, nämlich eine Astronomische Einheit ($\sim$ 150 Mio. Kilometer).

11.2 Jansky

Jansky ist eine sehr gebräuchliche Einheit für den **Strahlungsfluss** in der Radioastronomie. Sie wurde nach dem Radioastronomen *Karl Guthe Jansky* (1905 - 1950) benannt, der sie einführte. Der Strahlungsfluss ist von der Dimension her Leistung pro Fläche und Frequenzband. Die Abkürzung lautet *Jy*. In SI-Einheiten gilt:

$$1\,\mathrm{Jy} = 10^{-26}\ \mathrm{Wm^{-2}\,Hz^{-1}} \tag{11.1}$$

Diese äußerst kleinen Flüsse sind typisch bei weit entfernten Radioquellen, wie den Jets, die in radiolauten Quasaren und Radiogalaxien zu finden sind.

11.2.1 Nomenklatur in der Radioastronomie

Übrigens: In der Terminologie der Radioquellen ist für die hellste Radioquelle im Sternbild der Buchstabe **A** reserviert. *Sagittarius A* (Sgr A) ist demnach die hellste Radioquelle im

Sternbild *Schütze*, *Centaurus A* (Cen A) diejenige im Sternbild *Centaurus* (Südhimmel) und *Cygnus A* (Cyg A) diejenige im Sternbild *Schwan* (Nordhimmel).

11.3 Jeans-Masse

Die Jeans-Masse wurde benannt nach dem englischen Physiker und Mathematiker *Sir James Hopwood Jeans* (1877 - 1946). Die Jeans-Masse markiert eine charakteristische Grenzmasse, oberhalb derer das Ausgangsobjekt gravitativ instabil wird und kollabieren muss.

11.3.1 So wird's berechnet

Rechnerisch kann man die Gleichung für die Jeans-Masse aus einer Kräftebilanz ableiten. Man geht von einer sphärisch symmetrischen Massenschale aus, die eine homogene Dichteverteilung aufweisen möge. Die Bewegungsgleichung dieser Schale enthält gerade die Gewichtskraft und den Gasdruck. Rotiert die Schale gibt es noch einen Zentrifugalterm, der ihrem Gravitationskollaps entgegenwirkt. Ist die Massenschale magnetisiert gibt es noch einen Term vom magnetischen Druck. Dieses 'magnetische Korsett' hindert die Ionen in der Schale an einer weiteren Verdichtung. Nur neutrale Teilchen bleiben unbeeinflusst vom Magnetfeld (ambipolare Diffusion).

11.3.2 Diskussion der Abhängigkeiten

Ohne Rotation und Magnetisierung ergibt sich die klassische Formel

$$M_J = \pi^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{\mathcal{R}T}{\mu G} \right)^{3/2}.$$

Man liest ab, dass die Jeans-Masse für

- ◇ kleinere Dichten,
- ◇ höhere Temperaturen,
- ◇ kleineres, mittleres atomares Gewicht in der Schale

ansteigt. Anschaulich ist das klar, weil eine heißere Ansammlung von Material einen höheren Gasdruck aufweist, der dem Kollaps entgegen gerichtet ist. Ebenso sind dünnere Materiewolken schwieriger zu kollabieren. Sind die Spezies in der Schale leichter (viel Wasserstoff und Helium, statt Kohlenstoff und Sauerstoff) gilt dasselbe.

11.3.3 Hier braucht man's

Der wichtige Anwendungsbereich der Jeans-Masse findet sich in der Theorie der Sternentstehung, wenn untersucht wird, ab welchen Massen Gaswolken des interstellaren Mediums (ISM) zu Protosternen und YSOs kollabieren können.

11.4 Jet

Jets sind die größten **Teilchenbeschleuniger** des Universums! Es handelt sich dabei um **gebündelte Materieausflüsse** von kosmischen Objekten, die auf einer großen Längenskala vertreten sind.

Abbildung 11.2: HST-Foto von M87 mit Jet.

11.4.1 Mikro-Jets

So beobachten Astronomen protostellare Jets oder **Jets junger Sterne** (siehe YSOs), beispielsweise in Herbig-Haro-Objekten oder T-Tauri-Sternen, die auf der stellaren Längenskala auftreten.

In **Röntgendoppelsternen** fließt Materie eines massereichen Sterns auf ein kompaktes Objekt. Dabei entstehen auch stellare Jets. Im Extremfall bilden sich sogar relativistische Jets auf der stellaren Längenskala, z. B. bei Mikroquasaren, Mikroblazaren und in den Gamma Ray Bursts (GRBs). Sämtliche Jets dieser kleineren Größenordnung subsumieren Astrophysiker bisweilen unter dem Begriff *Mikro-Jets*.

11.4.2 Makro-Jets

Aber die Astronomen beobachten auch die viel größeren Jets - die *Makro-Jets* - von **Aktiven Galaktischen Kernen (AGN)**, also beispielsweise bei Radiogalaxien oder (radiolauten) Quasaren. Sie haben Längen auf der kpc- oder sogar Mpc-Skala!

Baade und *Minkowski* prägten den Begriff *Jet* 1954 an der Radiogalaxie M87. Diese elliptische Zentralgalaxie des Virgo-Haufens zeigt eine längliche Struktur, die etwa zwei Bogensekunden lang ist und die mit dem Begriff Jet gemeint ist. Deutlich sichtbar ist der Jet von M87 in der optischen Aufnahme 11.2, die mit dem Weltraumteleskop Hubble gemacht wurde (Credit: NASA and The Hubble Heritage Team 2000).

11.4.3 Entstehungsmechanismus: Vom Scheitern der Hydrodynamik

Ohne Materieeinfall, kein Materieausstoß: **Jet und Akkretionsfluss** sind immer untrennbar miteinander in der Astrophysik verbunden. Die Akkretionsscheibe füttert den Jet mit Materie, die aus äußeren Regionen einfällt. Der Antrieb für Materieeinfall ist die **Gravitation**: In Einsteins Sprache krümmt ein Zentralobjekt mit der Eigenschaft *Masse* die Raumzeit und zieht daher Materie aus der Umgebung an. Aber weshalb sammelt sich nicht alles 'auf einem Haufen im Zentrum' an? Die Schlüsselfrage ist, welche physikalischen Prozesse für ein Ausströmen der Materie sorgen.

Die sich bewegende Materie kann in der Theorie sehr gut als Flüssigkeit beschrieben werden, so dass einfache Akkretions- und Jetmodelle auf der reinen Hydrodynamik basieren. Viele beobachtete Sachverhalte können so reproduziert werden: das Einströmen auf das Zentralobjekt, die Turbulenz der Strömung, hydrodynamische Instabilitäten (z. B. *Kelvin-Helmholtz-* und *Rayleigh-Taylor-Instabilität*). Auch ein Ausfließen der Materie, das durch den rein hydrodynamischen Gasdruck und/oder Zentrifugaldruck angetrieben wird (falls die Konfiguration rotiert), tritt in Computersimulationen auf. Dennoch wurde bei diesen Forschungsarbeiten klar, dass es so noch nicht in der Natur funktioniert. Denn die beobachteten schnellen und gebündelten Jets konnten so nicht reproduziert werden.

11.4.4 vitale Zutat: Magnetfelder

In der einfallenden Materie gibt es elektrische Ladungsträger - das tritt umso gravierender auf, je heißer der Akkretionsstrom ist. Die Ionisierung führt zu einem Plasma, dessen Dynamik beschrieben werden muss. Die Elektrodynamik lehrt uns, dass mit den Ladungen Felder assoziiert sind, nämlich **elektrische Felder und Magnetfelder**. Wie sich herausstellte sind sie notwendig, um die Entstehung von Jets zu verstehen. Die Hydrodynamik muss also entsprechend zur **Magnetohydrodynamik** verallgemeinert werden.

Entstehungsmechanismus 1: Jets von magnetischen Winden

Der erste Prozess zur Bildung von Jets heißt **Blandford-Payne-Szenario**. Wie unter diesem Eintrag detaillierter beschrieben wird, treibt eine rotierende, magnetisierte Akkretionsscheibe einen **Scheibenwind**. Die Windgeschwindigkeiten sind vergleichbar mit der Rotationsgeschwindigkeit (Keplergeschwindigkeit) am jeweiligen Bahnorbit. Dieses von der Scheibe abströmende Material stellt einen breiten Ausfluss dar, der zu einem Jet werden kann. Zur weiteren Bündelung des breiten zu einem engen Ausfluss sind Magnetfelder erforderlich, die in einem der folgenden Abschnitte beschrieben werden.

Bei schwach magnetisierten Akkretionsscheiben ist für die Dynamik die so genannte **magnetische Rotationsinstabilität** (MRI) entscheidend. Sie sorgt effizient für eine Umverteilung des Drehimpulses: Drehimpulstransport nach außen ist gerade Voraussetzung für den Einfall. Denn sonst würde die einfallende Materie an der Drehimpulsbarriere reflektiert werden. Die MRI bewirkt Materieeinfall und letztlich das Wachstum des Zentralobjekts durch Akkretion.

Entstehungsmechanismus 2: Jets durch schnell rotierende Raumzeit

Der zweite Prozess erfordert ein **schnell rotierendes Schwarzes Loch**, das in Einsteins Theorie mit der Kerr-Lösung beschrieben wird. Ein solches Loch hat zwar nur zwei

Eigenschaften, nämlich Masse und Rotation, aber das birgt zwei gigantische Energieformen, nämlich Ruheenergie und Rotationsenergie. Die Rotationsenergie wird nun durch den einströmenden Akkretionsfluss angezapft - die Magnetfelder spielen dabei die Rolle 'eines langen Arms', mit dem die Rotationsenergie aus dem Loch gezogen wird. Das funktioniert jedoch nur, wenn die Magnetfelder sehr nahe an das Schwarze Loch herankommen, nämlich fast bis an den Ereignishorizont, in die so genannte **Ergosphäre** hinein. Denn hier ist die Rotation der Raumzeit besonders hoch (und nur hier funktioniert der Penrose-Prozess).

Das Szenario ist wie folgt: die vom Akkretionsstrom herangebrachten Magnetfelder wechselwirken mit dem rotierenden Loch. **Frame-Dragging** verdrillt die Magnetfelder und schnürt eine Art 'magnetischen Zopf'. Das geht allerdings nicht lange gut: Durch das Verdrillen stoßen irgendwann Magnetfeldlinien unterschiedlicher Polarität aufeinander. Dann setzt eine Art 'Kurzschluss' ein, der in der Fachsprache *Rekonnexion* (engl. *reconnection*) heißt. Dabei brechen die Magnetfelder lokal zusammen und übertragen die ehemals magnetische Feldenergie auf das Plasma in der Umgebung. Das Plasma hat nun so hohe kinetische Energie gewonnen, dass es sogar aus der unmittelbaren Umgebung eines Schwarzen Loches entkommen kann. Die MHD kommt auch auf die Weise ins Spiel, dass so genannte **Poynting-Flüsse** getrieben werden. Das sind elektromagnetische Energieflüsse, auf denen das Plasma 'reiten kann, wie ein Surfer auf der Welle'. Ein schnell rotierendes Loch ist ein guter Erzeuger für solche MHD-Wellen.

Auch bei diesem zweiten Mechanismus, dem **Blandford-Znajek-Prozess**, sind weitere Effekte zur Bündelung (*Kollimation*) zum Jet notwendig. Die Kollimation der Jets in AGN geschieht allerdings typischerweise deutlich weiter außen, ab etwa 100 Schwarzschildradien (zum Vergleich: die Ergosphäre schließt bei nur zwei Gravitationsradien ab!). Für einen Quasar mit einem 100-Millionen-Sonnenmassen-Loch entspricht die Distanz von 100 Schwarzschildradien nur etwa 200 Astronomischen Einheiten! Die Jetentstehung von aktiven Galaxien läuft offenbar nur im 'dunklen Herzen' der Galaxie ab.

11.4.5 Entscheidungen aus der Beobachtung

Die Forschung in der theoretischen Astrophysik hat also diese zwei Modelle herausgearbeitet, die die Entstehung von Jets *magnetisch* erklären. Die Aufgabe des astronomischen Beobachters ist nun zu entscheiden, ob eines der Modelle, beide oder keines dafür verantwortlich sind, dass kosmische Jets entstehen. Weil Modell 2, der Blandford-Znajek-Prozess, ein Kerr-Loch erfordert, ist die Sachlage zumindest dort klar, wo kein Schwarzes Loch vermutet wird, nämlich bei den protostellaren Jets. Hier scheint das Blandford-Payne-Szenario am Werke zu sein. Die Physik der Protosterne ist allerdings kompliziert genug, dass es auch hier noch viele Forschungsfragen zu klären gibt. Eine davon ist die Kühlung der Wasserstoffmoleküle durch Abgabe von Strahlung.

Schwieriger wird es im Falle der AGN und GRBs, in denen nach allgemeiner Lehrmeinung ein Schwarzes Loch verborgen ist. Moderne, hochauflösende Beobachtungen mittels **VLBI** haben das Potenzial, um den Entstehungsprozess relativistischer Jets zu entlarven. Denn sie kommen so nahe an das Loch heran, dass die Gestalt von Akkretionsfluss und Jet studiert werden kann. Die Abbildung der Zentralregion verspricht die Lösung, weil eine breite Jetbasis für die Scheibe spricht (Blandford-Payne-Szenario, Modell 1), aber eine kleine Entstehungsregion eher für das Loch (Blandford-Znajek-Prozess, Modell 2). Es ist auch plausibel anzunehmen, dass eine Mischung aus beiden Prozessen einen Jet speist. Die Jetentstehung um rotierende Schwarze Löcher fasst die Illustration 11.3 schematisch

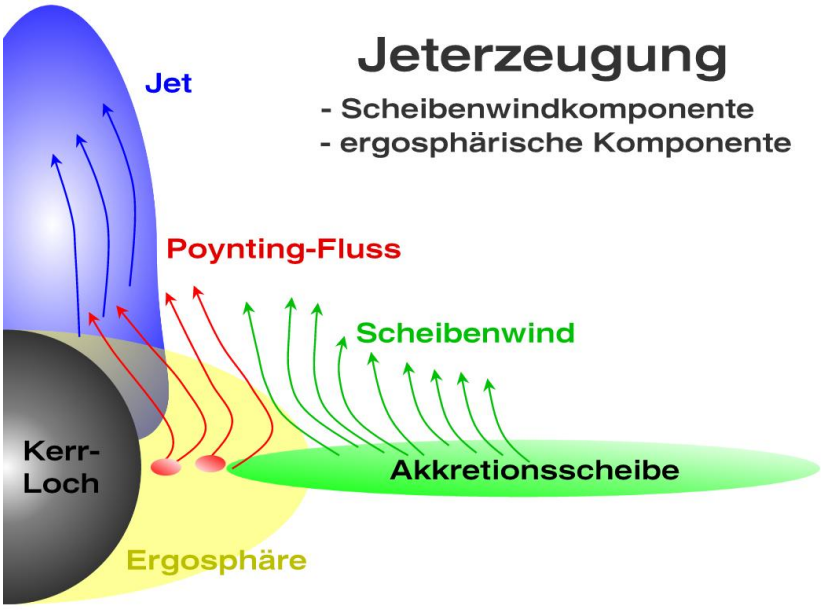

Abbildung 11.3: Jet: Entstehung aus zwei Komponenten.

zusammen.

11.4.6 Verschwindet der Energielieferant?

Die Energie für Entstehungsmechanismus 2 stammt zwar aus dem zentralen Schwarzen Loch, und es verliert Rotationsenergie. Dennoch kann man nun nicht zwingend davon ausgehen, dass rotierende Schwarze Löcher ihre Rotation in entwickelten Jet-Systemen aufgeben (und in die Schwarzschild-Lösung übergehen). Denn das Loch gewinnt durch Akkretion auch wieder an Drehimpuls/Rotation. Im Allgemeinen wird viel mehr Materie vom Loch aufgesammelt, als wieder im Jet weggeschleudert wird.

11.4.7 magnetische Bündelung und Beschleunigung

Die Abbildung 11.4 geht illustrativ auf eine Idee von *Christian Fendt* (MPIA Heidelberg) zurück und zeigt, wie **Lorentz-Kräfte** den (lokal geladenen) Plasmafluss des Jets ablenken: einerseits gibt es **kollimierende Kräfte**, die auf die Jetachse gerichtet sind und so den Jet auch auf großen Längenskalen (kpc bis Mpc!) bündeln; andererseits existieren **beschleunigende Kräfte**, die den Jet vorantreiben. Die jeweilige Richtung der Lorentz-Kraft folgt gemäß der bekannten *Drei-Finger-Regel* (Ursache, Vermittlung, Wirkung) unter Beachtung der Richtung des lokalen Plasmastroms und der zugeordneten Magnetfeldrichtung. Nebenbei gibt es Beschleunigungs- und Abbremsungseffekte, durch **gasdruckgetriebene Kräfte** (reine Hydrodynamik) und MHD-Effekten, wie den **Alfvén-Wellen**.

11.4.8 Strukturen im Jet

Die Abbildung 11.5 zeigt den Querschnitt eines klassischen, rein hydrodynamischen Jets (ohne Magnetfelder) entlang seiner Ausbreitungsrichtung von links nach rechts. In das

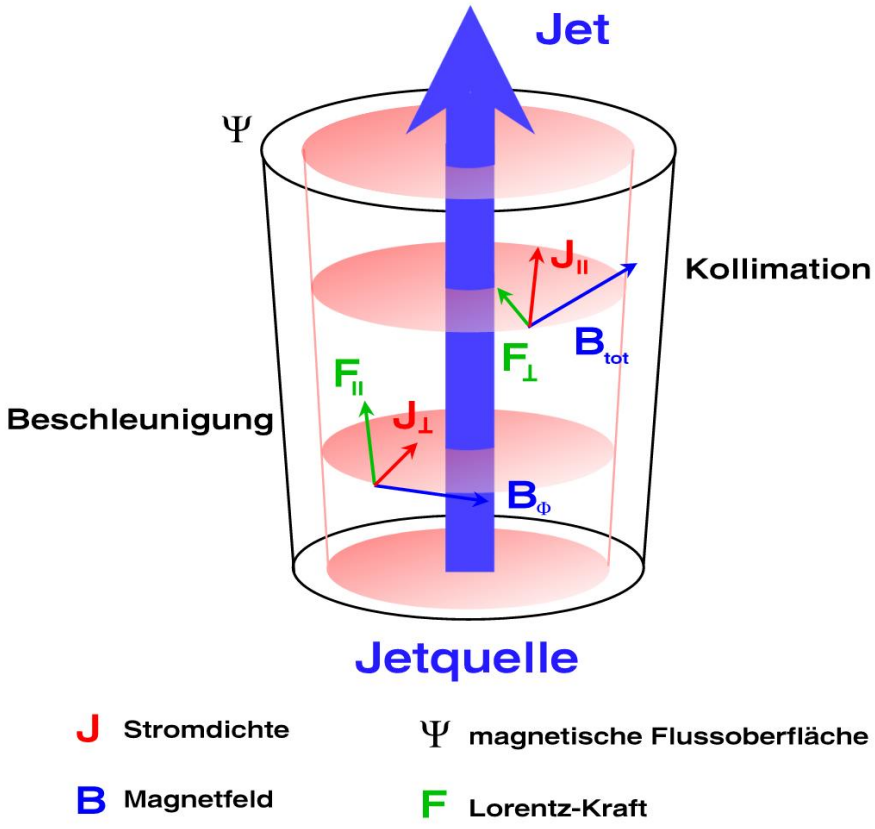

Abbildung 11.4: Kollimation und Beschleunigung von Jets.

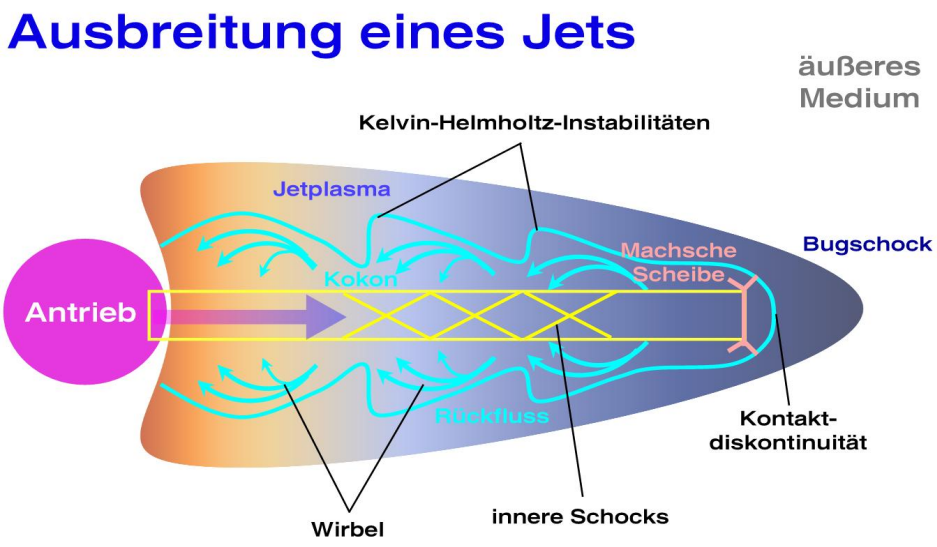

Abbildung 11.5: Strukturen eines sich ausbreitenden Jets.

Schema, das auf Computersimulationen basiert, sind die Bezeichnungen der Substrukturen eingetragen. Zunächst wird der Jet im Zentrum eines AGN oder YSOs erzeugt. Das geschieht hier links in der Region 'Antrieb'. Das Jetplasma propagiert dann im viel dünneren intergalaktischen (IGM; beim Makro-Jet) oder interstellaren Medium (ISM; beim Mikro-Jet) und bildet rechts einen **Bugschock** (engl. *bow shock*) aus. In diesem Bereich befindet sich die so genannte **Kontaktdiskontinuität** (engl. *contact discontinuity*), in der Dichte und Temperatur unstetig springen. Hier links von der Unstetigkeit befindet sich die **Machscheibe** (engl. *Mach disk*). Dort entsteht ein Rückfluss des Jetplasmas, der entlang der Jetachse einen so genannten **Kokon** (engl. *cocoon*) formt. Entlang der Jetachse kommt es ebenfalls zu **internen, schrägen Schockwellen** (engl. *internal shocks*), die vermutlich die *hellen Emissionsknoten* bekannter Quellen verursachen. Ein bekanntes Phänomen am Übergangsgebiet unterschiedlich strömender Schichten sind die zahlreichen *Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten*, die charakteristische **Wirbel** (engl. *eddies*, *vortices*) zwischen auswärts propagierendem Jetplasma und inwärts propagierendem Plasma im Kokon ausbildet. Überlagert ist die ganze Jetströmung mit der für die Hydrodynamik typischen **Turbulenz**.

Zum Teil werden diese Strukturen direkt astronomisch beobachtet. In den extragalaktischen Jets von radiolauten Quasaren und Radiogalaxien gibt es eine Terminologie für die wesentlichen, beobachteten Strukturen im Jet:

- ◇ Die heißen Flecken (engl. *hot spots*) sind eine helle Region am äußeren Ende des Jets. Diese Flecken sind gerade mit dem oben beschriebenen Bugschock assoziiert. Die Dimension der Hot Spots liegt bei etwa 1 kpc. Die Strahlung ist stark polarisiert und auch optisch nachweisbar

- ◇ Die Bögen (engl. *lobes*) sind ausgedehnte, bogenförmige Strukturen, die mit dem 'verwirbelten Jet' in Zusammenhang stehen.

- ◇ Der Bugschock (engl. *bow shock*) ist in der Regel gut sichtbar. Es handelt sich dabei um eine ausgedehnte Region am Ende des Jets, wo das relativistisch bewegte Jetplasma auf das äußere Medium trifft und es daher 'schockt'.

11.4.9 Quelle hochenergetischer Teilchen

Auch **Schockwellen** beeinflussen die Propagation von Jets. Das Jetplasma kann durch den Mechanismus der Fermi-Beschleunigung auf äußerst hohe Geschwindigkeiten beschleunigen und so - vor allem in AGN- und GRB-Jets - die Quelle ultra-hochenergetischer Protonen und Neutrinos sein. Die Neutrinoforscher am Südpol jagen gerade diese UHE-Neutrinos mit den Experimenten AMANDA und ICECUBE.

11.4.10 Schneller als das Licht!

Messungen von Jetgeschwindigkeiten (beispielsweise bei Blazaren) haben erstaunlicherweise auch Geschwindigkeiten *oberhalb* der Lichtgeschwindigkeit ergeben (engl. *superluminal motion*)! Dies sieht zunächst nach einem Widerspruch zur Speziellen Relativitätstheorie (SRT) aus, kann aber leicht erklärt werden: Dieses mysteriöse Phänomen kommt nämlich nur dann zustande, wenn der betrachtete Jet relativistisch ist und fast genau auf den Beobachter zeigt. Die Astronomen beschreiben das so, dass der Jet dann einen kleinen Neigungswinkel (*Inklination*) aufweist. Eine Inklination von 0° bedeutet üblicherweise, dass der Jet exakt auf

den Beobachter zeigt; 90° bedeutet, dass der Jet senkrecht zur Sichtlinie des Beobachters ('von links nach rechts' oder 'von rechts nach links') verläuft. Mit einer kleinen Rechnung, die nur auf der SRT und der Geometrie dieser Situation beruht kann man zeigen, dass typischerweise bei Inklinationen kleiner als etwa 10° ein (für den Beobachter!) **überlichtschneller Jet** resultieren kann.

Das geht so: Wir nehmen an, dass bei einem Quasar mit einer kosmologischen Rotverschiebung z der Jet sich mit einer Geschwindigkeit v_{jet} (im Quasarsystem) ausbreiten möge. Gemäß SRT gibt es zwischen Beobachter- und Quasarsystem eine Zeitdilatation, die einerseits kosmologisch und andererseits speziell relativistisch durch die schnelle Ausbreitung des Jets bedingt ist. Zwischen Beobachter- und Quasarsystem vermittelt daher ein Umrechnungsfaktor der unterschiedlichen Zeitmaße. Für kleine Winkel gilt näherungsweise, dass dieser Faktor

$$(1+z)/(2\gamma^2)$$

ist, wobei z die Entfernung des Quasars und γ der Lorentz-Faktor ist:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/\mathrm{c}^2}}.$$

Nehmen wir nun an, dass sich der Jet im Quasarsystem mit 99.5%iger Lichtgeschwindigkeit bewegen möge. Das nennen die Astrophysiker die *intrinsische* ('echte') Jetgeschwindigkeit. Für unser Beispiel resultiert ein Lorentz-Faktor von $\gamma = 10$. Nehmen wir weiterhin an, dass sich der Quasar bei $z = 1$ befinden möge. Anschaulich besagt nun der Umrechnungsfaktor oben für dieses Zahlenbeispiel, dass sich in einem Jahr Beobachtungszeit eines leuchtenden Knotens im Jet, dieser sich für den Beobachter um 100 Lichtjahre weiterbewegt hat, und nicht nur um knapp ein Lichtjahr! Die Jetgeschwindigkeit senkrecht zur Sichtlinie v_{senkr} kann man auch angeben. Ssie beträgt:

$$v_{\mathrm{senkr}} = \frac{v_{\mathrm{jet}}\ \sin i}{1 - v_{\mathrm{jet}}/\mathrm{c}\ \cos i}.$$

Für unser Beispiel mit $v_{\mathrm{jet}} = 0.995c$ und einer Inklination von 1° ergibt das eine **scheinbare Überlichtgeschwindigkeit** von etwa $3.4c$! Diese Rechnung rettet Einstein.

11.4.11 Radio-Jets und Kosmologie

Für die Radioastronomie sind die Jets besonders relevant, weil die Elektronen im ausströmenden Jetplasma Synchrotronstrahlung im Radiobereich erzeugen. Die Unterschiede in den Radiostrukturen werden zur Fanaroff-Riley-Klassifikation herangezogen. Für die Kosmologie sind die Jets als Radiostrahler wichtig, weil die Astronomen über den Effekt der Faraday-Rotation das heiße intra- und intergalaktische Clustergas zwischen den Galaxien untersuchen können.

11.4.12 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: Magnetic Launching of AGN-Jets (Dezember 2006).
- ◇ Vortrag: Cosmic Jets as Sources for ultra-high energetic Neutrinos (Januar 2003).
- ◇ *A. Müller*, Dissertation (2004): mit vielen Einzelheiten zur Entstehung relativistischer Jets in der Umgebung rotierender Schwarzer Löcher; DOWNLOAD pdf (9.9 MB).

◇ Artikel bei *Einstein online* von A. Müller: Das Schwarze Loch als Materieschleuder: Kosmische Jets (2007)

12 Lexikon K

12.1 Kaluza-Klein-Theorie

Die Theoretiker *Theodor Franz Eduard Kaluza* (1885 - 1954) und *Oskar Klein* (1894 - 1977) entwickelten Anfang der 1920er Jahre eine *Feldtheorie in fünf Dimensionen*, die seither in der Fachwelt **Kaluza-Klein-Theorie** genannt wird. Es ist eine klassische, d. h. unquantisierte Theorie.

12.1.1 Sie wollten die Einheit

Die Kaluza-Klein-Theorie verknüpft Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und Maxwells klassische Elektrodynamik zu einer unquantisierten Feldtheorie, die allerdings eine Raumdimension mehr hat. Damit kann die Kaluza-Klein-Theorie als eine der ersten physikalischen Theorien angesehen werden, die im Geist der Unifikation steht. Kaluza und Klein versuchten, die Gravitation mit der elektromagnetischen Kraft zu vereinheitlichen.

12.1.2 Begründer der Theorie war Kaluza

Kaluza arbeitete bereits 1919 an den ersten Ausarbeitungen dieser 5D-Feldtheorie. Er wurde für die rein mathematisch motivierte Einführung einer weiteren Raumdimension (die ja nicht beobachtet wurde!) anfangs kritisiert. Kaluza stand in Kontakt mit Einstein, der ihn zu einer Publikation ermutigte, die 1921 veröffentlicht wurde.

12.1.3 Urvater der Kompaktifizierung war Klein

Der Mathematiker Klein wurde erst 1925/26 aufmerksam auf Kaluzas Arbeiten. Kleins Verdienst ist die **Kompaktifizierung der fünften Dimension**. Er forderte, dass die Kompaktifizierung auf der kleinsten physikalischen Längenskala auftritt: der Planck-Länge von 10^{-33} cm. Damit ist diese winzige Dimension prinzipiell nicht beobachtbar. Diese fünfte Dimension sollte zwar aufgerollt, aber dennoch flach sein. Außerdem nahm Klein an, dass die Zusatzdimension periodisch sein möge. Die Periode sei eine Funktion von der Gravitationskonstante, der Vakuumlichtgeschwindigkeit, dem Planckschen Wirkungsquantum und der Elementarladung. Diese Arbeiten wurden 1926 sogar in *Nature* publiziert (s. u.) und zunächst mit großem Interesse von der Fachwelt aufgenommen.

12.1.4 Schicksal der Kaluza-Klein-Theorie

Nach anfänglicher Aufmerksamkeit versiegte das Interesse durch die rasante Entwicklung der erfolgreichen Quantentheorie. Ironischerweise verhalf auch Klein der Quantentheorie zum Durchbruch, weil er u. a. mit Bohr und Heisenberg zusammenarbeitete. Bekannt ist Oskar Klein den Physikern bis heute, weil nach ihm die *Klein-Gordon-Gleichung* benannt wurde;

diese fundamentale Bewegungsgleichung beschreibt Quanten speziell relativistisch und ist eine speziell relativistische Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung.

Dann wurde es einige Jahrzehnte ruhig um die Kaluza-Klein-Theorie, doch sie erlebten eine **Renaissance** in den Stringtheorien: dort wurden die Konzepte Extradimensionen und Kompaktifizierung wiederbelebt und gehören dort zu wesentlichen Charakteristika der Theorie.

12.1.5 Gibt es eine fünfte oder gar mehr Extradimensionen?

Klein forderte einen winzigen *Kompaktifizierungsradius* nahe der Planck-Länge. Inzwischen haben Physiker auch deutlich größere Längenskalen vorgeschlagen, die den nachweis erleichtern würden. Die Stringtheorien und die M-Theorie erfordern mehr als drei Raumdimensionen. Obwohl in einer Reihe von physikalischen Experimenten danach gesucht wurde, sind bislang keine Belege für die Existenz von Extradimensionen gefunden worden. Die aktuelle Grenze liegt im Mikrometerbereich: Falls es tatsächlich Extradimensionen geben sollte, so sind sie auf Abstände kleiner als Mikrometer (10^{-4} cm) 'zusammengerollt'.

Die nächsten Erkenntnisse werden beim Superbeschleuniger *Large Hadron Collider* (**LHC**) am CERN ab 2008 erwartet - vielleicht sogar der Nachweis von Extradimensionen?

12.1.6 Literaturquelle

- ◇ Website: MacTutor History of Mathematics archive, University of St. Andrews, Scotland; darin die Biographien von T. Kaluza und O. Klein

12.1.7 Originalpapiere

- ◇ Kaluza, T.: *Zum Unitätsproblem der Physik*, Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften 96, 69 (1921)

- ◇ Klein, O.: *The atomicity of electricity as a quantum theory law*, Nature 118, 516 (1926)

12.2 Kaup-Grenzmasse

Die Kaup-Grenzmasse (nach *D.J. Kaup* 1968) ist eine **Maximalmasse für Bosonensterne**, die aus nicht wechselwirkenden skalaren Bosonen bestehen. Sie ist extrem klein und zeigt, dass solche Bosonensterne unrealistische Modelle für kompakte Objekte in der Astronomie sind. Attraktiver für die Astrophysik sind selbstwechselwirkende Bosonen - siehe unter Bosonenstern für Einzelheiten.

12.3 Kaonen

Die Kaonen sind Teilchen, die eine Unterstruktur aufweisen. Sie gehören zu den Mesonen und werden auch **K-Mesonen** genannt. In der Teilchenphysik werden vier Kaonen unterschieden. Das positiv geladene Kaon und das neutrale Kaon und die beiden zugehörigen Antikaonen. Wie alle Mesonen bestehen Kaonen aus zwei Quarks, genauer gesagt einem Quark und einem Antiquark. Quark und Antiquark unterscheiden sich allerdings im Flavour.

12.3.1 Quarkgehalt der vier Kaonen

- ◇ Das positiv geladene Kaon $\mathbf{K}^+$ hat den Quarkinhalt *up* und *anti-strange*.
- ◇ Dagegen hat das neutrale Kaon $\mathbf{K}^0$ ein *down*-Quark und ein *anti-strange*-Quark.
- ◇ Die beiden Antikaonen haben deshalb folgenden Quarkgehalt: Das negativ geladene Kaon $\mathbf{K}^-$ besteht aus einem *anti-up*- und einem *strange*-Quark, das neutrale Antikaon aus *anti-down*- und *strange*-Quark.

12.3.2 seltsam & charmant

Enthalten Kaonen das Flavour *strange* ('seltsam'), so zählen sie zu den *seltsamen Mesonen*. Es sind aber statt seltsamer auch 'charmante' Kaonen möglich, nämlich dann, wenn statt des *strange*-Quarks ein *charm*-Quark vorhanden ist.

12.3.3 Isospin der Kaonen

Den Kaonen liegt eine **Isospinsymmetrie** zugrunde. Sie bilden wie die Nukleonen ein **Isospindublett** (Isospin 1/2) und unterscheiden sich in ihrer Ladung (neutral K^0 und positiv K^+) und nur geringfügig in ihrer Masse (*Massenentartung*). Die Masse des neutralen Kaons (und Anti-Kaons) beträgt 497.672 MeV, während die des positiven Kaons (sowie seinem Antiteilchen, dem negativen Anti-Kaon) 493.677 MeV ist.

Im Gegensatz zu den Nukleonen ist der Spin der Kaonen null. Es handelt sich also um skalare Bosonen.

12.3.4 astrophysikalische Bedeutung

Für die Astrophysik spielen die Kaonen im Innern von Neutronensternen eine wichtige Rolle, weil sie eine Komponente der Zustandsgleichung sind. Die Kaonen wechselwirken mit den Nukleonen und beeinflussen so Transport- und Kühlungsprozesse in der dichten Neutronensternmaterie. Ihr Einfluss auf die Zustandsgleichung ultradichter Materie wird in der Physik kompakter Objekte betrachtet. Generell kann man sagen, dass Kaonen die Zustandsgleichung von Neutronensternen 'aufweichen', d. h. Neutronensterne mit Kaonenkomponente können bei gleicher Masse kleiner sein, als Neutronensterne ohne Kaonen.

12.4 Kataklysmische Veränderliche

Dies bezeichnet **Doppelsternsysteme**, die aus einem **Riesenstern**, z. B. einem Roten Riesen und einer kompakten Komponente, einem Weißen Zwerg, bestehen. Typischerweise ist dieses Doppelsternsystem so eng, dass es zum Massenüberfluss von der Riesensternkomponente zum Weißen Zwerg kommt. Der Fachbegriff für diesen Überfluss ist der *Roche-lobe overflow*. Er findet nur statt, wenn der Stern besonders groß ist und mindestens bis an den inneren Lagrange-Punkt des Systems reicht. Der Stern erreicht oder überschreitet demnach sein Roche-Volumen. Im Lagrange-Punkt verschwinden alle Nettogravitationskräfte, weil sich diejenigen des Sterns gerade mit denen des Zwergs aufheben. Die Sternmaterie ist quasi frei und kann den Bereich des Sterns verlassen, wenn sie nur geringfügig gestört wird. Typischerweise wird sie aber gleich von der kompakten Komponente

Abbildung 12.1: Haare verboten! Erlaubt: Masse, Drehimpuls und Ladung.

eingefangen und nähert sich dieser im freien Fall. Der Fall wird schnell gebremst, wenn sich die einfallende Materie aufstaut und Druckkräfte wesentlich werden. Der Drehimpuls der Sternmaterie führt zur Ausbildung eines abgeflachten Akkretionsflusses, der Standardscheibe. Der wesentliche Mechanismus für die Freisetzung von Strahlung ist demnach die Akkretion. Akkretionslösungen sind üblicherweise auch mit Ausflüssen verbunden. So werden von der Akkretionsscheibe **Teilchenwinde** erzeugt, die unter Umständen zu stellaren Jets gebündelt werden können.

12.4.1 unterbrochenes Füttern fördert Flackern

Kataklysmische (grch. *kataklysmos*: 'Überschwemmung') Veränderliche (engl. *cataclysmic variables*, **CVs**) sind eine mögliche Realisierung von veränderlichen Sternen. Die Variationen der Leuchtkraft kommen dadurch zustande, dass die Versorgung mit Sternmaterie nicht gleichmäßig, nicht kontinuierlich ist. Immer wenn die akkretierte Materie auf der Oberfläche des Weißen Zwergs auftrifft, kommt es zu einem Strahlungsausbruch (engl. *burst*). Diese Eruption zeigt sich als deutliche Signatur in der **Lichtkurve** - einer diagrammatischen Auftragung der Strahlungsintensität über der Zeit. Überschreitet der Weiße Zwerg nach möglicherweise vielen solcher Akkretionsereignissen seine Chandrasekhar-Grenze, so explodiert er in einer Supernova Typ Ia. SN Ia sind gute Standardkerzen, weil sie nach immer gleichem Schema und gleicher Maximalleuchtkraft ablaufen.

12.5 Keine-Haare-Theorem

Dieses Theorem (engl. *No-hair theorem*) des Relativisten und Gravitationsforschers *John Archibald Wheeler* besagt, dass Schwarze Löcher in der Tat sehr wenig Eigenschaften ausweisen, nämlich höchstens **Masse**, **Drehimpuls** und **elektrische Ladung**.

12.5.1 Lösungen von Einsteins Feldgleichung

Nachdem die Allgemeinen Relativitätstheorie 1916 durch *Albert Einstein* publiziert wurde, fand man nach und nach Lösungen dieser Gleichungen. Allerdings waren diese Lösungen zunächst auf eine einfachere Variante von Einsteins Feldgleichungen beschränkt, nämlich auf das Vakuum. In diesem Fall verschwindet die rechte Seite der Feldgleichung, weil der Energie-Impuls-Tensor null ist.

Später kamen zu diesen *Vakuumlösungen* der Einsteinschen Feldgleichungen die Lösungen dazu, die z. B.die Einstein-Maxwellschen Feldgleichungen erfüllen. Hier entspricht der Energie-Impuls-Tensor dem Maxwell-Tensor. Diese Berücksichtigung des elektromagnetischen Felds erlaubt dann auch elektrische Ladungen.

12.5.2 Loch-Lösungen in chronologischer Reihenfolge ihrer Entdeckung

- ◇ Die Schwarzschild-Lösung wurde 1916 von *Karl Schwarzschild* gefunden. Es handelt sich um die kugelsymmetrische, statische Raumzeit einer Punktmasse. Diese Metrik kann zur approximativen Beschreibung der Sonne im Außenraum und vor allem für nicht rotierende Schwarze Löcher herangezogen werden. Die einzige Eigenschaft eines solchen Schwarzen Loches ist die **Masse**.

- ◇ Die Reissner-Nordstrøm-Lösung wurde von *Hans Reissner* (1916) und *G. Nordstrøm* (1918) gefunden und besitzt eine Eigenschaft mehr: neben der **Masse** hat ein Schwarzes Loch von diesem Typ eine **elektrische Ladung**.

- ◇ Die Kerr-Lösung wurde viel später, im Jahr 1963, von dem Mathematiker *Roy P. Kerr* gefunden. Es handelt sich um eine rotierende Raumzeit, die auf rotierende, ungeladene Massen angewendet werden kann. Im Speziellen werden rotierende Schwarze Löcher damit beschrieben. Es hat die Eigenschaften **Masse** und **Drehimpuls**.

- ◇ Die ganz allgemeine Form eines Schwarzen Loches, die Kerr-Newman-Lösung ist benannt nach *Roy P. Kerr* und *E.T. Newman*. Diese Lösung wurde 1965 gefunden und beschreibt rotierende, geladene Massen. Damit besitzt dieses Schwarze Loch die maximale Anzahl an Eigenschaften: **Masse** (M), **Drehimpuls** (a) und **elektrische Ladung** (Q).

12.5.3 Anmerkungen

Die gerade beschriebenen Lösungen wurden Schwarze Löcher genannt. Diese Benennung gab es allerdings nocht nicht, als die Lösungen gefunden wurden. Erst 1967 wurde der Begriff *black hole*, dt. *Schwarzes Loch*, von *Wheeler* erfunden.

Die Eigenschaft Ladung ist dabei eher akademischer Natur und hat in der Astrophysik kaum Relevanz gefunden, weil Ladungsunterschiede zwischen Umgebung und Loch durch elektrische Ströme ausgeglichen werden.

Für die Umgebung des Loches kann eine komplizierte Struktur des Vakuums angenommen werden, nämlich dass sie angefüllt ist mit der kosmologischen Konstante Λ - die entsprechend verallgemeinerten Löungen der Einsteinschen Feldgleichung heißen Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung, Kerr-de-Sitter-Lösung Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung und Schwarzschild-de-Sitter-Lösung.

12.5.4 Jetzt endlich zur haarigen Angelegenheit

Wie oben dargestellt wurde, haben Schwarze Löcher maximal drei Eigenschaften - das ist recht wenig, wenn man Schwarze Löcher mit Sternen vergleicht (aus denen sie ja großteils hervorgehen, siehe stellare Schwarze Löcher). Das veranlasste *Wheeler* zu der Aussage:

Black holes have no hair.

So war das *No-hair theorem* oder *Keine-Haare-Theorem* begründet worden. Die Bezeichnung '*keine Haare haben*' ist eine augenzwinkernde Metapher, weil der Sachverhalt '*wenig Eigenschaften haben*' bildlich durch eine Abwesenheit von Haaren umgesetzt wird. Das Schwarze Loch wird personifiziert und physikalische Eigenschaften werden also zu physiognomischen in Bezug gesetzt.

12.6 Kepler-Gesetze

Die Kepler-Gesetze sind benannt nach dem deutschen Astronom *Johannes Kepler* (1571 - 1630), der die Planetendaten seines dänischen Kollegen und Zeitgenossen *Tycho Brahe* (1546 - 1601) auswertete. Damals wurde einfache optische Linsenteleskope zur astronomischen Beobachtung verwendet, die dem Prototyp, den der Holländer *Hans Lipperhey* (1570 - 1619) erfand und den *Galileo Galilei* (1564 - 1642) weiterentwickelte, sehr ähnlich waren. Diese kleinen Fernrohre dienten vor allem der Mond- und Planetenbeobachtung.

12.6.1 Keplers Verdienste

Kepler hatte **drei Gesetze der Himmelsmechanik** *rein empirisch* gefunden. Eine theoretische Herleitung dieser später *Kepler-Gesetze* genannten Gesetze wurde mit der **Newtonschen Gravitationstheorie** möglich. Im Physikstudium sind die Keplerschen Gesetze auch heute noch Pflichtübung in der *klassischen Mechanik*.

Die drei Gesetze lauten:

- **(1)** *Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in dessen einem Brennpunkt die Sonne steht.*
- **(2)** *Die Verbindungslinie Planet - Sonne (Fahrstrahl) überstreicht in gleichen Zeitintervallen gleich große Flächen.*
- **(3)** *Die Quadrate der Umlaufzeiten der Planeten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachse der Ellipse ihrer jeweiligen Bahn.*

12.6.2 Himmelsbahnen sind Kegelschnitte

In dieser historischen Form wurden die Kepler-Gesetze an den Planeten im Sonnensystem beobachtet und bewiesen. Vom physikalischen Standpunkt haben sie jedoch eine viel allgemeinere Gültigkeit und astronomisch einen weit größeren Anwendungsbereich. Es handelt sich beim **Kepler-Problem** um die Bewegung einer Masse m in einem gravitativen Zentralpotential, nämlich demjenigen, das von der Zentralmasse M gebildet wird. Eine mathematische Analyse des Problems zeigt, dass alle Bahnen von Himmelskörpern im Sonnensystem *Kegelschnitte* sind. Das heißt die Bahnformen ergeben sich als Schnittfiguren, wenn man einen Kreiskegel mit einer Ebene schneidet. Diese Figuren sind alle bekannt und

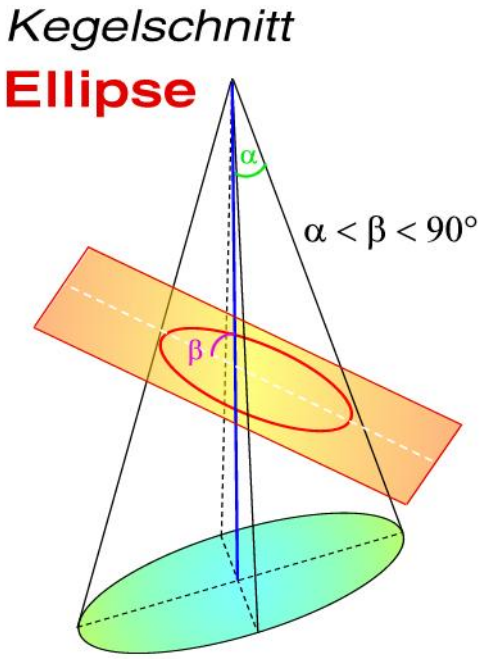

Abbildung 12.2: Ellipse als einer der Kegelschnitte.

heißen Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel - sie unterscheiden sich in der Exzentrizität. Die **Ellipse** ist dabei einer der wichtigsten Kegelschnitte, beschreibt sie doch die Planetenbahnen im Sonnensystem. Wie diese Schnittfigur zustande kommt, zeigt Abbildung 12.2. Die Ellipse ist dabei ein Sonderfall, der sich nur ergibt, wenn der halbe Öffnungswinkel des Kegels α und der Winkel der Ebene mit der Kegelachse β die Bedingung oben rechts erfüllen; bei anderen Winkelbedingungen ergeben sich entsprechend Kreis, Parabel und Hyperbel.

12.6.3 weit reichende Bedeutung für die Physik

Die Kepler-Gesetze bestimmen nicht nur die Dynamik im Sonnensystem, sie lassen sich auf viele andere astronomische Systeme übertragen: Doppelsternsysteme oder sogar auf Sterne, die um ein Schwarzes Loch kreisen. Das dritte Kepler-Gesetz kann als Relation zwischen Umlaufzeit (bzw. Umlauffrequenz) und Zentralmasse formuliert werden. In dieser Form wird es exzessiv in zahlreichen kosmischen Systemen genutzt, um Massen kinematisch zu bestimmen. Ein prominentes und aufregendes Beispiel ist das Zentrum der Milchstraße: aus der Dynamik von Sternen und von Gas folgt eine gigantische, konzentrierte Masse, die dunkel im Galaktischen Zentrum lauert. Die beste Interpretation, die Astronomen für dieses seltsame Gebilde haben, ist, dass sich hier ein supermassereiches Schwarzes Loches von gut drei Millionen Sonnenmassen befindet. Damit die entsprechenden Bahnberechnungen bei Schwarzen Löchern noch ihre Gültigkeit haben, müssen die klassischen Kepler-Gesetze relativistisch verallgemeinert werden. Das ist allerdings möglich.

12.6.4 Einschränkungen & Erweiterungen

Es seien noch einige Einschränkungen bzw. Erweiterungen der Kepler-Gesetze angemerkt: die Bewegung eines Objekts um das andere (**Zweikörperproblem**) erfolgt um den *gemeinsamen* Schwerpunkt. Im Falle des Systems Planet - Sonne liegt dieser aufgrund der enormen Masse der Sonne im Vergleich zu den Planeten nahe bei der Sonne.

Das zweite Kepler-Gesetz beruht physikalisch auf der **Erhaltung des Drehimpulses**, was wiederum mit der Achsensymmetrie des Problems zusammenhängt (*Noether-Theorem*, siehe auch Symmetrie). Dieser Erhaltungssatz ist auch der Grund dafür, dass die (Planeten-)Bewegung in einer Ebene stattfindet (vergleiche auch eine weitere Erhaltungsgröße, der *Runge-Lenz-Vektor*). Die Kepler-Gesetze vernachlässigen kleine Beiträge von den gravitativen Wechselwirkungen der Planeten untereinander. Im Allgemeinen ist nur das Zweikörperproblem exakt lösbar. Schon bei nur einem weiteren Körper, dem **Dreikörperproblem**, ist eine Lösung nur noch approximativ numerisch zu finden. Im **restringierten Dreikörperproblem** ist eine der drei Massen viel leichter, was die Lösung erleichtert.

12.6.5 Web-Artikel

- ◇ Das größte Schwarze Loch der Milchstraße

12.7 Kerr-de-Sitter-Lösung

Die Kerr-de-Sitter-Lösung ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** Λ-Term (siehe kosmologische Konstante). Physikalisch motiviert ist diese Raumzeit, wenn man ein rotierendes Schwarzes Loch beschreiben will, das sich in einer Umgebung befindet, die mit dem Λ-Fluidum angefüllt ist.

12.7.1 zum Namen

Der Name Kerr-de-Sitter-Lösung kommt daher, weil diese Metrik beides beinhaltet: die rotierende Eigenschaft von der Kerr-Lösung und die kosmologische Konstante wie in der de-Sitter-Lösung.

12.7.2 Eigenschaften: Masse, Rotation, Λ

Die Kerr-de-Sitter-Raumzeit ist eine **Drei-Parameter-Lösung**, weil Massenparameter M, spezifischer Drehimpuls $a = J/Mc$ und die kosmologische Konstante Λ die Eigenschaften der Metrik eindeutig festlegen.

12.7.3 Unterscheidung nach Vorzeichen von Λ

Wie bei der de-Sitter-Raumzeit auch, sprechen Theoretiker von der Kerr-de-Sitter-Lösung (KdS-Metrik), falls $\Lambda > 0$ (repulsive kosmologische Konstante; Antigravitation) und von der Kerr-Anti-de-Sitter-Lösung (KAdS-Metrik), falls $\Lambda < 0$ (attraktive kosmologische Konstante). Im Grenzfall $\Lambda = 0$ ist gerade die gewöhnliche Kerr-Metrik mit verschwindender kosmologischer Konstante realisiert.

Interessanterweise hat die KAdS-Metrik **keinen Ereignishorizont**.

12.7.4 Linienelement

Der Vollständigkeit halber sei das Linienelement an dieser Stelle notiert:

$$\begin{aligned} ds^2 &= -\frac{\Delta_r}{\chi^2\,\rho^2}\left(dt - a\,\sin^2\theta\,d\phi\right)^2 + \frac{\Delta_\theta\,\sin^2\theta}{\chi^2\,\rho^2} \\ &\quad \times\left[a\,dt - (r^2+a^2)\,d\phi\right]^2 + \rho^2\left(\frac{dr^2}{\Delta_r} + \frac{d\theta^2}{\Delta_\theta}\right), \end{aligned}$$

mit den Funktionen

$$\begin{aligned} \rho^2 &= r^2 + \cos^2\theta, \\ \Delta_r &= (r^2+a^2)\,(1 - \frac{1}{3}\,\Lambda r^2) - 2Mr, \\ \Delta_\theta &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2\cos^2\theta, \\ \chi &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2. \end{aligned}$$

12.7.5 Weitere Raumzeiten

Verschwindet der Drehimpuls des Loches, so ist gerade die Schwarzschild-de-Sitter-Lösung realisiert. Gibt es eine zusätzliche elektrische Ladung in der KdS-Metrik, so heißt die Raumzeit Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung

12.7.6 Publikationen zum Thema

- ◇ *Gibbons, G.W.* & *Hawking, S.W.*: Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation, Phys. Rev. D15, 2738, 1977
- ◇ *Stuchlik, Z.* & *Calvani, M.*: Null geodesics in black hole metrics with non-zero cosmological constant, Gen. Rel. Grav. 23, 507, 1991

12.8 Kerr-Lösung

Die Kerr-Lösung ist eine Vakuum-Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen und beschreibt die Metrik rotierender, nicht geladener Schwarzer Löcher. Allgemeiner gesprochen beschreibt es den gekrümmten Außenraum einer elektrisch neutralen, rotierenden Masse. In guter Näherung können mit der Kerr-Lösung rotierende Massen auf der Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben werden.

12.8.1 Ein Rechenkunststück

Der Neuseeländer *Roy Patrick Kerr* fand diese Lösung 1963 in kartesischen Koordinaten, was als mathematische Meisterleistung gewertet werden muss. Denn einerseits ist es generell schwierig, exakte Lösung der komplizierten Einsteinschen Feldgleichungen zu finden und andererseits hat die Kerr-Lösung in den kartesischen Koordinaten eine recht komplizierte Struktur. Durch Koordinaten, die besser an die Symmetrie der Kerr-Geometrie angepasst sind, wird auch ihre mathematische Formulierung einfacher. Üblicherweise notiert man

die Kerr-Geometrie in pseudosphärischen Boyer-Lindquist-Koordinaten. Das Linienelement lautet dann:

$$ds^2 = -\alpha^2 dt^2 + \tilde{\omega}^2(d\phi - \omega dt)^2 + \rho^2/\Delta\ dr^2 + \rho^2 d\theta^2.$$

Alternativ kann es auch in Matrixform aufgeschrieben werden, d. h. der metrische Tensor der Kerr-Metrik in Boyer-Lindquist-Form. Die im Linienelement enthaltenen Funktionen sind unter dem Eintrag Boyer-Lindquist-Koordinaten ausführlich notiert.

12.8.2 Rotation erschwert die Sache

Prinzipiell kann gesagt werden, dass rotierende Schwarze Löcher deutlich komplexere Raumzeiten sind, als ihr nicht rotierendes Pendant, die Schwarzschild-Lösung. Denn die Raumzeit rotiert. Dies spiegelt sich tensoriell darin wider, dass der metrische Tensor nicht mehr diagonal ist: es gibt in Boyer-Lindquist-Koordinaten einen Kreuzterm, der azimutale und zeitliche Komponente koppelt. In den ebenfalls pseudosphärischen Kerr-Schild-Koordinaten gibt es sogar drei Kreuzterme! Das ist zwar eine zusätzliche Komplexität, aber in numerischen Simulationen von rotierenden Löchern kann die Verwendung von Kerr-Schild-Koordinaten zweckmäßiger sein, weil dann Randbedingungen (in Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik) besser umgesetzt werden können.

12.8.3 zwei Eigenschaften: Masse und Drehimpuls

Kerr-Löcher haben also die physikalischen Eigenschaften **Masse** M und **Drehimpuls** J. Das **Robinson-Theorem** diktiert, dass Raumzeiten mit bestimmten Voraussetzungen notwendigerweise identisch mit der Kerr-Lösung sein müssen. Die Rotation kann durch den so genannten **Kerr-Parameter** (Rotations- oder Spinparameter) a charakterisiert werden. Diese Zahl ist physikalisch gesprochen ein spezifischer Drehimpuls $a = J/Mc$. In geometrisierte Einheiten ($G = c = 1$) variiert a zwischen den Werten -M (maximale retrograde Rotation) und $+M$ (maximale prograde Rotation). Manchmal setzen Theoretiker aus Bequemlichkeit auch $M = 1$ (bisweilen auch auf meiner Website), so dass a zwischen -1 und 1 variiert. Die Maximalwerte +1 und -1 sind mit Vorsicht zu genießen, denn die Singularität der Kerr-Lösung wird dann nach außen hin sichtbar! Der Relativist *Kip Thorne* hat 1974 herausgefunden, dass die Rotation einen kritischen Maximalwert hat, nämlich $a = 0.998M$. Gilt exakt $a = 0$, so geht die Kerr-Lösung in die statische Schwarzschild-Lösung über.

12.8.4 gekrümmte Raumzeit

Schwarze Löcher sind Raumzeiten, die sehr starke Krümmungen aufweisen, vor allem wenn man in die Nähe der Krümmungssingularität kommt. Nach außen nimmt die Krümmung allerdings rapide ab und verschwindet sogar im Grenzfall einer unendlich hohen Entfernung zum Loch. Diese Eigenschaft haben sowohl Schwarzschild-Metrik, als auch Kerr-Metrik, und sie heißt **asymptotische Flachheit**. D.h. für sehr große Abstände vom Schwarzen Loch gehen die Schwarzschild- bzw. Kerr-Metrik in die Minkowski-Metrik über.

12.8.5 Eigenschaften der Kerr-Lösung

- ◇ Es gibt **zwei Horizonte**, einen inneren Horizont oder Cauchy-Horizont bei r_H^- und einen äußeren Horizont bei r_H^+. Letztgenannter ist der eigentliche Ereignishorizont, weil

er festlegt, ab welchem Abstand ein rotierendes Loch für einen Außenbeobachter völlig schwarz erscheint.

Beide Horizonte hängen nur von der Masse und dem Drehimpuls des Loches ab:

$$r_{\mathrm{H}}^{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}.$$

Die Horizonte sind so genannte **Nullflächen** und werden von den beiden Killing-Vektoren der Kerr-Geometrie aufgespannt.

◇ Um die Horizonte herum gibt es eine **Ergosphäre**, d. h. eine Region, wo die Rotation der Raumzeit sehr stark wird. Alles, was sich lokal in der Ergosphäre befindet (Sterne, Akkretionsscheiben, Beobachter, Licht!), wird von der rotierenden Raumzeit mitgezogen. Dieses Phänomen heißt Frame-Drag. Innerhalb der Ergosphäre kann insbesondere kein Beobachter mehr statisch sein und muss rotieren. Die Struktur der rotierenden Raumzeit zwingt einfach **alles**, Materie und Strahlung, mit ihm zu rotieren! Am äußeren Horizont dreht sich alles mit der Winkelgeschwindigkeit des Loches (Anmerkung: In der Schwarzschild-Metrik fehlt zwar die Ergosphäre, doch gibt es hier eine Art *Anti-Frame-Drag*: alles muss statisch sein!) Aus diesen Gründen heißt die Ergosphäre auch **statisches Limit**, r_{stat}. Mathematisch ist die Ergosphäre definiert durch das Verschwinden der zeitartigen Komponente (00-Komponente) des metrischen Tensors. Demnach ist die Ergosphäre eine Fläche unendlicher Rotverschiebung bzw. verschwindenden Rotverschiebungsfaktors. Die Ergosphäre ist im Gegensatz zu den Horizonten abgeplattet - mathematisch ist das zu sehen an der Abhängigkeit vom Polarwinkel θ in der folgenden Gleichung:

$$r_{\mathrm{stat}} = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2\theta}.$$

◇ Wie alle klassischen Schwarzen Löcher hat auch die Kerr-Lösung eine **intrinsische Singularität** (Krümmungssingularität, Raumzeit-Singularität). Sie folgt aus einer Diskussion des Riemann-Tensors der Kerr-Metrik, insbesondere der *Riemannschen Invarianten* wie dem Kretschmann-Skalar. In Boyer-Lindquist-Koordinaten notiert, muss die Funktion ρ ('rho') verschwinden. Sie taucht im Nenner der Invarianten auf. Wird sie null, wird die Krümmung unendlich. Für die Funktion ρ gilt: $\rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2\theta$. Eine Diskussion dieses Ausdrucks (am besten mit Kerrs historischen kartesischen Koordinaten) führt auf das erstaunliche Resultat, dass die Kerr-Lösung im Zentrum eine Ringsingularität besitzt. Diese Ringsingularität befindet sich immer in der Äquatorebene des Lochs, innerhalb des Cauchy-Horizonts und im Zentrum des Loches bei $r = 0$, wie die Krümmungsinvarianten belegen. Der ringförmige Massenstrom ist die Quelle der achsensymmetrischen Gravitation der Kerr-Geometrie - sonst gibt es in der Vakuumraumzeit keine Quellen.

12.8.6 Schema mit struktureller Information

Häufig sind diese genannten Eigenschaften der Kerr-Lösung in Abbildungen wie Grafik 12.3 zusammengefasst. Solche Bilder sind jedoch aus einer Reihe von Gründen mit Vorsicht zu genießen: Der Betrachter kann dazu verleitet werden zu glauben, dass genau so ein Schwarzes Loch aussieht. **Ein Schwarzes Loch ist aber ein schwarzes Objekt**. Ein Außenbeobachter kann aufgrund der Gravitationsrotverschiebung nie etwas vom Inneren des Loches, z. B. die

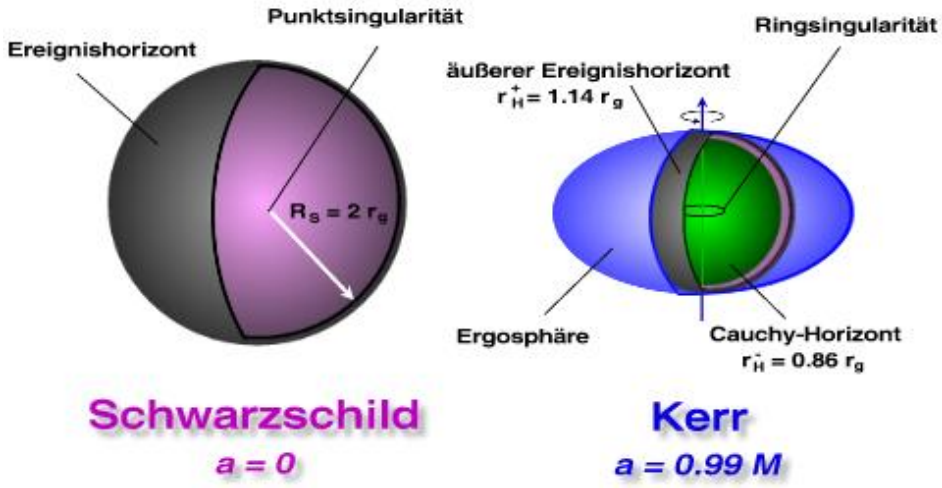

Abbildung 12.3: Vergleich von Schwarzschild- und Kerr-Loch.

Singularität, sehen. Ein anderes Problem ist, dass die Abbildung oben *nicht auf Invarianten* beruht, d. h. sie geht auf die Verwendung eines *speziellen* Koordinatensystems zurück. In einem anderen sieht es anders aus! Nur geeignete Invarianten der ART, wie die gerade angesprochenen Krümmungsinvarianten, erlauben ein objektives Bild. Die Abbildung oben kann also nur dazu dienen, einen Überblick über die strukturellen Komponenten eines Lochs zu bekommen.

12.8.7 Realistischer Eindruck vom Anblick eines Schwarzen Loches

Ist man daran interessiert, wie sich der visuelle Eindruck eines Loches für einen entfernten Beobachter gestaltet, so muss man eine Simulationstechnik namens relativistisches Ray Tracing betreiben. Die simulierten Bilder sehen aus, wie die voll relativistische Computersimulation in Abbildung 12.4. Das rotierende Schwarze Loch befindet sich in der Bildmitte. Es tritt nur deshalb in Erscheinung, weil seine Umgebung leuchtet. Denn um das Schwarze Loch befindet sich eine ebenfalls (hier gegen den Uhrzeigersinn) rotierende Standardscheibe - eine dünne Materiescheibe, die Strahlung abgibt. Der helle Fleck links vom Loch ist auf Blauverschiebung der Strahlung der sich nähernden Scheibenseite zurückzuführen. Entsprechend ist die rechte sich entfernende Seite rotverschoben. Es handelt sich um eine relativistische Verallgemeinerung des Doppler-Effekts.

Die Dunkelheit um und die Schwärze am Loch ist durch einen Effekt namens Gravitationsrotverschiebung begründet. So sieht ein Schwarzes Loch aus!

12.8.8 Horizonte

Bei maximaler Rotation ($a = M$) sind *beide* Horizonte bei einem Gravitationsradius. Bei verschwindender Rotation hingegen ($a = 0$), was der Schwarzschild-Lösung entspricht, ist der äußere Horizont bei zwei Gravitationsradien oder einem Schwarzschildradius. Der innere Horizont koinzidiert mit der zentralen Schwarzschild-Singularität bei r = 0.

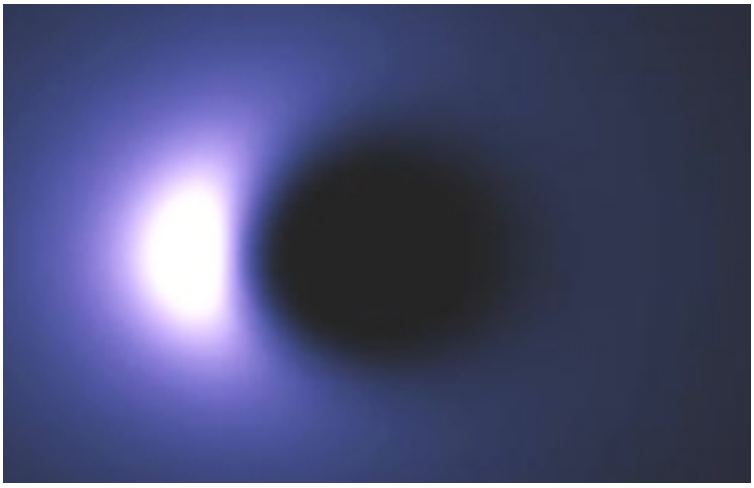

Abbildung 12.4: Emission einer Akkretionsscheibe um ein rotierendes Schwarzes Loch bei 40 Grad Neigung.

12.8.9 innere Kerr-Lösung?

Alle Versuche, eine *innere Kerr-Lösung* zu finden sind bisher gescheitert. Bei der Schwarzschild-Lösung ist dies allerdings möglich (siehe Eintrag Schwarzschild-Lösung).

12.8.10 Geodäten

Innerhalb des Horizonts treten raumartige Geodäten (wie bei den Tachyonen) auf, die die Kausalität verletzen! Da jedoch nichts davon nach außen dringen kann (geschlossene Geodäten), erfüllt diese Kausalitätsverletzung gewissermaßen die kosmische Zensur: Wie die Singularität sind sie durch den Ereignishorizont verhüllt.

Die **Geodätengleichung** der Kerr-Metrik ist mithilfe der Carter-Konstante vollständig integrabel. Mit dieser Standardmethode werden numerisch Teilchenbahnen und Trajektorien des Lichtes in der Kerr-Metrik studiert. Damit kann man relativistisches Ray-Tracing betreiben und viele Bilder erzeugen, die zeigen wie rotierende Schwarze Löcher, optisch die Umgebung verzerren. In der Astrophysik nutzt man diese Methode, um relativistische Spektren wie die relativistisch verbreiterte Eisenlinie zu simulieren und mit Beobachtungsdaten zu vergleichen.

Eine andere wichtige Anwendung der Kerr-Lösung in der Astrophysik ist die Beschreibung hydrodynamischer und magnetohydrodynamischer Phänomene auf dem Hintergrund der Kerr-Raumzeit (siehe auch Akkretion).

12.8.11 Aspekte zur Stabilität

Ein wichtiges Kriterium für Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen ist deren *Stabilität*. Die Theoretiker untersuchen in einer Stabilitätsanalyse der Metrik, wie sie sich unter kleinen Störungen verhält: Schwingt die gestörte Metrik in die ursprüngliche Lösung zurück? Falls ja, ist die Raumzeit stabil. Die Schwarzschild-Lösung ist der **Grundzustand der relativistischen Gravitation** (in vielen Details nachzulesen im Buch von *S. Chandrasekhar* mit dem Titel *The Mathematical Theory of Black Holes*). Demgegenüber ist die Kerr-Lösung

zwar stabil gegen axialsymmetrische Störungen. Man kann aber durch Penrose-Prozesse oder Blandford-Znajek-Mechanismen, die beide in der Ergosphäre stattfinden, die Rotationsenergie *theoretisch sogar vollständig* extrahieren, so dass aus dem Kerr- ein Schwarzschild-Loch wird. In diesem Sinne ist die Kerr-Metrik weniger stabil.

12.8.12 dicker Web-Artikel

◇ Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation, darin speziell das Kapitel zur Kerr-Lösung.

12.9 Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung

Die Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung ist eine Lösung der *Einstein-Maxwell-Gleichungen*, d. h. der Einsteinschen Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** Λ-Term (siehe kosmologische Konstante) und **mit** Maxwell-Tensor auf der rechten Seite der Feldgleichung.

12.9.1 Motivation

Physikalisch motiviert ist diese Raumzeit, wenn man ein rotierendes, elektrisch geladenes Schwarzes Loch beschreiben will, das sich in einer Umgebung befindet, die mit dem Λ-Fluidum angefüllt ist. Die experimentelle Kosmologie belegt mit unterschiedlichen und unabhängigen Methoden, dass das späte Universum durch eine Form Dunkler Energie beschleunigt expandiert. Aus dem Zoo Dunkler Energien wird aktuell eine konstante Dunkle Energie mit einem w-Parameter von -1 favorisiert: Das ist gerade Einsteins kosmologische Konstante Λ. Um nun die Wechselwirkung eines Schwarzen Loches mit der Dunklen Energie in der Umgebung zu studieren, bietet sich genau eine Lösungsfamilie an, die im ganz allgemeinen Fall die Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung darstellt.

12.9.2 zum Namen

Der Name Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung kommt daher, weil diese Metrik beides beinhaltet: die rotierende Eigenschaft und die Ladungseigenschaft von der Kerr-Newman-Lösung und die kosmologische Konstante wie in der de-Sitter-Lösung.

12.9.3 Eigenschaften: Masse, Rotation, Ladung, Λ

Die Kerr-Newman-de-Sitter-Raumzeit ist eine **Vier-Parameter-Lösung**, weil Massenparameter M, spezifischer Drehimpuls $a = J/Mc$, elektrische Ladung Q und die kosmologische Konstante Λ die Eigenschaften der Metrik eindeutig festlegen.

12.9.4 Unterscheidung nach Vorzeichen von Λ

Wie bei der de-Sitter-Raumzeit auch, sprechen Theoretiker von der Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung (KNdS-Metrik), falls $\Lambda > 0$ (repulsive kosmologische Konstante; Antigravitation) und von der Kerr-Newman-Anti-de-Sitter-Lösung (KNAdS-Metrik), falls $\Lambda < 0$ (attraktive kosmologische Konstante). Im Grenzfall $\Lambda = 0$ ist gerade die gewöhnliche Kerr-Newman-Metrik mit verschwindender kosmologischer Konstante realisiert.

Interessanterweise hat die KNAdS-Metrik **keinen Ereignishorizont**.

12.9.5 Linienelement

Der Vollständigkeit halber sei das Linienelement an dieser Stelle notiert:

$$\begin{aligned} ds^2 &= -\frac{\Delta_r}{\chi^2\,\rho^2}\,\left(dt - a\,\sin^2\theta\,d\phi\right)^2 + \frac{\Delta_\theta\,\sin^2\theta}{\chi^2\,\rho^2} \\ &\quad \times\left[a\,dt - (r^2+a^2)\,d\phi\right]^2 + \rho^2\,\left(\frac{dr^2}{\Delta_r} + \frac{d\theta^2}{\Delta_\theta}\right), \end{aligned} \tag{12.1}$$

mit den Funktionen

$$\begin{aligned} \rho^2 &= r^2 + \cos^2\theta \\ \Delta_r &= (r^2+a^2)\,(1 - \frac{1}{3}\,\Lambda r^2) - 2Mr + Q^2 \\ \Delta_\theta &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2\cos^2\theta \\ \chi &= 1 + \frac{1}{3}\,\Lambda a^2 \end{aligned}$$

12.9.6 Weitere Raumzeiten

Verschwindet die elektrische Ladung, so liegt die Kerr-de-Sitter-Lösung vor. Verschwinden Ladung und sogar Drehimpuls dieses Loches, so ist gerade die Schwarzschild-de-Sitter-Lösung realisiert. Diese elektrisch neutralen Lösungen sind in der Astrophysik geeignete Modelle, um die Wechselwirkung von Schwarzem Loch und Dunkler Energie im Rahmen der klassischen Gravitation Einsteins zu studieren.

12.9.7 wissenschaftliche Publikation

- ◇ *Gibbons, G.W. & Hawking, S.W.*: Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation, Phys. Rev. D15, 2738, 1977

12.10 Kerr-Newman-Lösung

Diese Lösung der Einsteinschen Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie beschreibt eine Form eines Schwarzen Loches, falls die kosmologische Konstante verschwindet. Allgemein gesprochen beschreibt diese Raumzeit rotierende, geladene Punktmassen. Damit verallgemeinert sie rotierende Schwarze Löcher, also die Kerr-Lösung, weil sie zudem eine elektrische Ladung trägt.

12.10.1 keine Vakuumlösung!

Der Maxwell-Tensor geht in dieser Beschreibung als Energie-Impuls-Tensor ein und modifiziert die Feldgleichungen so, dass sie eine nicht verschwindende rechte Seite erhalten. D.h. die Kerr-Newman-Lösung ist eine Nicht-Vakuumlösung. Die so modifizierten Feldgleichungen heißen **Einstein-Maxwell-Gleichungen**.

12.10.2 keine Verwendung in der Astrophysik

Im Rahmen der Relativitätstheorie ist die genaue Untersuchung jeder Raumzeit als Lösung der Einstein-Gleichung interessant. Bezogen auf die Astronomie muss geklärt werden wie realistisch das entsprechende Modell ist. Im vorliegenden Fall der Kerr-Newman-Lösung wäre zu fragen: Macht es Sinn ein kosmisches Schwarzes Loch mit den Eigenschaften Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung zu betrachten? Vermutlich hat die Kerr-Newman-Metrik eher einen akademischen Charakter, weil elektrische Ströme in unmittelbarer Umgebung des Loches Ladungsunterschiede kompensieren würden. Theoretisch sind geladenen Löcher in völliger Isolation denkbar. Weil aber immer irgendwelche Materieformen im All anzutreffen sind (Staub, Sterne, interstellares oder intergalaktisches Gas), sind sie eben sehr unwahrscheinlich. Das erklärt, weshalb die Anwendung dieser Kerr-Newman-Lösungen in der Astrophysik nicht besonders verbreitet ist. Die beiden intensiv eingesetzten Raumzeiten für Schwarze Löcher sind die Schwarzschild-Lösung und die Kerr-Lösung, also elektrisch neutrale Löcher.

12.10.3 Zur mathematischen Herleitung

Durch einen Trick (nach *Newman* & *Janis*) kann die Kerr-Newman-Lösung aus der statischen Reissner-Nordstrøm-Lösung gewonnen werden.

12.11 Kerr-Schild-Koordinaten

Kerr-Schild-Koordinaten sind eine mögliche Realisierung für ein Koordinatensystem um **rotierende** Schwarze Löcher zu beschreiben. Rotierende, elektrisch neutrale Löcher werden im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der Kerr-Lösung dargestellt. Die Kerr-Schild-Koordinaten sind die (vor allem numerisch) günstigere Alternative zu den Boyer-Lindquist-Koordinaten. Beide Koordinatensysteme sind *pseudo-sphärisch* und *asymptotisch flach*.

12.11.1 Vorteil von Kerr-Schild

Ihr besonderer Vorteil gegenüber den Boyer-Lindquist-Koordinaten ist der Umstand, dass sich die Kerr-Schild-Koordinaten am Ereignishorizont, dem äußerem Horizont $\mathbf{r}_+$, und auf der Rotationsachse des Loches ($\theta = 0$) 'gutartig verhalten', d. h. keine unangenehmen Divergenzen auftreten. Die Metrik bleibt damit auch numerisch beschreibbar, ohne dass 'Unendlichkeiten' auftauchen. Dies liegt daran, weil die Lapse-Funktion α der Boyer-Lindquist-Koordinaten durch eine Größe z ersetzt wurde. α wird am Horizont null und bewirkt damit für einen Außenbeobachter das bekannte 'Einfrieren' dynamischer Prozesse, hervorgerufen durch den Stillstand der Zeit (gravitative Zeitdilatation, Gravitationsrotverschiebung).

12.11.2 technische Details

Die Komponente $\mathbf{g}_{rr}$ des metrischen Tensors in Boyer-Lindquist-Form divergiert. Mithilfe der Größe Z lässt sich das umgehen und die Randbedingung am (äußeren) Horizont numerisch sehr elegant formulieren. In der Äquatorialebene hat Z für alle Löcher (unabhängig von der Rotation!) das Verhalten $2/r$. Bei $r = 0$ divergiert demnach auch die Z-Funktion. Am äußeren Horizont bleibt sie hingegen endlich und wird in relativistischen Einheiten am Äquator exakt

zwei für die Kerr-Lösung und exakt eins für die Schwarzschild-Lösung. An den Polen des Ereignishorizonts wiederum wird $Z = 1$ bei Kerr und Schwarzschild.

Das Linienelement der Kerr-Lösung in Kerr-Schild-Koordinaten $\{\tilde{t},\, \tilde{\phi},\, r,\, \theta\}$ hat folgende Gestalt:

$$\begin{aligned} ds^2 &= -(1-Z)\,d\tilde{t}^2 - 2Za\sin^2\theta\,d\tilde{t}\,d\tilde{\phi} + 2Z\,d\tilde{t}\,dr + \left(\frac{\Sigma\sin\theta}{\rho}\right)^2 d\tilde{\phi}^2 \\ &\quad -2a\,(1+Z)\sin^2\theta\,d\tilde{\phi}\,dr + (1+Z)\,dr^2 + \rho^2\,d\theta^2, \end{aligned}$$

sowie darin enthaltene Kerr-Schild-Funktionen:

$$\begin{aligned} Z &= 2Mr/\rho^2, \\ \tilde{Z} &= \tilde{\omega}^2 - (Z+1)a^2\sin^4\theta, \\ \rho^2 &= r^2 + a^2\cos^2\theta, \\ \Sigma^2 &= (r^2+a^2)^2 - a^2\Delta\sin^2\theta, \\ \Delta &= r^2 - 2Mr + a^2, \\ \tilde{\omega} &= \frac{\Sigma}{\rho}\sin\theta. \end{aligned}$$

(Quelle: *S.S. Komissarov* 2004, astro-ph/0402403). Wie man schnell erkennt, weist der metrische Tensor in Kerr-Schild-Koordinaten mehr Komponenten auf (exakt zwei Nebendiagonalelemente mehr plus ihrem symmetrischen Pendant), als in Boyer-Lindquist-Koordinaten. Das könnte erklären, weshalb häufig letztgenannte Koordinaten bevorzugt werden.

12.11.3 Motivation für Kerr-Schild

Weil die Kerr-Schild-Koordinaten kein pathologisches Verhalten an den Horizonten der Kerr-Lösung zeigen, kann es von Vorteil sein, sie in Computersimulationen (z. B. Hydrodynamik oder Magnetohydrodynamik) zu verwenden.

12.12 Killing-Felder

Die Killing-Felder sind Lösungen der **Killing-Gleichung**

$$L_X g_{\mu\nu} = \nabla_\nu X_\mu + \nabla_\mu X_\nu = 0$$

und beschreiben die Symmetrie einer Raumzeit. Man gewinnt die Killing-Felder aus der Betrachtung von Isometrien. Ihre Kenntnis erleichtert die analytische Behandlung und das Verständnis der Eigenschaften einer Metrik sehr! Außerdem können Killing-Felder im Rahmen der Numerischen Relativistik der Klassifikation von Raumzeiten dienen.

12.13 Killing-Tensor

Die Existenz des symmetrischen Killing-Tensors ergibt sich aus dem Theorem von Walker und Penrose (1970). Aus dessen zweifacher Verjüngung, die erhalten ist, ergibt sich der kompletten Satz Photonenimpulse im ZAMO und die Carter-Konstante (B. Carter 1968).

Bei der Betrachtung der Dirac-Theorie in der Kerr-Geometrie ist eine tiefere Einsicht in die Theorie möglich: *Killing-Yano-Tensoren* geben Aufschluss über Bewegungskonstanten. Der symmetrische Tensor heißt Killing-Tensor, während der antisymmetrische Yano-Tensor genannt wird. Neuerdings wird ein Zusammenhang mit der Supersymmetrie (SUSY) hergestellt. Eine relativistische Punkt-Ladung wird dazu in die Supersymmetrie eingebettet, um die Symmetrieeigenschaften von Raumzeiten und elektromagnetischen Felder zu studieren und einen Zusammenhang zu **Superinvarianten** herzustellen.

12.14 K-Korrektur

Die K-Korrektur ist ein Auswertungsmethode bei Spektren von Quellen mit hoher kosmologischer Rotverschiebung. Insbesondere ist die K-Korrektur nötig bei der Datenanalyse von **Supernova Typ Ia**, um sie als Standardkerzen verwenden zu können.

12.14.1 Der kosmologische Rotverschiebungseffekt

Die kosmologische Rotverschiebung ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie und ist physikalisch bedingt durch die Expansion des Universums. Wenn die Strahlung sehr weit entfernter Himmelsobjekte bei der Erde (dem Laborsystem) ankommt, ist sie einerseits zum roten Ende des Spektrums hin verschoben und andererseits auch in ihrer Intensität abgeschwächt. Damit sieht die beobachtete Strahlung ganz anders aus als am Emissionsort (im so genannten Ruhesystem).

12.14.2 Folgen für astronomische Beobachtungen

Das verfälscht astronomische Messungen, sowohl in Spektroskopie, als auch Photometrie. In der Astronomie werden bestimmte **Filter** verwendet (siehe dazu unter Helligkeit), also eine instrumentelle Anordnung, die nur ein bestimmtes Frequenzband registriert. Alles, was außerhalb des Filters an Strahlung ankommt, wird nicht beobachtet.

Die kosmologische Rotverschiebung verschiebt nun ein spektrales Merkmal, z. B. eine Spektrallinie, zum Roten hin und kann im Extremfall dazu führen, dass das Merkmal außerhalb des Filters liegt.

12.14.3 Funktion der K-Korrektur

Genau diesen Effekt gleicht die K-Korrektur aus. Im Allgemeinen hängt die K-Korrektur von der kosmologischen Rotverschiebung z und von der Farbe bzw. vom Spektrum des hochrotverschobenen Emitters ab.

12.14.4 wichtiger Spezialfall: Potenzspektrum

Die folgenden Gleichungen zeigen den wesentlichen Fall eines Potenzspektrums des Emitters:

$$\begin{aligned} m - M &= 5 \log \tfrac{d_\mathrm{L}}{10\,\mathrm{pc}} + K(z) \\ F_\nu \propto \nu^{-\alpha} &\quad \text{(Potenzspektrum)} \\ K(z) &= 2.5\,(\alpha - 1)\log(1+z) \end{aligned}$$

Die erste Gleichung zeigt den Distanzmodul, hier allerdings korrigiert um die K-Korrektur im letzten Term $K(z)$. Außerdem wird wie in der Kosmologie üblich die **Leuchtkraftdistanz**

d_{L} verwendet. In der zweiten Zeile steckt die Voraussetzung eines Potenzspektrums, d. h. der spektrale Fluss F_ν kann als Funktion der Frequenz ν in Form eines Potenzgesetzes ausgedrückt werden. Dabei wird α spektraler Index genannt und parametrisiert die Steigung (engl. *slope*) des Spektrums.

Wie nun das Ergebnis der Berechnung der K-Korrektur (aus Vorlesungsskript *Cosmology* von Matthias Bartelmann, ZAH Heidelberg, 2005) ergibt, hat die K-Korrektur ein relativ einfache Gestalt: Der Term $K(z)$ wird positiv für $\alpha > 1$ (*steile Spektren*) und negativ für $\alpha < 1$ (*flache Spektren*). Die z-Abhängigkeit der K-Korrektur zeigt, dass sie (wie zu erwarten ist) besonders wichtig für große Werte von z wird.

12.14.5 Lesehinweis

◇ *Hogg et al.* 2002: The K correction, astro-ph/0210394

12.15 Koinzidenzproblem

Eine Koinzidenz bezeichnet generell das gleichzeitige Auftreten zweier oder mehrere Ereignisse. Das Koinzidenzproblem tritt nun speziell in der Kosmologie auf und bezieht sich auf die erstaunliche Beobachtung, dass die Anteile von Dunkler Energie und Dunkler Materie zufällig gerade die gleiche Größenordnung im lokalen Universum haben. Das drückt sich konkret dadurch aus, dass die dimensionslosen Dichteparameter der Kosmologie, Ω_Λ für die Dunkle Energie und Ω_{m} für die Dunkle Materie, nur um etwa einen Faktor drei verschieden sind.

12.15.1 Beobachtungsdaten

In der modernen Kosmologie gibt mittlerweile viele Modelle für Dunkle Energien. Die aktuellen Beobachtungsdaten der Astronomie, vor allem sehr weit entfernte, explodierende Weiße Zwerge (Supernovae Typ Ia), legen eine ***zeitlich konstante*** **Form Dunkler Energie** in Gestalt der kosmologischen Konstante Λ nahe: Die Supernovadaten, die mit dem Weltraumteleskop *Hubble* gemessen wurden, besagen, dass kosmologische Konstante schon vor 9 Mrd. Jahren den aktuellen, lokalen Wert hatte (*Riess et al.* 2006, STScI/NASA).

12.15.2 Verschärfung des Problems

Die favorisierte Interpretation der Dunklen Energie ist, dass sie ein Resultat des überall fein verteilten Quantenvakuums ist. Diese Interpretation klingt reizvoll, entpuppt sich bei der konkreten Berechnung mittels der Quantenfeldtheorie als problematisch, weil Beobachtung und Theorie um 120 Größenordnungen auseinander liegen! Die **Hypothese vom Quantenvakuum** ist auch deshalb problematisch, weil es nicht einsichtig ist, warum der Anteil des Quantenvakuums sich zeitlich während der Entwicklung des Universums ändern sollte - hier mag die aktuelle Forschung in den Quantenfeldtheorien und der Kosmologie (**Astroteilchenphysik**) neue Einsichten bringen.

12.15.3 Die Lösung

Das Koinzidenzproblem kann gelöst werden, wenn man zulässt, dass die Dunkle Energie **zeitlich variabel** oder anders gesagt eine Funktion der kosmologischen Rotverschiebung

z ist. Inzwischen gibt es in der Kosmologie viele Modelle, die dieser Forderung gerecht werden: sie heißen z. B. Quintessenzen, aber auch andere Modelle wie das Radion oder die Phantom-Energie wurden vorgeschlagen (sämtliche Formen werden im Eintrag Dunkle Energie vorgestellt).

Die aktuellen Beobachtungen besagen jedoch, dass wenn die Dunkle Energie wirklich variabel ist, dann kann sie es nur in den ersten vier Milliarden Jahren des Universums gewesen sein. Danach wurde sie konstant oder entwickelt sich nur noch extrem langsam.

12.15.4 w wie warum eigentlich nicht?

Die Kosmologen drücken die Form der Dunklen Energie und ihre Zeitabhängigkeit sehr elegant durch den so genannten **w-Parameter** aus: w ist gerade das Verhältnis von Druck und Energiedichte ($c = 1$) der jeweiligen Dunklen Energie. Die Zeit- oder äquivalent Rotverschiebungsabhängigkeit drücken die Kosmologen mit $w' = \partial w/\partial z$ aus. Für die kosmologische Konstante gilt z. B. $w = -1$ und $w' = 0$. Für typische Quintessenz-Modelle gilt hingegen $w = -1/3$ und $w' \neq 0$.

12.16 Kollapsar

Im Allgemeinen bezeichnet *Kollapsar* einen kollabierenden Stern, d. h. ein Objekt, das durch den Gravitationskollaps in sich zusammenstürzt. Es hängt von der **Masse** ab, die da in sich zusammenfällt, was weiter geschieht. Am Ende des Gravitationskollapses können verschiedene Vertreter der kompakten Objekte (engl. *compact objects*, CO) stehen. In diese Klasse fallen mit aufsteigender Kompaktheit ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern (auch in seinen Erscheinungsformen als Pulsar und Magnetar), die hypothetischen Formen Quarkstern und seltsamer Stern und schließlich ein stellares Schwarzes Loch. Alternativ zum Schwarzschild-Loch wurden die hypothetischen Gravasterne und Holosterne vorgeschlagen. Schwarzes Loch, Gravastern und Holostern können unter dem Begriff Vakuumsterne zusammengefasst werden, weil diese Sternrelikte unterschiedliche Formen des physikalischen Vakuums repräsentieren.

Im engeren Sinne sind Kollapsare die kollabierenden Sterne, die in einer spektakulären Hypernova die langzeitigen Gamma Ray Bursts erzeugen. Dieses Szenario heißt auch *Collapsar model* nach *MacFadyen & Woosley*, ApJ 1999.

12.17 Kompaktes Objekt

Unter einem kompakten Objekt (engl. *compact object*, **CO**) versteht man in der Astronomie Objekte enorm hoher Dichte. Die kritische Grenze, ab der Astronomen von COs sprechen, liegt bei etwa **einer Million Gramm pro Kubikzentimeter**. Zum Vergleich: die mittlere Dichte der Sonne liegt gerade bei 1.4 g/cm^3 - das sind demnach sechs Größenordnungen mehr!

12.17.1 Kompaktheit erfordert Einstein

Die kompakten Objekte sind so dicht, dass sie die Raumzeit ungemein stark krümmen. Eine adäquate Beschreibung erfordert daher die **Allgemeinen Relativitätstheorie**. COs sind ein Teilgebiet der *relativistischen Astrophysik*. In den extremsten Formen kompakter Objekte ist sehr wahrscheinlich sogar eine **Quantisierung der Gravitation** erforderlich. Bislang gibt es in der modernen Physik noch keine bewährte Quantengravitation!

12.17.2 Typen kompakter Objekte

Die Einteilung der Objekte mit ansteigender **Kompaktheit** ist Weißer Zwerg, Neutronenstern und Schwarzes Loch. Neben diesen klassischen drei Typen gibt es weitere Vorschläge, die von einigen Forschern diskutiert werden, die sich allerdings noch nicht etabliert haben: Quarkstern und seltsamer Stern sind etwas kompakter als ein Neutronenstern; Bosonenstern, Fermionenstern, Gravastern, Holostern und Vakuumstern sind Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch aus Einsteins Theorie. Sie sind eventuell sogar noch von ganz allgemeiner Bedeutung, beispielsweise in der Kosmologie oder Teilchenphysik.

12.17.3 Ursprung kompakter Objekte

Von diesen COs nimmt man an, dass sie im Rahmen der Sternentwicklung aus normalen Sternen hervorgehen. Die Masse des Vorläufersterns entscheidet darüber, welcher CO-Typ als stabile, kompakte Endkonfiguration im **Gravitationskollaps** der Sternrestmaterie gebildet wird:

- ◇ Bei **massearmen Vorläufersternen**, die etwa eine Sonnenmasse aufweisen, folgt nach dem Stadium eines Roten Riesen der Übergang des Sternkerns in einen **Weißen Zwerg**. Der Zwerg ist eingebettet in einen Planetarischen Nebel, der aus den abgestoßenen Hüllen des ehemaligen Riesensterns besteht. Der Übergang von Riesen auf Zwerg relativ unspektakulär (ohne Sternexplosion!) und wird das Schicksal der Sonne in wenigen Milliarden Jahren sein. Weiße Zwerge werden durch den *Entartungsdruck der Elektronen* stabilisiert, der aufgrund des Pauli-Prinzips bei hohen Sterndichten wichtig wird. Diese Stabilisierung durch Quantendruck funktioniert aber nur bis zu einem bestimmten Massenlimit, der so genannten Chandrasekhar-Grenze.

- ◇ Bei **massereichen Vorläufersternen**, die alle Brennzyklen der thermonuklearen Fusion durchlaufen und eine zentrale Restmasse zwischen 1.45 und 1.65 Sonnenmassen aufweisen, erfolgt der Übergang zu einem noch kompakteren Objekt als dem Weißen Zwerg: zu einem **Neutronenstern**, der auch als Pulsar und Magnetar in Erscheinung treten kann. Diese Objekte werden durch den Entartungsdruck der (ebenfalls fermionischen) Neutronen stabilisiert. Bei einer Dichte von etwa 5×10^{14} g/cm^3 ist die Kernmateriedichte bereits überschritten. Hier findet im Innern des Neutronensterns der Übergang in ein Quark-Gluonen-Plasma statt. In einem vergleichbaren Dichteregime ($4\times$ 10^{14} g/cm^3, je nach Bag-Konstante, die in die Zustandsgleichung dieser Quarkmaterie eingeht) könnte die **seltsame Materie** frei existieren. Dies hängt davon ab, ob die *Hypothese Seltsamer Materie* tatsächlich gilt, wonach u- d- und s-Quarks zu gleichen Teilen den Grundzustand der Quantenchromodynamik repräsentieren. Falls sich dies als richtig erweisen sollte, ist zu erwarten, dass nach den Neutronensternen die Quarksterne und insbesondere die *seltsamen Sterne* (engl. strange stars) die nächsten kompakten Objekte in der Hierarchie sind. Die maximale Masse des Quarksterns ist bisher nicht eindeutig von der Theorie zu bestimmen und liegt zwischen 1.3 und 3.2 Sonnenmassen.

- ◇ Bei **sehr massereichen Vorläufersternen** kann auch der Entartungsdruck von Fermionen oder der Druck seltsamer Materie den Kollapsar nicht mehr stabilisieren. Dann erwartet man als letzte stabile Endkonfiguration ein **stellares Schwarzes Loch**.

Die kollabierende Masse muss etwa drei Sonnenmassen schwer sein, um ein Schwarzes Loch bilden zu können. Das ist der kanonische Wert - evt. ist diese Grenze etwas niedriger, weil die Physik ultrakompakter Materie noch nicht in allen Details verstanden ist. Die gesamte Restmasse des kollabierten Sterns steckt dann in der intrinsischen Singularität des Loches.

Ist das erzeugte Schwarze Loch statisch, so sprechen die Astronomen von einem Schwarzschild-Loch; viel wahrscheinlicher ist, dass das im Sternkollaps entstandene Loch rotiert, weil es den Drehimpuls des Vorläufersterns übernommen hat (*Drehimpulserhaltung*). Astronomen nennen dieses Schwarze Loch ein Kerr-Loch.

Die Theoretiker diskutieren derzeit, ob sich alternativ zum Schwarzen Loch auch ein *Gravastern* oder ein *Holostern* gebildet haben könnte. Diese Alternativen zum Schwarzen Loch werden einer modernen Auffassung des physikalischen Vakuums gerecht - vermutlich mehr als es die Schwarzen Löcher tun. Eine Problematik dabei ist, dass Astronomen zurzeit keine Möglichkeit haben, um Schwarzschild-Loch, Gravastern und Holostern aufgrund einer astronomischen Beobachtung zu unterscheiden. Nur in den Fällen, wo eine Rotation nachgewiesen wurde, muss es nach gegenwärtigem Stand der Theorie ein Kerr-Loch sein.

12.17.4 echte Hingucker

Fast alle Erzeugungsmechanismen, die zu diesen kompakten Objekten führen, sind verbunden mit einer heftigen Sternexplosion, einer **Supernova**. Eine Ausnahme bildet die Entstehung Weißer Zwerge, wo der Übergang recht glimpflich abläuft. Hier 'dampfen nur' die äußeren Sternschalen ab, um einen farbenprächtigen Planetarischen Nebel zu bilden, während im Innern das kompakte Relikt übrig bleibt. Die Entstehung von Neutronensternen und kompakteren Kollapsaren ist begleitet von Supernovae: Diese Explosion entsteht beim Rückprall (engl. *back bounce*) der vom Gravitationskollaps getriebenen, einlaufenden Schockwelle am kompakten Sternkern. Während also die innere Sternrestmasse weiter in sich zusammenfällt, explodieren die äußeren Sternhüllen. Hier laufen die für die Metallentstehung wichtigen r-Prozesse und p-Prozesse ab.

Die Explosion ist bei besonders massereichen Vorläufersternen, z. B. Wolf-Rayet-Sternen oder Sternen, die mit dem Superstern η *Carinae* (100 Sonnenmassen) vergleichbar sind, noch heftiger. Die Bildung des stellaren Schwarzen Loches ist dann mit einem (langzeitigen) **Gamma Ray Burst** (GRB) bzw. mit einer **Hypernova**, assoziiert. GRBs beobachten Astronomen in isotroper Verteilung am Himmel, auch in kosmologischen Distanzen.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Gravitationskollaps und Sternexplosion in einer **vollständigen Zerstörung der Konfiguration** *ohne* nennenswertes, kompaktes Relikt enden. Dann wird das Sternplasma komplett im interstellaren Medium (ISM) verteilt und reichert es mit Metallen an, die für die nächste Sterngeneration (vergleiche Population) zur Verfügung stehen.

12.17.5 kompakt, aber deutlich schwerer

Die bisher diskutierten kompakten Objekte entstehen im Rahmen der Sternentwicklung aus Sternen. Es kann Schwarze Löcher, Grava- und Holosterne jedoch auch mit deutlich höheren Massen geben, als auf der stellaren Massenskala. Bei solchen Schwarzen Löchern spricht man von **mittelschweren Schwarzen Löchern** (engl. *intermediate-mass black*

holes), die typische Massen im Bereich von 100 bis eine Million Sonnenmassen haben. Es gibt Beobachtungshinweise, dass dieser Typus vermutlich die Zentren von Kugelsternhaufen, jungen Sternhaufen und Zwerggalaxien bevölkert. Außerdem wird diskutiert, ob die **ultrahellen Röntgenquellen** (engl. *ultraluminous X-ray sources*, ULXs) ihre extreme Röntgenhelligkeit durch mittelschwere Schwarze Löchern speisen.

Die Massenskala setzt sich nach oben hin noch weiter fort: **supermassereiche Schwarze Löcher** (engl. *supermassive black holes*, SMBH) haben gigantische Massen von einer Million bis knapp 10 Milliarden Sonnenmassen! Die SMBHs findet man in nahezu allen Zentren von Galaxien, auch im Zentrum der Milchstraße. Das Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum, identisch mit der kompakten Radioquelle **Sgr A***, ist allerdings mit etwa 3.6 Mio. Sonnenmassen eher am unteren Ende der SMBH-Massenskala. Die größten Vertreter ihrer Art befinden sich in Riesenellipsen (siehe auch Hubble-Klassifikation) wie M87, die die Zentren ganzer Galaxienhaufen darstellen. In besonders spektakulärer Weise treten die supermassereichen Schwarzen Löcher in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) in Erscheinung: Hier sorgen sie über Akkretion von Umgebungsgas und Sternen für die charakteristisch hohe Leuchtkraft und Aktivität der AGN. Dabei kann es (je nachdem wie das Loch gefüttert wird) auch zur Produktion von relativistischen Jets kommen. Das geschieht besonders bei Radiogalaxien und radiolauten Quasaren.

Die Paarung von Schwere und Kompaktheit ist bei den supermassereichen Schwarzen Löcher unglaublich! Nehmen wir den Extremfall von zehn Milliarden Sonnenmassen, der auch beobachtet wurde. Dieses gewaltige Loch wiegt schon fast soviel wie ein Zehntel der Milchstraße, einer ganzen Galaxie! Der Schwarzschild-Radius beträgt jedoch knapp dreißig Milliarden Kilometer oder knapp 200 Astronomische Einheiten.

12.17.6 Zusammenfassende Übersicht

Die vorgestellten Eigenschaften der kompakten Objekte lassen sich knapp in einer Übersicht zusammenfassen. Die folgende Tabelle staffelt die COs aufsteigend nach Kompaktheit. Hier wurde als Maß für Kompaktheit die **mittlere Dichte** in der letzten Spalte verwendet:

kompaktes Objekt	Masse [kg]	Masse [$M_\odot$]	Radius [km]	Radius [$R_\odot$]	mittlere Dichte [g cm^{-3}]
Weißer Zwerg	$\lesssim 2 \times 10^{30}$	$\lesssim 1$	6500	10^{-2}	10^6
Neutronenstern	$\sim$ 2-6 $\times 10^{30}$	$\sim$ 1-3	$\sim$ 15	10^{-5}	10^{14}
Quarkstern	$\sim 4 \times 10^{30}$	~ 2	$\sim$ 10	10^{-5}	10^{15}
Schwarzes Loch	beliebig		3 km $\times (M/M_\odot)$		$10^{16} \times (M/M_\odot)^{-2}$
Sonne	$\sim 2 \times 10^{30}$	1	696000	1	1.4
Erde	$\sim 6 \times 10^{24}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim$ 6400	10^{-2}	5.5

Die Schwarzen Löcher nehmen in vielerlei Hinsicht eine Sonderposition ein: Sie haben im Prinzip eine **beliebige Masse**. Als Lochradius wurde hier der Ereignishorizont eines nicht rotierenden Loches gewählt, der linear mit der Lochmasse zunimmt. So hat die Sonne einen Schwarzschild-Radius von drei Kilometern. Die mittlere Dichte eines Schwarzen Loches lässt sich zwar mit Masse und Horizontradius berechnen, eigentlich divergiert jedoch die Dichte in

der Singularität. Man beachte, dass ein stellares Schwarzes Loch mit Sonnenmasse eine höhere mittlere Dichte aufweist, als alle anderen kompakten Objekte; ein viel schwereres Loch mit 100000 Sonnenmassen hat hingegen die gleiche mittlere Dichte wie ein Weißer Zwerg! Denn die mittlere Dichte nimmt quadratisch mit der Lochmasse ab.

Die Daten beruhen auf aktuellen Erkenntnissen, können sich im Zuge neuer Forschungsergebnisse verändern. Besondere Unsicherheiten gibt es bei Radius und Maximalmasse von Neutronensternen. Ähnliche Unsicherheiten bestehen bei Quarksternen - sie sind darüber hinaus noch nicht als astronomisches, kompaktes Objekt allgemein anerkannt.

Zum Vergleich sind in den letzten beiden Zeilen die Daten von Sonne und Erde dargestellt. Sie belegen, dass kompakte Objekte in der Tat deutlich kompakter sind, als das, was uns vertraut ist. Erstaunlicherweise zeigt die mittlere Dichte in der letzten Spalte, dass die Erde im Mittel kompakter ist als die Sonne.

12.17.7 Eine aktuelle Forschungsfrage

Grava- und Holosterne haben sich in der *scientific community* noch nicht etabliert. Wie man sich erinnert, war das seinerzeit bei der Einführung Schwarzer Löcher nicht anders. Die neuen Lösungen der Einsteinschen Feldgleichung bilden jedoch eine theoretische Alternative zu den singulären (statischen) Schwarzen Löchern. Was den Gravastern so attraktiv macht, ist dessen *Regularität* im Innern; beim Holostern ist der Bezug zum holographischen Prinzip und zu den Stringtheorien reizvoll. Der Gravastern kommt sogar *ohne Singularität* aus, eine Eigenschaft, nach der viele Physikern schon lange gesucht haben. Leider können Astronomen wie gesagt durch Beobachtungstechniken noch nicht Grava-/Holosterne von Schwarzen Löchern voneinander unterscheiden: die Außenraum-Lösung der Metrik ist identisch. Nach dieser Unterscheidung trachten Astronomen natürlich, um womöglich eine der Lösungen sogar falsifizieren zu können. Der vergleichbar kleine Rotverschiebungsfaktor bei kleinen Radien erschwert eine Unterscheidung anhand von Strahlung aus diesem Bereich deutlich - macht sie eventuell unmöglich. Kompakte Objekte zeigen eine Gravitationsrotverschiebung, die in den Extremfällen alles Interessante abdunkelt. Nur falls die Beobachtungen klar eine rotierende Raumzeit nahe legen, bleibt derzeit keine Alternative zur Kerr-Lösung (falls die CO-Masse größer als etwa drei Sonnenmassen ist). Eine weitere Hoffnung besteht darin, dass **Gravitationswellen** (sobald direkt beobachtet) mehr über die Natur der kompaktesten aller kompakten Objekte erzählen können.

12.17.8 Buchtipp

◇ M. Camenzind: **Compact Objects in Astrophysics. White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes**, Springer Berlin, 2007

12.18 Kompaktheit

Thema dieses Eintrags ist die Kompaktheit von **Massen**. Es ist wichtig, dafür ein Kriterium zu haben, um abschätzen zu können, in welchem Fall Rechnungen mit der Newtonschen Gravitationphysik durchgeführt werden können und in welchem Fall besser Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie benutzt werden sollte.

12.18.1 Definition von Kompaktheit

Es ist plausibel, dass Kompaktheit etwas Ähnliches wie Massendichte ist und daher anwächst, wenn eine Masse sich auf ein kleineres Volumen verteilt. Anstelle des Volumens kann man auch vereinfachend die radiale Ausdehnung verwenden, falls das Objekt etwa Kugelform hat. Ein gutes Kriterium zur Bestimmung der Kompaktheit ist daher bei gegebener Masse M und bei deren gegebenem Radius R das dimensionslose Verhältnis von Gravitationsradius r_{g} (hier steckt die Masse M) und ihr Radius R. Die Berechnung lautet

$$\mathcal{C} = r_{\mathrm{g}}/R = \mathrm{G}M/(R\mathrm{c}^2).$$

Dazu müssen die beiden fundamentalen Naturkonstanten Gravitationskonstante G = 6.672 $\times\ 10^{-11}$ $\mathrm{m}^3\ \mathrm{kg}^{-1}\ \mathrm{s}^{-2}$ und Vakuumlichtgeschwindigkeit c = 2.99 792458 $\times\ 10^8$ m/s verwendet werden. Ein Objekt kann als kompakt bezeichnet werden, wenn das **dimensionslose Verhältnis größer als 0.01** ist. Diese Grenze ist etwas willkürlich, kann jedoch empirisch begründet werden, wie im Folgenden demonstriert wird.

12.18.2 Beispiele

Die Kompaktheit $\mathcal{C}$ beträgt für die Erde 7.0 $\times\ 10^{-10}$ - eine Zahl die so klein ist, dass die Erde alles andere als kompakt ist. Bei den kompakten Objekten in der Astronomie sieht das schon anders aus: ein Weißer Zwerg (etwa Erdgröße, aber schwerer als die Sonne, wenn man wie hier die Chandrasekhar-Grenze annimmt) hat eine Kompaktheit von 4 $\times\ 10^{-4}$. Beim Neutronenstern ist der Zahlenwert schon etwa 0.16 - er darf als recht kompakt angesehen werden. Übertroffen wird der Neutronenstern vom hypothetischen Quarkstern (Kompaktheit 0.37) und natürlich von Schwarzen Löchern. Legt man als Radius des Schwarzen Loches den Ereignishorizont zugrunde, so hat ein Schwarzschild-Loch die Kompaktheit von exakt 0.5 (siehe Schwarzschild-Radius) und ein extremes Kerr-Loch liegt unübertroffen bei einer Kompaktheit von exakt 1.

Eigentlich ist aber die Masse eines Schwarzen Loches immer in der Krümmungssingularität bei $r = R = 0$ lokalisiert, so dass jedes Schwarze Loch aus dieser Perspektive sogar **unendliche Kompaktheit** hat!

12.18.3 Warum eine kritische Kompaktheit bei 0.01?

Aus den Zahlenbeispielen geht hervor, dass die Kompaktheit eines Weißen Zwergs 4 $\times$ 10^{-4} und die des Neutronensterns 0.16 betragen. Der kritische Wert liegt also dazwischen. Erfahrungsgemäß sind die allgemein relativistischen Effekte bei Weißen Zwergen nicht so stark ausgeprägt, bei Neutronensternen hingegen schon. Das motiviert zu einem kritischen Wert von etwa 0.01.

12.18.4 Literaturquelle

- ◇ Dissertation von Andreas Müller: *Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry*, Landessternwarte Heidelberg (2004), pdf mit knapp 10 MB

Abbildung 12.5: 11D-Raum konstituiert sich aus 4D-ART-Raumzeit und 6D kompaktifizierten Unterraum.

12.19 Kompaktifizierung

Bei einer Kompaktifizierung wird etwas verkleinert, 'kompakter gemacht'. Der Begriff *Kompaktifizierung* wird als solcher weniger in der Astrophysik, als in den Feldtheorien, vor allem den Stringtheorien verwendet.

12.19.1 Was ist kompaktifiziert?

Einige Feldtheorien fordern mehr Raumdimensionen als die bekannten drei (Länge, Breite und Höhe). Diese weiteren Raumdimensionen heißen Extradimensionen. Sofort ist man versucht zu fragen: Wo sollen denn diese Extradimensionen sein, die offensichtlich in meinem Alltagsleben nicht in Erscheinung treten? Antwort: Sie müssen *kompaktifiziert* sein, d. h. sie sollten auf kleinere Raumskalen 'aufgerollt' sein. Diese Raumskalen müssen wirklich sehr klein sein, mindestens im Bereich von Mikrometern oder kleiner, weil wir nichts von den Extradimensionen bemerken.

12.19.2 Keine Spinnerei, sondern moderne Physik

Das klingt phantastisch, eigentlich hört es sich an wie Science-Fiction, aber weitere Raumdimensionen werden tatsächlich in der modernen Hochenergiephysik diskutiert. Natürlich suchen die Experimentalphysiker nach Anzeichen für die Existenz dieser weiteren Dimensionen, aber bislang gibt es dafür **keinen überzeugenden Beleg**.

Es ist auch unklar, **wie viele Zusatzdimensionen** es geben sollte. Das hängt davon ab, welche Feldtheorie verwendet wird.

12.19.3 Vordenker vor fast 100 Jahren und Nachahmer in der Moderne

Diese Extradimensionen wurden in der **Kaluza-Klein-Theorie** erfunden und haben in den Stringtheorien eine Renaissance erfahren. In der Kaluza-Klein-Theorie fing alles noch zurückhaltend an, und es wurde nur eine räumliche Zusatzdimension gefordert.

In den Stringtheorien sind es dagegen sechs, in der **M-Theorie** sogar sieben räumliche Zusatzdimensionen. Das illustriert die Gleichung 12.5: Die Raumzeit der M-Theorie (links) setzt sich zusammen aus der gewohnten, vierdimensionalen Raumzeit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) und dem 'neuen, zusätzlichen Raum', der kompaktifiziert und siebendimensional ist (rechts). In den Stringtheorien spannen sogar mehrere kompaktifizierte Raumdimensionen einen Unterraum auf. Aktuell untersuchen die Stringtheoretiker **Orbifolds** und **Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten**, auf denen Strings und p-Branen 'leben'.

12.19.4 Warum braucht man mehr Raum?

Die Extradimensionen sind nötig, um einen Ausweg aus dem **Hierarchie-Problem** zu finden. Dieses Problem besteht darin, dass die Gravitation eine Sonderrolle unter allen vier Naturkräften spielt: sie ist die *schwächste* aller Wechselwirkungen, dominiert aber wegen ihrer unendlichen Reichweite (Ruhemasse des hypothetischen Gravitons ist null) das Universum als Ganzes. Die *Kopplungskonstanten*, ein Maß für die Stärke einer Wechselwirkung, parametrisieren in adäquater Weise die vier Wechselwirkungen und ermöglichen deren Vergleich. Im Rahmen der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) zeigt sich, dass sich die Kopplungskonstanten von starker und elektroschwacher Wechselwirkung zu hohen Energien betrachteter Teilchen hin angleichen (*dimensionale Transmutation*): das ist gerade das Wesen der Vereinheitlichung bei Energien ab 2×10^{16} GeV (1 GeV entspricht etwa der Protonenmasse). Die Kopplungskonstante der Gravitation kann erst durch Hinzunahme von Extradimensionen in diesen Bereich 'gedrückt' werden.

12.19.5 Sie suchen Raum? Nehmen Sie Waagen, Scheiben oder Neutronen!

Weil zusätzliche Raumdimensionen auf makroskopischen Skalen bisher nicht in Erscheinung traten, sind sie vermutlich auf sehr kurze Abstände beschränkt, d. h. kompaktifiziert. In welchem Maße diese Kompaktifizierung vorliegt, sollen hochpräzise Messungen mit Torsionswaagen belegen, die an das klassische *Cavendish-Experiment* angelehnt sind. Dabei betrachten die Experimentatoren die gravitativen Kräfte zwischen Metallkugeln mit hoher Präzision. Sie machen sich auf die Suche nach **Abweichungen vom klassischen Newtonschen Gravitationsgesetz**, weil es durch die zusätzlichen Raumdimensionen modifiziert wird (Warum das so ist wird im u.g. Vortrag vorgerechnet.)

Eine ganz andere Möglichkeit bieten Fallexperimente der Moderne: allerdings werfen die Physiker dazu keine Testmassen vom Schiefen Turm von Pisa, sondern betrachten Neutronen zwischen Platten. Da die Neutronen auch eine Masse haben, sind sie Gravitationskräften ausgesetzt, die es erlauben, die Existenz von Extradimensionen im Mikrometerbereich zu testen. In den Neutronenexperimenten konnten keine Hinweise auf Extradimensionen im Bereich zwischen einem und zehn Mikrometern gefunden werden (*Abele et al.*, Lect. Notes Phys. 631, 355, 2003; Preprint hep-ph/0301145)!

Eine aktuelle Studie basiert auf der Messung der Gravitationskräfte zwischen zwei Scheiben. In diesem Experiment wurden Anzeichen von Extradimensionen sogar von dem Millimeter- bis in den Mikrometerbereich hinunter gesucht - ohne Erfolg. Der Kompaktifizierungsradius der Extradimensionen muss demzufolge kleiner sein als 44 Mikrometer (*Kapner et al.*, Phys. Rev. Lett. 98, 021101, 2007; Preprint hep-ph/0611184). Das aktuelle Resultat lautet daher:

*Extradimensionen konnten bis in den Mikrometerbereich **nicht** nachgewiesen werden!*

12.19.6 LHC, das Ass im Ärmel

Sorry, Science-Fiction-Fans, aber das ist der Status der harten, physikalischen Realität. Doch natürlich geben sich die Physiker nicht so leicht geschlagen und suchen weiter. Eine weitere Möglichkeit bieten moderne Teilchenbeschleuniger. Die theoretische Erwartungshaltung ist, dass Extradimensionen die Planck-Skala herabsetzen, je nach Anzahl der Dimensionen, eventuell bis in den TeV-Bereich. Dies ist gerade die Energiegrenze aktueller Teilchenbeschleuniger, so dass man sich erhofft, dass Effekte der

Extradimensionen nachgewiesen werden können. Falls das weiterhin nicht gelingt, so haben die Physiker wenigstens ein neues Limit für den Kompaktifizierungsradius. Sollten sich die Extradimensionen hartnäckig einem Nachweis entziehen, so sollte man sich über alternative Theorien *ohne* Zusatzdimensionen Gedanken machen. Das ist schon in Arbeit. Ein Beispiel einer quantisierten Gravitationstheorie ohne Extradimensionen ist die Loop-Quantengravitation.

12.19.7 Weitere Informationen

◇ Vortrag: An introduction to Brane World Cosmology (Stand März 2004).

12.20 Kompaneets-Gleichung

Diese komplizierte, *partielle Integro-Differentialgleichung* beschreibt mathematisch die Comptonisierung. Man kann sie numerisch für vorgegebene Elektronenverteilungen, Inputstrahlung und Geometrien lösen. Die Strahlungstransportgleichung ist *siebendimensional*: drei Raumrichtungen, zwei Raumwinkel, eine Frequenz der Strahlung, und eine Zeitkoordinate.

12.20.1 flach okay, gekrümmt oje

Für Strahlung, die durch einen Nebel in einer flachen Metrik propagiert ist das Strahlungstransportproblem vielfältig untersucht und gelöst worden. Für gekrümmte Metriken (kovarianter Strahlungstransport) ist die numerische Behandlung außerordentlich kompliziert und bisher nicht gelöst. Diese Herausforderung muss jedoch bei Strahlungsprozessen um Schwarze Löcher bestanden werden.

12.21 konforme Transformation

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) benutzt man konforme (übersetzt eigentlich: '*gemeinsame Form*') Transformationen, um sich ausgehend von einer gegebenen Metrik die zugehörige **konforme Metrik** zu beschaffen. In der Gleichung rechts sind Metrik (rechts) und konforme Metrik (links) über den **konformen Faktor** (Ω) miteinander verknüpft. Der konforme Faktor ist im Allgemeinen eine Funktion von verschiedenen Koordinaten. Als konformer Faktor geeignet ist beispielsweise die *Arcus Tangens Funktion*. Sie ordnet einem Intervall von $-\infty$ bis $+\infty$ einen Intervall von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ zu.

Sinn dieser Prozedur ist es, das Verhalten im Unendlichen von Metriken auf einen endlichen Bereich abzubilden. Die konforme Metrik hat *per definitionem* dieselben Eigenschaften, so dass die Ergebnisse dieser Untersuchung auf die Ausgangsmetrik übertragen werden dürfen.

12.21.1 Wozu braucht man das?

Die konforme Transformation ist ein wesentlicher Schritt, um von Raumzeiten das **Penrose-Diagramm** darzustellen. Geeignete konforme Faktoren führen so eine 'physikalische' Metrik auf eine 'unphysikalische', deren Studium das asymptotische Verhalten der physikalischen Metrik offenbart.

12.22 Kongruenz

Eine Kongruenz von Kurven ist in der Differentialgeometrie so definiert, dass durch jeden Punkt der Mannigfaltigkeit **genau eine** Kurve geht. Diese Voraussetzung ist beim **Paralleltransport** von Tensoren wesentlich und wird im Zusammenhang mit der Lie-Ableitung benötigt. Diese wiederum ist ein mathematisches Werkzeug, um die Symmetrien von Raumzeiten in der Allgemeinen Relativitätstheorie zu bestimmen.

12.23 Koordinatensingularität

Koordinatensingularitäten sind Singularitäten, die durch eine *unzulängliche* Wahl der Koordinaten für Raumzeiten in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) entstehen. Sie sind deshalb nur scheinbar und behebbar. Daher rührt auch die alternative Bezeichnung *hebbare Singularitäten*.

12.23.1 Warum sollte man sie beheben wollen?

Die Koordinatensingularitäten können zu großer Verwirrung in der physikalischen Interpretation von Raumzeiten führen - das geschah in der Vergangenheit, und das geschieht auch heute noch. Da die Koordinatensingularitäten keine physikalische Bedeutung haben, ist es das Interesse der Relativitätstheoretiker sie zu entfernen.

12.23.2 Wie geht man bei der Beseitigung vor?

Die Theoretiker tauschen die Koordinaten aus. Sie denken sich ein geeignetes neues Koordinatensystem aus, in dem die scheinbaren Singularitäten verschwinden. Diese Prozedur ist nicht trivial. Es hat sich als guter Ansatz bewährt, sich die Struktur der Geodäten der jeweiligen Metrik anzuschauen, und die neuen Koordinaten an die Geodäten anzupassen. Die Theoretiker führen schließlich eine *Koordinatentransformation* durch. In der Analyse der Raumzeit in den neuen Koordinaten stellt sich dann (hoffentlich) heraus, dass die Koordinatensingularitäten verschwunden sind. In der Regel ist es dann auch so, dass das neue Koordinatensystem etwas komplizierter ist, dass z. B. der metrische Tensor mehr Komponenten hat, die verschieden von null sind.

12.23.3 zwei Beispiele

Die Schwarzschild-Lösung hat in ihrer üblichen Darstellung ('Schwarzschild-Koordinaten') eine Koordinatensingularität am Schwarzschild-Radius, dem Ereignishorizont eines nicht rotierenden Schwarzen Loches. Diese 'unechte' Singularität verschwindet, wenn man eine Transformation auf neue Koordinaten, die so genannten *Kruskal-Szekeres-Koordinaten* durchführt.

Auf vergleichbare Weise verschwindet bei rotierenden Schwarzen Löchern (mathematisch beschrieben durch die Kerr-Metrik) die Koordinatensingularität an den Horizonten und auf der Achse, wenn man von Boyer-Lindquist-Koordinaten auf Kerr-Schild-Koordinaten übergeht.

Eine genaue Beschreibung im Zusammenhang und vor allem eine Gegenüberstellung zu den **intrinsischen Singularitäten** gibt es unter dem Eintrag Singularität.

12.23.4 Web-Artikel

◇ Im Web-Artikel Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation befassen sich die Kapitel 'Die Schwarzschild-Lösung' und 'Die Kerr-Lösung' mit den genannten, neuen Koordinatensystemen.

12.24 Kopenhagener Deutung

Die Kopenhagener Deutung ist eine Interpretation, die von essentieller Bedeutung für die Quantentheorie ist. Die Deutung betrifft die **Wellenfunktion**, symbolisiert durch Ψ, die die Lösung der fundamentalen Schrödinger-Gleichung ist.

12.24.1 Historisches

Der Begriff *Kopenhagener Deutung* wurde nach der Kopenhagener Schule um den dänischen Physiker *Niels Henrik David Bohr* (1885 - 1962), einem führenden Quantenphysiker benannt. Er erhielt 1922 den Nobelpreis für Physik für seine Leistungen auf dem Gebiet der Atomphysik, speziell die quantenmechanische Behandlung der Elektronenzustände in der Atomschale und den damit verbundenen elektromagnetischen Strahlungsübergängen (*Bohr-Atommodell*). Die eigentliche Kernidee der Kopenhagener Deutung stammt jedoch von dem deutschen Quantenphysiker *Max Born* (1882 - 1970). Er lieferte eine **neue statistische Interpretation der Quantenmechanik**, was mit dem Nobelpreis für Physik 1954 belohnt wurde. Die Ausarbeitung dieses Konzepts geschah bereits 1925/26 in Göttingen, auch zusammen mit *Werner Heisenberg* (1901 - 1976, Nobelpreis 1932). 1927 hielt sich Heisenberg in Kopenhagen auf. Dort griff er Borns Ansatz mit Bohr auf. Heisenberg entwickelte die Matrizenmechanik, die eine Alternative zur Wellenmechanik von *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961) darstellt. Auf der Basis dieser Formulierungen und Borns Interpretation gelang dem Kopenhagener Kreis, im Wesentlichen Heisenberg und Bohr, die Grundlegung eines **neuen physikalischen Weltbildes ohne Determinismus und Kontinuität**. So wurde auch der Begriff der physikalischen Realität neu definiert, was enorme erkenntnistheoretische Konsequenzen hatte.

12.24.2 Kern der Deutung

Das Entscheidende an der Kopenhagener Deutung ist die Beziehung zwischen Wellenfunktion und **Messprozess**: Gemäß Borns neuer Interpretation befindet sich das quantenmechanische Teilchen **vor der Messung gleichzeitig an allen Orten**, wo die Wellenfunktion nicht verschwindet! Erst im Moment der Messung 'kollabiert' die Wellenfunktion und das Teilchen lokalisiert an einem bestimmten Ort. Die Quantenphysiker sagen: *Vor* der Messung ist ein Zustand eine **kohärente Überlagerung aller möglichen Zustände**, *nach* der Messung steht dann ein bestimmter der möglichen Zustände fest.

12.24.3 Gott würfelt nicht!

Die Kopenhagener Deutung ist auch unter Physikern umstritten, weil diese radikale Sichtweise nicht immer erforderlich ist. Prominente Gegner der Kopenhagener Deutung waren der Entdecker der Energiequanten *Max Planck* (1858 - 1947, Nobelpreis 1918), der Erforscher der Röntgenkristallographie *Max von Laue* (1879 - 1960, Nobelpreis 1914), der Begründer der

Wellenmechanik *Erwin Schrödinger*, der Begründer der Materiewellen *Louis de Broglie* (1892 - 1987, Nobelpreis 1929) und vor allem der 'Vater der Relativitätstheorie' *Albert Einstein* (1879 - 1955, Nobelpreis 1921), der lapidar sagte '*Gott würfelt nicht!*'.

12.24.4 Paralleluniversen?

Die **Viele-Welten-Theorie** oder **Mehrwelt-Interpretation** von *H. Everett* (1957) geht noch weiter: Mit jeder durchgeführten Messung spaltet ein zuvor unbestimmter Zustand in viele Welten auf! Anders gesagt: Alles was möglich ist, also endliche Wahrscheinlichkeit hat, geschieht. Unsere Welt, unser Universum, ist nur ein ganz bestimmtes. Alle anderen, die ebenso alternativ möglich wären, gibt es auch, nur nicht in unserem Universum! Im Rahmen der Quantenkosmologie führt dies zur Hypothese, dass Paralleluniversen existieren.

12.25 Korona

Der Begriff *Corona* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet *Kranz* oder *Krone*. In der Medizin (*Kardiologie*) kennt man die *Koronargefäße*, die das Herz kranzförmig umgeben und es mit Nährstoffen versorgen. Koronen gibt es auch in der Astrophysik. Prominent ist die **Korona der Sonne**. Die solare Korona ist ein unter normalen Umständen *unsichtbarer Lichtkranz*, der nur bei Sonnenfinsternissen spektakulär in Erscheinung tritt. Die Sonnenkorona ist die Berandungszone der Sonne und mit zwei bis fünf Millionen Grad sehr heiß. Sie überschreitet die Temperatur der Sonnenoberfläche, der Photosphäre (6000 Grad), um drei Größenordnungen! Dies war lange Zeit ein großes Rätsel kann aber mittlerweile mit den Methoden der **solaren Magnetohydrodynamik** erklärt werden: MHD-Wellen und Plasmawellen kommen aus dem Inneren der Sonne. Sie heizen die Korona stark auf und füttern sie sowie die Sonnenumgebung mit Teilchen, dem so genannten **Sonnenwind**.

12.25.1 Ein heißes Teil

Allgemein gesprochen ist eine Korona in der Astronomie ein besonders heißes Gebiet. Anfangs haben Astronomen aus Gründen der Einfachheit ihre Form auf Punktquellen oder kugelartige, kranzförmige Gebilde beschränkt; inzwischen sind verschiedene Geometrien je nach kosmischer Quelle vorgeschlagen worden.

In der Physik der kompakten Objekte spricht man ebenfalls von Koronen. Dort begegnet man den **Koronen in der Akkretionsphysik**, z. B. beim Einfall von Materie auf ein Schwarzes Loch. Um diese Koronen soll es vor allem in diesem Lexikoneintrag gehen. Weil die Korona so heiß ist, strahlt sie thermisch im Bereich hoher Strahlungsenergien. Deshalb sind die Koronen in der **Röntgenastronomie** anzusiedeln. Die hochenergetische, elektromagnetische Strahlung der Korona sorgt für einige charakteristische Spektraleigenschaften, die Astronomen bei Röntgendoppelsternen und Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) beobachten.

12.25.2 Das Compton-Kontinuum

Die koronale Primärstrahlung selbst befindet sich als thermisches Spektrum im UVX-Bereich. Niederenergetische Strahlung aus der Umgebung wird in der Korona Comptonisiert (inverse Compton-Streuung, IC) und wird so in hochenergetische Strahlung transformiert. Die dazu erforderlichen 'kalten Saatphotonen' können von der Standardscheibe oder dem kosmischen

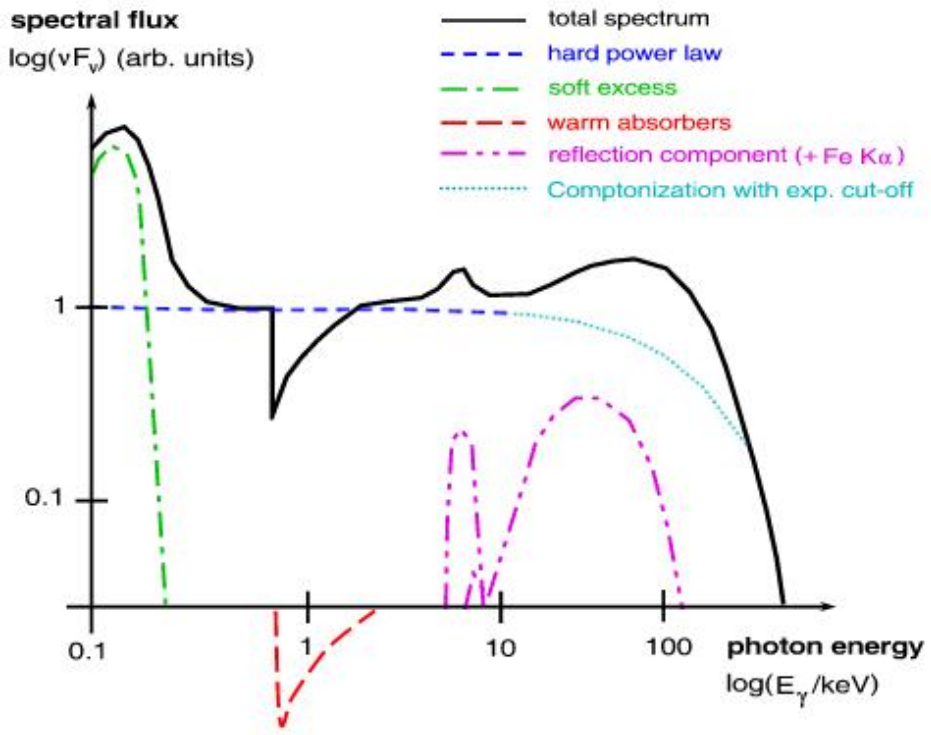

Abbildung 12.6: typisches Röntgenspektrum eines AGN Typ-1.

Hintergrund kommen. Treffen die kalten Photonen (in der Abbildung unten rot dargestellt) auf das heiße Koronagas, werden sie invers Compton gestreut und gewinnen dabei deutlich an Energie (blau dargestellt). Im Röntgenspektrum zwischen etwa einem und einigen hundert keV ist dieses **Compton-Kontinuum** klar zu detektieren. Durch den Energieverlust bei der Compton-Streuung kühlt das koronale Gas. Außerdem kann die Koronastrahlung bei bestimmten Geometrien auf die kalte Standardscheibe gestrahlt werden. Weil diese ionisiert ist, wirkt sie wie ein Spiegel und reflektiert die Koronastrahlung. Im Spektrum macht sich dieser *Reflexionsbuckel* (engl. *reflection bump*) bei etwa 20 keV bemerkbar (siehe Grafik 12.6). Auf diese Weise können Röntgenastronomen direkte Strahlung aus der Korona und zeitversetzt indirekte Koronastrahlung, die an der Scheibe reflektiert wurde, detektieren. In diesem Zeitversatz steckt die Information von Laufzeitunterschieden der Strahlung. Das kann man sich zunutze machen, um die **Geometrie der Korona** herauszufinden. Diese Technik, wo man Beleuchtungseffekte und Spiegelungseffekte ausnutzt, heißt Reverberation Mapping (engl. *reverberation*: 'zurückstrahlen', *to map*: 'kartieren').

12.25.3 Gestalt der Korona

Die Koronageometrie und -morphologie ist Gegenstand der Forschung und von großem Interesse in der Akkretionsphysik. Es ist anzunehmen, dass unterschiedliche, akkretierende Objekte im Allgemeinen verschiedene Koronageometrien aufweisen. Kennt man sie, so können Astronomen einige Aussagen über die Akkretionsphysik des Objekts treffen, z. B. die Akkretionsrate oder Relevanz von Strahlungskühlung abschätzen. Eine typische

Eigenschaft dieser Röntgenquellen ist jedoch auch die **Variabilität**, also zeitliche Variationen im Röntgenfluss, die in immer wieder aufgenommenen Spektren dokumentiert werden. Astronomen interpretieren das so, dass auch die Geometrie des Akkretionsflusses - also auch der Akkretionsscheibe und der Korona - variieren. Das kann dann geschehen, wenn beispielsweise die Korona torusförmig ist und vom großskaligen Akkretionsfluss von außen aufgefüttert wird. Unterbleibt die Fütterung, beispielsweise aufgrund magnetischer oder turbulenter Effekte oder durch Instabilitäten im Akkretionsfluss, so baut sich die Korona langsam ab. Sie schrumpft und kann weniger strahlen. Solche Szenarien könnten die Beobachtungen erklären. Reverberation mapping ist dabei eine wertvolle Methode. Auch Simulationen von Akkretionsflüssen im Rahmen der theoretischen Astrophysik belegen die Variabilität der Strukturen. Weil die Akkretionsstrukturen variabel sind, sind es auch die Spektrallinien, die aus dieser Region kommen.

Die Geometrie der Korona hängt davon ab, welche Akkretionsphysik in der Nähe des Lochs (oder anderer Akkretoren) abläuft. Bisher wurden die Szenarien eingeteilt in

- ◇ abgeflachte Geometrien (engl. *slab corona model*),
- ◇ platte Sandwichkonfigurationen (engl. *sandwich corona model*),
- ◇ sphärische oder sphäroidale Geometrien (engl. *sphere+disk model*),
- ◇ toroidale Geometrien (engl. *torus+disk model*),
- ◇ löchrige Koronen (engl. *patchy corona model*, *pill box model*)
- ◇ 'Laternenpfahl-Modell' mit koronaler Punktquelle über dem Akkretionsfluss (engl. *lamp-post corona model*)

Eine schematische Übersicht dieser Modelle zeigt die Abbildung 12.7. Die Astronomen diskutieren außerdem die Möglichkeit, dass der in unmittelbarer Nähe zum Akkretor gestartete Jet die Funktion einer Korona übernimmt. Das ausströmende Plasma ist ebenfalls recht heiß und könnte als Primärquelle dienen.

12.25.4 reflektierte Koronastrahlung als Spektrallinie

Die spektrale Reflexionskomponente hat noch einen wesentlichen Zusatz: **Fluoreszenzlinien**. Sie treten auf, wenn das nicht vollständig ionisierte Material in der Standardscheibe die koronale Röntgenstrahlung absorbiert. Dies geschieht etwa ab einer Schwelle der Strahlungsenergie von 7.1 keV. Dann werden die Elektronen von inneren auf äußere Atomschalen (K-Schale nach L-Schale) angeregt, fallen aber nach kurzer Zeit unter Aussendung charakteristischer Fluoreszenzphotonen wieder zurück. Die fluoreszierenden Atome bzw. Ionen dürfen nicht vollständig ionisiert sein, denn ohne Elektronen kein Übergang. Fluoreszenzlinien entstehen auch nur bei einer hohen räumlichen Nähe von kaltem (Standardscheibe) und heißem (Korona) Material. Räumliche Nähe, signifikante Größe und Effizienz der Korona, Vorhandensein einer kalten Standardscheibe sind nicht immer gegeben. Deshalb beobachtet man auch nicht bei allen Akkretoren Fluoreszenzlinien! Eine alternative Erklärung dafür, dass Röntgenfluoreszenzlinien fehlen, ist, dass die Akkretionsscheibe innen abgeschnitten ist (*Müller & Camenzind* 2004). Solche *trunkierten Scheiben* könnten Folge einer effizienten Kühlung durch Strahlung sein. Die Astronomen haben sich bislang in dieser Frage nicht geeinigt.

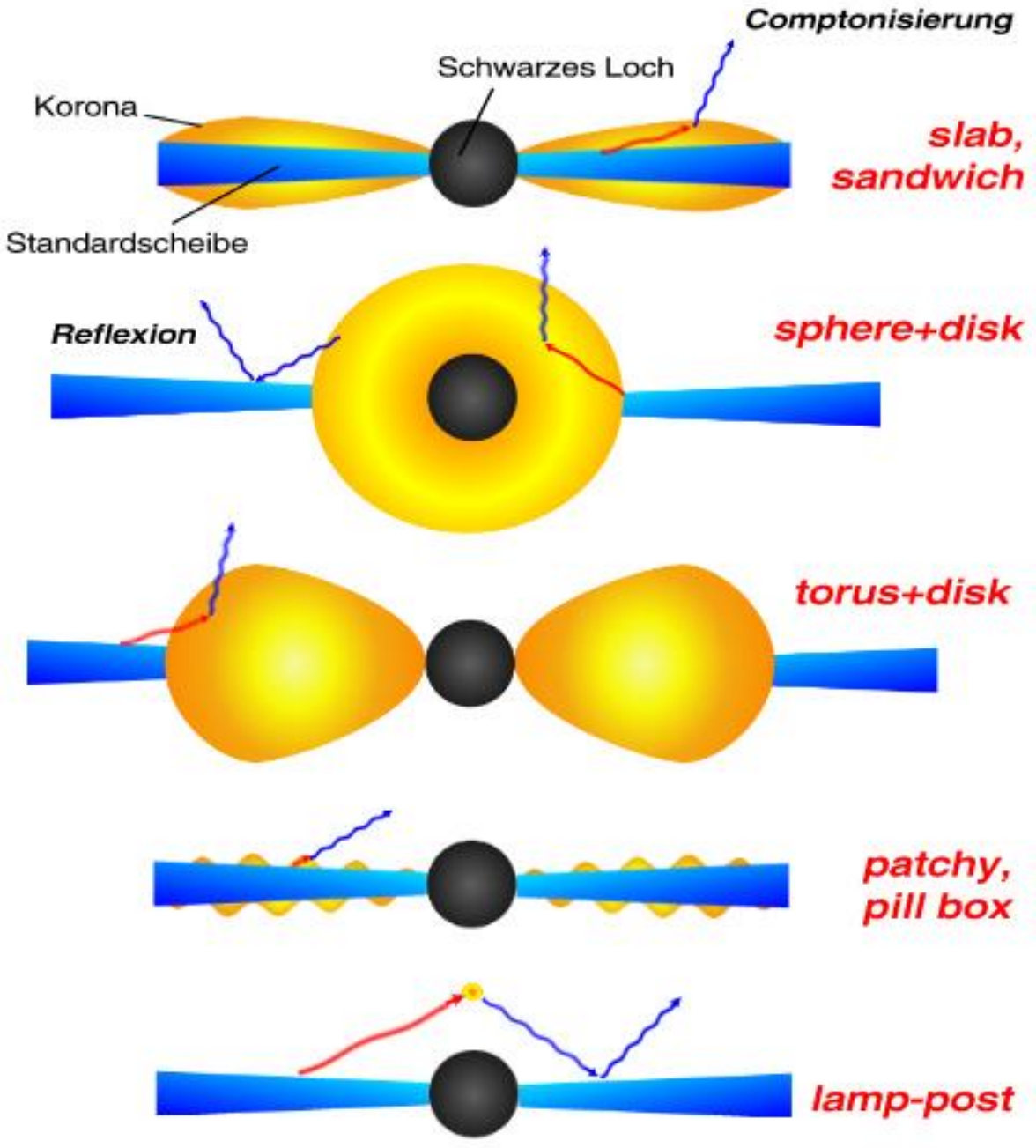

Abbildung 12.7: Geometrien der Korona in der Akkretionsphysik.

Es ist rätselhaft, weshalb die Astronomen im **Galaktischen Zentrum** (der Mitte der Milchstraße), assoziiert mit der kompakten Radioquelle Sgr A*, nach wie vor keine Röntgenfluoreszenzlinien beobachtet haben. Vermutlich gibt es dort keine Akkretionsscheibe, weil zu wenig Material auf das zentrale supermassereiche Schwarze Loch stürzt. Das Zentrum der Milchstraße stellt die Akkretionsphysiker vor große Herausforderungen. Wenn es überhaupt ein paar Fluoreszenzphotonen dort geben sollte, so ist ihr spektraler Fluss für eine Beobachtung auf der Erde zu stark unterdrückt. Dies ist allerdings nur *eine* der möglichen Spekulationen.

12.25.5 Fe K - Dominanz von Eisen

Verschiedene chemische Elemente in der Standardscheibe können die Fluoreszenzstrahlung aussenden. Besonders dominant ist jedoch Eisen (chem. Symbol *Fe*), weil die Fluoreszenzausbeute dieses Elements sehr hoch ist. Daneben mag es marginale Beiträge von Nickel (*Ni*) und Chrom (*Cr*) geben. In der Röntgenastronomie werden fast exklusiv die **Fe-K-Linien** betrachtet, die leichte Unterschiede in der Ruheenergie aufweisen. Die Unterschiede hängen davon ab, welcher elektronische Übergang stattfindet (von welcher Atomschale zu welcher Atomschale) und wie sehr das Eisenatom ionisiert ist. Die prominenteste Fluoreszenzlinie ist die Eisenlinie bei Strahlungsenergien von etwa 6.4 keV im Ruhesystem des Emitters (Fe Kα). Eisen ist bei diesem Übergang neutral, was Astronomen mit der Bezeichnung *FeI* notieren (siehe zur Nomenklatur unter Metall), und das Fluoreszenzphoton wird beim Übergang von der L- in die K-Schale emittiert.

12.25.6 Was Linienprofile verraten

Eisenlinien eignen sich besonders zur Diagnostik mit relativistischen Emissionslinien, denn sie werden in unmittelbarer Nähe stark gravitierender Objekte, wie Schwarzen Löchern emittiert. Die gekrümmte Raumzeit lenkt die Fluoreszenzphotonen auf gekrümmte Bahnen, weil Photonen den Nullgeodäten der betreffenden Raumzeit folgen. Die Nullgeodäten in der Umgebung von Schwarzen Löchern folgen aus Geodätengleichung der Schwarzschild-Metrik (keine Rotation) oder der Kerr-Metrik (rotierendes Loch). Die Form der Nullgeodäte hängt davon ab, an welchem Ort und in welche Richtung das Photon emittiert wird. Die allgemein relativistischen Effekte bleiben nicht ohne Folgen für die Form der Spektrallinie: Nehmen wir vereinfachend an, im Ruhesystem des Plasmas habe die Spektrallinie die Form eines unendlich scharfen Peaks, einer so genannten Delta-Distribution (alternativ lässt sich das Profil auch durch eine Gauß-Funktion, einem 'stark lokalisierten Buckel' beschreiben). Ein Beobachter im Unendlichen (im asymptotisch flachen Bereich der Raumzeit, wie der Relativist sagt) betrachtet nun das, was von der Emissionslinie bei ihm ankommt. In diesem Beobachtersystem (einer Tetrade) zeigt sich, dass die scharfe Spektrallinie des Ruhesystems verschmiert wurde. Sie ist nun schief, asymmetrisch und viel breiter! Das ist im Allgemeinen die Auswirkung relativistischer Effekte, wie Blauverschiebung (*Beaming*), Gravitationsrotverschiebung, aber auch des Doppler-Effekts. Die resultierenden, relativistischen Linienprofile im Beobachtersystem kann man mit dem numerischen Verfahren Ray Tracing auf Computern berechnen und visualisieren. Studien unterschiedlicher Parametersätze lassen so auf die Eigenschaften des Systems aus Schwarzem Loch, Akkretionsscheibe und Korona schließen.

12.25.7 Web-Artikel & Vortrag

Diese Thematik habe ich in meiner Diplomarbeit (2000) und auch in der Doktorarbeit (2004) behandelt. Deshalb gibt es gleich mehrere Web-Artikel und ein Vortrag, die sich mit unterschiedlichem Schwerpunkt dem Thema widmen:

- ◇ Web-Artikel: Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing
- ◇ Web-Artikel: Röntgenlinien - Sendboten von Loch und Scheibe
- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ Vortrag: Relativistic Emission Lines of Accreting Black Holes (Stand Mai 2003)

12.26 Korrespondenzprinzip

Das Korrespondenzprinzip ist eines der wesentlichen Prinzipien, die *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) inspirierten. Daneben sind das Äquivalenzprinzip, das Machsche Prinzip, das Kovarianzprinzip, und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung zu nennen.

12.26.1 Recycling von Theorien

Das Korrespondenzprinzip hat jedoch einen ganz allgemeinen Charakter, ähnlich wie das Kovarianzprinzip. Es besagt, dass alle erfolgreichen Theorien und Modelle, die vorangegangen sind, mit einer neuen Theorie reproduziert werden können müssen. In diesem Sinne steht die neue Theorie mit den alten in Korrespondenz. In der Regel enthalten neue Theorien die älteren Modellbildungen in einem Grenzfall.

12.26.2 Beispiel: Gravitationstheorien

So enthält die ART die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) im Grenzfall verschwindender Gravitationsfelder. Ebenso enthält die ART aber auch die **Newtonsche Theorie** im Limes schwacher Gravitationsfelder und kleiner Geschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit. An eine noch zu findende Quantengravitation ist die Anforderung zu stellen, dass sie im Limes starker Gravitationsfelder und großer Raumskalen die ART enthalten muss.

12.26.3 hierarchischer Aufbau der Naturwissenschaften

Das Korrespondenzprinzip ist bei sukzessiver **Ausgestaltung des naturwissenschaftlichen Weltbildes** von unschätzbarem Wert, sorgt es doch (in der Regel) in einem *konstruktivem Sinn* für einen Zugewinn an Wissen, *ohne* dass bisher Erfolgreiches ad absurdum geführt werden muss. Natürlich kann es auch zu *naturwissenschaftlichen Revolutionen* kommen, wo mit der althergebrachten Sichtweise der Dinge radikal gebrochen werden muss. So revolutionierte die ART die Sichtweise von Raum, Zeit, Energie und Bezugssystem (siehe Raumzeit, Lorentz-Kontraktion und Zeitdilatation), während die Quantentheorie die Begriffe und Vorstellungen von Feld, Teilchen und Messbarkeit revolutionierte (z. B. Unschärfe, Welle-Teilchen-Dualismus, Wellenfunktion, Kopenhagener Deutung, Quantenvakuum, Tunneleffekt).

12.26.4 Web-Essay

◇ Alles graue Theorie?,

12.27 Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung (engl. *cosmic rays*, CR) oder Höhenstrahlung ist schon recht lange bekannt. Es handelt sich um einen **hochenergetischen Teilchenstrom** (*Korpuskularstrahlung*) mit Energien von 10^7 bis 10^{20} eV. Der Fluss der kosmischen Strahlung beträgt in mittleren Breiten etwa zwei Teilchen pro 100 cm^2 und Sekunde. Die hochenergetische Strahlung vermag sogar tief in Wasser und Gestein einzudringen.

12.27.1 Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Der Teilchenstrom besteht aus Protonen, Alphateilchen, Elektronen, schwereren Ionen und Photonen. Diese **Primärstrahlung** wird bis sie auf der Erdoberfläche ankommt verändert, dadurch dass sie in der Hochatmosphäre zahlreiche Reaktionen mit Gasmolekülen und anderen Teilchen eingeht. Die daraus hervorgehende Strahlung heißt **Sekundärstrahlung**, die man in drei Komponenten unterscheidet:

◇ *Neutronenkomponente*, die in einer Höhe von etwa 15 Kilometern erzeugt wird. Hier werden sekundäre Teilchenschauer erzeugt, indem die Primärstrahlung Atomkerne der Hochatmosphäre zerreißt;

◇ *harte Komponente*, bestehend aus Myonen und

◇ *weiche Komponente*, die aus hochenergetischen Photonen und Elektronen besteht.

Photonen der dritten Komponente entstehen beim Zerfall neutraler Pionen und erzeugen die bekannte **Kaskadenstrahlung**: aus den Photonen (Gammaquanten) bilden sich Elektron-Positron-Paare (Energieäquivalent 1.02 MeV). Die Elektronen und Positronen werden an umgebenden Atomkernen abgebremst und erzeugen die charakteristische **Bremsstrahlung**. Die Photonen der Bremsstrahlung sind immer noch sehr energiereich und erzeugen ihrerseits wieder Elektron-Positron-Paare. Diese Teilchenschauer (engl. *air shower*) können mit *Air-shower-Detektoren* beobachtet werden. Diese Detektoren bestehen aus einer Anordnung vieler lichtempfindlicher Photo-Multiplier-Tubes (PMTs).

12.27.2 Mit Einstein-Effekten kommt man weiter

Die Teilchen der kosmischen Strahlung und ihre Sekundärteilchen bewegen sich relativistisch schnell, so dass sie in einem engen Kegel die Atmosphäre passieren. Bei den Myonen konnte gezeigt werden, dass sie dabei weiter kommen, als man klassisch erwarten würde: die Zeitdilatation der Speziellen Relativitätstheorie bewirkt eine Dehnung des Eigenzeitintervalls, so dass sie längere Wege durch die Atmosphäre zurücklegen können.

12.27.3 Spektrum und Herkunft kosmischer Strahlung

Der Abfall der Verteilung der Kosmischen Strahlung bei hohen Energien erklärt man durch den GZK-cutoff, der Mitte der 1960er Jahre postuliert, aber noch nicht zweifelsfrei

nachgewiesen wurde. In den aktuellen Messungen des Air-shower-Detektors AGASA fehlt sogar der GZK-cutoff. Ob 'neue Physik' dabei eine Rolle spielt ist Gegenstand aktueller Forschung. Ebenso ist die **Herkunft kosmischer Strahlung** nach wie vor unklar. Es gibt eine Reihe von Kandidaten, die für die Emission kosmischer Strahlung verantwortlich sein können: Aktive Galaktische Kerne (AGN), Neutronensterne (z. B. der Crab-Pulsar), Überreste von Supernovae und Hypernovae (also SNRs und GRBRs), Mikroquasar, aber auch Annihilation (Vernichtung) von exotischer Materie. In Bezug auf die letzte Quelle kosmischer Strahlung wurde vorgeschlagen, dass zwei **Neutralinos**, leichte, hypothetische Teilchen der Supersymmetrie (SUSY), in Gammastrahlung annihilieren. Dies solle funktionieren, weil man vermutet, dass das Neutralino ein *Majorana-Teilchen*, also sein eigenes Antiteilchen sei. Solche Modelle laufen unter dem Begriff **DarkSUSY**, wo supersymmetrische Teilchen (als ein Bestandteil) die Dunkle Materie konstituieren. Auch das ist Neuland im Überlappungsgebiet von Astrophysik und Teilchenphysik.

12.28 Kosmische Strings

Eine bestimmte Form von topologischen Defekten (siehe dort für anschauliche Erklärung), die in einem Higgs-Mechanismus mit komplexem Higgs-Feld auftauchen. Kosmische Strings können als topologische Erweiterung von *Domänenwänden* (engl. *domain walls*) aufgefasst werden. Solche Erweiterungen haben den Oberbegriff *topologische Defekten*. Sie treten immer bei einer spontanen Symmetriebrechung auf. Insbesondere werden sie bei mit der Symmetriebrechung *reellwertiger* Higgs-Felder erzeugt.

12.28.1 Supraleitung gefällig?

Als neuere Variante gibt es auch die **supraleitenden kosmischen Strings**, in denen die Fermionen keine Ruhemasse haben. Die Ruhemasse erhalten sie erst beim Übergang vom *falschen* ins *echte Vakuum* (diese Begriffe werden beim Higgs-Mechanismus erläutert). Dieser energetisch ungünstige Übergang tritt aber nicht ein, so dass die Fermionen im String gehalten werden.

12.28.2 Achtung, Verwechslungsgefahr!

Es sei darauf hingewiesen, dass die kosmischen Strings **nicht** mit den Strings (1-Branen) der Stringtheorien verwechselt werden dürfen. Beide Objekte haben lediglich eine topologische Ähnlichkeit und sind schlauch- oder fadenförmig. Sie unterscheidet aber, dass die Strings der Stringtheorien Teilchen beschreiben, während kosmische Strings aus falschen Vakua bestehen und Relikte einer gebrochenen Symmetrie sind (deshalb ist das Attribut *kosmisch* wesentlich). Es ist denkbar, dass die kosmischen Strings in der Entwicklung des Universums verschwunden sind.

12.28.3 Status: keine Evidenz

Astronomen haben bisher keinerlei Hinweise beobachtet, dass kosmische Strings existieren oder existiert haben. Die beobachtenden Kosmologen fahnden jedoch auch nach diesen Gebilden.

12.29 Kosmographie

Derjenige Zweig der Kosmologie, der sich gerade mit der Kartierung des Universums beschäftigt. Dazu müsste man ein Koordinatensystem konstruieren, dass sämtliche Koordinaten kosmischer Objekte in der vierdimensionalen Raumzeit fixiert.

12.29.1 Entfernungsmessung

In der Praxis gestaltet es sich so, dass die interessante Größe neben der Position am Himmel die **Entfernung** ist. Im lokalen, d. h. nahen Universum ist die Angabe dieser Größe meist kein Problem. Auf kosmologischen Skalen stößt man allerdings schnell auf Probleme, weil die Entfernung nicht direkt abzuleiten ist, und erst aus (möglicherweise unsicheren) Modellen folgt.

Als Entfernungsindikatoren dienen in der Astronomie diejenigen Objekte, deren Physik man gut verstanden hat und deren *relative Helligkeit* (die, die man beobachtet) und *absolute Helligkeit* (die 'vor Ort'; nicht direkt beobachtbar, folgt erst aus einem Modell) bekannt sind. Aus dem **Entfernungsmodul** folgt dann die Entfernung, was aber nur bis zu gewissen Distanzen gültig ist.

12.29.2 Zünden wir ein paar Standardkerzen an

Standardkerzen meint in der Astronomie gerade solche gut verstandenen Quellen, von denen man die 'Helligkeit vor Ort', die Leuchtkraft, kennt. Die wichtigsten Standardkerzen sind die Cepheiden, die RR Lyrae-Sterne (Haufenveränderliche) und die Supernovae Typ Ia. Den Cepheiden kommt dabei das stärkste Gewicht zu, weil sie oft genutzt werden, um andere Methoden zu eichen. Cepheiden sind so hell, dass man ihre Helligkeitskurve auch in entfernten (extragalaktisch) Galaxien beobachten kann.

12.29.3 Parameter der Kosmographie sind

- ◇ Rektaszension,
- ◇ Deklination
- ◇ und kosmologische Rotverschiebung z.

Rektaszension und Deklination sind zwei Winkelangaben, die gerade die Position an der Himmelssphäre festlegen. Die **Astrometrie** versucht gerade (vor allem bei Sternen) diese beiden Winkel exakt zu vermessen (Satelliten Hipparchos, geplant: GAIA, DIVA). Die kosmologische Rotverschiebung ist gemäß des Hubble-Gesetzes und der Friedmann-Weltmodelle gerade ein Maß für die Entfernung und wesentlich leichter spektroskopisch oder photometrisch zugänglich.

12.29.4 Blick auf die großräumige Struktur

In 3D-Katalogen versuchen die Astronomen mit diesen drei Angaben die **großräumige Struktur** (engl. *large scale structure*, LSS) des Universums zu entschlüsseln. Solche Untersuchungen offenbarten gerade die wabenartige Struktur vieler Galaxienhaufen und die weit ausgedehnten Leerräume, die Voids, dazwischen.

12.30 Kosmologie

Die Kosmologie beschäftigt sich mit der Entstehung, der globalen Entwicklung und den großräumigen Strukturen des Universums.

12.30.1 Die zentralen Fragen der Kosmologie

- ◇ *Wie ist das Universum entstanden?*
- ◇ *Wie entwickelt sich das Universum?*
- ◇ *Wie endet der Kosmos?*
- ◇ *Was sind die wesentlichen Energie- und Materieformen im Kosmos?*
- ◇ *Welche Physik beschreibt den Kosmos angemessen?*
- ◇ *Welche Eigenschaften hat die globale Raumzeit des Universums?*
- ◇ *Gibt es ein Multiversum?*
- ◇ *Welche Topologie hat unser Universum?*

12.30.2 Historisches

Der Mensch betreibt Kosmologie seit er sich seiner selbst bewusst geworden ist und den Blick in die Natur und an den Himmel gerichtet hat. Wichtige Einflüsse auf die moderne Kosmologie hatten sicherlich die Babylonier, Griechen und andere Kulturen. Die moderne Kosmologie entstand erst als eigenständiger wissenschaftlicher Zweig mit dem Aufkommen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Denn erst Einsteins Theorie mit den geeigneten Begriffen von Raum und Zeit ermöglichte eine adäquate mathematische Beschreibung. Unter diesem Gesichtspunkt ist die moderne kosmologische Forschung keine hundert Jahre alt!

12.30.3 Einsteins Universum

Ausgehend von einigen Grundprinzipien - dem kosmologischen Prinzip, dem Weylschen Postulat und der ART als mathematisches Werkzeug - ist eine erfolgreiche Beschreibung des Kosmos als Ganzes möglich, die die Friedmann-Weltmodelle liefert. Um allen Pionieren gerecht zu werden spricht man auch von den **Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Universen** (FLRW-Kosmologie). Diese Theorie beschreibt dynamische Modelluniversen *konstanter* Krümmung k, die sich in ihrer Entwicklung stark unterscheiden. Die verwendete Raumzeit in dieser Kosmodynamik ist die Robertson-Walker-Metrik. Mit dem Vorzeichen des Krümmungsparameters liegt dann die **Geometrie des Universums** fest (nicht jedoch dessen Topologie - dazu später).

12.30.4 Das Standardmodell der Kosmologie ΛCDM

Aktuell stimmen die meisten Kosmologen darin überein, dass das Universum

- ◇ unendlich sei;

- ◇ dynamisch sei;
- ◇ im Urknall entstanden sei;
- ◇ seither expandiere und zu späten Entwicklungszeiten sogar beschleunigt expandiere;
- ◇ in späten Epochen dominiert werde von der Dunklen Energie
- ◇ und die kosmologische Konstante die bevorzugte Form Dunkler Energie sei;
- ◇ global flach sei (Krümmung null).

Mittlerweile hat sich ein *Standardmodell der Kosmologie* herausgebildet, das in folgender Hinsicht vergleichbar ist dem Standardmodell der Teilchenphysik: In beiden Standardmodellen gibt es eine feste Anzahl freier Parameter, die nicht die Theorie festlegt, sondern die experimentell mit unterschiedlichen Methoden sehr exakt bestimmt werden müssen. In der Kosmologie nennt man sie den **Satz kosmologischer Parameter**. Das sind die

- ◇ **Hubble-Konstante**, die ein Maß für die (lokale) Expansionsgeschwindigkeit des Universums ist.
- ◇ **Dichteparameter** Ω unterschiedlicher Energieformen im Universum. Die dominante Energieform ist mit einem Anteil von etwa zwei Dritteln die **Dunkle Energie**. Daneben gibt es etwa ein Drittel Beimischungen von der **Dunklen Materie**. Die uns vertraute baryonische (besser gesagt hadronische) Materie, aus der wir auch selbst bestehen, spielt für die Dynamik des Kosmos keine Rolle und kommt nur in Spuren (wenige Prozent) vor;
- ◇ **w-Parameter**, die alternativ zu den Dichteparametern geeignet sind, um die unterschiedlichen Energieformen zu klassifizieren. Die w- oder eos-Parameter hängen im Allgemeinen von der kosmologischen Rotverschiebung ab.
- ◇ **Krümmung** des Universums, die aus der Summe aller Energiedichten der unterschiedlichen Materie- und Energiedichten folgt. Wie unter Friedmann-Weltmodelle auch in Form von Gleichungen dargelegt wird, legen die Daten der experimentellen Kosmologie ein **global flaches Universum** nahe. Das Universum kann deshalb wie ein Euklidischer Raum aufgefasst werden, in dem die Sätze der ebenen Geometrie gelten. Es gibt allerdings (aufgrund unvermeidbarer Messfehler) eine leichte Unsicherheit darin, ob die Krümmung wirklich *exakt verschwindet*. Dies ermöglicht als Alternativen zum flachen Universum hyperbolische Universen (positive Krümmung), wie das **Dodekaeder-Universum**, oder das **Horn-Universum**. Sie sind bisher noch konsistent mit den Beobachtungen.

12.30.5 Die Urknall-Theorie

Das Standardmodell der Kosmologie sieht im **heißen Urknall** den Ursprung des Universums. Es besagt, dass vor etwa 13.7 Milliarden Jahren aus einer Singularität heraus Raum und Zeit geboren wurden. Die Raumzeit, die das Universum als Ganzes beschreibt ist nicht statisch, sondern dynamisch: seit dem Urknall dehnt sich der Kosmos aus. Als Erfinder der Urknalltheorie muss aus heutiger Sicht der belgische Priester und Kosmologe *Abbé Georges*

Abbildung 12.8: Die vier Säulen der Urknallhypothese.

Lemaître (1894 - 1966) angesehen werden, der die Expansion des Modell-Universums erkannte, und es rückwärts in der Zeit extrapolierte. Dabei fand er einen 'beliebig kleinen Ort in Raum und Zeit'. Lemaître sprach hier von der **Geburt des Raums**.

Die heute gängige Bezeichnung Urknall verdanken wir dem englischen Wort Big Bang, das ironischerweise als Schimpfwort von einem der schärfsten und kompetentesten Gegner der Urknalltheorie gedacht war: *Sir Fred Hoyle* (1915 - 2001). Hoyle war Verfechter der von ihm mit entwickelten *Steady-State-Theorie*, nach der das Universum zwar expandiere, aber eine ständige Neuerschaffung der Materie erforderlich sei, damit die mittlere Dichte des Kosmos konstant gehalten werden könne.

Kurioserweise erklärt die Urknall-Theorie nur die Folgen des Urknalls, aber nicht dessen Ursache. Ein möglicher Grund für den Urknall ist das Ekpyrotische Modell bzw. Zyklische Universum, das aber ein kühne, spekulative und bislang nicht belegte Behauptung ist.

12.30.6 Stützen des Urknalls

Viele astronomische Beobachtungen sprechen für den Urknall – siehe Grafik 12.8. Es begann 1929 mit *Edwin Hubbles* Beobachtung, dass Galaxien eine **Fluchtbewegung** ausführen (Hubble-Gesetz), setzte sich fort mit den erfolgreichen Vorhersagen der Elementhäufigkeiten durch die **primordiale Nukleosynthese** (die einen **heißen** Urknall erforderte) und der Entdeckung der **kosmischen Hintergrundstrahlung**, die als elektromagnetisches Relikt des heißen Feuerballs aufgefasst werden muss. Aussagen über den kosmologische Parametersatz sind auch durch sehr exakte Abstandsmessungen im Kosmos möglich. Aus diesem Grund benötigen die Astronomen Standardkerzen und verwenden vor allem weit entfernten **Supernovae** vom Typ Ia - möglicherweise bewähren sich auch die Gammastrahlenausbrüche als geeignete Standardkerzen in noch größerer Entfernung. Auch die beobachtete **großräumige Struktur der Galaxien und Galaxienhaufen** ist mit der

Urknall-Theorie vereinbar.

Was der Hypothese vom Urknall so unglaublich viel Gewicht verleiht: alle diese Methoden, bezeugen unabhängig voneinander einen heißen und räumlich kleinen Ursprung unseres Universums.

12.30.7 Inflation

Die Urknalltheorie allein vermag jedoch *nicht* alles zu erklären. So traten in der Kosmologie einige Probleme auf, die unter den Bezeichnungen **Homogenitätsproblem, Horizontproblem, Monopolproblem und Flachheitsproblem** bekannt wurden. Diese Unstimmigkeiten können mit einem exponentiellen und überlichtschnellen Wachstum des sehr jungen Universums gelöst werden. Diese Epoche heißt **Inflation**. Erst Anfang der 1980er Jahren erfand der Kosmologe und Teilchenphysiker *Alan Guth* dieses Modell, das in der Folgezeit von vielen Forschern weiterentwickelt und verbessert wurde. Eine inflationäre Phase ist in der Kosmologie auch deshalb notwendig, um die Zeitskalen der Entwicklung des Universums - das rapide Wachstum - zu erklären.

12.30.8 Materieära

Danach schlossen sich andere Frühphasen an. Es kam zur Kondensation von Elementarteilchen: In der **Leptogenese** entstanden die Leptonen (z. B. Elektronen, Positronen, Myonen und Neutrinos). In der **Nukleosynthese** bildeten sich primordiale Atomkerne (*Nuklide*) und in der **Baryogenese** schließlich neutrale Atome.

Die letztgenannte Phase lief vermutlich folgendermaßen ab: Der sich aus dem Urknall entwickelnde **heiße Feuerball** dehnte sich aus und kühlte sich dabei ab. Irgendwann war er so kalt, dass die in der Leptogenese und Nukleosynthese gebildeten Ladungsträger sich zu neutralen Atomen verbanden. Dies markiert den Zeitpunkt der Rekombinationsepoche bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ bzw. etwa 400000 Jahre nach dem Urknall.

12.30.9 Hintergrundstrahlung: Informationen einer urzeitlichen Ära

Photonen werden in einem heißen Plasma so sehr gestreut, dass Plasmen undurchsichtig - optisch dick, wie die Astronomen sagen - sind. Aus diesem Grund können wir nicht ins Innere der Sonne oder durch eine Kerzenflamme schauen. Wenn sich aber die freien, elektrischen Ladungen im Plasma zusammenschließen, weil das Plasma abkühlt, so ändern sich schlagartig die Transparenzeigenschaften: das Plasma wird ein neutrales Gas und die Photonen können sich frei bewegen, weil sie nicht mehr an einem Plasma gestreut werden. Genau das geschah in der Rekombinationsära.

Die Urphotonen machten sich nun auf den Weg in die Weite des Alls und wurden aufgrund der kosmischen Expansion extrem rotverschoben. Nach mehr als 13 Milliarden Jahren treffen sie den irdischen Beobachter bei $z = 0$, der diese Strahlung als **kosmische Hintergrundstrahlung** detektiert. Physikalisch gesprochen handelt es sich um Plancksche Strahlung, also Wärmestrahlung. Denn das Urplasma hatte durch den thermischen Kontakt der Ladungen eine einheitliche Temperatur von etwa 3000 Kelvin ausbilden können. Durch die kosmologische Rotverschiebung sind die Photonen der Rekombinationsära fast auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt worden: Sie verloren einen Großteil ihrer Strahlungsenergie, weil sie gegen die Expansion der Raumzeit 'ankämpfen' mussten und befinden sich daher bei

der Ankunft auf der Erde mehr am roten Ende des Spektrums - auch ihre Intensität wurde stark unterdrückt. Was dem Astronomen bleibt, ist eine 2.72 Kelvin kalte, schwache und fast isotrope Wärmestrahlung, die auch Drei-Kelvin-Strahlung genannt wird.

Astronomen messen also direkt ein Relikt des heißen Urknalls!

Der **Mikrowellensatelliten WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, NASA) misst die kosmische Hintergrundstrahlung. Aus diesen Daten lassen sich die kosmologischen Parameter ableiten. Die WMAP-Daten ergänzten im Jahr 2003 und 2006 die bisherigen Daten des Mikrowellensatelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*, 1990) und zahlreicher Ballonexperimente (BOOMERANG, MAXIMA, um 2000) mit hoher Präzision. Daraus folgt unter anderem ein **Alter des Universums** von etwa **13.7 Milliarden Jahren**.

Darüber hinaus enthält die kosmische Hintergrundstrahlung viele weitere Detailinformationen über unser Universum, z. B. in ihrer *Anisotropie* und *Polarisation* (Einzelheiten unter Eintrag Hintergrundstrahlung).

12.30.10 Strukturbildung

Gegenstand der Kosmologie ist außerdem die Entstehung von Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen (engl. *galaxy clusters*) und Galaxiensuperhaufen. Dieses Gebiet subsumieren Kosmologen unter der Bezeichnung **Strukturbildung**. Galaxien bilden global eine *wabenförmige Struktur* im Universum. Auf den Knotenpunkten (*Vertices*) der Waben sitzen die Galaxiensuperhaufen, während das Innere der Waben leer ist. Die letztgenannten 'Hohlräume' oder Leerräume bezeichnet man als Voids, die eine Ausdehnung von 50 bis 100 Mpc (etwa 150 bis 300 Mio. Lj) haben. Die Entwicklung zu solchen, großräumigen Strukturen (engl. *large-scale structure*, LSS) muss auf der Zeitskala der Hubblezeit abgelaufen sein. Die Hubblezeit ist gerade der Kehrwert der Hubble-Konstanten und beträgt gut 13 Milliarden Jahre. Die Kosmologen versuchen zu erklären, wie in diesem Zeitraum die lokal beobachtbaren Strukturen des Universums inklusive intelligentem Leben entstanden sind - eine enorme Herausforderung!

12.30.11 kosmische Zeit

Zu jedem aus einem Spektrum ermittelten Rotverschiebungswert kann man ein **Alter des Universums** zuordnen, die so genannte *kosmische Zeit*. Sie folgt erst als Zahlenwert unter Zugrundelegung eines kosmologischen Modells. Kennt man den Gehalt an Dunkler Energie, Dunkler Materie, baryonischer Materie, die Hubble-Konstante sowie das Vorzeichen der Krümmung des Universums so ist die kosmische Zeit festgelegt.

12.30.12 Entwicklungsschemata

Die Entwicklung des Universums lässt sich chronologisch in unterschiedliche Epochen oder Phasen einteilen. Je nach Perspektive ergeben sich unterschiedliche Benennungen der verschiedenen Phasen, die im Folgenden präsentiert werden. Details zu jeder einzelnen Phase können unter entsprechend verlinktem Eintrag gelesen werden:

Entwicklungsphasen des Kosmos unter dem Teilchenaspekt

Das Universum begann in der Planck-Ära ging über in die Quark-Ära, danach in Hadronen-Ära, Leptonen-Ära, Strahlungsära und Materie-Ära (siehe oben).

Entwicklungsphasen des Kosmos unter dem Theorieaspekt

Die physikalische Theorie zur Beschreibung des Beginns des Universums ist die Quantengravitation, die derzeit in den Stringtheorien und der Loop-Quantengravitation mögliche Ausprägungsformen hat. Danach folgten Große Vereinheitlichte Theorien, Relativitätstheorie, elektroschwache Theorie, Quantenelektrodynamik, schwache Theorie und Quantenchromodynamik.

Entwicklungsphasen des Kosmos unter dem Aspekt der Naturkraft

In jeder der oben genannten Epochen herrschten unterschiedliche Naturkräfte vor: Die Urkraft herrschte in der Planck-Ära als einzige Kraft - über sie weiß man in Ermangelung einer physikalischen Theorie nichts. Diese Kraft spaltete sich auf in X-Kraft und Gravitation. Aus der X-Kraft wurden elektroschwache Kraft und starke Kraft. Und schließlich entstanden durch weitere Abkühlung des Kosmos die vier uns heute vertrauten Naturkräfte: Gravitation, elektromagnetische Kraft, schwache Kraft und starke Kraft. Der Weg zum Urknall hin ist also verbunden mit einer nach und nach abnehmenden Zahl an Kräften. Die entsprechende Theorie, alle Kräfte zu vereinheitlichen, heißt **Unifikation**!

Begleitend zu diesen kosmischen Epochen empfiehlt sich der Abschnitt 'Meilensteine der Kosmologie' unter dem Lexikoneintrag Rotverschiebung, der konkrete Beispiele für verschiedene Werte von z vorstellt.

12.30.13 Herausforderungen der Kosmologie

1) Dunkle Energie: Die wichtigste und rätselhafteste Zutat für unser Universum ist die Dunkle Energie. Es gibt aktuell eine Reihe von sehr unterschiedlichen kosmologischen Modellen, die eine Aussage über ihre Natur machen wollen. Anfangs als kosmologische Konstante (*Albert Einsteins* Λ) angenommen, wurde versucht, sie mit dem Quantenvakuum zu interpretieren. In den Quintessenz-Modellen nehmen die Theoretiker sie als *zeitlich veränderliche* Dunkle Energien an, die durch Skalarfelder wie dem Cosmon, dem Radion oder der Spintessenz repräsentiert werden. Ein neueres Modell malt eine sehr düstere Zukunft aus, den Big Rip, der durch ein Anschwellen der Phantom-Energie über alle Maßen ausgelöst wird. Die Phantom-Energie zerreißt das Universum! Welches Modell tatsächlich in der Natur realisiert ist, muss die weitere Forschung ergeben. Zurzeit erlebt Einsteins kosmologische Konstante (also eine zeitlich konstante Dunkle Energie) eine Renaissance und wird vor allem von den Supernovamessungen favorisiert. Die Unkenntnis über die physikalische Natur der Dunklen Energie ist sicherlich das Schwerwiegendste der Physik, denn weder Astrophysik noch Teilchenphysik können dafür eine befriedigende und allgemein akzeptierte Lösung anbieten.

2) rasante Strukturentwicklung: Ebenso müssen die Beobachtungen fernster Objekte und ihre rasante Entwicklung auf der Skala von nur wenigen hundert Millionen Jahren erklärt werden können. Denn schon nach dieser kosmologisch gesehen kurzen Zeitdauer nach dem Urknall waren sie schon vorhanden.

3) Hierarchieproblem: Das Hierarchieproblem bezeichnet die beobachteten Unterschiede in der Stärke der vier fundamentalen Naturkräfte. Die Gravitation ist die schwächste von allen, was von einigen Teilchenphysikern mit der Hypothese begründet wird, dass sie durch zusätzliche Raumdimensionen (Extradimensionen) ausgedünnt werde. Eine Vielzahl von Experimenten hat bislang noch keinerlei Anhaltpunkte für die Existenz dieser Zusatzdimensionen geliefert.

4) Inflation mit oder ohne Skalarfeld: Außerdem ist nicht klar, was genau die Epoche der Inflation hervorgerufen hat. Ein Inflatonfeld oder quantisierte Raumzeit wie in der Loop-Quantengravitation?

5) Topologie: Über die kosmische Topologie - also wie Teile des Universums miteinander verknüpft sind - macht die ART keinerlei Aussagen. Im Allgemeinen sind für feste Krümmung k sowohl offene (unendliche), als auch geschlossene (endliche) Topologien möglich. Der Einfluss der Topologie auf die Entwicklung und Struktur des Universums wird oft unterschätzt. So könnte das Universum tatsächlich kleiner sein, als allgemein angenommen und kosmische Objekte könnten 'topologisch gelinst' werden. Hier entstehen 'Geisterbilder', 'kosmische Fata Morganen', dadurch dass das Universum womöglich komplizierte Windungen aufweist. Im Konkordanzmodell (engl. *concordance model*) ist daher die einfachstmögliche Topologie enthalten, nach der unterschiedliche Gebiete im Kosmos *nicht* miteinander vernetzt sind. Auf der Basis dieses Standardmodells werden weitere Eigenschaften des Universums untersucht. Es gibt neuerdings auch Analysen, bei denen versucht wird, die Topologie zu entschlüsseln - z. B. müssten topologische Linsen auf der Himmelskarte der Hintergrundstrahlung als verräterisches Fleckenmuster auftreten. Einzelheiten werden unter dem Eintrag Topologie diskutiert.

12.30.14 Neue Kosmologie

Die aktuellen Forschungsthemen der modernen, theoretischen Kosmologie widmen sich auch ungewöhnlichen Zugängen, um die oben genannten Herausforderungen zu bewältigen. Die Theoretiker versuchen dabei über die Standardkosmologie hinauszugehen und betrachten Modelle abseits der bewährten Relativitätstheorie und des Standardmodells der Teilchenphysik.

Zu diesen neuen Formen der Kosmologie gehören modifizierte Gravitationstheorien, Quantenkosmologie, Stringkosmologie, Branenkosmologie, Chaplygin-Kosmologie und Skalarfeldtheorie. Die Skalarfeldtheorien sind ein Teilgebiet der Quantenfeldtheorien und involvieren Skalarfelder wie das Inflaton, Quintessenzmodelle wie z. B. Cosmon oder Radion.

Diese Formen neuer Kosmologien werden derzeit sehr intensiv erforscht. Die Modelle sind physikalisch äußerst interessant und weisen sehr attraktive Eigenschaften auf. Aus der Vogelblickperspektive kann man sich zu folgendem Pauschalurteil hinreißen lassen: Mit einem elegant gelösten Problem der Standardkosmologie handeln sich die Kosmologen leider neue Probleme ein. Es gab bislang keinen Durchbruch mit den neuen Kosmologien. Das kann sich mit der Flut neuer Beobachtungsdaten, z. B. von Tiefenfeldbeobachtungen oder von Teilchenbeschleunigern der neuen Generationen, jedoch schon bald ändern.

12.31 Kosmologische Konstante

Die kosmologische Konstante, symbolisiert durch den griechischen Buchstaben Λ, wurde von *Albert Einstein* (1879 - 1955) als neue Größe in die Kosmologie im Jahr 1917 eingeführt. In den Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) tauchte daher ein neuer Term auf, der seither auch Λ-Term genannt wurde. Aus heutiger Sicht ist die kosmologische Konstante eine *zeitlich unveränderliche* Form **Dunkler Energie** (engl. *dark energy*).

Abbildung 12.9: Lambda und andere Formen Dunkler Energie.

12.31.1 Einsteins Motivation

In der Retrospektive ist es sehr erstaunlich, was Einstein zur Erfindung seiner kosmologischen Konstante getrieben hatte. Kurz gesagt war es Ästhetik. Einsteins Ziel war es ein statisches, homogenes Universum in eine konsistente Theorie einzubetten, was damals ein - und insbesondere sein - favorisiertes Weltmodell war. Ein dynamisches Universum, was wir heutzutage vermutlich als selbstverständlich erachten, kam den Menschen der damaligen Zeit nicht in den Sinn.

12.31.2 Blick auf die Feldgleichung mit Λ

Einsteins Feldgleichung ist ein komplizierter Satz gekoppelter, partieller Differentialgleichungen mit beliebig vielen Lösungen. Bis heute sind nicht alle Lösungen bekannt, weil das mathematisch bei einem solch schwierigen Gleichungstyp *prinzipiell* nicht möglich ist. Durch Annahmen z. B. über die Symmetrie oder allgemeiner gesprochen durch *Randbedingungen* kann man die Lösungsmenge verkleinern. Die Hinzunahme eines weiteren Terms, hier des kosmologischen Λ-Terms, verändert sich natürlich auch die Lösungsstruktur. Wie die Gestalt der Feldgleichung mit Lambda-Term

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda\, \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\, \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

zeigt, muss Λ mit dem metrischen Tensor multipliziert werden, damit Λ zu den Tensoren addiert werden kann. Physikalisch kann man diesen Term als langreichweitige Wechselwirkung interpretieren, die für positives Lambda als 'kosmische Abstoßung' (Antigravitation) und für negatives Lambda als 'kosmische Anziehung' interpretiert werden kann.

12.31.3 Die Natur meldet sich zu Wort

Kurz nach Einsteins Einführung der kosmologischen Konstante wurde durch den amerikanischen Astronomen *Edwin Hubble* (1889 - 1953) die kosmische Expansion anhand von Fluchtbewegungen einiger Galaxien experimentell entdeckt: das Hubble-Gesetz. Anders gesagt bedeutete das:

Das beobachte Universum ist *nicht statisch.*

12.31.4 Werk eines Genies oder eines Esels?

Andere kosmologische Modelle wurden gefunden, die dynamische Modell-Universen *ohne* kosmologische Konstante erklären konnten. Im Zuge dieser Entwicklungen nahm Einstein seine kosmologische Konstante zurück, weil sie nicht mehr notwendig erschien. Er ging sogar so weit die Einführung seines Λ-Terms als '*die größte Eselei seines Lebens*' zu bezeichnen - ein verfrühtes Urteil, wie sich herausstellen sollte. So erkannte bereits der belgische Kosmologe *Abbé Georges Lemaître* (1894 - 1966), dass man den Λ-Term nicht ohne weiteres wegdiskutieren könne.

In der weiteren kosmologischen Forschung wurde vor allem auf der Grundlage immer besserer Beobachtungsdaten klar, das man nicht auf Einsteins Λ verzichten könne. Im Gegenteil: Im Jahr 1998 beobachteten die Kosmologen anhand weit entfernter Sternexplosionen, dass sich das Universum sogar beschleunigt ausdehnt (*Perlmutter et al., Supernova Cosmology Project*). Daher brauchten sie eine weitere Stellschraube in ihren Modellen vom Universum, um die theoretischen Modelle an die Beobachtungsdaten anpassen zu können. Einsteins Intuition war richtig.

12.31.5 Ist Λ konstant?

In den Friedmann-Weltmodellen werden daher Terme mit nicht verschwindender kosmologischer Konstante berücksichtigt. Kosmologische Messungen der letzten Jahre (Ballone BOOMERANG, MAXIMA; Mikrowellen-Satelliten COBE, WMAP, ab 2008: PLANCK) sprechen in der Tat für eine Lambda-Kosmologie. Auf Einsteins Λ möchten die Kosmologen ungern verzichten. Eine ganz andere Frage ist, ob der Zahlenwert, der mit Λ assoziiert ist, zu allen Zeiten gleich ist oder ob es einen Spielraum für Variationen gibt.

Die Theorie lässt diesen Spielraum zu: der Lambda-Term muss nicht notwendig konstant sein. Doch die aktuellen Beobachtungen der experimentellen Kosmologie lassen diesen Spielraum *nicht* zu - zumindest **nicht in den letzten neun Millarden Jahren**. Woher wissen das die Beobachter? Sie vermessen eine Vielzahl von hochrotverschobenen Supernovae vom Typ Ia mit dem Weltraumteleskop Hubble (*Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512; bestätigt 2006). Diese Daten zeigen, dass Einstein mit seiner Intuition Recht hatte und tatsächlich eine kosmologische **Konstante** vorliegt, die *zeitlich unveränderlich* ist. Big Crunch und Big Rip erscheinen nach diesen Daten als sehr unwahrscheinliche Szenarien für die Zukunft des Universums.

12.31.6 Probleme mit Zufälligkeiten

Erstaunlich ist allerdings der Umstand, dass die kosmologische Konstante einen Wert aufweist, der gerade in derselben Größenordnung ist, wie die Anteile der anderen Materieformen im lokalen Universum, insbesondere der Dunklen Materie. Das kursiert in der Fachwelt unter dem Begriff **Koinzidenzproblem**. Einen Ausweg aus diesem Zufallsproblem haben die Kosmologen in Gestalt der Quintessenz-Modelle vorgeschlagen. Quintessenzen sind im Gegensatz zur kosmologischen Konstante eine **zeitlich veränderliche** Form von Dunkler Energie. Eine Kosmologie mit kosmologischer Konstante (**ΛCDM**) unterscheidet sich von einer mit Quintessenz (**QCDM**) dadurch, dass die kosmologische Konstante als eine **konstante Vakuumenergiedichte** interpretiert wird, wohingegen die Quintessenz ein skalares, sehr leichtes Teilchen ist. Es wurden bei den Quintessenz-Modellen wiederum ganz verschiedene Formen vorgeschlagen: sie heißen beispielsweise Cosmon, Radion oder

Spintessenz, die eine *langsame, zeitliche Veränderlichkeit der Dunklen Energie* bewirken. Die extremste Form ist die Phantom-Energie, die einen totalen Zerriss des Universums, den **Big Rip**, herbeiführt.

12.31.7 Herausforderungen an Beobachtung und Theorie

Die aktuellen Messungen des Mikrowellen-Satelliten WMAP und des Weltraumteleskops Hubble sprechen eher für die kosmologische Konstante als für die Quintessenz oder Phantom-Energie. Die Kosmologen wollen natürlich noch tiefer in den Kosmos schauen, noch weiter entfernte Sternexplosionen aufspüren, um eine noch bessere Datenlage zu haben. Dazu dienen auch Tiefenfeldbeobachtungen (engl. *deep fields*) und neue Projekte wie die *Dark Energy Task Force*. In der Zukunft der kosmologischen Beobachtungen könnten sich auch Gamma Ray Bursts, Gravitationswellen und Neutrinos als wertvolle Werkzeuge erweisen.

Neben diesen experimentellen Herausforderungen muss aber vor allem auf theoretischer Seite quantitativ schlüssig geklärt werden, was die kosmologische Konstante für eine physikalische Natur hat. Denn die oben erwähnte Vakuuminterpretation klingt zwar plausibel, hat aber auch klare Schwächen.

12.31.8 Λ in anderen Bereichen der Astrophysik

Die kosmologische Konstante hat nicht nur Einzug in die Kosmologie gehalten. Eine anderer Anwendungsbereich für Λ-Fluide - wie man in der ART den Λ-Term verallgemeinert nennt - sind kompakte Objekte wie die Gravasterne. Bei dieser Form von Vakuumstern existiert im Innern eine Blase aus Dunkler Energie, die im Wesentlichen die Masse des Sterns stellt. Damit rückt die die Dunkle Energie aus vielerlei Hinsichten in den Fokus der Astrophysiker.

12.32 kosmologisches Prinzip

Das kosmologische Prinzip (engl. *cosmological principle*, kurz **CP**) besagt, dass auf einer großen Längenskala, die vergleichbar ist mit der Größe des Universums, kein Ort im Kosmos gegenüber einem anderen ausgezeichnet ist. Es verallgemeinert im Kern das *Kopernikanische Prinzip*, das das geozentrische durch das heliozentrische Weltbild ablöste. Universen, die das kosmologische Prinzip erfüllen, nennt man **CP-Universen**.

12.32.1 Isotropie

Mit anderen Worten formuliert, sagt das kosmologische Prinzip aus, dass der Kosmos auf großen Skalen in allen Richtungen gleich ausschaut. In der Wissenschaft nennt man diese Eigenschaft **Isotropie**.

12.32.2 Homogenität

Daraus folgt unmittelbar eine zweite Eigenschaft des Universums, nämlich die Gleichartigkeit oder Einheitlichkeit, d. h. dass die Materie im Kosmos relativ gleichmäßig verteilt ist. Auch dafür gibt es einen Fachbegriff, nämlich **Homogenität**.

12.32.3 Auf welcher Längenskala?

Das kosmologische Prinzip sagt uns also, dass das Universum isotrop und homogen ist. Wenn wir uns allerdings im nahen Kosmos umschauen, so ist das mitnichten der Fall: Hier treten Unregelmäßigkeiten auf, denn es gibt einen Wechsel von 'Massenverdichtungen' - die Sonne, um die die Planeten kreisen - und von 'Leere', denn der interplanetare Raum dazwischen ist mehr oder weniger ein Vakuum. Offensichtlich ist die hier betrachtete Längenskala von einigen Astronomischen Einheiten) zu klein.

Erhöhen wir die Skala weiter, zu einigen Parsec, so begegnen wir den Sternen in der Milchstraße - noch immer ist die Skala zu klein, weil sich Orte mit Sternen mit sternlosen Gebieten abwechseln. Das ändert sich auch nicht, wenn wir auf eine Skala bis einige zehntausend Parsec gehen - das ist gerade in etwa der Durchmesser der Milchstraße ($\sim$ 100000 Lichtjahre).

Bei einer Skala von einigen hunderttausend bis Millionen Parsec nähern wir uns der Skala unseres lokalen Galaxienhaufens (der *Lokalen Gruppe*) und nahen Galaxienhaufen wie dem Virgo-Haufen. Auch dann ist noch keine Isotropie zu beobachten.

Erst bei entfernten Galaxien ist näherungsweise Isotropie gegeben, etwa bei einigen hundert Millionen bis Milliarden Parsec.

12.32.4 Isotrope Hintergrundstrahlung

Eine (fast) perfekte Isotropie weist die kosmische Hintergrundstrahlung auf. Um das veranschaulichen, stelle man sich einen perfekten, blauen Himmel bei schönstem, irdischen Wetter vor. Die Hintergrundstrahlung weist einen noch höheren Grad an Isotropie auf, als der perfekt blaue Himmel!

Die Isotropie schlägt sich darin nieder, dass man dem Spektrum der Hintergrundstrahlung dasjenige von Wärmestrahlung zuweisen kann. Die Beobachtungsdaten passen in idealer Weise zu einer solchen Planck-Kurve mit 2.72 Kelvin.

Dennoch wurden winzige Unregelmäßigkeiten (*Anisotropien*) in der Hintergrundstrahlung entdeckt, die ausgedrückt in der Temperatur im Bereich von Mikrokelvin liegen. Für diese 1989/90 gemachte Entdeckung gab es den Nobelpreis für Physik 2006.

Die Hintergrundstrahlung kommt aus den frühen Phasen des Universums (der Rekombinationsära), als es noch keine Sterne gab. Der Kosmos war erst knapp 400000 Jahre alt und auch deutlich kleiner.

12.32.5 Die perfekte Version

Das *perfekte* kosmologische Prinzip besagt, dass das Universum in Raum **und** Zeit unveränderlich (**statisch**) sei. Dieser Ansatz führt auf Modell-Universen wie das statische Universum oder das **Steady-State-Modell**. Beide Modelle weichen deutlich von den dynamischen, d. h. sich zeitlich entwickelnden Friedmann-Modellen ab. Die experimentelle Kosmologie lässt zurzeit nur den Schluss zu, dass wir in einem **expandierenden Friedmann-Universum** leben, das durch die Wirkung der Dunklen Energie ewig expandieren wird.

12.33 kovariante Ableitung

Die kovariante Ableitung ist eine der wesentlichen Differentialoperationen, die man auf Tensoren in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) anwendet. Daneben gibt es die

partielle Ableitung, **absolute Ableitung** und die Lie-Ableitung. Die kovariante Ableitung weist in ihrer Grunddefinition Ähnlichkeiten zum Differenzen- bzw. Differentialquotienten der Analysis einer Veränderlichen auf. Anschaulich kann die kovariante Ableitung als ein Vergleich zweier **parallel transportierter** Tensoren verstanden werden.

Ihren Namenszusatz *kovariant* verdankt sie der Tatsache, dass ein Tensor vom Typus (i,j) eine weitere kovariante Stufe erhält und so zum Typus (i, j+1) wird.

Allgemein und etwas salopp gesprochen ist die kovariante Ableitung eines Tensors beliebiger Stufe eine Summe aus dessen partieller Ableitung plus einer Anzahl weiterer Terme, deren Anzahl der Stufenhöhe entspricht, die mit dem Christoffel-Symbol gewichtet sind. Dabei haben diese Terme positives Vorzeichen, wenn sie sich auf einen kontravarianten Index des Tensors beziehen und bei den kovarianten Indizes ein negatives Vorzeichen.

Die kovariante Ableitung eines Tensors 0. Stufe, eines **Skalars**, geht in seine partielle Ableitung über (kein weiterer Term mit Christoffel-Symbol):

$$\nabla_\nu \Phi = \partial_\nu \Phi.$$

Die kovarianten Ableitungen von **Vektoren** (Tensoren 1. Stufe) enthalten neben der partiellen Ableitung einen Term mit Christoffel-Symbol. Man unterscheidet die kovarianten Ableitung eines kontravarianten Vektors

$$\nabla_\nu X^\lambda = \partial_\nu X^\lambda + \Gamma^\lambda{}_{\mu\nu} X^\mu$$

von der kovarianten Ableitung eines kovarianten Vektors

$$\nabla_\nu X_\lambda = \partial_\nu X_\lambda - \Gamma^\lambda{}_{\mu\nu} X_\mu.$$

Die üblichen Schreibweisen für die kovariante Ableitung sind die mit *Nabla-Operator* ∇, der als Index die Koordinate hat, nach der abgeleitet wird oder mit Semikolon und angefügtem Ableitungsindex:

$$\nabla_\nu X_\mu \equiv X_{\mu\ ;\nu}.$$

Ein gemischter Tensor zweiter Stufe (ein Index kovariant, ein Index kontravariant) wird folgendermaßen kovariant abgeleitet:

$$\nabla_\nu Y^\lambda_\mu = \partial_\nu Y^\lambda{}_\mu + \Gamma^\lambda{}_{\rho\nu} Y^\rho{}_\mu - \Gamma^\rho{}_{\mu\nu} Y^\lambda{}_\rho.$$

Die Gleichungen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) enthalten vielfach partielle Ableitungen. In der Regel kann man formal den Übergang zur ART vollziehen, indem man die partiellen durch kovariante Ableitungen ersetzt. Anhand der Definition der kovarianten Ableitung (siehe oben) wird klar, warum das so ist: die kovariante Ableitung enthält neben der partiellen Ableitung (erster Term) einen weiteren Term, der von den Christoffel-Symbolen ('Ableitungen der Metrik') abhängt. In der SRT, die auf einer flachen Raumzeit, der Minkowski-Metrik, basiert, verschwinden gerade diese Christoffel-Symbole, denn die Ableitung einer Konstante ist null.

12.34 Kovarianzprinzip

Das Kovarianzprinzip ist eines der wesentlichen Prinzipien, das *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) anregte. Daneben sind das Äquivalenzprinzip, das Machsche Prinzip, das Korrespondenzprinzip und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung zu nennen.

12.34.1 Beobachter, Bezugssystem, Koordinaten

Die Gesetze der Physik werden durch Beobachter beschrieben und durch Beobachtung gefunden. Mit dem Beobachter ist untrennbar sein **Bezugssystem** verbunden. Dieses kann mit verschiedenen *Koordinatensystemen* beschrieben werden. Als einfaches Beispiel möge eine halbkugelförmige Schale dienen, in der eine Metallkugel auf den Boden hinabrollt. Diese Anordnung kann man mit kartesischen Koordinaten (x,y,z) beschreiben, zum Beispiel könnte man auf dem Boden der Schale den Nullpunkt fixieren und die z-Achse entlang der Achse legen, die senkrecht die Ebene des kreisförmigen Randes der Schale schneidet und auch durch den Nullpunkt verläuft. Die Wahl dieses Koordinatensystems wäre allerdings nicht besonders klug, weil es nicht der Symmetrie des Problems angepasst ist. Viel besser geeignet wären Kugelkoordinaten: der Ursprung wäre das Zentrum der Halbkugel. Dann parametrisieren zwei Winkel, Azimut und Poloidalwinkel, einen Punkt auf der Schale und der Radius bliebe immer konstant. Der Vorteil liegt auf der Hand: während bei kartesischen Koordinaten drei variable Koordinaten die Bewegung auf der Schalenfläche beschreiben, reichen bei Kugelkoordinaten zwei Winkel aus, weil der Radius bei der ganzen Bewegung konstant bleibt. Diese Eigenschaft erleichtert die mathematische Beschreibung enorm, weil die Gleichungen deutlich einfacher werden. Analog ist die Volumenberechnung (Dreifachintegral) einer Kugel wesentlich einfacher in Kugelkoordinaten als in kartesischen durchzuführen.

12.34.2 Physik ist unabhängig von Koordinaten

Weil nun die Wahl irgendeines Koordinatensystems unumgänglich ist, um physikalische Gesetze zu beschreiben, dürfen die Gesetze jedoch nicht von dieser Wahl abhängen. An die Gleichungen einer übergeordneten Theorie, wie der ART, muss also die Forderung der **Koordinatenunabhängigkeit** gestellt werden. Es stellte sich heraus, dass die Tensoren diejenigen mathematischen Gebilde sind, die dieser Forderung gerecht werden. Warum? Dies zeigt sich an den *Transformationsgesetzen* der Tensoren: Stimmen zwei Tensoren in einem *bestimmten* Koordinatensystem überein, so bedingen die Transformationsgesetze, dass die Tensoren dann auch in **jedem beliebigen** anderen Koordinatensystem übereinstimmen! Das **Prinzip der allgemeinen Kovarianz** lautet daher verkürzt:

Physikalische Gleichungen sind tensoriell.

12.35 Kreisbeschleuniger

Ein Kreisbeschleuniger oder Zyklotron ist ein Teilchenbeschleuniger mit kreisförmiger Beschleunigungsstrecke. Diese Beschleunigerarchitektur löste historisch gesehen die Linearbeschleuniger (*LINACs*) ab.

12.35.1 Vorteil

Es ist wesentlich effizienter die Teilchenstrahlen auf kreisförmigen Bahnen mehrfach durch den Beschleuniger zu führen.

12.35.2 ...und Nachteil

Die ständige Richtungsänderung des Teilchenstrahls bringt den Nachteil mit sich, dass **Zentrifugalkräfte** wirken, die den Strahl aus seiner Sollbahn lenken. Diese Kräfte gleicht

man mit Lorentz-Kräften von magnetischen Führungsfeldern aus. Weil die Geschwindigkeiten und entsprechend die Zentrifugalkräfte mit jedem Umlauf wachsen, müssen die Magnetfelder entsprechend stärker werden, um die Teilchenstrahlen auf ihrer Sollbahn zu halten.

12.35.3 Das Lawrence-Zyklotron

Im *Lawrence-Zyklotron* (1932) bilden zwei D-förmige Metallgehäuse (*Duanten*) eine Kreisscheibe, die entlang ihres Durchmessers eine Lücke aufweist. Im Mittelpunkt der Kreisscheibe befindet sich die Ionenquelle, aus der Teilchen auf Spiralbahnen die Duanten durchlaufen und schließlich tangential austreten. Gleichsetzen von Lorentz-Kraft und Zentrifugalkraft führt auf eine Bedingung für die *Umlauffrequenz*, die in Zyklotrons konstant ist.

12.36 Kretschmann-Skalar

Der Kretschmann-Skalar ist eine wichtige Größe in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), um die **Krümmung** von Raumzeiten darzustellen.

12.36.1 Masse macht krumme Sachen

Krümmung wird durch Energien hervorgerufen. So lautet eine fundamentale Aussage der ART, dass Massen die Raumzeit krümmen. Die Krümmung variiert im Allgemeinen über die Raumzeit und unterscheidet sich von Ort zu Ort - von Koordinate zu Koordinate. Krümmung kann sogar unendlich werden - genau das passiert in den Krümmungssingularitäten oder echten Singularitäten der ART. Der Kretschmann-Skalar eignet sich nun besonders gut, um die Singularitäten einer gegebenen Raumzeit oder Metrik zu finden.

12.36.2 Krümmungsinvarianten: frei von Koordinatenwahl

Der Kretschmann-Skalar wird alternativ auch als *Riemannsche Invariante* bezeichnet. Der erste Wortbestandteil *Riemann* bezieht sich darauf, dass diese Größe aus dem Riemann-Tensor (Krümmungstensor) hervorgeht, der in der ART gerade die Krümmung mathematisch beschreibt. Der zweite Wordbestandteil *Invariante* ist darauf zurückzuführen, dass die Größe *unabhängig* von verwendeten Koordinaten ist. Das ist eine hervorragende Eigenschaft einer mathematischen Größe, die den Physikern besonders gefällt! Denn es reicht die einmalige Berechnung in irgendeinem Koordinatensystem damit sehr generelle Aussagen gemacht werden können.

Ganz allgemein kann man sagen, dass die Riemannsche Invariante eine Summe aus Weylscher Invariante und den Ricci-Invarianten ist. Liegen entsprechend Weyl-Tensor (**C**), Ricci-Tensor (**R** mit zwei Indizes) und Ricci-Skalar (Skript R ohne Index) vor, so folgt die Riemannsche Invariante gemäß:

$$R_{\kappa\lambda\mu\nu}\,R^{\kappa\lambda\mu\nu} = 48\frac{M^2}{r^6}\frac{1-(a/r)^2\cos^2\theta}{\left(1+(a/r)^2\cos^2\theta\right)^6}\left(1-14\,(a/r)^2\cos^2\theta+(a/r)^4\cos^4\theta\right).$$

Die Berechnungen der Riemannschen Invarianten einer vorgegebenen Metrik sind schon bei einfachen Raumzeiten mit hoher Symmetrie relativ aufwendig. Die Mühe lohnt allerdings,

weil mit dem Resultat die Krümmungseigenschaften ganz allgemein diskutiert werden können. Die Relativisten sind ebenso an den Krümmungssingularitäten besonders interessiert. Man findet sie, indem man divergentes Verhalten der Riemannschen Invarianten untersucht, also Koordinaten bestimmt, wo die Invariante unendlich wird.

12.36.3 Kretschmann für Kerr

Im Folgenden wird als Beispiel der Kretschmann-Skalar der Kerr-Geometrie diskutiert. Die Kerr-Metrik ist wichtig für die Astronomie, weil sie relativistisch rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher beschreibt. Die Gleichung für den Kretschmann-Skalar ist im Lexikoneintrag Riemann-Tensor dargestellt. Das Loch möge sehr schnell rotieren und einen Drehimpulsparameter a/M von 0.998 haben. Seine Masse wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit gleich 1 gesetzt (die Masse skaliert nur den Radius). Visualisiert man nun die Invariante als Maß für die Krümmung in Abhängigkeit von den Koordinaten Radius (in Einheiten des Gravitationsradius) und Poloidalwinkel (θ, im Bogenmaß), so ergibt sich Bild 12.10 (basierend auf *R.C. Henry*, ApJ 535, 350, 2000). Bei großen Radien verschwindet die Krümmung nahezu. Diese Eigenschaft ist die **asymptotische Flachheit** der Kerr-Metrik. Mit Annäherung an das Loch nimmt die Krümmung stark zu. Weiterhin fällt auf, dass sich der linke und rechte Teil des Reliefs gleichen - das ist nichts anderes als die Achsensymmetrie der Metrik rotierender Schwarzer Löcher. Die Spiegelebene in der Mitte des Bildes ist gerade die Äquatorialebene des Loches. Die Krümmung nimmt wie man anhand der vertikalen Skala sieht rapide zum Innern des Loches hin zu. Dies geschieht allerdings nicht räumlich homogen, sondern es gibt eine starke Abhängigkeit vom Poloidalwinkel ('Breitengrad'): Erstaunlicherweise erkennt man nicht nur drei herausragende 'Gipfel' (positive Krümmung), sondern auch zwei 'tiefe Täler', die ins Bodenlose fallen. In den Senken liegt eine **negative Krümmung** vor, die vollkommen wesensverschieden von negativ gekrümmten Sattelflächen ist (*Henry* 2000). Die negative Krümmung wird auch an den Polen des Lochs besonders groß. Wie das und negative Krümmung überhaupt zu interpretieren sind, ist bislang unklar.

12.36.4 Jagd auf Krümmungssingularitäten

Es lohnt sich, die Orte verschwindender Krümmung zu diskutieren: Eine Analyse der Konturlinien für Krümmung null zeigt, dass sie interessanterweise in der Äquatorialebene bei Radius null konvergieren. In der Krümmungssingularität muss der Kretschmann-Skalar gegen unendlich gehen. Ein solches Verhalten zeigen die drei Gipfel die zu kleinen Radien hin verschmelzen und divergieren. Dieses Verhalten weist auf die **Ringsingularität** der Kerr-Geometrie hin.

12.37 Kruskal-Lösung

Die Kruskal-Lösung ist eine spezielle Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeine Relativitätstheorie (ART). Sie gehört zur Familie der Schwarzen Löcher, weist aber ein paar besondere Eigenschaften auf.

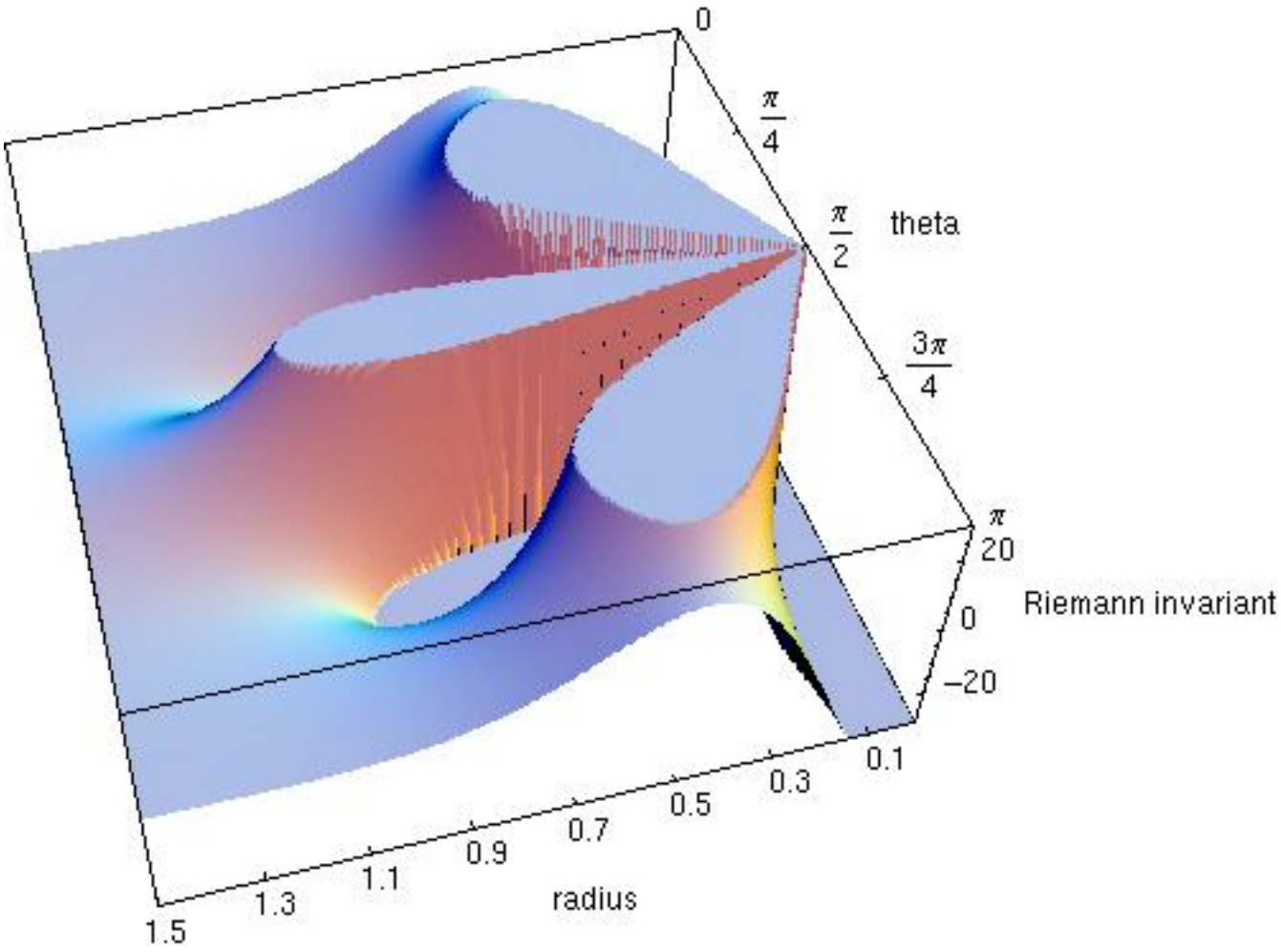

Abbildung 12.10: Krümmungseigenschaften der Kerr-Geometrie.

12.37.1 Wurmlöcher der Science-Fiction

In der Science-Fiction wurde die Kruskal-Lösung dankend angenommen und hat unter der Bezeichnung Wurmloch Berühmtheit erlangt. Eine Analyse des Raumzeit-Diagramms der Kruskal-Geometrie führte darauf, dass verschiedenen Regionen der Raumzeit miteinander durch eine Art 'Raumzeit-Tunnel' miteinander verbunden sind. Wissenschaftlich heißt dieser Tunnel Einstein-Rosen-Brücke - populärwissenschaftlich nennt man es ein Wurmloch. Im Raumzeit-Diagramm findet man Zonen, die als zeitliche Umkehrung eines Schwarzen Loches aufgefasst werden können: die so genannten Weißen Löcher. Wie es die zeitliche Inversion nahe legt, strömen aus Weißen Löchern ständig Materie und Energie heraus. Es ist eine sichtbare oder - wie im Fachjargon auch gesagt wird - nackte Singularität. Nach der kosmologischen Zensur, einem bisher unbewiesenen, aber auch nicht widerlegten Theorem des englischen Mathematikers *Roger Penrose*, sind nackte Singularitäten verboten. Die Astronomie spricht bislang für dieses Theorem, weil weder Weiße Löcher, noch nackte Singularitäten im Kosmos beobachtet wurden. Ebenso wenig gibt es indirekte Indizien, die Existenz erfordern würden. Letztendlich lässt das auch die Existenz von Wurmlöchern sehr fragwürdig erscheinen. Eine mögliche Erklärung lautet, dass Wurmlöcher, die Kruskal-Lösung, Weiße und auch Schwarze Löcher Objekte einer klassischen Theorie, der ART, sind. Zwar hat sich die ART vielfach bewährt und gehört zu den mächtigsten Theorien der Physik mit starker Vorhersagekraft; doch hat sie (wie übrigens **jede** Theorie!) einen Gültigkeitsbereich, der vermutlich bei kleinen Längenskalen endet. Hier beginnt die Domäne einer Quantengravitation, für die es bisher nur Erfolg versprechende Kandidaten (Stringtheorien und Loop-Quantengravitation), aber keine bewährten Theorien gibt. Das heißt, dass eine mikroskopische Theorie der Gravitation, die über Einsteins ART hinaus geht (aber sie als Grenzfall enthalten muss), *eventuell* gar nicht die Existenz von Wurmlöchern, Schwarzen oder Weißen Löchern und Singularitäten vorsieht. Ob das so ist, ist ein aktuelles und brisantes Forschungsgebiet.

12.37.2 So berechnet man ein Wurmloch

Die Kruskal-Geometrie resultiert, wenn man von der Schwarzschild-Lösung (in Schwarzschild-Koordinaten) ausgeht und eine **Koordinatentransformation** durchführt. Dazu verwendet man die so genannten Eddington-Finkelstein-Koordinaten. Die folgenden Beschreibungen werden sehr technisch, sind aber nötig, um zu verstehen, wie man die Kruskal-Geometrie ableitet:

Die Kruskal-Lösung ist die eindeutige, maximale analytische Erweiterung der Schwarzschild-Lösung. *Maximal* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass jede von einem beliebigen Punkt ausgehenden Geodäte entweder in beide Richtungen zu unendlichen Werten des affinen Geodätenparameters ausgedehnt werden kann oder in einer intrinsischen Singularität endet. Gilt der erste Fall für **alle** Geodäten, so heißt die Mannigfaltigkeit **geodätisch vollständig**, wie es die Minkowski-Metrik trivial erfüllt. Die Kruskal-Lösung hat intrinsische Singularitäten und ist daher nicht vollständig, aber maximal. Man erhält die Kruskal-Lösung, indem man sowohl die einlaufenden (retardierte Eddington-Finkelstein-Koordinaten), als auch die auslaufenden Geodäten (avancierte Eddington-Finkelstein-Koordinaten) 'zu Geraden macht'. Das gelingt mit einer geeigneten Koordinatentransformation der Schwarzschild-Metrik.

12.38 Kugelsternhaufen

Kugelsternhaufen (engl. *globular cluster*) sind die ältesten Objekte in einer Spiralgalaxie und umkreisen die galaktische Scheibe in einer sphäroiden Region, dem **galaktischen Halo**. Die Entfernung des galaktischen Zentrums zum Halo beträgt typischerweise 10^4 bis 10^5 Lj. Aufgrund ihres hohen Alters von etwa 10 Mrd. Jahren dienen Kugelsternhaufen auch der Altersbestimmung einer Galaxie und geben sogar eine Untergrenze für das Alter des Universums an.

12.38.1 Gestalt und Etymologie

Kugelsternhaufen sind Sternansammlungen von etwa 10^4 bis 10^7 Sternen, deren Konzentration deutlich zum Zentrum des Haufens hin zunimmt. Das ist gerade das Typische an den Kugelsternhaufen und auf den HST-Fotos unten sehr schön zu sehen. Damit unterscheiden sie sich morphologisch deutlich von **offenen Sternhaufen** (wie den *Plejaden*, *Hyaden* oder h/χ *Persei*), die eher einen lockeren Verbund mit gemeinsamen Konvergenzpunkt bilden und auch aus sehr viel weniger Sternen bestehen. Aufgrund der damit verbundenen Helligkeitszunahme zum Zentrum hin und der resultierenden kugeligen Gestalt, haben die Kugelsternhaufen diesen Namen bekommen.

12.38.2 Halopopulation

Typische Durchmesser von Kugelsternhaufen liegen im Bereich zwischen 10 und 150 pc. Die Sterne in Kugelsternhaufen, die **Halopopulation** (Population), sind entsprechend alt und weit in ihrer Entwicklung vorangeschritten: viele massearme Sterne unter 1.2 Sonnenmassen sind bereits zu Weißen Zwergen geworden. Massereichere Sterne haben sich nach dem Gravitationskollaps in Neutronensterne oder andere kompakte Objekte verwandelt.

Besonders bekannt ist ein Typus veränderlicher Sterne, den man RR Lyrae-Sterne, nach ihrem Prototyp im Sternbild *Lyra* (dt. Leier), genannt hat. Sie sind auch als *Haufenveränderliche* bekannt.

12.38.3 Bekannte Kugelsternhaufen

Besonders bekannte Kugelsternhaufen in der Milchstraße sind M13 im Sternbild *Herkules*, der bereits mit kleinen Instrumenten gut beobachtbar ist und M15 im Sternbild *Pegasus*. Dieser letztgenannte Haufen hat zusammen mit dem 'extragalaktischen Kollegen' G1 in der Andromedagalaxie für Aufsehen gesorgt, weil diese beiden höchstwahrscheinlich ein **mittelschweres Schwarzes Loch** (engl. *intermediate-mass black hole*) im Innern beherbergen (siehe Beobachtungsfoto 12.11; Credits: STScI/AURA und *M. Rich*, HST/NASA 2002). Für M15 wurden 3400 und für G1 sogar 17000 bis 18000 Sonnenmassen Zentralmasse abgeleitet. Damit schließt sich - so hoffen Astronomen - die prominente Massenlücke zwischen stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern. Allerdings sind noch nicht alle Astronomen von der Existenz dieser *intermediate-mass black holes* in M15 und M31 G1 überzeugt. Zwar mehreren sich Beobachtungen, dass diese mittelschweren Löcher auch in anderen Quellen gibt (z. B. in ultrahellen Röntgenquellen; engl. *ultraluminous X-ray sources*, **ULXs**), aber das ist Gegenstand intensiver Forschung.

Abbildung 12.11: Kugelsternhaufen M15 und M31 beobachtet mit HST 2002.

12.38.4 Mehr dazu im Wissensportal

- ◇ Details zu den Kugelsternhaufen M15, G1 und anderen kompakten Objekten gibt es im Web-Artikel Kompakte Objekte des Himmels.

13 Lexikon L

13.1 Laborsystem

Siehe dazu Eintrag Lorentz-Faktor.

13.2 Ladung

Die Ladung (engl. *charge*) ist eine Teilcheneigenschaft. Bekannt ist die **elektrische Ladung**. Teilchen können elektrisch positiv oder negativ geladen sein. Teilchen können aber auch elektrisch neutral geladen sein, also keine elektrische Ladung tragen.

Atome bestehen zwar aus elektrischen Ladungen, sind jedoch nach außen hin elektrisch neutral: Die positive Ladung des Atomkerns (der aus Nukleonen besteht) wird exakt mit der negativen Ladung der Elektronen in den Atomschalen ausgeglichen. Es kann vorkommen, dass die Atome z. B. durch eine große Umgebungshitze oder harte Umgebungsstrahlung, Elektronen durch Stöße verloren haben. In diesem Fall spricht man von positiv geladenen *Ionen*; es gibt auch negative Ionen. Ein solches Milieu gibt es in astrophysikalischen Plasmen, z. B. in heißen Akkretionsflüssen und in Koronen.

13.2.1 Terminologie in der Astronomie

In der Astronomie hat sich zur Unterscheidung der Ionen eine spezielle Benennung eingebürgert: Hinter dem chemischen Symbol des betreffenden Elements wird eine römische Ziffer gestellt, die angibt, wie stark ionisiert das Element ist. Bei der Ziffer I ist die Ionisierung null, d. h. das betreffende Element ist elektrisch neutral. Bei der Ziffer II ist das Element einfach positiv geladen; bei der Ziffer III ist es zweifach positiv geladen usw. Beispiele: Eine **HII-Region** besteht aus einfach ionisiertem Wasserstoff; eine **OVII-Linie** ist eine Spektrallinie, die von 6fach ionisiertem Sauerstoff absorbiert/emittiert wird.

13.2.2 Terminologie in der Elektrochemie

In der Elektrochemie haben elektrische Ladungen eigene Namen bekommen. Die negativ geladenen Ionen heißen **Anionen**, weil sie sich an der Anode (der positiven Elektrode) abscheiden. Hingegen sind die **Kathionen** positiv geladen, weil sie von der negativen Elektrode angezogen werden.

13.2.3 Millikan-Versuch: Quantisierung der elektrischen Ladung

Im Jahr 1909 konnte der US-amerikanische Physiker *Robert Andrews Millikan* (1868 - 1953) in einem historischen, physikalischen Experiment zeigen, dass die elektrische Ladung nicht beliebige Zahlenwerte annehmen kann, sondern nur in Vielfachen der Elementarladung e auftritt.

13.2.4 Quantenelektrodynamik

Elektrische geladene Teilchen wechselwirken über elektromagnetische Kräfte. Im Quantenbild der Quantenelektrodynamik, der Quantenfeldtheorie der elektromagnetischen Wechselwirkung, tauschen sie daher Photonen aus. Die Photonen sind gerade die 'Botenteilchen' der elektromagnetischen Wechselwirkung. Solche Austauschteilchen nennt man im Rahmen der Eichtheorie **Eichbosonen**.

13.2.5 Ladung als verallgemeinerte Teilcheneigenschaft

Der Ladungsbegriff kann verallgemeinert werden: Teilchen mit einer bestimmten Ladung 'spüren sich' mit der zur Ladung assoziierten Kraft. Neben der elektrischen Ladung und der elektromagnetischen Kraft, gibt es in der Natur drei weitere fundamentale Kräfte: Die Gravitation, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Auch für diese Kräfte wurde ein Ladungsbegriff gefunden. Die schwache Wechselwirkung wirkt zwischen Teilchen, die die schwache **Hyperladung** tragen. Die starke Wechselwirkung wirkt zwischen solchen die **Farbladung** tragen. Leptonen wie Elektronen und Neutrinos tragen per definitionem *keine* Farbladung: Sie sind farbneutral und wechselwirken deshalb nicht stark miteinander. Baryonen hingegen, wie das Proton und das Neutron, bestehen aus Quarks. Quarks sind farbgeladen. Daher spüren Hadronen (Baryonen und Mesonen) untereinander starke Kräfte. Die Farbladung gab der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung ihren Namen: Quantenchromodynamik (grch. *chromos*: Farbe).

Die Gravitation als vierte Naturkraft wirkt zwischen Massen. Eine **Masse** kann in diesem Sinne als '*gravitative Ladung*' aufgefasst werden. Eine Quantenfeldtheorie der Gravitation wurde allerdings noch nicht etabliert. Im Rahmen der Stringtheorien wird versucht eine Quantengravitation zu formulieren. Die Botenteilchen der Gravitation heißen Gravitonen, doch bisher wurden sie nicht nachgewiesen.

13.2.6 Antiteilchen & Ladungsinversion

Der so **verallgemeinerte Ladungsbegriff** ist wichtig, um zu verstehen, was Antiteilchen von Teilchen unterscheidet. Antiteilchen haben verglichen mit den Teilchen **umgekehrte Ladungen**, präzise gesagt invertierte Ladungsquantenzahlen. Die additiven Quantenzahlen unterscheiden sich in ihrem Vorzeichen. Das gilt fast für alle Ladungseigenschaften, nämlich elektrische Ladung, Farbladung und schwache Hyperladung. Eine Inversion der gravitativen Ladung, der Masse, ist nicht möglich.

Als Beispiel möge das neutral geladene Neutron dienen, das in Atomkernen vorkommt. Was unterscheidet Neutron von Antineutron? Das Neutron besteht aus drei Quarks, nämlich udd. Entsprechend muss das Antineutron aus einem Anti-u-Quark und zwei Anti-d-Quarks bestehen. Die Antiquarks haben entsprechend invertierte elektrische Ladungen, invertierte Farbladungen und invertierte Baryonenzahl. Insgesamt resultiert jedoch sowohl beim Neutron als auch beim Antineutron die gleiche elektrische neutrale Gesamtladung. In der Baryonenzahl unterscheiden sie sich allerdings: Das Neutron hat wie man vom Quarkgehalt ableitet $+1/3 + 1/3 + 1/3 = +1$, das Antineutron hat $-1/3 - 1/3 - 1/3 = -1$.

13.3 Lagrange-Punkte

Die Lagrange-Punkte sind ausgezeichnete Punkte im System mehrerer Massen, in denen die effektiven Gravitationskräfte verschwinden. *Effektiv* bezieht sich darauf, dass auch Zentrifugalkräfte berücksichtigt werden müssen. Besonders wichtig in der Astronomie und Raumfahrt sind die Lagrange-Punkte zweier umeinander kreisender Massen, beispielsweise in einem Doppelstern (Binär) oder im Erde-Mond System. Hier existieren exakt fünf Lagrange-Punkte, von denen derjenige auf der Verbindungslinie beider Massenschwerpunkte, der so genannte *innere Lagrange-Punkt L1*, der wichtigste ist. Er bestimmt gerade die Roche-Volumina der beiden Körper.

13.3.1 Pionier & Namenspate

Die Lagrange-Punkte wurden nach dem französischen Mathematiker *Joseph-Louis Lagrange* (1736 - 1813) benannt, der sich besonders in der klassischen Mechanik (auch *Euler-Lagrange Gleichungen*) verdient gemacht hat.

13.3.2 Weitere Informationen

Eine detaillierte, auch bebilderte, Diskussion der Lagrange-Punkte mit einem numerischen Beispiel befindet sich im Eintrag Roche-Volumen.

13.4 Lambda-Universum

Eine verkürzte Bezeichnung für ein Universum mit Λ-Kosmologie, d. h. ein Universum, in dem die kosmologische Konstante (üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben Λ abgekürzt) verschieden von null ist.

13.4.1 Einsteins intuitive Leistung

Albert Einstein selbst führte den **Λ-Term** in die Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie 1917 ein:

$$\mathbf{G}_{\mu\nu} - \Lambda\, \mathbf{g}_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}\, \mathbf{T}_{\mu\nu}$$

Seine Motivation bestand darin, sein ästhetisch favorisiertes **statisches Universum** mathematisch zu erklären. Dieses Universum kontrahiert oder expandiert nicht, sondern bleibt für alle Zeit, wie es ist. Die Einführung dieses Terms war freilich nur *phänomenologischer Natur* und physikalisch bis dato ohne interpretatorischen Gehalt.

13.4.2 Λ fällt mit Beobachtungsfakten

Als der amerikanische Astronom *Edwin Hubble* (1889 - 1953) die Fluchtbewegung einiger Galaxien 1929 beobachtete, den Hubble-Effekt, war das statische Universum jeder Grundlage entzogen und Einstein verwarf seinen Λ-Term mit dem bekannten Zitat:

Das war die größte Eselei meines Lebens!

13.4.3 Λ siegt mit Beobachtungsfakten

Einsteins Intuition war jedoch offensichtlich richtig: die moderne Kosmologie kommt **nicht ohne Lambda** aus! Mittlerweile ist der Lambda-Term auch mit physikalischem Inhalt gefüllt. Dahinter verbirgt sich die so genannte Dunkle Energie, eine Energieform, die antigravitativ wirkt und die Expansion des Weltalls *beschleunigt* antreibt. Diese erst 1998 entdeckte Beschleunigung war es die Einsteins Λ rehabilitierte. Die Beobachtungsdaten der Missionen Hubble und WMAP bestätigen ältere Messungen, wonach die Dunkle Energie die Dynamik unseres Universums deutlich dominiert. Andere Formen der Energie (baryonische, 'gewöhnliche' Materie, nichtbaryonische und baryonische Dunkle Materie) spielen eine eher untergeordnete Rolle.

13.4.4 Sie ist da, aber was ist sie?

Die Dunkle Energie gehört sicherlich zu den **größten Rätseln der Astrophysik**, auch wenn Erklärungsansätze vorhanden sind und sie mit dem Quantenvakuum assoziiert wird. Die Dunkle Energie, in zeitabhängiger Form heißt sie Quintessenz, ist Gegenstand aktueller kosmologischer Forschung.

13.4.5 Weitere Informationen

Viel mehr Einzelheiten bieten die Einträge kosmologische Konstante und Dunkle Energie .

13.5 Lapse-Funktion

Die Lapse-Funktion ist eine Größe in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die gravitativ bedingte Dehnung der Zeit mathematisch darstellt. Die Lapse-Funktion hängt von den Koordinaten ab, also wo sie genau in der Raumzeit ausgewertet wird.

13.5.1 Achtung bei Begrifflichkeiten

Die ART bietet eine ganze Palette von Rechengrößen, die diesen physikalischen Zeitdehnungseffekt verdeutlichen. Man muss dabei nur sehr genau aufpassen, wie die jeweilige Größe definiert ist. Zur **Lapse-Funktion** α kann man auch Rotverschiebung oder Rotverschiebungsfaktor (oft g-Faktor genannt) sagen; aber man sollte sich über die subtilen Unterschiede in der mathematischen Berechnung im Klaren sein. Die kosmologische Rotverschiebung z hat eine physikalisch andere Ursache (nämlich eine Expansion der Raumzeit), aber dennoch ist auch dieses z mit einem Zeitdehnungseffekt assoziiert: die Uhren entfernter Supernovae ticken anders als lokale Uhren.

13.5.2 Lapse in flacher vs. gekrümmten Raumzeit

Betrachten wir zunächst nur den Grenzfall der Speziellen Relativitätstheorie. Hier wird die Raumzeit durch die Minkowski-Geometrie beschrieben. Die Lapse-Funktion ist überall exakt 1, weil die Raumzeit flach ist. Das gilt auch bei gekrümmten Raumzeiten, in dem Gebiet, wo sie asymptotisch flach sind. Alle klassischen Schwarzen Löcher der ART sind asymptotisch flach; nähert man sich allerdings der Krümmungssingularität, so nimmt die Krümmung zu und auch die Lapse-Funktion verändert sich.

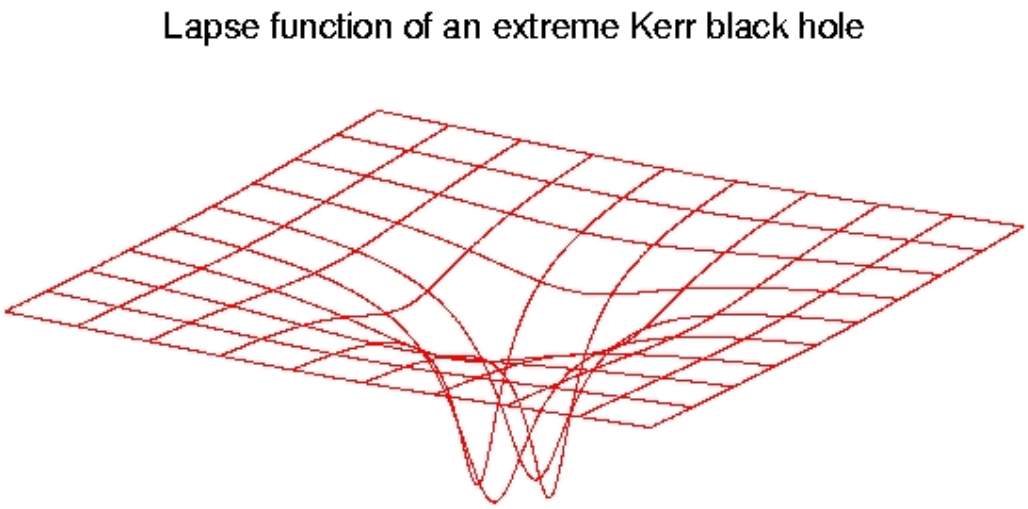

Abbildung 13.1: Lapse-Funktion visualisiert Gravitationstrichter.

13.5.3 Definition und Veranschaulichung

Die allgemeine Definition ist im Prinzip die Ableitung der **Eigenzeit** τ nach der **Koordinatenzeit** t. Dies entspricht einem Vergleich des Gangs der Uhr eines relativ ruhenden Beobachters, des FIDO (engl. *fiducial observer*), mit einem Beobachter im Unendlichen.

Die Bezeichnung *Lapse* kommt aus dem Englischen: *to lapse* heißt 'verfließen' oder 'verzögern'. Die Lapse-Funktion ist gerade ein Maß dafür, um welchen Faktor die beiden Uhren verschieden gehen. Denn aufgrund der **gravitativen Zeitdilatation** messen frei fallender und entfernter, ruhender Beobachter unterschiedliche Zeitmaße.

13.5.4 Beispiel: Kerr-Geometrie

Betrachten wir als Beispiel die Kerr-Metrik, die die gekrümmte Raumzeit rotierender Massen relativistisch beschreibt. Wir verwenden die Boyer-Lindquist-Form der Kerr-Lösung. Hier ist die 00-Komponente des kontravarianten metrischen Tensors gerade das negative, inverse Quadrat der Lapse-Funktion α (Signatur der Metrik sei - + + +):

$$\alpha = \rho\sqrt{\Delta}/\Sigma.$$

13.5.5 Bezug zu zerlegten Raumzeiten

Im ADM-Formalismus oder **3+1 Split** wird die vierdimensionale Raumzeit in Hyperflächen zerlegt (*Foliation*). Diese Hyperflächen sind dreidimensionale, rein räumliche Unterräume, auf denen die Zeit jeweils konstant ist. Die Lapse-Funktion gibt nun an, wie sich der Zeitablauf von einer Hyperfläche zur nächsten verändert. Mit der allgemeinen Formel des 3+1 Split einer gesplitteten Metrik lassen sich Lapse-Funktion und Shift-Vektor für jede beliebige Metrik beschaffen.

Abbildung 13.2: Laserstrahl am Unit telescope Yepun am VLT, ESO.

13.5.6 Visualisierung der Lapse-Funktion

Die Lapse-Funktion eignet sich gut zur Visualisierung des **Gravitationstrichters**, wie in Abbildung 13.1 gezeigt. Am Ereignishorizont verschwindet die Lapse-Funktion in Boyer-Lindquist-Koordinaten: Die Gravitationsrotverschiebung wird unendlich - das ist allerdings nur ein Folge der Koordinatensingularität, also unzureichender Koordinaten. An den Rändern der Raumzeit (Radialkoordinate r gegen $+\infty$) wird die Lapse-Funktion eins und die Raumzeit asymptotisch flach: In der Fernzone sind Gravitationsquellen 'minkowskisch'.

13.6 Laserleitstern

Ein Laserleitstern (engl. *laser guide star*, LGS) ist ein von Menschenhand künstlich erzeugter Stern.

13.6.1 High-tech Zauberei

Das hört sich wie Science-Fiction an, ist aber Alltag in der modernen Präzisionsastronomie. Das Staunen klärt sich auf, wenn man bedenkt, dass nicht ein ganzer Stern aus Plasma erzeugt wird, sondern 'nur ein **Lichtpunkt in der Hochatmosphäre**.

13.6.2 Motivation zum Kunststern

Jeder Hobbyastronom, der schon einmal ein Teleskop mit Sucherfernrohr bedient hat weiß, dass ein heller Leitstern (engl. *guide star*) im Gesichtsfeld eine praktische Sache ist: Der Leitstern weist immer den Weg zum Objekt des Interesses und eignet sich bestens, um die Nachführung des Teleskops an ihm auszurichten. Profi-Astronomen machen es im Prinzip genauso, nur verwenden sie moderne **adaptive Optiken** (AO), d. h. mit einer ausgefeilten Technik können die Turbulenzen in der Atmosphäre herausgerechnet und ausgeglichen werden. Auch hier wird ein Leitstern benötigt, weil das 'helle, zappelnde Licht' gerade eine Referenz ist, die die Luftbewegungen verrät. Die leistungsfähige Software der AO stellt den 'hüpfenden Lichtpunkt' ständig scharf. Die Leitsternidee hat nur einen Haken: Es gibt *nicht in jedem Beobachtungsfeld* geeignete Leitsterne, die auch hell genug sind.

13.6.3 Die Lösung: Wir schießen uns einen Stern an den Himmel

Der Laserleitstern löst diese Problem sehr elegant: ein scharf gebündelter, gelber Laserstrahl regt eine Natriumschicht in 90 km Höhe zum Leuchten an. Genau dort entsteht ein kaum ausgedehnter Lichtpunkt, ein künstlicher Stern, der die Funktion eines Leitsterns übernehmen kann. Der Vorteil: Der Lichtpunkt kann in *jedem beliebigen* Gesichtsfeld erzeugt werden. Die Astronomen haben sich damit von natürlichen Leitsternen (engl. *natural guide stars*) emanzipiert.

Das Foto 13.2 zeigt gerade den Laserstrahl, der vom *Unit Telescope Yepun* herausgeschossen wird (Credit: *Sylvain Oberti*, ESO, 2006). Die Europäischen Südsternwarte (ESO) hat im Februar 2006 einen Laserleitstern installiert. Diesem Erfolg sind fünf Jahre Forschung an den MPIs für extraterrestrische Physik (MPE) sowie für Astronomie (MPIA) und bei der ESO vorausgegangen.

Das MPE entwickelte den Laser PARSEC, der kontinuierlich Licht der Wellenlänge 589 nm bei einigen Watt Leistung erzeugt. Das MPIA entwickelte das Gerät LIDAR, das zur präzisen Vermessung der atmosphärischen Natriumschicht eingesetzt wird. Das Laserleitsystem arbeitet in Kombination mit dem Spektrometer SINFONI im Nahinfrarot zusammen. So ist es besonders interessant, mit dem kompletten System die stellare Umgebung des supermassereichen Schwarzen Loches im Galaktischen Zentrum zu beobachten.

Diese moderne Laserleitstern-Technologie kam erstmals im Jahr 2004 am Keck-Teleskop auf Hawaii zum Einsatz.

13.7 Lense-Thirring-Effekt

Der Lense-Thirring-Effekt benennt lapidar gesagt das Phänomen, dass eine rotierende Masse alles in seiner Umgebung mitrotieren lässt, selbst den Raum und die Zeit!

13.7.1 Effekt von Einsteins Gravitationstheorie

Mit einiger Kenntnis der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wird auch klar weshalb: rotierende Massen erzeugen ein rotierendes Gravitationsfeld in ihrer Umgebung. In der ART spricht man präzise von einer rotierenden Raumzeit. Die Symmetrien (siehe auch Isometrien) dieser Raumzeiten heißen **Axialsymmetrie** und **Stationarität**. Relativistisch gesehen ist die Umgebung rotierender Körper nicht statisch, sondern ein dynamisches Objekt. Raum und

Zeit werden zum vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum, der Raumzeit, zusammengefasst. Dieses Gebilde dreht sich bei rotierenden Massen!

13.7.2 Wenn die Raumzeit zieht

Bewegt sich nun ein Testteilchen oder Licht in einer rotierende Raumzeit, so werden sie unweigerlich gezwungen mit zu rotieren. Aber nicht nur der Körper an sich rotiert, auch das Bezugssystem. Das kennzeichnet gerade den Lense-Thirring-Effekt. Er darf im Prinzip alternativ zum Fachbegriff Frame-Dragging verwendet werden. Frame-Dragging leitet sich aus dem Englischen ab von *drag of inertial frames*, also dem 'Mitziehen von Referenzsystemen / Inertialsystemen'. Was physikalisch passiert, lässt sich mit dem **Gravitomagnetismus** verstehen (siehe diesen Link für Einzelheiten). Durch die gravitomagnetischen Kräfte um ein rotierendes Schwarzes Loch kann ein charakteristisches Schwingungsverhalten angeregt werden. Die zugehörige Schwingungsfrequenz heißt **Lense-Thirring-Frequenz**. Dieser Lense-Thirring-Effekt wurde bereits 1918 von den beiden österreichischen Physikern *Joseph Lense* (1890 - 1985) und *Hans Thirring* (1888 - 1976) prognostiziert. Erst im Jahr 2004 ist es gelungen Frame-Dragging bei der rotierenden Erde experimentell zu belegen (*Ciufolini & Pavlis*, Nature 2004).

13.7.3 Das Experiment Gravity Probe-B

Der Lense-Thirring-Effekt war neben den Gravitationswellen eine derjenigen Vorhersagen der ART, die nicht direkt im Experiment beobachtet werden konnten. Deshalb wurde im April 2004 ein Satellitenexperiment namens **Gravity Probe-B** (GP-B) gestartet. Die Hauptaufgabe des Satelliten besteht darin, die Raumzeitkrümmung der Erde und den Lense-Thirring-Effekt mit Gyroskopen nachzuweisen.

Das Messprinzip beruht darauf, dass Kreisel durch die gekrümmte, rotierende Raumzeit der Erde beeinflusst werden und die Lage ihrer Drehachse verändern: sie präzedieren. Deshalb hat GP-B vier Gyroskope und ein Referenzteleskop an Bord. Die Gyroskope sind gerade Hochpräzisionskreisel. Sie bestehen aus heliumgekühlten, rotierenden Kugeln aus geschmolzenem Quarz. Das Referenzteleskop ist exakt auf den Stern *IM Pegasi* (HR8703) ausgerichtet. An den Polen zeigen die Drehachsen der Gyroskope auf den Referenzstern. Damit stellt der Satellit ein **ideales Referenzsystem** dar, um die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen. GP-B umkreist nun die Erde auf einer polaren Umlaufbahn in 400 Meilen Höhe. Nun ist die Erwartung, dass die Kreisel ihre Drehachse um einen winzigen Winkel kippen: *Leonard Schiff* von der Stanford Universität hatte bereits 1960 die Idee den Lense-Thirring-Effekt mit Gyroskopen auszumessen. Er berechnete, dass die Winkelabweichung eines Gyroskops bei GP-B aufgrund des Lense-Thirring-Effekts nach einem Jahr 42 Millibogensekunden (etwa zwölf Millionstel Grad) betragen müsse. Zum Vergleich: Unter diesem Winkel würde eine etwa 160 Meter durchmessende Fläche auf dem Mond erscheinen. Dieser winzige Effekt wird von der viel stärker ausfallenden **geodätischen Präzession** überlagert. Die geodätische Präzession wird von der Bewegung der Kreisel in der gekrümmten Raumzeit der Erde verursacht. Als Folge dessen präzedieren die Gyroskope an Bord von GP-B in der Bahnebene mit einer Winkelabweichung von 6.6 Bogensekunden (fast zwei tausendstel Grad) pro Jahr. Diese geodätische Präzession ist seit 1988 experimentell gesichert, denn in diesem Jahr konnte die geodätische Präzession des Erde-Mond-Systems beim Lauf um die Sonne radiointerferometrisch gemessen werden. GP-B ist ein hochempfindlicher Detektor und

kann Winkel bis auf etwa eine Millibogensekunde genau auflösen. Damit sollte der Lense-Thirring-Effekt bis auf einen Prozent im Messfehler genau bestimmt werden können. Mit dem Vorgängersatelliten **Gravity Probe-A** ist es 1976 mittels einer Atomuhr gelungen, die Zeitdilatation der ART zu beweisen, also dass Massen den Ablauf der Zeit verlangsamen.

13.7.4 Laser-Experiment kam zuvor!

Zur Überraschung der Gravitationsforscher konnte das LAGEOS-Experiment dem Projekt GP-B den Rang im Jahr 2004 streitig machen! Das Experiment besteht aus den zwei LAGEOS-Satelliten (**LA**ser **GEO**detic **S**atellites), die Laserlicht reflektieren können. Die Strahlung kann über tausende von Kilometern noch zentimetergenau vermessen werden. Eigentlich dienten die Satelliten ganz anderen wissenschaftlichen Zwecken, doch es stellte sich heraus, dass sie auch als Gyroskop genutzt werden konnten. Denn die Satelliten folgen auf Geodäten der leicht gekrümmten und rotierenden Raumzeit der Erde. Die Verdrillung der Raumzeit konnte damit aus den LAGEOS-Laserdaten aus den Jahren 1993 bis 2003 abgeleitet werden. *Ciufolini & Pavlis* veröffentlichten im Oktober 2004 in einem Nature-Artikel ihren Fund, dass sie den Lense-Thirring-Effekt auf 99% genau (mit einem Messfehler von maximal ±10%) nachweisen konnten! Die ART prognostiziert für die speziellen Höhen der LAGEOS-Satelliten einen Lense-Thirring-Effekt von 48.2 Millibogensekunden pro Jahr; gemessen wurden 47.9 Millibogensekunden pro Jahr!

Für das Wissenschaftlerteam von GP-B war das sicherlich eine erschütternde Meldung: auch wenn GP-B den Effekt viel genauer vermessen wird, so werden sie nur die zweiten sein.

13.7.5 Weitere Informationen

- ◇ Originalpublikation: *Ciufolini & Pavlis*: A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect, Nature **431**, 958, 2004
- ◇ Web: Homepage von Gravity Probe B: Die englischsprachige Seite bietet eine Fülle an Informationen zum Experiment und zur Allgemeinen Relativitätstheorie

13.8 Leptonen

Die Leptonen sind neben den Quarks nach dem Standardmodell der Elementarteilchen die **Grundbausteine der Materie**. Wie die Quarks auch sind sie **punktförmige** Objekte und weisen keine Substruktur auf. In der Quantenfeldtheorie beschreibt man diese Teilchen mit Wellenfunktionen.

13.8.1 Schwache Kraft zieht am Lepton

Der Begriff *Lepton* leitet sich vom griechischen Wort $\lambda\epsilon\pi\tau\sigma\nu$, *leptos* ab, was im Deutschen soviel heißt, wie 'leicht, zart, fein'. Per definitionem unterliegen alle Leptonen nur der schwachen Wechselwirkung, aber *nicht* der starken Wechselwirkung.

13.8.2 Trio-Familie: e, μ, τ

Man kann die Leptonenfamilie in drei Generationen unterscheiden: e, μ, τ. Die erste Generation umfasst Elektron und Elektron-Neutrino. Die zweite Myon, das schwerer ist als

das Elektron und Myon-Neutrino. Schließlich sind in der dritten Generation das schwerste Lepton (das sogar fast doppelt so schwer ist als das Proton!), das Tauon, und das zugehörige Tau-Neutrino. Den Neutrinos konnte in den Superkamikande-Experimenten in Japan eine **endliche Ruhemasse** nachgewiesen werden.

Alle Leptonen sind Fermionen, weil sie einen Teilchenspin von 1/2 haben. Demzufolge unterliegen sie dem Pauli-Verbot, ein Prinzip, dass zwei und mehr Fermionen verbietet in exakt demselben quantenmechanischen Zustand zu sein.

13.8.3 Massen und elektrische Ladungen der Leptonen

- ◇ Elektron: 510.998902 keV, -1 (in Einheiten der Elementarladung e)
- ◇ Elektron-Neutrino: 7 eV als Obergrenze, 0
- ◇ Myon: 105.658357 MeV, -1
- ◇ Myon-Neutrino: 300 keV als Obergrenze, 0
- ◇ Tauon: 1.77699 GeV, -1
- ◇ Tau-Neutrino: 30 MeV als Obergrenze, 0

(Quellen: CERN Homepage und *Particle Physics Booklet*, Juli 2002)

13.8.4 Auch ein Isospin schwächelt

Daneben gibt es weitere Quantenzahlen, deren vollständige Darstellung den Rahmen hier sprengen würde. Besonders wichtig ist allerdings noch der **schwache Isospin**, der eine übersichtliche Klassifikation von Quarks und Leptonen gestattet. In den drei obigen so genannten *Generationen* oder *Familien* kann man dann auch alle sechs Quarks unterbringen. Der schwache Isospins genügt ebenso wie der 'normale' Spin (Eigendrehimpuls), der Isospin der Nukleonen, der Bahndrehimpuls (Drehimpuls bezüglich eines Raumpunktes) und der Gesamtdrehimpuls einer **Drehimpulsalgebra** mit den wohl definierten *Kommutatorrelationen* eines Drehimpulses.

13.8.5 Rechts- und Linkshänder

Die Lösungen der Dirac-Gleichung der Quantenelektrodynamik sind linkshändige und rechtshändige Teilchen. Der gravierende Unterschied zwischen rechtshändigen und linkshändigen Teilchen ist, dass nur die linkshändigen an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Die Unterteilung gemäß ihrer Händigkeit (grch. *cheir*: Hand) nennt man Chiralität. Für masselose Teilchen stimmen Chiralität und Helizität überein. Die rechtshändigen Teilchen besitzen Helizität +1 und die linkshändigen Teilchen Helizität -1. Die linkshändigen Teilchen bilden ein so genanntes **schwaches Isospindublett** (schwacher Isospin 1/2) und unterscheiden sich nur in der dritten Komponente des Isospinvektors, der so genannten **Isospinprojektion**. Neben Elektron und Elektron-Neutrino sind demnach in der ersten Generation das up-Quark und das down-Quark (alle linkshändig), in der zweiten neben dem Myon und Myon-Neutrino das charm-Quark und das strange-Quark und schließlich in der dritten Generation befinden sich neben Tauon und Tau-Neutrino das bottom-Quark und das schwere top-Quark.

Die rechtshändigen Teilchen bilden ein **schwaches Isospinsingulett** (schwacher Isospin 0). Hier befinden sich alle rechtshändigen Pendants zu den obigen linkshändigen Teilchen, auch die Neutrinos! Die Messungen am Super-Kamiokande im Japan haben 1998 belegt, dass Neutrinos eine Masse haben. Damit gibt es sie **sowohl als links- als auch als rechtshändige Teilchen!**

13.8.6 Opas, Papas & Söhne bei den Leptonen

Eine experimentelle Verifikation der Anzahl der Lepton-Generationen bietet die **Breite der Z-Resonanz**. Das Z bezieht sich dabei auf das neutrale Eichboson der schwachen Wechselwirkung, Z^0, das das schwerste Vektorboson der schwachen Wechselwirkung ist und auch als *neutraler Strom* bezeichnet wird.

Die DELPHI-Kollaboration am CERN hat die Z-Resonanz bei der Hadronenproduktion in Elektron-Positron-Stößen vermessen. Es folgt, und zwar *unabhängig vom Standardmodell*, dass es **drei Generationen** geben muss! Eine vierte ist mit 95%iger Sicherheit ausgeschlossen!

Die enge Verwandtschaft von Elektron, Myon und Tauon und deren gleiche elektrische Ladung lässt faszinierende, neue Materieformen zu: So ist es möglich ein **Myon-Atom** herzustellen, wo nicht Elektronen, sondern Myonen den Kern 'umkreisen'. Die Herstellung ist natürlich aufwendig und Myon-Atome sind recht kurzlebig. Außerdem ist eine industrielle Anwendung dieser Materieform nicht gefunden worden.

13.9 Leptonen-Ära

Die Leptonen-Ära kennzeichnet eine bestimmte Entwicklungsphase im frühen Universum. In der Kosmologie folgt sie auf die Hadronen-Ära, die sich ihrerseits an die Quark-Ära anschließt.

13.9.1 kleiner geht's nicht

Leptonen sind elementare Bausteine der Materie. Gemäß des Standardmodells der Teilchenphysik ist Materie aus Quarks und Leptonen zusammengesetzt. *Elementar* bedeutet, dass diese Teilchen nicht weiter zerlegbar sind. Sie haben - nach allem, was die Physiker heute wissen - **keinerlei Substruktur**. Das Elektron ist sicherlich das bekannteste Lepton. Doch auch sein Antiteilchen, das Positron, sowie die Myonen, Tauonen und Neutrinos sind leptonisch. Leptonen spüren sich über alle fundamentalen Naturkräfte, nur *nicht* über die starke Wechselwirkung, weil sie farbneutral sind.

13.9.2 Bezug zur Kosmologie

Die Leptonen-Ära kennzeichnet nun ein Entwicklungsstadium des Kosmos, wo die Leptonen dominiert haben. Die Dominanz rührt daher, weil die Antihadronen, die Antiteilchen der Hadronen, infolge der **Materie-Antimaterie-Vernichtung** am Ende der GUT-Ära verschwunden waren. Zeitlich wird die Leptonen-Ära zwischen 10^{-5} Sekunden und einer Sekunde nach dem Urknall eingeordnet. Die Temperatur betrug etwa 10^{10} Kelvin. Auf die Leptonen-Ära folgt eine Phase, wo die Strahlung dominiert hat, die **Strahlungsära**.

13.10 Leptoquarks

Leptoquarks sind gebundene Zustände aus Leptonen und Quarks. Solche Teilchen wurden bislang nicht gesichert in Experimenten nachgewiesen. Am HERA-Collider des deutschen Teilchenbeschleunigers DESY wurden Protonen und Elektronen (auch Positronen) mit hohen Energien auf Kollisionskurs gebracht. Es ist nicht klar, ob bei der Fusion von Elektronen mit Quarks Leptoquarks mit einer Masse um 200 GeV entstanden sind.

13.10.1 Ohne Leptoquarks keine Menschen

Es *muss* allerdings Leptoquarks geben, unsere Existenz ist ein Beleg dafür! In einer frühen Phase des Universums, am Ende der GUT-Ära, zerfielen besonders schwere Leptoquarks in Quarks und Leptonen. Dabei bildete sich eine ungleiche Menge an Materie und Antimaterie aus. Als sich die Materie mit der zur Verfügung stehenden Antimaterie zu Gammastrahlung vernichtete, war das Universum strahlungsdominiert. Doch in diesem 'Strahlenmeer' blieb ein kleiner Rest Materie übrig! Diese als Baryogenese bezeichnete Phase lieferte die Saat für die Sterne und Galaxien.

13.10.2 Argumente sind GUT

Dieses Szenario legt zumindest die moderne Physik nahe: Im Rahmen der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) leiten sich zwölf neue Austauschteilchen ab, die gerade zu besonders schweren Leptoquarks zählen. Es handelt sich um superschwere (etwa 10^{16} GeV!), elektrisch und schwach geladene sowie farbgeladene Teilchen. Als Vektorbosonen haben sie Spin 1. Man unterscheidet sie in sechs X-Bosonen und sechs Y-Bosonen. X-Bosonen haben 4/3 Elementarladung, Anti-X-Bosonen entsprechend -4/3, Y-Bosonen 1/3 und Anti-Y-Bosonen -1/3 Elementarladung. Auf die 12 Leptoquarks der GUT kommt man, wenn man davon ausgeht, dass jedes X-Boson die Farbladung rot, grün oder blau annehmen kann. Entsprechendes gilt für die Anti-X-Bosonen. Aber auch für die Y- sowie Anti-Y-Bosonen: $3 \times 4 = 12$.

Die GUT kann gruppentheoretisch im einfachsten Fall als SU(5)-Gruppe beschrieben werden. SU(5) ist gerade das direkte Produkt aus der U(1) der Quantenelektrodynamik, der SU(2) der Schwachen Wechselwirkung und der SU(3) der Quantenchromodynamik. Gemäß den Regeln der Gruppentheorie hat eine SU(n)-Theorie n^2 - 1 Erzeugende (Generatoren), die mit den Eichbosonen der Theorie identifiziert werden. 5^2 - 1 ergibt 24. Die 24 Eichbosonen der GUT setzen sich aus den wohl verifizierten 12 des Standardmodells (ein Photon, drei Weakonen, acht Gluonen) und eben den 12 weiteren X- und Y-Bosonen zusammen. In der GUT-Ära waren alle 24 Austauschteilchen ununterscheidbar und konstituierten gerade die X-Kraft.

13.11 Leuchtkraft

Die Leuchtkraft hat die Dimension einer Leistung, Energie pro Zeit, und ist in der Astronomie eine besonders wichtige Zustandsgröße. Im Speziellen ist die Leuchtkraft wesentlich, um in der Stellarphysik Sterne zu charakterisieren; aber Leuchtkräfte geben die Astronomen für alle möglichen kosmischen Objekte an, auch für Galaxien. Die typische Einheit der Leuchtkraft

ist in der Astronomie erg/s, weil vor allem Theoretiker das cgs-System bevorzugen. Die Leuchtkraft (engl. *luminosity*) ist von der Definition der Helligkeit zu unterscheiden.

13.11.1 Was leuchtet da?

Oft beziehen die Astronomen die Leuchtkraft auf einen bestimmten Spektralbereich und sprechen beispielsweise von *Radioleuchtkraft*, *Röntgenleuchtkraft* oder *Gammaleuchtkraft*. Auch werden - etwas seltener - Leuchtkräfte auf Teilchen bezogen, z. B. Neutrinoleuchtkraft.

13.11.2 Leuchtkraft bei allen Farben

Die **bolometrische Leuchtkraft**, also die Leuchtkraft integriert über alle Spektralbereiche, folgt aus der **bolometrischen Helligkeit**

$$M_{\rm bol} - 4.72 = -2.5 \ \log \frac{L}{L_\odot}.$$

Bei beiden Größen gibt es jedoch große Unsicherheiten zur exakten Bestimmung.

13.11.3 Leuchtkraft von Sternen

Die Leuchtkraft von Sternen folgt aus Sternmodellen. Eine fundamentale Gleichung der Stellarphysik setzt die **Leuchtkraft einer Massenschale** bekannter Dicke und Dichte in Bezug zur Energieproduktion in dieser Schale:

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon.$$

Kennt man die Energieproduktion (*epsilon*, Dimension: Energie pro Masse und pro Zeiteinheit) in Abhängigkeit von Dichte, Temperatur und chemischer Zusammensetzung (vergleiche auch thermonukleare Fusion), so lässt sich diese Gleichung über die Massenschale des Sterns integrieren und liefert die Leuchtkraft dieser Schale.

13.11.4 Leuchtkraft von wärmestrahlenden Kugeln

Eine andere wichtige Gleichung erhält man, wenn man den Stern als **Schwarzen Strahler** (engl. *black body*) annimmt. Die strahlende Sternoberfläche mit Radius R möge gerade die Effektivtemperatur T_{eff}. Dann folgt mit der *Stefan-Boltzmann-Konstante* σ, die einen Wert von 5.67×10^{-8} W m^{-2} K^{-4} hat:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\rm eff}^4.$$

Sternradius und Effektivtemperatur oder äquivalent Spektraltyp führen so auf die Leuchtkraft eines Sterns.

13.11.5 Charakterisierung im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Mit den beiden bekannten Zustandsgrößen **Leuchtkraft und Effektivtemperatur** (oder Spektraltyp) von vielen Sternen lässt sich das fundamentale Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne darstellen. Das HRD zeigt die Entwicklung von Sternen von ihrer Entstehung bis zu ihrem Ende, das möglicherweise zu einem kompakten Objekt führen kann. Es zeigt sich, dass sich beobachtete Sterne in verschiedenen **Entwicklungsstadien**

befinden. Massereichere Sterne durchleben die stellare Entwicklung schneller, weil die thermonuklearen Prozesse im Innern effizienter sind und schneller den Brennstoff aufbrauchen. Massearme Sterne wie die Sonne hingegen können relativ lange in einem stationären Zustand auf der Hauptreihe verharren. Auch unterscheiden sich die Sterne darin, was als stabile Endkonfiguration nach den thermonuklearen Reaktionen übrig bleibt: Weiße Zwerge, Neutronensterne, Quarksterne, Seltsame Sterne, stellare Schwarze Löcher oder sogar Gravasterne sind dabei vermutete Kandidaten. Im Wesentlichen entscheidet die **Masse** des Sterns über sein Schicksal, weshalb sie als wichtigste Zustandsgröße angesehen werden muss.

Im HRD lassen sich die unterschiedlichen Entwicklungsstadien zu **stellaren Entwicklungspfaden** verknüpfen, die viel über die physikalischen Abläufe in Sternen während ihres 'Lebens' verraten.

In Sternmodellen unter Annahme bestimmter Zustandsgleichungen lassen sich so genannte **Masse-Leuchtkraft-Beziehungen** oder **Temperatur-Leuchtkraft-Relationen** ableiten. Auf diese Weise führt eine bekannte Zustandsgröße auf eine unbekannte Zustandsgröße, wenn die Relation Gültigkeit für den betrachteten Stern hat.

13.11.6 Leuchtkraft von Galaxien

In der Theorie der Galaxienentstehung und -entwicklung sowie in der Kosmologie ist man besonders an der **Leuchtkraft von Galaxien** interessiert. Es lässt sich also die Strahlung vieler Objekte (Sterne, Kugelsternhaufen, Kernregion etc.) in der Galaxie zu einem Wert subsumieren.

Im speziellen Fall **elliptischer Galaxien** (siehe Hubble-Klassifikation) fand *de Vaucouleurs* 1948 eine Helligkeitsverteilung, die einem $R^{1/4}$-Gesetz folgt. Hier definiert man den Effektivradius R_{eff}, der die Hälfte der Gesamtleuchtkraft enthält. Bei bekannten morphologischen Parametern der Ellipse, den Halbachsen a und b, kann man bei bekanntem Effektivradius und zugeordneter Helligkeit an diesem Radius, I_{eff}, die Gesamtleuchtkraft gemäß folgender Gleichung bestimmen:

$$L_{\mathrm{elliptical}} = 7.215\pi I_{\mathrm{eff}} R_{\mathrm{eff}}^2 (b/a).$$

13.11.7 Leuchtkraftfunktionen

Von besonderem Interesse ist die so genannte *Leuchtkraftfunktion*. Sie gibt an, wie viele Galaxien in einem gegebenen Volumen in einem bestimmten *Leuchtkraftintervall* liegen. *Schlechter* hat 1976 dafür eine empirische Formel gefunden, die unterhalb einer charakteristischen Leuchtkraft ein Potenzverhalten und oberhalb einen exponentiellen Abfall zeigt.

Die größten Leuchtkräfte zeigen erwartungsgemäß die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN). Diese enormen Leuchtkräfte lassen die AGN auch auf kosmologischen Skalen (Rotverschiebungen $z = 1$ bis 6) noch beobachten. Theoretisch erklärt man diese gewaltigen Strahlungsemissionen mit der Akkretion interstellarer Materie der Wirtsgalaxie auf ein supermassereiches Schwarzes Loch im Zentrum des AGN. Nur dieser Mechanismus leistet eine effiziente Umwandlung von Ruheenergie des Plasmas in Strahlungsenergie!

13.12 Leuchtkraftdistanz

Die Leuchtkraftdistanz oder Leuchtkraftentfernung ist das geeignete Entfernungsmaß in der **relativistischen Kosmologie**. Die üblichen Definitionen für Entfernung versagen in der Allgemeinen Relativitätstheorie, weil die Begriffe von Gleichzeitigkeit und absolutem Raum in Einsteins Theorie *nicht* mehr gelten. Die Raumzeit des Universums ist dynamisch, so dass Distanzen zu weit entfernten, kosmischen Objekten nicht zeitlich konstant bleiben. Die Expansion des Kosmos bewirkt eine kosmologische Rotverschiebung und kosmologische Zeitdilatation. Das erfordert einen neuen Entfernungsbegriff, nämlich die Leuchtkraftdistanz. Dieses Entfernungsmaß nutzen Astronomen, die sich mit hochrotverschobenen Quellen befassen, z. B. mit Supernova vom Typ Ia oder entfernten Aktiven Galaktischen Kernen.

13.12.1 Definition der Leuchtkraftentfernung

Im Euklidischen Raum nimmt die Helligkeit einer kosmischen Quelle, die in alle Richtungen gleich (*isotrop*) hell abstrahlen möge, aus rein geometrischen Gründen mit dem Abstandsquadrat ab. Anschaulich liegt das daran, weil sich die Strahlung auf einer Kugelfläche verteilen muss. Die Kugelfläche nimmt mit dem Abstandsquadrat zu - entsprechend nimmt die Strahlungsintensität bzw. der Strahlungsfluss ab.

In Einsteins Kosmos kommen zu dieser geometrischen Helligkeitsabnahme die kosmologische Rotverschiebung und Zeitdilatation dazu. Sie hängen vom Entwicklungszustand des dynamischen Kosmos ab. Deshalb hängt im Allgemeinen die Leuchtkraftdistanz von den Parametern des jeweiligen Friedmann-Weltmodells ab. Der Definition im Euklidischen Raum folgend, definieren Astronomen die Leuchtkraftdistanz gemäß dieser Gleichung

$$d_{\mathrm{L}} = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}},$$

wobei L die Leuchtkraft (eine Art intrinsische Helligkeit) und F der beobachtete totale Strahlungsfluss sind. Die Abhängigkeit der Leuchtkraftentfernung von der kosmologischen Rotverschiebung steckt hier im beobachteten Fluss.

13.12.2 Berechnung der Leuchtkraftentfernung

Für FLRW-Universen mit **verschwindender** kosmologischer Konstante bietet sich die so genannte *Mattig-Formel* (nach *W. Mattig* 1958) an, die eine handliche Gleichung zur Berechnung der Leuchtkraftdistanz ist. Leider wird die Berechnung in ΛCDM-Universen (Friedmann-Weltmodells mit kosmologischer Konstante) komplizierter. Hier muss ein Integral ausgewertet werden, das der Standardliteratur für Kosmologie zu entnehmen ist. Oder man verwendet das Web-Tool des Kosmologen *Ned Wright* (s. u.)

Im Grenzfall $z \ll 1$ identifiziert man die Leuchtkraftentfernung mit der Entfernung im **Hubble-Gesetz**.

13.12.3 Web-Tool zur Berechnung der Leuchtkraftdistanz

- ◇ Ned Wrights Web-Tool zur Berechnung von Zeiten und Entfernungen in der Kosmologie

13.13 Levi-Civita-Zusammenhang

Eine andere Bezeichnung für das Christoffel-Symbol.

13.14 Licht

Licht ist eine elektromagnetische Energieform. Sie breitet sich im Vakuum mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c von knapp 300 000 km/s aus; genau: 2.99792458×10^8 m/s. Im Prinzip ist die Reichweite von Licht unendlich, doch Licht tritt in der Regel in Wechselwirkung mit Materie, z. B. durch Beugung, Brechung, Streuung, Absorption, Emission.

Damit vermag Licht über große Entfernungen **Energie und Information** zu transportieren.

13.14.1 geometrische Optik & Wellenoptik

Die klassische, physikalische Disziplin, die sich mit Licht befasst ist die Optik. Ohne genau zu wissen, was eigentlich die Natur des Lichts ist, wird Licht als **Lichtstrahl** (*geometrische Optik*) oder als **Lichtwelle** (*Wellenoptik*) rein geometrisch beschrieben. Dieser relativ einfache mathematische Apparat ist mächtig und gestattet eine Fülle von Lichtphänomenen zu beschreiben, z. B. Brechung und Beugung.

13.14.2 Farben des Lichts

Im engeren Sinne meint Licht nur den für Menschen sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums. Das beginnt bei kurzen Wellenlängen (hohen Lichtenergien) im Violetten und geht über die Farben blau, grün, gelb, orange bis ins Rote. Allgemeiner gesprochen gibt es Licht in vielen Farben, als Radio-, Wärme-, optische, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung.

Diese vielfältigen Formen des Lichts machen klar, wie wesentlich Licht für die Astronomie ist. Die klassische, beobachtende Astronomie war optisch. Erst nach und nach öffneten sich die anderen Beobachtungsfenster der Astronomie - einerseits durch das allmähliche Verständnis über die Natur des Lichts; andererseits durch den technologischen Fortschritt, der es ermöglichte Licht einzufangen und so Bilder herzustellen.

13.14.3 Rolle des Lichts

Licht ist in vielerlei Hinsicht von fundamentaler Wichtigkeit:

- ◇ Ohne Licht keine Helligkeit.
- ◇ Ohne Licht keine Wärme.
- ◇ Ohne Licht keine Photosynthese.
- ◇ Ohne Licht kein Leben.
- ◇ Ohne Licht keine Information.
- ◇ Ohne Licht keine Astronomie.

13.14.4 Licht im Lichte der großen physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts

Gemäß der Speziellen Relativitätstheorie ist die Geschwindigkeit des Lichts im Vakuum die absolute Grenzgeschwindigkeit für Information.

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie breitet sich Licht auf Nullgeodäten in einer im Allgemeinen gekrümmten Raumzeit aus.

Gemäß der Quantentheorie ist Licht quantisiert in Lichtteilchen, den Photonen.

Gemäß der Quantenelektrodynamik, einer Quantenfeldtheorie des Lichts, sind die Photonen Austauschteilchen (Eichbosonen) der elektromagnetischen Kraft.

13.14.5 Weiter mit...

...dem Lexikoneintrag Photonen, der viel Wissenswertes über Licht enthält.

13.15 Lichtjahr

Eine sehr gebräuchliche Einheit in der Astronomie zur Angabe von Entfernungen (keine Zeiteinheit!). Ein Lichtjahr, deutschsprachig abgekürzt mit **Lj**, international mit lyr (engl. *light year*), ist definiert als die Wegstrecke, die Licht oder Strahlung generell im Vakuum in einem Jahr zurücklegt. Weil die Vakuumlichtgeschwindigkeit c mit 299.792458 Millionen m/s sehr groß ist, ist ein Lichtjahr eine sehr große Distanz für irdische Verhältnisse, nämlich in vertrauten Einheiten 9.4605 Billionen km! Astronomisch gesehen ist ein Lichtjahr keine besonders große Distanz.

13.15.1 Beispiele

- ◇ Der nächste Stern zur Sonne, **Proxima Centauri**, die C-Komponente des hellen Sterns α *Centauri*, ist 4.3 Lj entfernt;
- ◇ Die **Milchstraße**, unsere Heimatgalaxie, hat einen Durchmesser von etwa 100000 Lj und ihr Zentrum ist von uns aus etwa 26 000 Lj entfernt;
- ◇ Unsere Nachbargalaxie, der **Andromedanebel** ist 2.2 Millionen Lj entfernt und vermutlich das am weitesten entfernte Objekt, das man noch mit bloßem Auge ausmachen kann. Trotzdem ist es lediglich ein Angehöriger unseres an sich unscheinbaren Galaxienhaufens, der lokalen Gruppe.
- ◇ Der nächste Galaxienhaufen zur lokalen Gruppe, auf den sie sich auch zubewegt, der **Virgo-Haufen**, ist etwa 52 Millionen Lj entfernt.
- ◇ Und schließlich ist das aktuell bestimmte Alter des Universums bei knapp 14 Milliarden Jahren, aber die Größe (der so genannte **Teilchenhorizont**) liegt bei 27.1 Mrd. Lj. für ein flaches und strahlungsdominiertes Universum.

13.15.2 abgeleitete und andere Größen

Es gibt abgeleitete Größen zum Lichtjahr auf kleineren Längenskalen, wie die Lichtsekunde, Lichtminuten, Lichtstunden, Lichttage und Lichtmonate, mit analoger Definition. So sind der

Mond gerade eine Lichtsekunde (etwa 300 000 km) und die Sonne 8 Lichtminuten entfernt. Auf diesen Skalen wird dann die Astronomische Einheit (AU) gebräuchlicher.

Ein geometrisch definiertes, alternatives Längenmaß ist die Parallaxensekunde (Parsec, pc).

13.16 Lichtkurve

Ein sehr gebräuchliches Diagramm in der Astronomie, dass die Strahlungsintensität einer kosmischen Quelle (auf der y-Achse) über der Zeit (auf der x-Achse) darstellt. Motiviert ist das ganz einfach dadurch, weil die Astronomen an Schwankungen der Helligkeit des Objekts interessiert sind. Lichtkurven (engl. *light curves*) eignen sich bestens, um *Studien der Variabilität* durchzuführen. So folgen Eigenschaften der Quelle, wie ihre Ausdehnung (Stichwort: Lichtlaufzeit) oder ihre physikalische Natur.

13.16.1 Wer die Wahl hat

Es bieten sich hier vielfältige Möglichkeiten: so können Strahlungsintensitäten bei verschiedenen Wellenlängen oder Energien der Strahlung benutzt werden. Der Astronom misst entsprechend Lichtkurven im Bereich der optischen Strahlung, Röntgenstrahlung, Gammastrahlung etc.

Als Maß für die Helligkeit bietet die Astrophysik ebenfalls eine Reihe von Größen an: so eignen sich für Lichtkurven die Leuchtkraft, der spektrale Fluss, der Gesamtfluss oder die bolometrische Helligkeit.

13.16.2 Lichtkurven von Sternen

Astronomen nehmen die Lichtkurven von einer Vielzahl kosmischer Quellen auf. Naheliegend sind Sterne. Kein Stern gibt einen konstanten Strahlungsstrom ab, sondern zeigt je nach Masse, Aktivität und Zusammensetzung (Metallizität) charakteristische Merkmale. Lichtkurven helfen dabei die Sterne in ganz unterschiedliche Typen von Veränderlichen einzusortieren.

13.16.3 Lichtkurven von Explosionen

Interessant sind auch kurzzeitige Ereignisse, die einen steilen Helligkeitsanstieg zur Folge haben. Diese Form nennt man Ausbrüche (engl. *bursts*) und wird bei Nuklear-Explosionen oder ganzen Sternexplosionen beobachtet. Entsprechend fallen in diese Kategorie von Ereignissen die Novae, Supernovae, Hypernovae und Gamma Ray Bursts. Unter dem Eintrag Zeitdilatation wird als Beispiel für eine Lichtkurve, die einer Supernova Typ Ia gezeigt (explodierende Weiße Zwerge).

13.16.4 Lichtkurven von speziellen Vorgängen

Anstiege in der Lichtkurve werden auch beobachtet, wenn ein Stern sich zu nahe an ein supermassereiches Schwarzes Loch im Herzen einer inaktiven Galaxie traut. Dann wird der Stern von immensen Gezeitenkräften zerrissen, was unter Umständen als Helligkeitsanstieg beobachtet werden kann. Der Grund: durch die unerwartete Mahlzeit für das Loch steigt auch die Leuchtkraft infolge der Akkretion rasant, aber nur für gewisse Zeit an.

Die Quasi-periodischen Oszillationen (QPOs) bezeichnen gerade ein charakteristisches Auf und Ab in Lichtkurven. Sie werden häufig bei Röntgendoppelsternen beobachtet und hängen mit Prozessen in der Akkretionsfluss zusammen - z. B. mit einer Rotationsbewegung, mit Epizykelfrequenzen oder mit dem Lense-Thirring-Effekt.

13.16.5 Mathematische Werkzeuge in der Analyse

Die Astronomen betrachten Lichtkurven nicht einfach nur als Intensität-Zeit-Diagramme; sie verwenden auch anspruchsvollere Analysetechniken wie die **Fourier-Transformation** (eine spezielle Integraltransformation, die auch in der Nachrichtentechnik breite Anwendung findet). Im so genannten Fourier-Raum heißen die Lichtkurven dann **Leistungsspektren** oder *Power density spectra* (kurz oft *power spectra*). Der Vorteil ist, dass charakteristische Perioden in der Lichtkurve dann als Peak im Leistungsspektren erscheinen. So sind z. B. QPO-Frequenzen direkt abzulesen und man kann versuchen sie z. B. mit Keplerfrequenzen (mit der Umlaufperiode) oder anderen charakteristischen Frequenzen zu interpretieren.

13.17 Lie-Ableitung

Die Lie-Ableitung ist eine spezielle, mathematische Operation, die bei der Allgemeinen Relativitätstheorie eine Rolle spielt. Die Lie-Ableitung bezüglich eines Tensorfeldes **X** erster Stufe lautet

$$L_X g_{\kappa\lambda} = X^\sigma \partial_\sigma g_{\kappa\lambda} + g_{\kappa\nu}\partial_\lambda X^\nu + g_{\lambda\nu}\partial_\kappa X^\nu.$$

Die Relativitätstheoretiker sind an den Symmetrieeigenschaften von Raumzeiten interessiert. Sie betrachten daher Isometrien. Es stellt sich heraus, dass ein mathematischer Ausdruck, die so genannte **Lie-Ableitung** der Metrik verschwinden muss, um die Metrik über eine Koordinatentransformation auf sich selbst abzubilden. Diese Gleichung heißt dann **Killing-Gleichung** und deren Lösungen Killing-Felder.

13.17.1 Was passiert bei der Lie-Ableitung?

Anschaulich entspricht die Lie-Ableitung einem **Paralleltransport** eines Tensors von einem Punkt an einen anderen in der Raumzeit entlang einer **Kongruenzkurve**. Danach werden die Tensoren an den verschiedenen Punkten verglichen. Beim Grenzübergang der Ableitung wird der Abstand infinitesimal, d. h. beliebig klein.

13.17.2 Eigenschaften der Lie-Ableitung bezüglich eines Vektorfelds

- ◇ Linearität
- ◇ Erfüllung der Leibniz-Regel (Produktregel bei Differentiation)
- ◇ Erhaltung des Tensortyps
- ◇ Kommutativität (Vertauschung) mit der Verjüngung
- ◇ Anwendbarkeit auf alle Tensoren

13.18 Linearbeschleuniger

Die Linearbeschleuniger sind Teilchenbeschleuniger mit gerader Beschleunigungsstrecke. Diese **Beschleunigerarchitektur** war in der Historie der Hochenergiephysik die erste Bauart. Linearbeschleuniger nennt man auch *LINACs* (Akronym aus dem Englischen aus *linear accelerator*).

13.18.1 Geradeaus geht's nicht weit

Die gerade Strecke begrenzt jedoch die erreichbaren Geschwindigkeiten von zu beschleunigenden Teilchen und ist auch architektonisch ungünstig, weil LINACs schnell die räumlichen Dimensionen einer Beschleunigeranlage sprengen. Daher ging man zu einer neuen Beschleunigerarchitektur über: den Kreisbeschleunigern. Diese haben dann den Vorteil, dass Teilchenstrahlen mehrfach die Beschleunigungsstrecke durchlaufen können und damit mehr Energie gewinnen; aber dies erkauft man sich mit dem Nachteil, dass nun Zentrifugalkräfte den Strahl (*beam*) aus seiner Sollbahn bringen, was durch Lorentz-Kräfte von magnetischen Führungsfeldern ausgeglichen werden muss.

13.18.2 Besser mit Wechselfeld

Die ersten LINACs waren recht einfache Anlagen mit einem beschleunigenden, elektrischen Gleichspannungsfeld. Diese Bauweise wurde später durch die **Hochfrequenzbeschleuniger** abgelöst. Hier sind die Felder nicht mehr statisch, sondern wechseln ihre Richtung. Die Umpolung des Feldes würde normalerweise in der 'Gegenphase' die Teilchen wieder abbremsen. Dies unterbindet man durch Abschirmung mit zylindrischen Kapseln, den *Driftröhren*, die als Faraday-Käfige im Innern feldfrei bleiben. Im LINAC muss die Länge der Driftröhren und den dazwischen liegenden Beschleunigungsstrecken sukzessiv zunehmen, weil die Teilchenbündel immer schneller werden.

13.18.3 Andere Beschleunigertypen

Siehe dazu auch die Einträge: Synchrotron, Synchrozyklotron und Zyklotron.

13.19 LINER

Hinter LINER verbirgt sich ein Akronym für einen bestimmten Typen Aktiver Galaktischer Kerne (AGN). Es steht für *low-ionization nuclear emission line region*, also einem Emissionsgebiet im Kern einer aktiven Galaxie, der gering ionisiert ist.

13.19.1 Eigenschaften

LINERs sind den Seyfertgalaxien vom Typ 2 sehr ähnlich und haben eine geringe Kernleuchtkraft. Im Spektrum findet man keine breiten Emissionslinien, aber schmale sind beobachtbar. Besonders stark sind die Linien von OI, OII, SII und NII sowie schwachen Linien von OIII.

13.19.2 eine Quelle

Ein prominenter Vertreter dieses Typs ist das Objekt LINER NGC 4258.

13.20 Linienelement

Das Linienelement ds^2 legt gerade die Eigenschaften einer Mannigfaltigkeit in der Differentialgeometrie eindeutig fest. In allgemeiner Form lautet es

$$ds^2 = \mathbf{g}_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

13.20.1 Mathematisches Rüstzeug von Einsteins Theorie

Die vierdimensionalen Mannigfaltigkeiten der Relativitätstheorie können gerade durch das Linienelement beschrieben werden. Im Prinzip kann man die Ausdrücke Linienelement, Metrik, Raumzeit und **metrischer Tensor** $\mathbf{g}_{\mu\nu}$ in der Relativitätstheorie synonym verwenden. Im Allgemeinen, gibt es in der Mathematik eine strengere Unterscheidung: Eine Mannigfaltigkeit mit einer Metrik heißt *Riemannsche Mannigfaltigkeit*. Die Raumzeit ist vierdimensional und ist damit eine bestimmte Mannigfaltigkeit spezieller Dimension. Das Linienelement ist eigentlich ein Quadrat eines infinitesimalen, raumzeitlichen Abstands, der lorentzinvariant ist. Das bedeutet, alle Beobachter zweier Ereignisse (Weltpunkte) werden sich darauf verständigen können, dass sie denselben raumzeitlichen Abstand haben.

13.20.2 ds^2 zur Bahnenklassifizierung

Greift man bestimmte Trajektorien (Weltlinien) in der Raumzeit, die Geodäten, heraus, so kann man sie anhand des Vorzeichen des Linienelements klassifizieren. Sie heißen

- ◇ *zeitartige* Geodäten bei $ds^2 > 0$,
- ◇ *lichtartige* Geodäten oder Nullgeodäten bei $ds^2 = 0$,
- ◇ und *raumartige* Geodäten bei $ds^2 < 0$.

Wesentliche Linienelemente der Relativitätstheorie, die die Krümmungseigenschaften und die Geometrie der Mannigfaltigkeit bestimmen, sind

- ◇ die Minkowski-Metrik der SRT,
- ◇ die Schwarzschild-Lösung,
- ◇ die Reissner-Nordstrøm-Lösung,
- ◇ die Kerr-Lösung,
- ◇ die Kerr-Newman-Lösung, alles Metriken Schwarzer Löcher,
- ◇ die Metrik von Gravasternen,
- ◇ die Metrik von Neutronensternen,
- ◇ und die Robertson-Walker-Metrik der Kosmologie.

13.21 LIRG

Siehe dazu die Beschreibung von ULIRG.

13.22 LMXB

Dieses Akronym steht für ***L**ow-**M**ass **X**-ray **B**inary*, übersetzt entsprechend Röntgendoppelsterne, die einen 'normalen' Stern geringer Masse enthalten. Röntgendoppelsterne werden im Fachjargon generell mit dem englischen Akronym **XRBs**, ***X**-**R**ay **B**inaries* bezeichnet.

13.22.1 Wirt & Parasit

LMXBs sind Systeme aus einem Wirtstern und einer kompakten Komponente, z. B. einem Neutronenstern oder einem stellaren Schwarzen Loch. Der Namenszusatz *low-mass* bezieht sich darauf, dass der Begleitstern leichter ist als zwei Sonnenmassen. Er stellt die Materie, die auf die kompakte Komponente überfließt und dabei charakteristische Röntgenspektren erzeugt. Das Überfließen der Sternmaterie, getrieben durch die Gravitationskräfte der kompakten Komponente, kann entweder geschehen, wenn der Begleitstern sein Roche-Volumen überschreitet oder wenn der kompakte Begleiter den Sternenwind des anderen Sterns zu sich heranzieht. Beides passiert typischerweise nur bei Riesensternen. Ihre Sternoberfläche berührt oder überschreitet dabei den inneren Lagrange-Punkt des Doppelsternsystems (L1 im zweiten Diagramm unter dem Eintrag Roche-Volumen). In diesem Punkt heben sich gerade die Gravitationskräfte von stellarer und kompakter Komponente auf: Die Sternmaterie ist ungebunden und kann den Riesenstern verlassen. Dann kann sie aber von der kompakten Komponente eingefangen werden.

13.22.2 rotierende Materiescheibe

Beide Sterne rotieren. Die Sternmaterie besitzt also Drehimpuls. Aus diesem Grund fällt sie nicht direkt auf kürzestem Wege auf die kompakte Komponente ein, sondern beschreibt eine kurvenförmige Bahn. Auf diese Weise bildet sich eine Akkretionsscheibe aus, im Allgemeinen eine Standardscheibe. Der Motor für die hohe Leuchtkraft dieser Objekte ist demnach die Akkretion.

13.22.3 weitere Einträge

Unter dem Eintrag Röntgendoppelstern findet sich eine zusammenhängende Beschreibung mit einer Abgrenzung von Typen anderer Röntgendoppelsterne (HMXBs, Mikroquasare, AXPs, CVs etc.).

13.23 LNRF

LNRF ist ein Akronym für *local non-rotating frame*, einem Bezugssystem, das lokal nicht rotiert. Es wurde 1970 von *James Bardeen* gefunden und wird in der Allgemeinen Relativitätstheorie zur Untersuchung rotierender Raumzeiten relativistischer Sterne wie

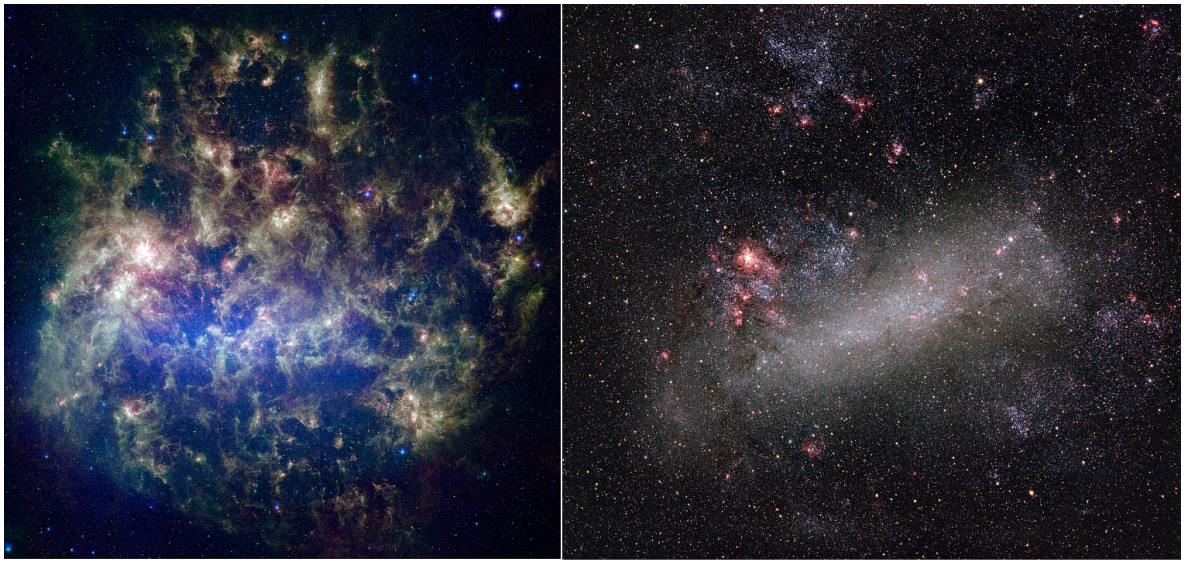

Abbildung 13.3: Die Große Magellanische Wolke im Infrarot (links) und optisch (rechts) 2006.

bei Neutronensternen, Magnetaren oder rotierenden Schwarzen Löchern (Kerr-Lösung) verwendet.

13.23.1 viele Namen, die dasselbe meinen

Der Beobachter im LNRF heißt *ZAMO* oder *Bardeen-Beobachter*. Unter dem Lexikoneintrag ZAMO ist eine genauere Beschreibung zu finden, wie man das LNRF definiert und findet.

13.24 Lokale Gruppe

Lokale Gruppe ist die Fachbezeichnung in der Astronomie für den **Galaxienhaufen**, in dem sich die die Milchstraße, die Andromedagalaxie (M31; eine Spiralgalaxie), die beiden Magellanischen Wolken (irreguläre Galaxien), die Dreiecksgalaxie (*Triangulumgalaxie* M33; eine Spiralgalaxie) und viele kleine Zwerggalaxien befinden. Verglichen mit anderen Galaxienhaufen, wie z. B. dem *Virgo-Haufen*, ist die Lokale Gruppe recht klein. Beobachtungen bezeugen nur weniger als etwa 50 Mitglieder, die sich alle innerhalb von etwa 1500 kpc befinden. Computersimulationen hingegen sagen einige hundert Galaxien in der Lokalen Gruppe voraus. Vermutlich wird diese Diskrepanz dadurch erklärt, dass viele der Zwerggalaxien nur noch von Dunkler Materie dominiert werden, kaum noch Gas und Sterne enthalten und dadurch extrem leuchtschwach und schwer beobachtbar sind (*Mayer et al.* 2007).

Weitere interessante Details gibt es unter den Einträgen Milchstraße, Galaxie und Hubble-Klassifikation.

13.24.1 Blicke auf die Große Magellanische Wolke

Wir betrachten nun ein Mitglied der Lokalen Gruppe etwas genauer: die *Große Magellanische Wolke* (engl. *Large Magellanic Cloud*, **LMC**). Es handelt sich um eine irreguläre Zwerggalaxie, die nur von der Südhalbkugel der Erde aus beobachtet werden kann. Am Himmel ist sie im Sternbild *Dorado* (dt. *Schwertfisch*) zu finden und erscheint als blasses, kugeliges Wölkchen. Diese Satellitengalaxie der Milchstraße ist 160000 Lichtjahre entfernt und hat einen Durchmesser von etwa 70000 Lichtjahren.

Die beiden Fotos 13.3 zeigen ein und dasselbe Objekt: die LMC - jedoch beobachtet in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen der elektromagnetischen Strahlung. Rechts ist ein optisches Foto zu sehen, das die LMC als irreguläre Galaxie entlarvt (Credit: *Wei-Hao Wang*, Institut für Astronomie, Hawaii, 2007). Links ist die LMC (bei gleicher Orientierung) im Infraroten zu sehen - das Foto wurde mit dem Weltraumteleskop Spitzer fotografiert, das nur Infrarotstrahlung detektieren kann (Credit: *M. Meixner*, NASA/JPL & the SAGE Legacy Team, 2007). 300000 Einzelbeobachtungen mit Spitzer wurden hier zu einem Falschfarbenkomposit zusammengefügt. Die Infrarotemission kommt vom überall in der LMC fein verteilten interstellaren Medium. Diese Material, im Wesentlichen Gas und Staub, wird durch Strahlung von Sternen in der Umgebung aufgeheizt und sendet Plancksche Strahlung (Wärmestrahlung) aus. Der Staub erscheint schwarz in der optischen Aufnahme und rötlich im Infraroten; Sterne sind optisch als weiße und im Infraroten als grüne Punkte zu sehen. Eine Sternentstehungsregion wird von Spitzer als rötliche Wolke fotografiert. In beiden Fotos ist eine dominant leuchtende Region links von der Bildmitte zu sehen. Das ist der *Tarantelnebel* (*30 Doradus*), eine Sternentstehungsregion, also ein 'Kollege' des Orionnebels in der Milchstraße. Optisch gut zu sehen ist die zentrale Balkenstruktur in der LMC. In der Wärmestrahlung erscheint dieser Bereich als blau glühender Balken unterhalb von der Bildmitte. Das ist das Licht von älteren Sternpopulationen in der LMC.

Die LMC hat 1987 für große Aufregung gesorgt, denn damals ereignete sich die berühmte **Supernova 1987A**. Das war die erste Gelegenheit für Astronomen eine Supernova vom Typ II live mitzuverfolgen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Ereignisses gibt es im Eintrag Supernova.

13.25 Loop-Quantengravitation

Die Loop-Quantengravitation (LQG), im Deutschen auch bisweilen Schleifen-Quantengravitation (auch Schleifenquantengravitation) genannt, ist eine Theorie der Quantengravitation. Damit wird bestrebt die Konzepte der Quantentheorie mit denjenigen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) zu vereinigen. Anders gesagt, wird der Versuch unternommen, das Gravitationsfeld zu quantisieren. Das damit verbundene Gravitationsfeldquant nennt man in den Quantenfeldtheorien (QFT) Graviton. In der LQG distanziert man sich eher vom Begriff des Gravitons und bezeichnet die Quanten der Theorie als *Loops* (dt. Schleifen).

13.25.1 gekörnte Raumzeit

In der ART ist die Raumzeit ein deformierbares, vierdimensionales, kontinuierliches Gebilde, ein **Raum-Zeit-Kontinuum**, das durch Energieformen wie der Masse gekrümmt wird. Die klassischen Theorien sehen keine Prinzipien wie Unschärfe oder diskrete physikalische

Abbildung 13.4: granulare Struktur der Raumzeit.

Größen (Quanten) vor. Die Raumzeit erscheint hinreichend glatt, kontinuierlich und weist allenfalls 'Löcher' in Form von Krümmungssingularitäten auf (die Schwarzen Löcher sind ein Beispiel dafür). Nun impliziert aber die Quantentheorie und im Speziellen die daraus mit der ART abzuleitende Planck-Skala, dass bei sehr starken Gravitationsfeldern auf sehr kleinen Längenskalen eine **Körnung der Raumzeit** auftauchen muss. Die Längenskala, wo die Körnung auftritt, ist im Bereich der Planck-Länge, also auf nur 10^{-33} cm. Das ist die kleinste Längeneinheit, die Physiker kennen. Die Granulation, erfordert eine Theorie, die über die ART hinaus geht und dem quantenhaften Charakter der Raumzeit Rechnung trägt: eine **Quantengravitation**.

13.25.2 Erfolge quantisierter Feldtheorien

Lange Zeit gab es für diese Theorie nur einen ernst zu nehmenden Kandidaten, die Stringtheorien. Dies war im Wesentlichen dadurch motiviert, dass diese Theorien ein Teilchen mit Spin 2 (Tensorboson) enthalten. Gerade das war eine gewünschte Eigenschaft für das Graviton. Deshalb waren die Stringtheorien schlagartig attraktiv für eine quantisierte Gravitationstheorie. Der mathematische Apparat der Quantenfeldtheorien erwies sich als sehr erfolgreich zur Beschreibung von Elementarteilchen, wie die Quantenelektrodynamik, Quantenchromodynamik, elektroschwache Theorie, Große Vereinheitlichte Theorien, generell gesagt, die Eichtheorien belegen. Diese Konzeption offenbarte eine einheitliche Sicht in Form des Standardmodells der Teilchenphysik. Diesen Apparat der Quantenfeldtheorien versuchten die Theoretiker auch auf die Strings anzuwenden.

13.25.3 Strings & Branen

Es stellte sich heraus, dass fadenförmigen Strings morphologisch verallgemeinert werden können zu flächenhaften Gebilden, den **Branen**. Die Stringtheorien erfordern jedoch die Existenz von (räumlichen) Extradimensionen (sechs oder sieben *weitere* Raumdimensionen neben den bekannten dreien). Sie erfordern auch eine Gültigkeit der Supersymmetrie (SUSY), um mit dem physikalischen Prinzip der Kausalität vereinbar zu sein. Eine Gültigkeit der SUSY hat zur Konsequenz, dass die bis heute bekannten Teilchen des Standardmodells so

genannte Superpartner haben. Der Teilchenzoo wird also signifikant vergrößert, viele neue SUSY-Teilchen müssen dann existieren. **Aber:** Bisher wurde keines dieser SUSY-Teilchen experimentell beobachtet, ebenso wenig weitere, räumliche Dimensionen neben den bekannten dreien.

13.25.4 Die Anfänge der Loop-Gravitationstheorie

Dies motivierte zur Suche nach alternativen Konzepten, die ganz andere Ansätze verfolgen, als die Stringtheorien; Konzepte, die nicht notwendig Extradimensionen und SUSY erfordern. Genau das ist die Loop-Quantengravitation, eine Theorie, deren Anfänge bis 1986 zurück reichen. In besagtem Jahr arbeiteten *Amitaba Sen* und *Abhay Ashtekar* an einer neuen Formulierung der ART mithilfe neuer mathematischer Variablen, die man **Zusammenhänge** (engl. *connections*) nennt. Das Christoffel-Symbol der ART (assoziiert mit den Einsteinschen Feldgleichungen und der kovarianten Ableitung), das anschaulich die Newtonsche Gravitationskraft in einer geometrischen Beschreibung der Gravitation ablöst, ist gerade mathematisch gesprochen ein Zusammenhang (Konnexion). In der *Ashtekar-Formulierung* der ART ist die Feldvariable nicht mehr die Metrik, sondern ein so genannter **selbst-dualer Zusammenhang** (der sich vom Christoffel-Symbol unterscheidet). Seither nennt man diese auch *Ashtekar-Variablen*.

Im gleichen Jahr, 1986, reformulierten *Ted Jacobson* und *Lee Smolin* die Wheeler-DeWitt-Gleichung in diesen neuen Variablen. Sie fanden auch eine Klasse von exakten Lösungen dieser Gleichungen: die **Wilson-Loops** (dt. Wilson-Schleifen). Um zu verstehen, was dies für mathematische Objekte sind, muss man weiter ausholen - leider wird es nun begrifflich recht kompliziert, weil eine Erklärung ohne Mathematik nicht angemessen ist. Der mathematisch weniger interessierte Leser mag den folgenden Abschnitt überspringen.

13.25.5 LQG in der Sprache der Mathematik: Holonomien und Wilson-Loops

Mit **Holonomie** bezeichnet man auch den *Parallel-Propagator* (Holonomie-Operator), also denjenigen Operator, der einen Parallel-Transport (eine Transformation, vergleiche auch Lie-Ableitung) eines Zusammenhangs, eines Vektors oder eines Tensors entlang einer geschlossenen Kurve auf einer Raumzeit (mathematisch eine *Riemannsche Mannigfaltigkeit*) bewerkstelligt. Holonomie genügt bestimmten mathematischen Eigenschaften, vor allem bildet sie eine mathematische Gruppe, die *Holonomie-Gruppe*.

Eine besondere Bedeutung hat nun die **Spur** des Holonomie-Operators (Summe der Diagonalelemente, wenn der Operator als Matrix dargestellt wird). Die Spur, bezogen auf einen bestimmten Pfad durch die Raumzeit, dient zur Bestimmung von parallel-transportierten physikalischen Größen, wenn ein Teilchen entlang des Pfads durch die Raumzeit propagiert.

Als Beispiel möge ein Elektron dienen, das sich durch die Raumzeit bewegt. Durch Anwendung des Parallel-Propagators, kann man untersuchen, wie sich die Observable Spin ändert. Die Krümmung der Raumzeit rotiert den Spinvektor bei der Bewegung entlang der geschlossenen Kurve. Berechnet man nun die Spur des zugehörigen Parallel-Propagators, so hat man ein Maß gefunden, wie sich die Observable Spin geändert hat. Als Anforderungen an die Kurven sei gestellt, dass sie 'glatt' seien und keine Überschneidungen aufweisen mögen.

*Die Spur des Holonomie-Operators ist **eichinvariant** und ist gerade der **Wilson-Loop**.*

Schon in der Betrachtung der QFTs als Eichtheorien erwiesen sich der Wilson-Loop bzw. Holonomien als die natürliche Basisvariablen und ermöglichten die Formulierung der Quantenchromodynamik (*Yang-Mills-Theorie*, einer Gitter-Eichtheorie). **Die Eichtheorien erfuhren so eine tief liegende geometrische Interpretation** (*Gambini & Trias*, 1981 und 1986). Auch in der Loop-Quantengravitation ist dieser Formalismus erfolgreich und gab dieser Theorie ihren Namen: *Loop* stammt verkürzend von *Wilson-Loop*. Die Wilson-Loops der Ashtekar-Zusammenhänge lösen also die reformulierte Wheeler-DeWitt-Gleichung.

Carlo Rovelli und *Lee Smolin* nutzten nun 1987 die Wilson-Loops als neue Basiszustände des separablen Hilbert-Raums der Quantengravitation. Physikalische Größen (*Observablen*) werden dann durch diese Loop-Basis dargestellt. Der Hilbert-Raum der Loops lässt sich im Vergleich zum Quantensystem des **Harmonischen Oszillators** der Quantenmechanik besser verstehen.

13.25.6 Einschub: harmonischer Oszillator

Beim harmonischen Oszillator geht man zunächst vom Hamilton-Operator (*Hamiltonian*) aus. Er enthält die Observablen Impuls und Ort als Operatoren. Man formuliert nun das Eigenwertproblem dieses Quantensystems, dessen Lösung *Energieeigenwerte* des Hamiltonians und *Eigenzustände* (Eigenfunktionen, Wellenfunktionen) liefert. Man hat also das *diskrete Spektrum des Operators* gefunden. Die Energieniveaus benachbarter Eigenzustände im harmonischen Oszillator unterscheiden sich gerade um ein *Oszillatorquant* (*Vibron*), das eine diskrete Energie hat, das dem Produkt von Planckschem Wirkungsquantum und Oszillatorfrequenz entspricht. Mit einer natürlichen Zahl n kann man das diskrete Spektrum parametrisieren. Der Grundzustand, der **Vakuumzustand** des harmonischen Oszillators, hat gerade $n = 0$ und liefert einen endlichen Energieeigenwert, die *Vakuumenergie* des harmonischen Oszillators. Der n-te Eigenzustand enthält gerade n Oszillatorquanten. In der Feldtheorie der Elektrodynamik, der QED, die formal ähnlich zu konstruieren ist, heißen diese Teilchen Photonen. Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes ist jedoch ungleich komplizierter in ihren Details als die Quantenmechanik des harmonischen Oszillators (unter anderem wegen der Renormierungsprozedur).

13.25.7 quantisierter Raum: Volumenquanten

Die **Hamilton-Jacobi-Theorie**, die bereits in der klassischen Mechanik Anwendung findet, kann benutzt werden, um die Gestalt des *Hamiltonians* der LQG zu finden. Die Methode der LQG folgt prinzipiell dem gerade beschriebenen Konzept der Quantenmechanik (wenn man sich einen geeigneten Hamiltonian beschafft hat), beachtet dabei aber auch die Gesetzmäßigkeiten der Allgemeinen Relativität. Man kann dabei soweit gehen zu sagen, dass die lokale Messung von Längen, Flächen und Volumina einer Vermessung der lokalen Eigenschaften des Gravitationsfeldes gleich kommt. So stellt sich das Volumen in der LQG als **Volumenoperator** heraus, der eine nicht-lineare Funktion des Gravitationsfeldes bzw. der Metrik ist. Das Spektrum dieses Operators ist, analog wie oben beim Harmonischen Oszillator dargestellt, *diskret*, d. h. das Raumvolumen ist quantisiert in **Volumenquanten**. Dies sind die irreduziblen Elemente des Raums, die eine Volumen von 10^{-99} Kubikzentimetern einnehmen (Planck-Länge hoch 3). Entsprechend finden sich im Universum, das einen Hubble-Radius (siehe dazu Horizont) von etwa 13.6 Mrd. Lichtjahren hat, 10^{184} Volumenquanten! Damit befinden sich in einem Kubikzentimeter mehr

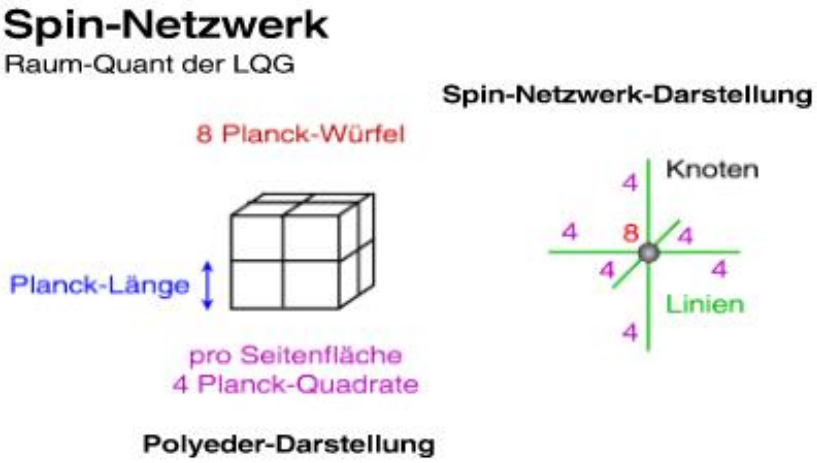

Abbildung 13.5: Spin-Netzwerk Darstellung eines Würfels.

Volumenquanten (10^{99}), als Kubikzentimeterwürfel im Universum (10^{84})!

Die resultierende, körnige oder **granulare Struktur der Raumzeit** (engl. *grains of space-time*) auf der Planck-Skala ist ein wichtiges Ergebnis der Loop-Quantengravitation und wurde 1992 gefunden. Die LQG beschreibt demgemäß die *kleinskalige Struktur der Raumzeit* (engl. *small scale structure of space-time*) und erweitert die relativistische Kosmologie auf der mikroskopischen Skala. Die Körnung umschreibt man manchmal mit dem Begriff '*Raumzeitschaum*'. Dieses Resultat der LQG steht in krassem Gegensatz zum Begriff Raum-Zeit-*Kontinuum* der Relativitätstheorie: die Raumzeit entpuppt sich auf den kleinen Quantenskalen als diskontinuierlich oder *diskret*.

13.25.8 quantisierter Raum: Flächenquanten

Nun befindet sich zwischen benachbarten Raumvolumina eine gemeinsame Fläche mit bestimmtem Flächeninhalt (engl. *area*). Der Flächeninhalt ist ebenso abhängig vom Gravitationsfeld und quantisiert wie das Volumen, nämlich in **Flächenquanten**. Ihre Ausdehnung ist gerade das Quadrat der Planck-Länge, also 10^{-66} Quadratzentimeter. Ihr Daumennagel besteht also aus 10^{66} dieser Flächenquanten, die Erdoberfläche aus 10^{85}. Man kann sich nun im Allgemeinen einen Quantenzustand, der aus n Volumenquanten bestehen möge, als einen so genannten *Graphen* vorstellen, der **Knoten** aufweist. Das Teilgebiet der Mathematik, das sich damit auseinander setzt, heißt *Knotentheorie*. Die Knoten entsprechen gerade den Volumenquanten; benachbarte Volumenquanten sind durch Flächenquanten 'verbunden'.

13.25.9 Spin-Netzwerke

Die gerade beschriebene Struktur nennen die Theoretiker **Spin-Netzwerk**. Man kann diesen Gebilden Quantenzahlen zuordnen, die gerade mit den Volumen- und den Flächenquanten assoziiert sind. Dies ist schematisch in der Abbildung 13.5 dargestellt: Wir zerlegen den dort gezeigten Polyeder, ein dreidimensionaler 'Vielflächner', in Volumenquanten. Im Beispiel ist dies für einen Würfel geschehen, der aus acht Volumenquanten bestehen möge. Die Darstellung

dieses Gebildes als Spin-Netzwerk geschieht nach dem folgenden Algorithmus: Wir skizzieren einen Knoten und versehen ihn mit einer Zahl, die der Anzahl seiner Volumenquanten entspreche, in diesem Fall acht. Für jede Berandungsfläche des Polyeders zeichnen wir dann eine (beliebig lange) Linie, im Beispiel also sechs Linien. Die Zahlen an diesen Linien geben die Anzahl der Flächenquanten der jeweiligen Seite an, in diesem Beispiel immer vier. Dies bildet das einfache Spin-Netzwerk in der Abbildung rechts dargestellt.

Beliebige Volumina lassen sich so als komplizierte Spin-Netzwerke darstellen. In der LQG ist es nun auch möglich Spin-Netzwerke *ohne* Pendant in der Polyederdarstellung zu generieren. In Spin-Netzwerken sind nur die Quantenzahlen und die relativen Verknüpfungen relevant. Sie enthalten die Information über den quantisierten Raum.

Die Entdeckung der Spin-Netzwerke (engl. *spin network*) in der LQG war ein wichtiger Schritt für die Theorie (*Rovelli & Smolin* 1995). Der Begriff Spin-Netzwerk wurde jedoch bereits 1971 von dem englischen Relativisten und Mathematiker *Roger Penrose* eingeführt, mit der Absicht Mannigfaltigkeiten (in der ART sind das Raumzeiten) eher von einem kombinatorischen Standpunkt zu sehen. Bevor die Spin-Netzwerke Einzug in die LQG fanden, wurden die Loops und Multiloops (ein Zustand aus vielen Loops, die auch überlappen können) als Basiszustände für den Hilbertraum der Theorie herangezogen. Es ist wie in der Quantentheorie: einen beliebigen Quantenzustand kann man in Basiszuständen ausdrücken. Wem das noch nichts sagt: Es verhält sich so ähnlich wie mit beliebigen Zahlen, die man in Potenzen der Zahl 10 zerlegen kann: $123 = 1 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0$.

Spin-Netzwerke stellen eine neue, orthonormale Basis dar.

Sie weisen gegenüber den Loop-Zuständen rechentechnische Vorteile auf. So diagonalisieren Spin-Netzwerk-Zustände den Flächen- und Volumenoperator, was sie 'mathematisch handlicher' macht.

13.25.10 quantisierte Zeit

Es wäre nun zu vereinfachend anzunehmen, dass der Raum aus kleinen Polyedern besteht. Dieser Ansatz trägt der Krümmung des Raumes nicht Rechnung. Außerdem wurde in der bisherigen Betrachtung die Zeitkoordinate vernachlässigt, die doch in der ART ein vernetztes Kontinuum mit den drei Raumrichtungen bildet. Man muss also den Spin-Netzwerken eine zeitliche Entwicklung zugestehen. Wie soll das gehen? Man muss sich das so vorstellen, dass durch diese Entwicklung Knoten im Spin-Netzwerk verschwinden, neue auftauchen, neue Verbindungen geknüpft und alte aufgelöst werden. Ein solches Gebilde heißt **Spinschaum** (engl. *spin foam*) und ist in der nächsten Abbildung unten illustriert. Durch die zeitliche Entwicklung werden die Knoten der Spin-Netzwerke zu Linien im Spinschaum, ebenso werden die Linien im Spin-Netzwerk zu Flächen im Spinschaum. In der Abbildung wird eine Zeitrichtung angegeben. Die Zeit sei jedoch auch quantisiert in den fundamentalen Einheiten der Planckzeit, also in 'Zeitpaketen' von 10^{-43} Sekunden. Damit sei die Zeit in der LQG nicht der sprichwörtliche, kontinuierliche Fluss, sondern eher vergleichbar mit dem Ticken einer Uhr:

Wie der Zeiger auf dem Ziffernblatt der Uhr mache die Zeit Sprünge!

Bei diesen 'Zeitsprüngen' ändert sich die Gestalt des Spin-Netzwerkes schlagartig, instantan. Diese Entwicklung wird sichtbar, wenn man den Spinschaum (in Abbildung 13.6 links

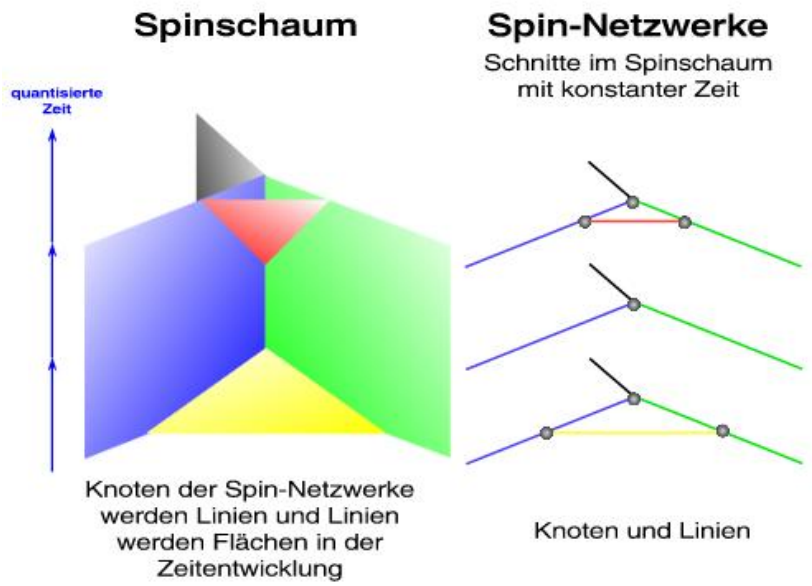

Abbildung 13.6: Spinschaum und Foliation in Spin-Netzwerke.

dargestellt) entlang der Zeitachse in Spin-Netzwerke zerlegt (in Abbildung rechts dargestellt). Mit jedem **Zeitquant** reformiert sich das Spin-Netzwerk. Oder anders gesagt: Überall dort, wo sich ein ein Spin-Netzwerk neu formiert, tickt einmal eine lokale Uhr!

13.25.11 Überall & nirgendwo

Das erinnert an den ADM-Formalismus (3+1 Split) der ART, wo man die vierdimensionale Raumzeit in dreidimensionale (räumliche) Hyperflächen mit jeweils konstanter Zeit auffächert. Zeitentwicklung kommt dadurch zustande, dass man sich entlang des Shift-Vektors der Raumzeit von einer zur nächsten Hyperfläche bewegt. Dieses so genannte *Slicing* (Foliation, Blätterung) ist wesensgleich mit der Zerlegung des Spinschaums in der LQG.

Die Darstellung von Spinschaum wird häufig mit den Feynman-Diagrammen der Quantenfeldtheorien verglichen. Hier ist jedoch Vorsicht geboten! Feynman-Diagramme enthalten eine Zeit und eine Raumachse, die man üblicherweise weglässt. Im Prinzip gibt es das beim Spinschaum nicht. Ein Spin-Netzwerk ist ein fixierter Quantenzustand mit bestimmtem Volumen und bestimmter Fläche. Zeit ist ein lokales Phänomen und mit einer Umordnung der Knoten- und/oder Linienstruktur des Spin-Netzwerks verbunden. Anders gesagt: In der Loop-Quantengravitation ist die Raumzeit (Newton: das Gravitationsfeld) eine Superposition (Überlagerung) von Spin-Netzwerken, so wie das elektromagnetische Feld in der Quantenelektrodynamik eine Superposition von Photonen ist. Das Erstaunliche ist nun, dass ein Spin-Netzwerk-Zustand **nicht lokalisierbar** ist, er hat also keinen definierten Ort! In diesem Sinne ist er abstrakt und **nicht** auf einer raumzeitlichen Mannigfaltigkeit definiert. Wie kommt es zu dieser seltsamen Eigenschaft?

13.25.12 Hintergrundunabhängigkeit

Letztendlich hat man diese seltsame Eigenschaft als Forderung in die Theorie hinein gesteckt. Die Eigenschaft trägt den Namen *Hintergrundunabhängigkeit* und ist die wichtigste Eigenschaft der LQG. Historisch gesehen wurde sie von der ART antizipiert und jeder kovarianten Quantengravitation impliziert. Die Geometrie der Raumzeit ist in der ART dynamisch, d. h. der Hintergrund ist nicht statisch, sondern verändert sich durch den Einfluss von sich bewegenden Massen und Energien. Ein anderer Aspekt der Hintergrundunabhängigkeit ist, dass die Wahl des Koordinatensystems frei ist. Das folgt aus dem Kovarianzprinzip, denn die Tensoren der ART sind koordinatenunabhängig. Mathematisch fasst man diese Eigenschaft mit einer Unabhängigkeit der Theorie von 'Verschiebungen' auf der Mannigfaltigkeit. Allgemein nennt man Abbildungsvorschriften in der Mathematik Morphismen. Sie sind Gegenstand der Kategorietheorie, einer Teildisziplin der Mathematik. Die Unabhängigkeit vom Hintergrund nennt man mathematisch *Diffeomorphismusinvarianz*. Der Diffeomorphismus ist eine Abbildung, die gerade die Verschiebung auf der Mannigfaltigkeit bewerkstelligt. Trotz dieser Verschiebung, darf sich aber die Physik nicht ändern; das diktiert die ART.

Abstrahiert man zwei Spin-Netzwerke als Graphen, so können sie über den Diffeomorphismus ineinander überführt werden. Die Diffeomorhismusinvarianz besagt nun, dass diese beiden Spin-Netzwerke **eich-äquivalent** sind, also die *gleiche Physik* beschreiben. Diese Äquivalenz ist wesensgleich zur Äquivalenz zweier Lösungen der Einstein-Gleichungen der ART (z. B. der Kerr-Lösung), die sich nur in der Wahl der Koordinaten unterscheiden (z. B. Boyer-Lindquist-Koordinaten gegenüber Kerr-Schild-Koordinaten): beide Lösungen beschreiben dasselbe Objekt (in diesem Beispiel ein rotierendes, ungeladenes Schwarzes Loch), also dieselbe Physik. Dies führt sogar auf die folgende Aussage:

*Das Spin-Netzwerk ist nicht **in** der Raumzeit, es **ist** die Raumzeit!.*

Allerdings 'leben' dynamische Objekte wie Teilchen des Standardmodells *auf* Spin-Netzwerken. Teilchen und Felder in Spin-Netzwerken geben den Knoten und Linien weitere Quantenzahlen. Die Veränderung der Quantenzahlen im Spin-Netzwerk entlang eines Graphen symbolisiert gerade die Bewegung des Teilchens durch die Raumzeit. 1994 wurde die Kopplung von Materie (insbesondere Fermionen) an die bis dato materiefreie LQG untersucht. Beide orthonormale Basen, Loop-Basis wie Spin-Netzwerk-Basis, dienen also als mathematische Darstellung von **hintergrundunabhängigen, physikalischen Größen** (*Diffeomorphismusinvarianten*).

Die neue Formulierung in Spin-Netzwerken brachte der LQG den alternativen Namen **Quantenspindynamik** (QSD) ein. Manchmal spricht man auch von der **Quantengeometrie**, wegen des tiefen geometrischen Aspekts, den diese Quantengravitation von der ART geerbt hat.

13.25.13 Strings vs. Loops

Die LQG wird gewöhnlich in vier Dimensionen und ohne Supersymmetrie formuliert. Sie ist zwar kompatibel mit diesen Konzepten, benötigt sie aber *a priori* nicht. Dies ist der gewichtigste Unterschied zu den Stringtheorien. Bisher gibt es keinerlei experimentelle Evidenz für zusätzliche Raumdimensionen und supersymmetrische Teilchen. Diese empirische

Beobachtung spricht deshalb besonders für die LQG bzw. Theorien ohne Extradimensionen und ohne Supersymmetrie.

Auch zielt die LQG noch **nicht** so sehr auf eine Unifikation aller vier Wechselwirkungen, die es in der Natur gibt, sondern lediglich auf eine Quantisierung der Gravitation unter strenger Berücksichtigung der erfolgreichen Konzepte der ART. In diesem Sinne ist sie vom Standpunkt des Relativisten ein 'natürlicher' Zugang zur Quantengravitation, als wenn man sich der Herausforderung von der Seite der Quantenfeldtheorien nähert. Anders gesagt: Die LQG 'will weniger', da sie nicht im Unifikationsgeist einer Theorie von Allem (engl. *Theory of Everything*, TOE) steht. Es ist aber nicht auszuschließen, dass sich Konzepte der LQG auf eine TOE anwenden lassen.

13.25.14 experimentelle Tests der LQG

Eine wichtige Eigenschaft einer Theorie ist ihre *Falsifizierbarkeit*. Die Wissenschaftstheorie besagt, dass man eine Theorie *niemals beweisen*, sondern nur widerlegen kann (Buch von *Karl R. Popper*: Logik der Forschung). Vor dem Ruhm einer Theorie steht die *Bewährung*: Die Physiker testen die Prognosen einer Theorie immer wieder in physikalischen Experimenten. Erst wenn die Theorie immer wieder übereinstimmende Resultate mit dem Experiment (in der Astronomie sind das astronomische Beobachtungen) liefert, so hat sie sich bewährt. Stringtheorien und LQG müssen sich noch bewähren. Welche Vorhersagen macht die LQG und wie kann man sie testen?

- ◇ Von prinzipiellem Interesse ist die Physik auf der Planck-Skala. Die Granulation der Raumzeit sollte hier - stimmen LQG im Speziellen und Anforderungen an eine Quantengravitation im Allgemeinen - nachweislich zu Abweichungen führen. Vielleicht gelingt ein experimenteller Aufbau zum (direkten oder indirekten) Nachweis der Volumenquanten der LQG, auch wenn die assoziierte Skala außerordentlich klein ist. Derzeit ist die klassische Planck-Skala unerreichbar mit direkten Experimenten wie z. B. mit Teilchenbeschleunigern.

- ◇ Eine theoretische Ableitung der Bekenstein-Hawking-Entropie, die sich relevant für die Thermodynamik Schwarzer Löcher zeichnet, ist auch in der LQG möglich. Die Stringtheorien erlauben eine Berechnung, die zum selben Ergebnis führt. Vom theoretischen Standpunkt ist dieses Resultat beruhigend, aber sicher keine starke Stütze der Theorie. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bekenstein-Hawking-Entropie selbst noch nicht experimentell untermauert wurde, sondern nur in ganz verschiedenen Theorien übereinstimmend vorkommt. Das Attraktive an der LQG-Rechnung ist, dass sie eine neue, mikroskopische Interpretation der Bekenstein-Hawking-Entropie auf den Tisch bringt: diese Entropie resultiert, indem man die Anzahl der Eigenzustände des Flächenoperators (s. o. Flächenquanten) auf dem Horizont zählt.

- ◇ In der Optik sind neue Effekte zu erwarten. Während das gewöhnliche optische Vakuum *nicht-dispersiv* ist, sollte infolge der Granulation der Raumzeit, wie sie die LQG beschreibt ein dispersives Vakuum resultieren. Dispersion heißt in der Optik, dass die Vakuumlichtgeschwindigkeit (Symbol c) von der Farbe abhängt. In der klassischen Elektrodynamik kann man gerade die **Wellengleichung** der Strahlung (unquantisiert) ableiten, wie sie in die Optik eingeht. *Gambini & Pullin* haben 1998 die klassische Elektrodynamik mit den Konzepten der LQG

reformuliert und eine modifizierte Wellengeschwindigkeit abgeleitet. In einem **c-Test** könnte man nun experimentell überprüfen, ob die Lichtgeschwindigkeit auf der Skala von Minuten - wie sie vorhersagen - tatsächlich für unterschiedliche Farben abweicht. Es wurde vorgeschlagen diesen Sachverhalt mit Gamma Ray Bursts in kosmologischen Distanzen zu überprüfen. Der elektromagnetische Schauer dieser kosmischen Strahlungsausbrüche, der im GRB-Nachleuchten (engl. *afterglow*) auf allen Spektralbereichen auftritt, eignet sich hervorragend zum c-Test, weil die geringen Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit kumuliert werden und bei den hohen Entfernungen kosmologischer GRBs deutlich zu Tage treten sollten. Bislang gibt es keine Resultate dieses Experiments. Erste Ergebnisse erhofft man sich von der GRB-Mission **GLAST**.

13.25.15 c $\neq$ const

Die nichtuniverselle Lichtgeschwindigkeit der LQG stellt Einsteins Spezielle Relativitätstheorie (SRT) in Frage! Es existieren bereits Modifizierungen der SRT, dass die Lichtgeschwindigkeit eben nur im Limit hoher Wellenlängen (kleiner Photonenenergien) gilt. Ob 'die heilige Kuh der Physiker' geschlachtet werden muss und die Lichtgeschwindigkeit doch nicht konstant ist, müssen präzise Experimente ergeben.

13.25.16 Loop-Quantengravitation und Kosmologie

Mit den Methoden der Loop-Quantengravitation lässt sich auch Kosmologie betreiben. Diese Disziplin heißt in der Literatur **Loop-Quantenkosmologie** (*Loop Quantum Cosmology*, LQC). Einige LQG-Rechnungen zeigen bereits entscheidende Konsequenzen für die Kosmologie:

- ◇ Das Universum habe laut LQG im Urknall eine **Mindestgröße**. Es gäbe nach dieser Vorstellung also **keine Urknall-Singularität**! Das Big-Bounce-Modell der Kosmologie (*Priester & Blome*, 1991) erlebt so die Wiederbelebung mit neuer Physik (*Bojowald*, AEI Golm, 2003, s. u.).

- ◇ Der kosmologische Skalenparameter der Friedmann-Weltmodelle (symbolisiert durch a(t) oder R(t)) parametrisiert die Entwicklung des Universums in der Art eines Zeitparameters. Weil das Volumen des Universums gemäß LQG quantisiert ist, sei es auch der Skalenparameter und die (kosmologische) Zeit! Die kosmologische Entwicklung sei daher **diskret**.

- ◇ Eine besonders interessante Implikation hat die LQG auf die Inflation, einer exponentiellen Expansionsepoche im frühen Universum. In der LQG benötigt man kein hypothetisches Skalarfeld, genannt Inflaton, um die anfänglich überlichtschnelle Expansion der Inflationsära zu treiben. Die exponentielle Ausdehnung sei **allein eine Folge** der Quanteneigenschaften der Raumzeit!

13.25.17 LQG-Kollapsrechnungen

Sehr interessante Arbeiten sind in den Jahren 2005 und 2006 zum Gravitationskollaps im Rahmen der LQG erschienen (*Bojowald et al.* 2005, *Goswami et al.* 2006). Im Kern zeigen

diese vorläufigen Rechnungen, dass die **Ausbildung einer Singularität verhindert** werden kann. Wie funktioniert das?

Zunächst erinnert das Vorgehen an die ersten rein relativistischen Kollapsrechnungen in den 1930er Jahren: zur Vereinfachung nehmen die Physiker den homogenen und isotropen Fall an. Sie betrachten nun ein Skalarfeld, das in sich zusammenfallen möge. Das Skalarfeld steht dabei für eine einfache Form von Materie (wir erinnern uns, dass z. B. das Higgs-Boson, die Kaonen und die Pionen skalare Bosonen mit Spin 0 sind). Interessanterweise war es den Theoretikern möglich, die FLRW-Metrik der Kosmologie zur Beschreibung des Kollapses im Innern zu benutzen. Aber hier kommen die Loop-Effekte ins Spiel: diese Metrik wird granular. Eine Quantisierung der Raumzeit wird dann wichtig, wenn der Skalenfaktor *a(t)* vergleichbar wird mit einem kritischen Wert a_*, der durch die LQG festgelegt wird. Fuer $a \gg a_*$ liegt der klassische, relativistische Fall vor, wo die granulare Raumzeit irrelevant ist. *Goswami et al.* betrachten nun den interessanten Fall $a \ll a_*$ und setzen den Hamiltonian der LQG an. Zur Erinnerung: Der Hamiltonian ist der Energieoperator der Quantentheorie, dessen Spektrum (die Eigenwerte) etwas über die diskreten, energetischen Zustände des Systems verrät.

Interessant ist nun die zeitliche Entwicklung des Skalarfelds im Kollaps. Dieser Vorgang wird durch eine Bewegungsgleichung des Skalarfelds Φ beschrieben, die in der Quantenfeldtheorie allgemein **Klein-Gordon-Gleichung** heißt. Die Diskussion der Dynamik dieses Feldes zeigt, dass der Kollaps aufgehalten werden kann und ein Radius null ('die Singularität') nicht erreicht wird. Weiterhin zeigt sich, dass die Energiedichte des Feldes nicht unendlich wird. Konsequenz: Die Quantisierung der Raumzeit verhindert die Ausbildung von Singularitäten!

Wer drückt dagegen? Wir wissen ja von anderen kompakten Objekten, dass sich irgendein Druck dem mächtigen Gravitationsdruck im Kollaps entgegenstellen muss, damit der Kollaps auf ein Schwarzes Loch aufgehalten werden kann. *Goswami et al.* untersuchten den effektiven Druck des Feldes und konnten zeigen, dass dieser im Regime $a \ll a_*$ **negativ** wird. Ein negativer Druck wirkt ja wie die Dunkle Energie in der Kosmologie antigravitativ. Der negative Druck ist sogar so stark, dass er einen **Massenverlust nach außen** antreibt.

Sehr aufregend ist der Umstand, dass diese LQG-Kollapsrechnungen im Prinzip astronomisch beobachtbar sind! Denn der Massenverlust im Kollaps sollte Variationen in der Lichtkurve des Kollapsars bewirken. Sicherlich wird dieser Nachweis nicht leicht sein, zumal beim Sternenkollaps immer auch Massenverluste auftreten und darüber hinaus die Natur komplizierter ist, als in diesem Modell angenommen wurde. So zeigen Computersimulationen von Supernovae Typ II, dass diese vorzugsweise anisotrop und inhomogen sind. Dennoch sind die Loop-Rechnungen sehr ermutigend, zeigen sie doch, dass die Natur eventuell ohne Singularitäten auskommt.

13.25.18 Der Stand der Dinge

Der aktuelle Stand ist, dass sowohl LQG als auch Stringtheorien erstaunliche und neue Konzepte für das Verständnis von Raum und Zeit bieten. Leider gibt es bisher keinerlei experimentelle Hinweise, die die eine oder andere Theorie favorisieren würden. Deshalb stellt sich die aktuelle Situation so dar, dass beide Theorien richtig (im Sinne von nicht falsifizierbar), nur eine von beiden richtig oder gar beide falsch sein könnten! Die bisherige Nichtnachweisbarkeit von Extradimensionen und Supersymmetrie lassen die LQG attraktiver erscheinen, weil sie ohne diese Konzepte auskommt.

Eine aktuelle Entwicklung zeigt sogar auf eine Verknüpfung von LQG und Stringtheorien ohne Extradimensionen und ohne Supersymmetrie (*Thiemann* 2004). Der Einfachheit halber

ist dieser Zugang zunächst beschränkt auf einen geschlossenen, bosonischen String auf flacher Minkowski-Geometrie. Die Bedeutung des **LQG-Strings** für die Physik bleibt abzuwarten.

Eine Entscheidung könnte auch die Lorentzinvarianz herbeiführen: In der ART ist diese Symmetrie erfüllt. Die moderne Forschung deutet an, dass die Lorentzinvarianz unter Umständen verletzt sein könnte. Auf der Grundlage astronomischer Beobachtungen werden die Bedingungen für Lorentzinvarianz derzeit erforscht. Vielleicht hilft dieser Sachverhalt eines Tages, um eine geeignete Quantengravitation - Stringtheorien, LQG oder etwas ganz anderes - auszuwählen bzw. aufzufinden.

Wer sich über das Für und Wider der LQG eine eigene Meinung bilden mag, dem seien die unten verlinkten, relativ verständlichen Papiere *Loop Quantum Gravity: An Outside View* von *Nicolai et al.* (2005) und *Loop Quantum Gravity: An Inside View* von *Thiemann* (2006) empfohlen.

Das letzte Wort hat jedoch - wie immer in der Physik - das Experiment.

13.25.19 Webtipps

- ◇ Artikel auf Einstein online: Die gebändigte Dichte von *Martin Bojowald* (AEI Golm) - sehr verständlich; über die kosmologische Rolle der LQG
- ◇ Website: Carlo Rovelli, einer der LQG-Pioniere, bietet auf seiner Homepage einige Materialien an.

13.25.20 Publikationen

- ◇ *Baez*: Spin Network States in Gauge Theory; gr-qc/9411007, 1994
- ◇ *Rovelli & Smolin*: Spin Networks and Quantum Gravity; gr-qc/9505006, 1995
- ◇ *Rovelli*: Loop Quantum Gravity; living reviews of relativity, 1997
- ◇ *Gambini & Pullin*: Non-standard Optics from quantum spacetime; gr-qc/9809038, 1998
- ◇ *Smolin*: How far are we from the quantum theory of gravity?; hep-th/0303185, 2003 (review)
- ◇ *Rovelli*: A dialog on quantum gravity; hep-th/0310077, 2003 (sehr unterhaltsam!)
- ◇ *Smolin*: Atoms of Space and Time; Scientific American, Januar 2004 (leicht verständlich)
- ◇ *Thiemann*: The LQG-String: Loop Quantum Gravity Quantization of String Theory; hep-th/0401172, 2004
- ◇ *Bojowald et al.*: A black hole mass threshold from non-singular quantum gravitational collapse; gr-qc/0503041, 2005
- ◇ *Goswami et al.*: Quantum Evaporation of a Naked Singularity; gr-qc/0506129, 2005
- ◇ *Nicolai et al.*: Loop Quantum Gravity: An Outside View; hep-th/0501114, 2005
- ◇ *Thiemann*: Loop Quantum Gravity: An Inside View; hep-th/0608210, 2006

13.26 Lorentz-Faktor

Der Lorentz- oder Γ-Faktor (Gammafaktor) ist eine der wichtigsten dimensionslosen Größen in der Relativitätstheorie. Dieser Faktor hängt ausschließlich von der Relativgeschwindigkeit v ab. Dimensionslos wird der Lorentz-Faktor dadurch, dass die Geschwindigkeit v in der natürlichen Einheit der Relativitätstheorie, der Vakuumlichtgeschwindigkeit c gemessen wird. Im Vakuum bewegt sich das Licht mit 2.99792458×10^8 m/s. Das Verhältnis von Relativ- zu Lichtgeschwindigkeit wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben β bezeichnet.

Es gilt

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

mit der üblichen Vereinbarung

$$\beta = v/\mathrm{c}.$$

13.26.1 Γ als relativistisches Maß

Der Γ-Faktor steigt sehr stark mit Erhöhung der Geschwindigkeit an. Im Grenzwert $v =$ c, divergiert der Lorentz-Faktor und geht gegen unendlich! Die folgenden Diagramme 13.7, 13.8 und 13.9 zeigen die Abhängigkeit des Lorentz-Faktors von der Relativgeschwindigkeit in verschiedenen Geschwindigkeitsregimes:

- v/c zwischen 0 und 1,
- v/c größer 0.9,
- v/c größer 0.99.

Die Relativgeschwindigkeit ist ein Vektor **v** und gibt die relative, unbeschleunigte Bewegung von zwei Bezugssystemen zueinander an. So kann man beispielsweise die Geschwindigkeit eines schnellen Teilchens betrachten. Die beiden Bezugssysteme sind einmal das uns vertraute **Laborsystem**. So nennen Physiker das Bezugssystem, in dem man das sich bewegende Teilchen untersucht. Zum andern gibt es das **Ruhesystem** des Teilchens, in dem das Teilchen sich nicht bewegt; der Beobachter 'sitzt' sozusagen auf dem Teilchen. Die Relativgeschwindigkeit gibt nun an, wie sich das Ruhesystem gegenüber dem Laborsystem bewegt.

Bei einer Betrachtung in einer Raumdimension, bewegen sich beide Systeme in dieselbe Richtung, aber unterschiedlich schnell. Dann reicht es, diesen Unterschied mit der Relativgeschwindigkeit v anzugeben, die in diesem Spezialfall nur einen Betrag hat und ein *Skalar* ist. Im Allgemeinen bewegen sich Ruhesystem und Laborsystem allerdings in unterschiedliche Richtungen und der *Vektorcharakter* der Relativgeschwindigkeit muss berücksichtigt werden. In den Lorentz-Faktor geht der Betrag v dieses Vektors **v** ein, den man gemäß der Vektorrechnung nach der Formel $v^2 = |\mathbf{v}|^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ erhält. (Hier wurde ein Kartesisches Koordinatensystem x,y,z gewählt, um die Komponenten der Geschwindigkeit anzugeben. Die Geschwindigkeit kann jedoch in einem beliebigen anderen Koordinatensystem dargestellt werden.)

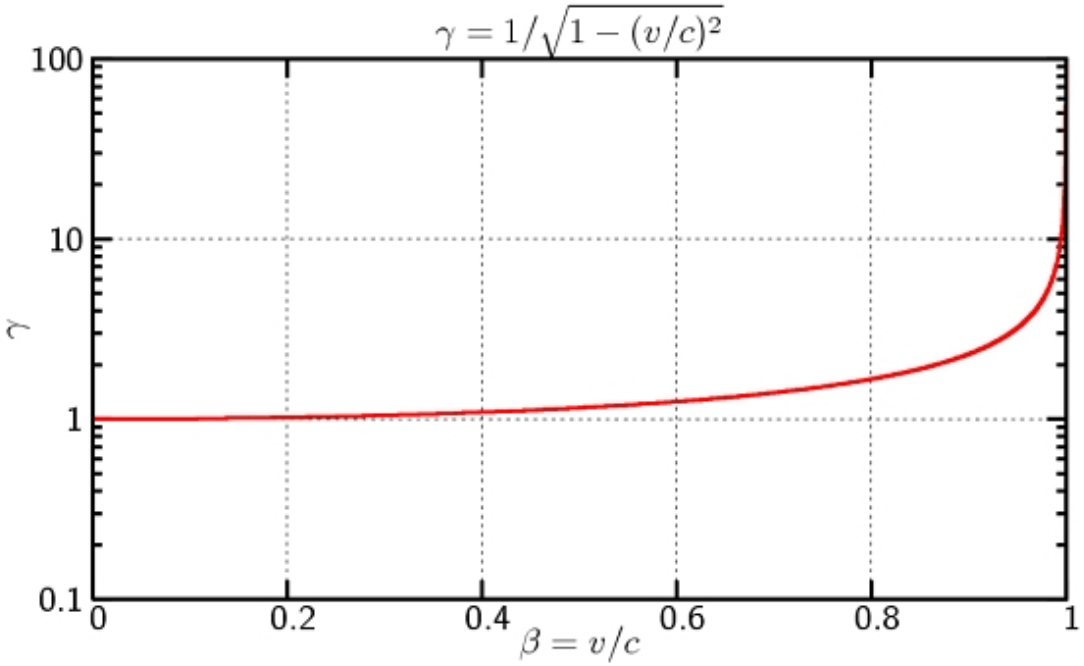

Abbildung 13.7: kleine Lorentz-Faktoren.

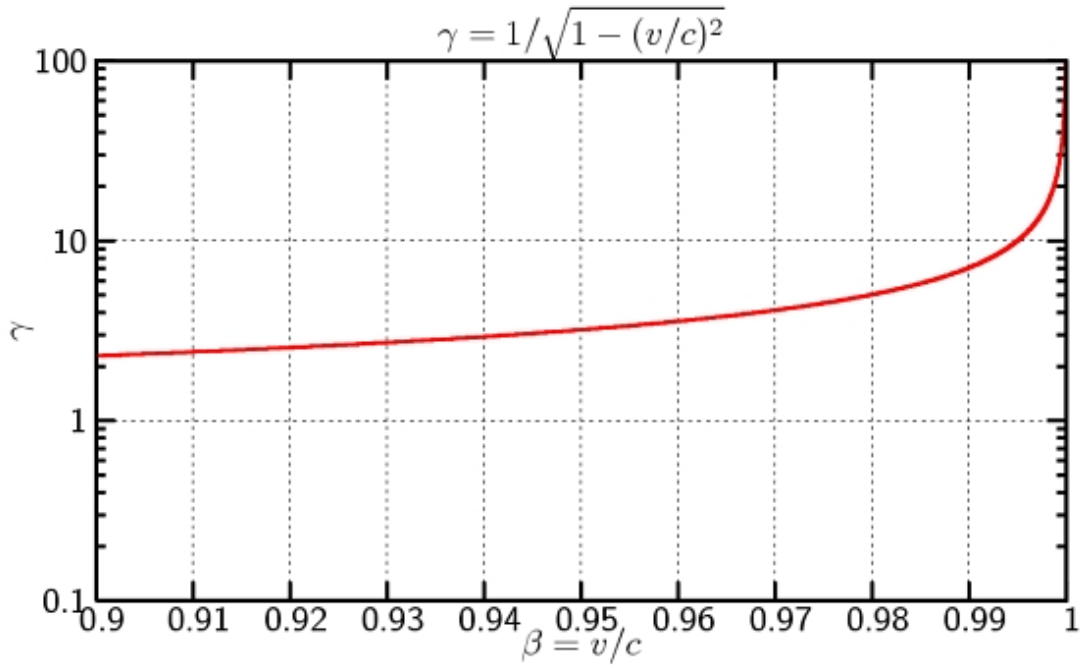

Abbildung 13.8: mittlere Lorentz-Faktoren.

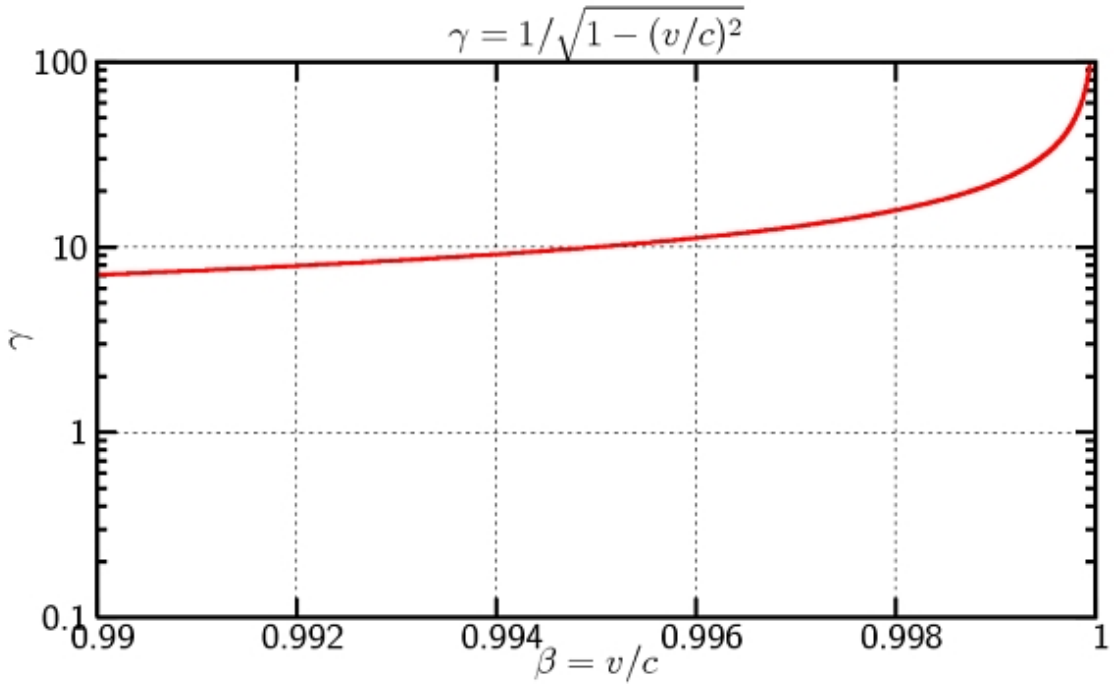

Abbildung 13.9: ultrarelativistisch.

13.26.2 Wozu benötigt man den Lorentz-Faktor?

Einerseits dient er dazu, um einzuschätzen, wie *relativistisch* eine Bewegung ist. Es geht also um die Frage, ob die Bewegung des betrachteten Objekt bereits so schnell ist - nämlich vergleichbar schnell mit der Bewegung des Lichts - dass Effekte der Speziellen Relativitätstheorie eine Rolle spielen und berücksichtigt werden müssen. Diese Effekte sind die Zeitdilatation und die Lorentz-Kontraktion (oder Längenkontraktion): Länge und Zeitablauf hängen davon ab, wie schnell sich das betrachtete Objekt bewegt!

Es hat sich folgende Bezeichnungsweise eingebürgert, die klassifiziert, *wie* relativistisch eine Bewegung ist:

- ◇ Lorentz-Faktor gleich oder vergleichbar 1: nicht-relativistisch (engl. *non-relativistic*),
- ◇ Lorentz-Faktor größer als 2: relativistisch (engl. *relativistic*),
- ◇ Lorentz-Faktor größer als 10: 'mittelrelativistisch' (engl. *mid-relativistic*),
- ◇ Lorentz-Faktor größer als 100: ultrarelativistisch (engl. *ultra-relativistic*).

13.26.3 Lorentz-Transformationen

Andererseits geht der Lorentz-Faktor wesentlich in die Lorentz-Transformationen, den so genannten **Boosts** ein. Die Lorentz-Transformation vermittelt zwischen Ruhesystem und Laborsystem. Möchte man die relativistische Bewegung eines Teilchens im einen System vergleichen mit der im anderen System, so führt man die Lorentz-Transformation aus.

Außerdem gewichtet der Γ-Faktor die relativistischen Effekte Zeitdilatation und Längenkontraktion: Je größer Γ ist, umso ausgeprägter sind relativistische Phänomene. Dabei geht die geht die **relativistische Mechanik** stetig in die nicht-relativistische, die klassische oder **Newtonsche Mechanik** über. Die in der Physik schon viel länger bekannten Gesetze der klassischen Mechanik sind als Grenzfall in der relativistischen Mechanik enthalten. Das quantifiziert gerade der Lorentz-Faktor, weil er im Newtonschen Grenzfall sehr klein wird und gegen eins konvergiert. Das illustriert das erste Diagramm oben bei kleinen Geschwindigkeiten v.

13.26.4 Teilchenphysik: große Γs

In der Teilchenphysik sind relativistische Effekte an der Tagesordnung: In Teilchenbeschleunigern erreichen die beschleunigten Teilchen (Elektronen, Positronen, Protonen, Atomkerne) relativistische Geschwindigkeiten. Die relativistischen Effekte müssen bei den Beschleunigungsvorgängen berücksichtigt werden, so z. B. die Lorentz-Kontraktion der Atomkerne bei einer Kollision.

13.26.5 große Γs in der Astronomie

In der Astronomie gibt es eine Reihe sehr energetischer Prozesse, die hohe Lorentz-Faktoren involvieren. So bewegt sich in der Nähe eines Schwarzen Loches der Akkretionsfluss relativistisch schnell, ebenso die Jets, die aus der Zentralregion von Aktiven Galaktischen Kernen oder kompakten Objekten beschleunigt werden. Am Entstehungsort der Jets (dem so genannten Fußpunkt) sind typische Lorentz-Faktoren unterhalb von 10. Extreme Geschwindigkeiten wurden bei Gamma Ray Bursts beobachtet, die auf Γ-Faktoren bis 1000 schließen lassen.

Rekordhalter im Universum sind wohl die Pulsare: Die magnetisch getriebenen Pulsarwinde erreichen durch Nachbeschleunigung Lorentz-Faktoren bis 10000000! Ein prominentes Beispiel dafür, der *Crabnebel* im Sternbild *Stier*, wird im Lexikoneintrag SNR beschrieben.

13.27 Lorentzgruppe

Die **eigentlichen, orthochronen Lorentz-Transformationen** bilden eine mathematische **Gruppe**.

13.27.1 Gruppeneigenschaften

Generell gibt es in der Gruppenstruktur *Elemente* einer bestimmten *Menge*, die miteinander durch eine *mathematische Operation* verknüpft werden. Bei den Gruppen resultiert aus dieser Operation wieder ein Element, das zur Ausgangsmenge gehört.

Gruppen als mathematisches Gebilde genügen bestimmten mathematischen Kriterien, wie

- ◇ der Existenz eines *neutralen Elements*;
- ◇ der Existenz eines *inversen Elements* und
- ◇ der *Assoziativität*.

Ist außerdem die *Kommutativität* gegeben, also Vertauschen der Reihenfolge von Operationen führt zum gleichen Ergebnis, so nennt man die Gruppe *abelsch*.

Diesen Kriterienkatalog kann man nun auf die Lorentz-Transformationen anwenden und nachweisen, dass sie die so genannte **Lorentzgruppe** bilden:

- ◇ die *Identität* bildet die Transformationsmatrix mit verschwindender Relativgeschwindigkeit, $v = 0$. Die Lorentz-Transformationsmatrix wird dann gerade die **Einheitsmatrix** und überführt Vierervektoren in sich selbst.

- ◇ Das *inverse Element* ist gerade die inverse Transformationsmatrix, die man erhält, wenn man β durch -β ersetzt: Die Geschwindigkeit wird invertiert.

- ◇ Ebenso lässt sich die Assoziativität der Lorentz-Transformationen auf das Assoziativgesetz bei der Matrizenmultiplikation zurückführen.

13.27.2 vier Typen von Lorentz-Transformationen

Man unterscheidet *vier Typen von Lorentz-Transformationen*:

- ◇ die eigentlichen oder orientierungserhaltenden (engl. *orientation-preserving*) Lorentz-Transformationen,

- ◇ die uneigentlichen Lorentz-Transformationen,

- ◇ die orthochronen oder zeitorientierungserhaltenden (engl. *orthochronous* or *time-preserving*) Lorentz-Transformationen

- ◇ und die nicht-orthochronen Lorentz-Transformationen.

Mathematisch wird das so symbolisiert:

$$\mathsf{eigentliche\ Lorentz-Transformation}: \det \Lambda^{\mu}{}_{\nu} = +1$$

$$\mathsf{orthochrone\ Lorentz-Transformation}: \Lambda^{0}{}_{0} \geq 1$$

$$\mathsf{eigentliche,\ orthochrone\ Lorentzgruppe}: L^{\uparrow}_{+}$$

13.27.3 weitere Lorentzgruppen

Nur die **eigentlichen, orthochronen Lorentz-Transformationen** (engl. *proper orthochronous Lorentz transformations*) bilden eine **Untergruppe** der Lorentzgruppe. Es handelt sich dabei um eine *sechsparametrige, kontinuierliche Transformationsgruppe*.

Darüber hinaus entspricht eine Hintereinanderausführung zweier Lorentztransformationen mit verschiedenen Relativgeschwindigkeiten gerade der Multiplikation von Matrizen bzw. hintereinander ausgeführten Drehungen mit verschiedenen Winkeln im Minkowski-Raum (*Distributivgesetz*).

13.27.4 Bezug zu Drehungen

Die Lorentzgruppe unterscheidet man in Spezielle und Allgemeine Lorentzgruppe und ordnet sie entsprechend der Speziellen Relativitätstheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie zu. In der **Gruppentheorie** stellt sich heraus, dass die Lorentzgruppe eine enge Verwandtschaft zur *Rotationsgruppe*, SO(3), aufweist. Die **volle Lorentz-Transformation** setzt dann zwei beliebige Inertialsysteme zueinander in Beziehung und kann in eine Verkettung von gewöhnlicher Raumdrehung, Boosttransformation und weiterer Raumdrehung zerlegt werden.

Der physikalische und erkenntnistheoretische Gehalt der physikalischen Gruppentheorien ist sehr tiefsinnig und trägt weiter als dieser mathematische Apparat anmutet: Während das Newtonsche Gesetz invariant unter **Galilei-Transformationen** ist und mit der Struktur der **Galilei-Gruppe** in Zusammenhang steht, wurde mit der Relativitätstheorie eine neue Gruppenstruktur gefunden: die Lorentzgruppe. Die Gesetze der Relativitätstheorie sind invariant unter Lorentz-Transformationen, man sagt auch verkürzend lorentzinvariant. Dies ist eine Folge des **Relativitätsprinzips**: *Alle inertialen Beobachter sind äquivalent.* (siehe auch Äquivalenzprinzip). Daneben steht das **Kovarianzprinzip**: *Physikalische Gesetze sind* ***forminvariant*** *unter Lorentz-Transformationen.* Daraus resultiert die notwendige mathematische Beschreibung mit Tensoren, also Gebilden, die in allen Koordinatensystemen die gleiche Gestalt haben.

13.27.5 Poincarégruppe

Es gibt jedoch noch eine der Lorentzgruppe übergeordnete Gruppenstruktur, die Poincarégruppe.

13.28 Lorentzinvarianz

Das Prinzip der Lorentzinvarianz ist eine wesentliche Eigenschaft der Relativitätstheorie. Vom Begriff her meint Lorentzinvarianz, dass die Beobachter oder physikalische Größen ineinander durch Lorentz-Transformationen überführt werden können, ohne dass dabei die physikalischen Verhältnisse geändert werden. Dieses Nicht-Ändern bezeichnet man in der mathematischen Physik mit dem Begriff *Invarianz*. Letztendlich ist dies eine Symmetrieeigenschaft. Die entsprechende Symmetriegruppe dieser Transformation heißt Lorentzgruppe. Eine lorentzinvariante Größe ist in allen Bezugssystemen identisch.

13.28.1 Lorentzinvarianz in Einsteins Theorien

Lorentzinvarianz gilt in beiden Theorien, der Speziellen Relativitätstheorie (SRT), wo relativ zueinander gleichförmig geradlinig bewegte Systeme oder relativ in Ruhe befindliche Systeme betrachtet werden; aber auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), wo die Relativbewegungen zu gleichmäßig beschleunigten bzw. frei fallenden Systemen verallgemeinert wurden. Es gibt jedoch einen gewichtigen Unterschied: Die SRT ist **global lorentzinvariant**, die ART ist nur **lokal lorentzinvariant**. Das bedeutet, dass die Lorentzinvarianz in der Minkowski-Metrik, der Raumzeit der SRT, überall gilt. Man kann von beliebigen Weltpunkten auf der Mannigfaltigkeit zu anderen mittels Lorentz-Transformation wechseln; die Größe bleibt gleich. In der ART gilt das nur noch lokal, also in einem Weltpunkt mit unmittelbarer Umgebung, weil die Raumzeit global im Allgemeinen *gekrümmt* ist. Anders

gesagt: In einer beliebig kleinen Umgebung um einen Weltpunkt in global gekrümmter Raumzeit gilt **lokale Flachheit** und Lorentzinvarianz.

13.28.2 Lorentzinvarianz mündet in Einsteins Prinzipien

Wie gesagt, messen lorentzinvariante Beobachter in einem physikalischen Experiment dieselben Größen und werden zum gleichen Versuchsergebnis kommen. Diese **Gleichberechtigung der Beobachter** mündet in das Relativitätsprinzip und weiter verallgemeinert in das Äquivalenzprinzip.

13.28.3 Gilt Lorentzinvarianz immer?

Einige Varianten der Quantengravitationstheorien sagen eine **Verletzung der Lorentzinvarianz** voraus, so z. B. die Stringtheorien. Dies konnte bisher nicht mit astronomischen Messungen, beispielsweise der elektronischen Synchrotronstrahlung im Krebsnebel, bestätigt werden. Weitere **Tests der Lorentzinvarianz** sind dennoch dringend erforderlich, um den Gültigkeitsrahmen der Relativitätstheorie auszuloten.

13.29 Lorentz-Kontraktion

Die Lorentz-Kontraktion oder eigentlich *Fitzgerald-Lorentz Kontraktion* geht zurück auf die Physiker *George Francis Fitzgerald* (1851 - 1901) und *Hendrik Antoon Lorentz* (1853 - 1928). Zusammen mit dem Mathematiker *Jules Henri Poincaré* (1854 - 1912) deuteten sie 1895 mit dieser Kontraktion von Längen sowie der Zeitdilatation das Nullresultat des Michelson-Morley-Experiments (1881/87). In diesem Experiment sollte der Weltäther nachgewiesen werden, der als Trägersubstanz der Lichtwellen postuliert wurde. Das Nullresultat bestand darin, dass sich das Licht auf allen Laufstrecken mit gleicher konstanter Geschwindigkeit ausbreitete. Fitzgerald, Lorentz und Poincaré hielten dennoch am Weltäther fest und postulierten ad hoc die Längenkontraktion und die Zeitdilatation, die die Messgeräte entsprechend beeinflussen mögen, so dass das Nullresultat zustande kommt. Die Lorentz-Transformation stellte gerade die Mathematik, um diese Mechanismen zu beschreiben.

13.29.1 Weg mit dem Äther!

Albert Einstein schlug vor, gänzlich auf den Weltäther zu verzichten. Seine Spezielle Relativitätstheorie (SRT) postuliert nur die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und das Relativitätsprinzip. Auf diese Weise lässt sich das Nullresultat sehr elegant erklären. Die Lorentz-Transformation stellte sich als richtig heraus, nicht hingegen die damit verbundene ursprüngliche Interpretation von Fitzgerald, Lorentz und Poincaré. Erst Einstein gelang es, eine neue, revolutionäre Sichtweise von Raum und Zeit zu etablieren.

13.29.2 Ein relativistischer Effekt

In der Relativitätstheorie beschreibt die Lorentz- oder Längenkontraktion einen relativistischen Effekt, wo ein relativistisch bewegter Körper eine Längenverkürzung in Bewegungsrichtung erfährt und zwar gerade um den Lorentz-Faktor oder Γ-Faktor $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Mathematisch geht dies auf die Eigenschaften der Speziellen Lorentz-Transformation zurück, die gerade zwischen zwei verschiedenen Inertialsystemen

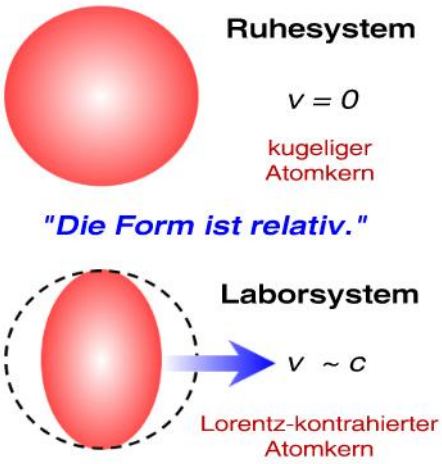

Abbildung 13.10: Lorentz-Kontraktion von Atomkernen.

vermittelt. Geschwindigkeiten in der Relativitätstheorie misst man meist in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit c. Daher bietet sich die dimensionslose Größe v/c an, die man üblicherweise mit β abkürzt.

13.29.3 Keine Science-Fiction!

Die Lorentz-Kontraktion wurde auch experimentell nachgewiesen. So werden in Teilchenbeschleunigern im Ruhesystem kugelförmig erscheinende schwere Ionen, die aus vielen Nukleonen bestehen, in Bewegungsrichtung gestaucht (siehe Abbildung 13.10: Gegenüberstellung von mitbewegten und statischen Beobachtersystemen). Die lorentzkontrahierten, schweren Ionen haben deshalb im Laborsystem eine abgeflachte Gestalt und ähneln eher einem Pfannkuchen als einer Kugel. Es ist sehr beeindruckend, dass Einstein diesen Sachverhalt bereits in seinem Wunderjahr 1905 im legendären Papier *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* berechnete! Freilich war dort nicht die Rede von lorentzkontrahierten Atomkernen, doch führte er die Rechnung explizit vor (Kap. 4), wie eine Kugel zu einem Rotationsellipsoid via Lorentz-Boost deformiert wird.

13.29.4 2. relativistischer Effekt: Zeitdilatation

Der mit der Lorentz-Kontraktion verwandte relativistische Effekt heißt Zeitdilatation und wirkt sich allerdings auf Zeitintervalle aus.

13.30 Lorentz-Transformation

Die Lorentz-Transformation ist eine mathematische Operation, die zwischen gegeneinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssystemen (Spezielle Relativitätstheorie, SRT) oder gegeneinander frei fallenden (beschleunigten) Bezugssystemen (Allgemeine Relativitätstheorie) vermittelt. Sie hat die klassische *Galilei-Transformation* abgelöst, in der die Zeittransformation eine Identität war, $t = t'$, und somit den Begriff einer

absoluten Zeit erlaubte. In der Relativitätstheorie hat die Zeit einen **relativen Charakter**, was sehr gut aus den Gleichungen der Lorentz-Transformation zu ersehen ist.

13.30.1 Mathematisch formuliert

Mathematisch gesehen ist die Lorentz-Transformation eine *lineare, homogene Transformation*, die bezogen auf zu transformierenden Vierervektoren der Relativitätstheorie durch eine 4 × 4-Matrix (meist mit Λ bezeichnet) dargestellt werden kann:

$$x^\mu \rightarrow x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu. \tag{13.1}$$

Die Lorentz-Transformation ist ein Spezialfall der Poincaré-Transformation. Letztere bezieht ebenfalls *Translationen* mit ein und ist damit eine lineare, **in**homogene Transformation. Beide Transformationstypen bilden mathematische Gruppen: die Lorentzgruppe bzw. die Poincarégruppe.

13.30.2 Der Pionier

Die Bezeichnung *Lorentz-Transformation* ist mit dem niederländischen Physiker *Hendrik Antoon Lorentz* (1853 - 1928) verbunden, der grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der Relativitätstheorie leistete und - wie *Albert Einstein* - den negativen Ausgang des *Michelson-Morley-Versuchs* zur Messung eines *Weltäthers* aufgriff. Mit ihm sind bis heute die Begriffe Lorentz-Kontraktion, Lorentz-Faktor und Lorentzgruppe verknüpft.

13.30.3 absolute Lichtgeschwindigkeit

Die natürliche und einzige Einheit der Speziellen Relativitätstheorie ist die **Vakuumlichtgeschwindigkeit** $\boldsymbol{c}$. Sie ist *unveränderlich in jedem Bezugsystem* und in diesem Sinne *absolut* wie in der SRT postuliert wird (Nicht *alles* ist relativ in der Relativitätstheorie!). Es bietet sich daher an, Geschwindigkeiten in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit zu messen. Dies legt die dimensionslose Größe v/c (meist als β bezeichnet) fest.

In der Ableitung des Lorentz-Transformationsgesetzes taucht der so genannte Lorentz-Faktor (γ auf

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Dieser Faktor, der von der Relativgeschwindigkeit v zweier gegeneinander bewegter Bezugssysteme abhängt, ist immer zu beachten, wenn man von einem Bezugssystem ins andere wechselt. Er ist von immenser Wichtigkeit für die gesamte Relativitätstheorie und ist derjenige Faktor, der die Längen- oder Lorentz-Kontraktion und die Zeitdilatation ausmacht. Mathematisch kann man die Lorentz-Transformation durch ein Matrix-Vektor-Produkt schreiben (Gleichung 13.1 oben). Die Vektoren $\mathbf{x}$ sind **Vierervektoren** mit einer zeitlichen Komponente und drei räumlichen Komponenten. Entsprechend ist die **Transformationsmatrix**, die gerade die Lorentz-Transformation vermittelt, eine 4 × 4-Matrix, hat also 16 Einträge. Die Transformationsmatrix für eine Lorentz-Transformation in

x-Richtung, einem so genannten x *Boost*, lautet:

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Damit werden die Transformationen von alter, ungestrichener Koordinate in neue, gestrichene – die Lorentz-transformierte – Koordinate explizit:

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z. \end{aligned}$$

Anschaulich ist die *Spezielle Lorentz-Transformation* eine Drehung im Minkowski-Raum. Die Lorentzgruppe ist verwandt mit der Drehgruppe und enthält die Rotationen im Raum. Ein *Boost* ist im Prinzip auch eine Drehung, in der allerdings Raum und Zeit ineinander überführt werden (das wird klar beim Betrachten der expliziten Transformationsgesetze unten). Deshalb nennt man die *Boosts* auch *Pseudo-Rotationen*. Die *Allgemeine Lorentz-Transformation* entspricht hingegen einer Speziellen Lorentz-Transformation verkettet mit einer Raumdrehung.

Anschaulich bedeutet dies, dass die **Relativgeschwindigkeit** v zwischen ungestrichenem (*Ruhesystem*) und gestrichenem System (*relativ bewegtes System*) parallel zur x-Richtung ist. Wie die nächste Abbildung rechts zeigt, bleiben die y- und z-Komponente des Orts-Vierervektors unverändert (*invariant*), während sich die Raumkomponente in Boost-Richtung (nämlich x) *und* die zeitliche Komponente t verändern, wenn man in ein anderes Bezugssystem wechselt! Diese Eigenschaft belegt die enge Verknüpfung von Raum und Zeit zur Raumzeit bzw. dem **Raum-Zeit-Kontinuum**. Nachrechnen kann man die vier komponentenweise notierten Transformationsgesetze schnell durch Berechnung des Matrix-Vektor-Produkts aus der Transformationsmatrix oben und einem Orts-Vierervektor $\mathbf{x} = (\mathrm{x}_0, \mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, \mathrm{x}_3)^T = (\mathrm{ct}, \mathrm{x}, \mathrm{y}, \mathrm{z})^T$ (Bemerkung: ^{T} steht für den transponierten Vektor, denn: Matrix × Spaltenvektor = Spaltenvektor.).

13.30.4 Weitere Anmerkung

Es gibt auch Schreibweisen der Lorentz-Transformation, bei denen die *imaginäre Einheit* $\mathbf{i} = (-1)^{1/2}$ verwendet wird. Diese Zugänge sind zwar mathematisch äquivalent, jedoch veraltet. Ein Gebrauch von **i** ist aus pädagogischen Gründen nicht zu empfehlen, weil es vor allem Einsteiger in der Relativitätstheorie verwirrt.

13.30.5 Eigenschaften der Lorentz-Transformation

- ◇ Es ist eine **lineare Transformation**. Durch diese Eigenschaft bleibt physikalisch gesprochen der Typus der Bewegung (gleichförmig bzw. frei fallend) erhalten.

- ◇ Die **Determinante** der Transformationsmatrix ist 1 (siehe kurze Rechnung unten).
- ◇ Für den **Limes kleiner Geschwindigkeiten** gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit c geht die Lorentz-Transformation in die klassische Galilei-Transformation über.
- ◇ Die **inverse Lorentz-Transformation** erhält man durch Ersetzen von v/c (beta) in der Transformationsmatrix durch -v/c. Physikalisch interpretiert wird dabei einfach die Bewegungsrichtung umgekehrt.

$$\det\Lambda = \gamma^2 - \beta^2\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2} - \frac{\beta^2}{1-\beta^2} = 1$$

13.30.6 Lorentz-Invarianten

Lorentz-Invarianten ändern sich nicht bei einer Lorentz-Transformation, d. h. sie sind in allen Bezugssystemen gleich! So ist die *Länge eines Weltvektors* eine Lorentz-Invariante, weil Weltvektoren unter Lorentz-Transformationen nur im Minkowski-Raum gedreht werden. Dies enthüllt den engen Zusammenhang von **Rotationsgruppen** und der **Speziellen Lorentzgruppe**.

13.30.7 Additionstheorem für Geschwindigkeiten

Das *Additionstheorem für (Relativ-)Geschwindigkeiten* lässt sich leicht durch eine Verkettung von Lorentz-Transformationen nachweisen. An diesem Gesetz

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1\beta_2}$$

sieht man leicht, dass das Licht einer bewegten Lichtquelle sich **nicht** etwa mit Lichtgeschwindigkeit plus Geschwindigkeit der Lichtquelle bewegt, sondern - wie im Postulat Einsteins gefordert - die **Lichtgeschwindigkeit konstant** bleibt. Dieses Additionstheorem geht für kleine Geschwindigkeiten (v viel kleiner als c) in das wohl vertraute Gesetz für Geschwindigkeiten über, wonach ein Geschoss, das von einer bewegten Quelle stammt, auch die Geschwindigkeit der Quelle hinzuaddiert bekommt.

13.30.8 Spinoren

Eine verallgemeinerte Mathematik der Lorentz-Transformation in der Allgemeinen Relativitätstheorie bietet die **Spinor-Algebra**.

13.31 Lundquist-Zahl

Eine der **charakteristischen Zahlen** der Magnetohydrodynamik, die man nutzt, um das System oder eine entsprechende Simulation zu beschreiben.

Man unterscheidet die **viskose** S_v und die **resistive Lundquist-Zahl** S_r: Erstere ist das Produkt aus einer charakteristischen Dichte, einer charakteristischen Länge des Systems sowie der Alfvén-Geschwindigkeit, geteilt durch die **Viskosität**.

Die resistive Lundquist-Zahl ist dagegen das Produkt aus einer charakteristischen Länge des Systems sowie der Alfvén-Geschwindigkeit, geteilt durch die **magnetische Resistivität**.

13.32 Luxon

Dies ist der Oberbegriff für Teilchen, deren Geschwindigkeit im Vakuum gerade der Lichtgeschwindigkeit c entspricht. Dazu gehören natürlich die **Photonen** selbst, aber auch die Gluonen, die hypothetischen, Gravitonen und Gravitationswellen. Bei den Neutrinos konnte man in den Superkamiokande-Messungen in Japan nachweisen, dass sie eine endliche Masse haben. Deshalb können sie zwar der Lichtgeschwindigkeit sehr nahe kommen, sie aber nie exakt erreichen. Ähnlich ist es bei den Elektronen (Ruhemasse 510.9989 keV).

Ebenfalls relativ zur Lichtgeschwindigkeit sind die Tardyonen (v kleiner c) und Tachyonen (v größer c) definiert.

14 Lexikon M

14.1 Machscher Kegel

Der Machsche Kegel ist eine spezielle Struktur in der Akustik, die bei Körpern beobachtet wird, die sich schnell durch ein Medium bewegen.

14.1.1 Über- und Unterschallgeschwindigkeit

Der Machsche Kegel wurde nach dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916) benannt. Er betrachtete die Ausbreitung von Schallwellen, wenn sich Objekte durch ein Medium (z. B. Luft, Wasser) bewegen. Bewegungen schneller als der Schall im betreffenden Medium nennt man **supersonisch**. Die Machzahl übersteigt dann den Wert 1. Demgegenüber gibt es die **subsonischen** Bewegungen mit Geschwindigkeiten unterhalb der Schallgeschwindigkeit.

14.1.2 Einhüllende von Schockwellen ist ein Kegel

Bewegt sich ein Objekt schneller als mit Schallgeschwindigkeit (im Allgemeinen abhängig von der Temperatur und der Zusammensetzung des Mediums) im betreffenden Medium, so bilden sich im Medium an der Spitze des Objektes Stoßwellen aus, so genannte **Schockwellen**. Entlang der Bahn des supersonisch bewegten Körpers werden in jedem Punkt kugelförmige Schockwellen angeregt, die ins Medium propagieren. Die Kugelwellen an jedem Bahnpunkt weisen dabei verschiedene Radien auf, je nachdem wie viel Zeit sie hatten, um zu propagieren. Der Radius ist deshalb größer bei Bahnpunkten, die der Körper vor längerer Zeit passiert hat, als bei dem Punkt, wo er sich aktuell befindet: hier bildet sich die Kugelwelle gerade erst aus und hat einen kleinen Radius. Die Überlagerung all dieser kugelförmigen Stoßwellen, die **Einhüllende**, formt deshalb einen Kegel, den man **Machschen Kegel** nennt. Der Sinus des halben Öffnungswinkels des Kegels, des so genannten *Machschen Winkels*, entspricht gerade dem Quotienten aus Schall- zur Bewegungsgeschwindigkeit des Körpers. Der Machsche Winkel ist also umso kleiner, je schneller sich der Körper im Medium bewegt.

14.1.3 Analogie zur Cerenkov-Strahlung

In der Strömungsmechanik, Hydro- und Aerodynamik machen sich die Schockwellen akustisch bemerkbar. Der **Überschallknall** pflanzt sich mit den Schockwellen fort und ist hörbar (bekannt z. B. bei tief fliegenden Düsenjets).

Es gibt jedoch das analoge, optische Pendant: die Cerenkov-Strahlung. Dies ist gerade diejenige elektromagnetische Strahlung, die von Quellen emittiert wird, die sich schneller, als mit der Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium (der *Phasengeschwindigkeit*) fortbewegen. Bei der Beschreibung der Cerenkov-Strahlung tritt eine verwandte Physik auf, nur dass die emittierten Wellen nicht mehr akustischer, sondern elektromagnetischer Natur

sind. Die Begriffe Machscher Kegel und Machscher Winkel werden hier bisweilen auch ersetzt durch Cerenkov-Kegel und Cerenkov-Winkel.

Sobald ein Körper, der sich durch das Medium bewegt, eine höhere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit im betreffenden Medium hat (*superluminale* Bewegung), kommt es zur Emission der Cerenkov-Strahlung. Die Cerenkov-Strahlung ist gewissermaßen ein Regulator, um den superluminal bewegten Emitter auf die Phasengeschwindigkeit im betreffenden Medium abzubremsen. Bei diesem Phänomen kommt es zu keinem Zeitpunkt zur Verletzung der Speziellen Relativitätstheorie, weil die Vakuumlichtgeschwindigkeit c nie überschritten wird.

14.2 Machsches Prinzip

Das Machsche Prinzip ist eines der wesentlichen Prinzipien, das *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) inspirierte. Einstein setzte sich mit diesem Prinzip stark auseinander, weil er erkannte, dass es Raumzeit nur in Verbindung mit Materie zulässt. Für Einstein hatte die Raumzeit allerdings einen unabhängigen Charakter (vergleiche Vakuum-Feldgleichungen der ART). Neben dem Machschen Prinzip sind wichtige Konzepte, die die ART beeinflussten das Äquivalenzprinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung.

14.2.1 Der Pionier

Das Machsche Prinzip ist benannt nach dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916), der sich aus einer eher philosophischen Perspektive Gedanken zum Gültigkeitsrahmen der Newtonschen Gesetze und ihrer Bedeutung für Bewegung machte (1893). Seine Arbeiten auf dem Gebiet der Physik sind bis heute von hohem Stellenwert (siehe auch Machscher Kegel und Machzahl).

14.2.2 Über das Wesen der Trägheit

In diesem Abschnitt soll es um grundsätzliche Aspekte von Bewegung, Trägheit und Masse gehen. Mach führte den Begriff der **relativen Bewegung** ein: Bewegung ist immer relativ zu einem Bezugspunkt definiert, zum Beispiel eine relative Bewegung gegenüber dem Hintergrund der Fixsterne. Er folgerte, dass über einen Körper in einem darüber hinaus leeren Universum keine Aussage gemacht werden kann, ob er sich bewege, weil eben der Bezugsrahmen fehle. Erst die Massenverteilung und die Bewegungszustände der Fixsterne legen den Bezugsrahmen fest und sind die Quelle der **Trägheitskräfte** (z. B. Zentrifugalkraft und Corioliskraft). In diesem Sinne bestimmen relativistisch gesprochen Masse und Energie (der Energie-Impuls-Tensor) dort, bei den Fixsternen, die Trägheit hier.

Die Trägheit ist also nichts anderes als ein Phänomen, das aus der Wechselwirkung aller Körper im Universum zustande kommt!

Die Beschleunigung, die man in der Newtonschen Bewegungsgleichung der Mechanik findet, ist also nur gegenüber einem Bezugsrahmen definiert. Es gibt keine absolute Beschleunigung (ebenso wenig wie einen absoluten Raum), sondern nur **relative Beschleunigungen**. Dieses Szenario kann man sich auch als **Anfangswertproblem**

vorstellen: gegeben seien die Positionen und Bewegungszustände (Geschwindigkeitsvektoren) sämtlicher Körper im Universum *zu einem bestimmten* Zeitpunkt. Die Lösung des Anfangswertproblems liefert sämtliche Trägheitseigenschaften von Testteilchen *zu allen* Zeiten, sowohl in der Vergangenheit, als auch in der Zukunft. Das 'Universum' ist dabei eine geschlossene, raumartige Hyperfläche, also ein geschlossener 3D-Raum. Die Lösung des Anfangswertproblems, einer Bewegungsgleichung, liefert dann den 4D-Raum, die Raumzeit, in Vergangenheit und Zukunft.

14.2.3 Aus dem Machschen Prinzip folgt axiomatisch:

- ◇ Materieverteilungen bestimmen Geometrie.
- ◇ Ohne Materie, keine Geometrie.
- ◇ Ein Körper im leeren Universum hat keine Trägheitseigenschaften.

14.2.4 Bezug zu Einstein

Die erste Aussage ist von besonderer Bedeutung, findet sie doch ihren mathematischen Niederschlag in den Einsteinschen Feldgleichungen der ART.

Der **de-Sitter-Kosmos**, ein **materiefreies** Universum mit positiver kosmologischer Konstante verletzt somit das Machsche Prinzip, denn es handelt sich um eine Raumzeit (Geometrie) ohne Körper (siehe zweite Aussage)!

14.3 Machzahl

Die *Machzahl* ist eine wichtige Kenngröße in der Strömungsmechanik und Hydrodynamik. Sie wurde von dem österreichischen Physiker und Philosophen *Ernst Mach* (1838 - 1916) gefunden und entspricht dem Verhältnis der Geschwindigkeit eines bewegten Körper und der Schallgeschwindigkeit des Mediums, in dem er sich bewegt.

14.3.1 Wir kennen's von Flugzeugen

Bekannt ist dies in der Aerodynamik: so gibt es Flugzeuge die Mach 1 (einfache Schallgeschwindigkeit) und Mach 2 (doppelte bzw. Überschallgeschwindigkeit) fliegen können. Oberhalb der Schallgeschwindigkeit wird 'die Schallmauer durchbrochen', und vor dem bewegenden Objekt breitet sich eine Schockwelle aus. Die Einhüllende vieler solcher Stoßwellen bilden den Machschen Kegel. Die Bewegung unterhalb der Schallgeschwindigkeit (M kleiner 1) nennt man *subsonisch*, oberhalb von der Schallgeschwindigkeit (M größer 1) heißt sie *supersonisch*.

14.3.2 Analogie von Akustik und Optik

Während bei der Cerenkov-Strahlung ein Lichtblitz entsteht, gibt es bei überschallschnellen Bewegungen in der Akustik den **Überschallknall**. Ein einfaches Beispiel ist die Peitsche. Der Knall der Peitsche resultiert aus der supersonischen Bewegung der kleinen Peitschenspitze.

14.4 Magnetar

Damit bezeichnet man eine spezielle Form von Pulsaren (also Neutronensternen), die ein abnorm hohes Magnetfeld in der Größenordnung von 10^{15} bis 10^{16} Gauß und mehr besitzen! Ein typischer, normaler Neutronenstern hat hingegen 'nur' Feldstärken von 10^{12} bis 10^{13} Gauß. Das sind extreme Feldstärken: die stärksten Magnetfelder auf der Erde haben etwa eine Million Gauß (also 100 Tesla; 1 Tesla = 10000 Gauß).

14.4.1 Magnetare im Pulsar-HRD

In der Stellarastronomie bezeichnet das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne eine doppellogarithmische Auftragung der Leuchtkraft eines Sterns über seiner Effektivtemperatur oder Spektralklasse.

Etwas Ähnliches gibt es in der Pulsarastronomie: hier heißt es *Pulsar-HRD* und entspricht einer Auftragung von Periodenabnahme über Periodendauer der Pulse. Die Magnetare bevölkern in diesem Diagramm den Bereich **langsam rotierender Neutronensterne**. In einem Übergangsbereich zu den kürzeren Perioden befinden sich die so genannten AXPs, während sich dann das Gros der Pulsare anschließt mit den schnellsten Rotationen im Bereich von Millisekunden.

14.4.2 Ursprung der Magnetare starken Magnetfelder

Folgende Entstehungsszenarien wurden vorgeschlagen:

- ◇ **Dynamo-Prozess**: Dieser Effekt ist schon länger bekannt. Hier werden die Magnetfelder, die den Magnetar in Form einer Magnetosphäre umhüllen, durch die **schnelle Rotation** mitgeschleppt und aufgewickelt. Im Feldlinienbild steht eine hohe Feldliniendichte für ein starkes Magnetfeld (Arbeiten von *Duncan et al.*).
- ◇ **Artefakt der MRI**: Ein neuerer Zugang wurde in Anlehnung an die MHD-Akkretionsphysik gefunden. Die so genannte **magnetische Rotationsinstabilität (MRI)** (auch *Balbus-Hawley-Instabilität* genannt) soll die starken Felder bereits vor der eigentlichen Magnetarphase erzeugen. Bereits bei der Bildung des Neutronensterns aus einem massereichen Vorläuferstern (*core-collapse pre-neutron star*, CC PreNS), sollen sich über den Mechanismus dieser Instabilität schwache Saatmagnetfelder in den Schalen des CC PreNS bis zu einer Sättigungsgrenze von 10^{16} Gauß aufbauen!

Es liegt auf der Hand, dass bereits vorhandene Felder des Vorläufersterns im Gravitationskollaps mitgerissen und verstärkt werden. Über **Synchrotronstrahlung** sind diese Felder in Betrag und Richtung (Polarisation) der astronomischen Beobachtung zugänglich.

14.4.3 magnetische Rotationsbremse

Die gemessene langsame Rotation vieler Magnetare im Vergleich zu anderen Pulsaren ist kein Zufall: letztendlich sind die hohen Magnetfelder dafür verantwortlich, weil sie einen **Anti-Frame-Dragging-Effekt** hervorrufen, d. h. die Magnetosphäre bremst die Rotation der Raumzeit dieser kompakten Objekte. Dies konnte von *Ioka & Sasaki* (astro-ph/0305352, 2003) gezeigt werden. Diese Arbeit ist in der allgemein relativistischen

Magnetohydrodynamik (**GRMHD** für *General Relativistic Magnetohydrodynamics*) bzw. einer Theorie magnetisierter, relativistischer Sterne anzusiedeln. Diese schöne Anwendung der ART sei im Folgenden kurz skizziert.

14.4.4 Blick ins Innere des Magnetars

Man setzt den Energie-Impuls-Tensor der idealen (d. h. perfekte Leitfähigkeit) Magnetohydrodynamik an und zerlegt die vierdimensionale Raumzeit (ganz ähnlich dem ADM-Formalismus) in einem *(2+1)+1 Split* gemäß der Arbeit von *Gourgoulhon & Bonazzola* (1993). Nun formuliert man die **relativistische Grad-Shafranov-Gleichung** des Problems, die die Information über den magnetischen Fluss enthält. Eine fast schon historische Methode erweist sich als nützlich: *Regge & Wheeler* betrachteten bereits 1965 in allgemeiner Form Störungen auf der Schwarzschild-Metrik. Genau dieser Formalismus wurde ausgenutzt, um die Metrik des Magnetars zu zerlegen. Die Störung ist dabei das Magnetfeld, weil die im Magnetfeld gespeicherte Energie natürlich eine Auswirkung auf die Krümmung der Raumzeit hat. Nun entwickelt man die skalare Flussfunktion in Multipolen (*Legendre-Polynomen*). So leitet man schließlich ein relativistisches **Eigenwert-Problem** ab und studiert unter verschiedenen Randbedingungen die so zerlegte Magnetosphäre des Magnetars. *Ioka & Sasaki* konnten *erstmals* **meridionale Zirkulationen** des polytropisch beschriebenen Plasmas innerhalb des Magnetars untersuchen. Sicherlich ist die Zustandsgleichung eines Polytropen nur eine 'nullte Näherung' für das exotische Innere des (Prä-)Neutronensterns und wird modifiziert werden müssen. Das Magnetfeld wurde so angelegt, dass es innerhalb des Magnetars eingeschlossen ist und an der Oberfläche verschwindet. Auch hier werden sicher andere Randbedingungen mit endlicher Feldstärke folgen. Interessanterweise ist durch die Ausbildung eines meridionalen Plasmaflusses entlang der Rotationsachse des Kompaktors die **Reflektionssymmetrie** zwischen Nord- und Südhalbkugel verletzt! Anders gesagt gibt es eine Vorzugsrichtung beim Magnetar, entlang derer **einseitige Jets** ausbrechen könnten, wie spekuliert wird.

14.4.5 Wie die schnelle Drehung zerfallen könnte

Es gibt in der Fülle der beobachteten und klassifizierten Neutronensterne ein hypothetisches Entwicklungsszenario: Nach einer Supernova Typ II, der klassischen *core-collapse SN*, entsteht ein schnell rotierender Magnetar, der die ersten etwa 10000 Jahre als so genannter Soft Gamma Ray Repeater (SGR) in Erscheinung tritt. Ein SGR ist ein Emitter weicher Gammastrahlung. Sie wurden 1979 entdeckt und senden wiederholte, hochenergetische Ausbrüche im Spektralbereich der Gammastrahlung aus, was durch Rekonnexionsprozesse starker, stellarer Magnetfelder erklärt wird (*Thompson & Duncan, 1995*). Dabei gibt es Frakturen in der Kruste des Neutronensterns, aus denen die Energie der Magnetfelder freigesetzt werden kann. Die sich wiederholenden Gamma-Bursts klingen mit der Zeit ab und in weiteren etwa 30000 Jahren offenbart sich der Magnetar als Anomalous X-ray pulsar (AXP), also als anomaler Röntgenpulsar. Die Rotationsperiode nimmt weiter zu, die Rotation wird immer langsamer, was durch bereits erwähnte Anti-Frame-Dragging-Prozesse geleistet wird und dadurch, dass Energie durch Sternenbeben in der Neutronensternkruste abgeführt wird. Weitere 30000 bis 100000 Jahre später ist der AXP nur noch ein dunkler, kaum beobachtbarer, langsam rotierender Neutronenstern: ein *toter Magnetar*.

14.4.6 Bekannte Vertreter

Beispiel für Magnetare, AXPs und SGRs sind 1E1841-045 (AXP), SGR 1806-20, SGR 1900+14 und SGR 0525-66. Auch der langsame (2.7 h Periode) Pulsar 2S 0114+650 wird als Magnetar interpretiert (*Li et al., 1999*, astro-ph/9901084).

14.5 magnetische Rotationsinstabilität

Instabilitäten sind von allgemeinem Interesse in der Fluiddynamik, weil sie die Dynamik von Strömungen beeinflussen. Die Fluiddynamik kann in die beiden Teildisziplinen Hydrodynamik (HD) und Magnetohydrodynamik (MHD) untergliedert werden. Bei der MHD kommen elektrische und magnetische Felder hinzu, die einen Einfluss auf die Bewegung astrophysikalischer Plasmen haben.

Die magnetische Rotationsinstabilität beeinflusst entscheidend die Dynamik rotierender Plasmen, die in schwache Magnetfelder eingetaucht sind. Wie das genau funktioniert, soll in diesem Abschnitt geklärt werden.

14.5.1 Vorbereitung: Einfall von Materie

In der Akkretionsphysik untersuchen die Astrophysiker Strömungen, die sich auf ein Zentralobjekt bewegen. Materie wird aufgrund der Gravitation von einer Zentralmasse angezogen und führt zum Anwachsen dieser akkretierenden Masse. Diese so genannten *Akkretoren* können gewöhnliche Sterne, Protosterne, aber auch kompakte Objekte wie Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze Löcher sein.

Typischerweise rotiert die akkretierte Materie um den Akkretor und bewegt sich dabei nach innen. Es bildet sich eine **Akkretionsscheibe** aus, die sehr erfolgreich mit Standardscheiben beschrieben werden kann. Daneben gibt es ganz verschiedene Formen von Akkretionsflüssen.

14.5.2 Zutaten: Magnetfelder & Rotation

Ein Phänomen von großer Bedeutung in der MHD-Akkretionsphysik ist nun die *Magnetorotationsinstabilität* oder **magnetische Rotationsinstabilität** (engl. *magneto-rotational instability*, kurz **MRI**). Wie der Name der Instabilität andeutet sind die wesentlichen Zutaten **Magnetfelder** und **Rotation**. Beides ist natürlicherweise in heißen Akkretionsflüssen vorhanden, weil die hohe Temperatur das akkretierte Material ionisiert und weil dieses Material Drehimpuls besitzt. Beide Zutaten der MRI müssen jedoch bestimmte Kriterien erfüllen: die Magnetfelder müssen **schwach** sein und die Rotation **differenziell**. Aufgrund des ersten Kriteriums heißt die MRI bisweilen auch 'Instabilität schwacher Magnetfelder' (griffiger als englische Bezeichnung: *weak field instability*). Die MRI funktioniert nur bei schwachen Magnetfeldern, die natürlicherweise mit dem bewegten Akkretionsplasma assoziiert sind. Bei starken Magnetfeldern (für Experten: Felder an der Äquipartitionsschwelle) wird die MRI unterdrückt.

14.5.3 Funktionsweise anhand eines mechanischen Modells

Schematisch ist in Grafik 14.1 eine rotierende Scheibe dargestellt (violett), bei der es sich um den rotierenden Akkretionsfluss um ein Schwarzes Loch (schwarz ausgefüllter Kreis in der Mitte) handeln möge. Es wird angenommen, dass die Scheibe gegen den Uhrzeigersinn

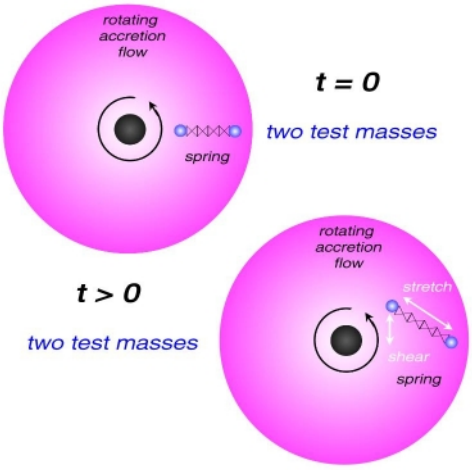

Abbildung 14.1: mechanisches Model für die MRI.

rotiert. Aus der Akkretionsscheibe werden nun zwei Testteilchen herausgegriffen, die auf einer Linie liegen (*kollinear*), sich aber im Abstand zum Drehzentrum unterscheiden. Zwischen beiden Testteilchen wirkt eine anziehende Kraft: Im realen MHD-Fluss ist das die gemeinsame Magnetfeldlinie, die versucht die beiden Plasmateilchen zusammenzuhalten. Hier, im mechanischen Modell, wird die anziehende Kraft durch eine Metallfeder symbolisiert. Stellen wir uns nun vor, dass man die Rotation der Scheibe einschalten könnte. Die Abbildung links oben ist ein Schnappschuss zu einem Zeitpunkt, bevor die Rotation startet: Die Testteilchen sind locker durch die Feder verbunden. Auf die Feder in entspannter Ruhelage wirken keine Kräfte. Rechts unten wurde die Rotation in Gang gesetzt. Was passiert mit den Testteilchen?

Die Testteilchen rotieren differenziell, so dass das innere Testteilchen das äußere überholt. Als Folge dessen dehnt sich die Feder, weil die Teilchen nach und nach getrennt werden (engl. *to stretch*: dehnen). Die Feder bzw. die Magnetfeldlinie widersteht der Trennung der Testteilchen entlang der Verbindungslinie und wirkt **stabilisierend**. In tangentialer Richtung, also in Drehrichtung, versucht die Feder allerdings der Scherung (engl. *to shear*: scheren) entgegenzuwirken, um eine starre Rotation beizubehalten. Dieser Effekt ist **destabilisierend**! Die Feder bzw. das Magnetfeld zwingt das Testteilchen zu schnell für seinen neuen, näheren Abstand zu rotieren. Das äußere Testteilchen wird deshalb beschleunigt, während das innere Testteilchen abgebremst wird. Anders gesagt: Durch die MRI transportieren innere Plasmateilchen im Akkretionsfluss Drehimpuls nach außen zu äußeren Plasmateilchen. Sie ist ein **sehr effizienter Mechanismus für den Drehimpulstransport** in magnetischen Akkretionsflüssen.

14.5.4 Drehimpulstransport als Voraussetzung für Materieeinfall

Der Drehimpuls wird also nach außen auf benachbarte Teilchen abgeführt. So kann das Plasma überhaupt erst in den Bereich des Akkretors gelangen und z. B. in ein Schwarze Loch fallen. Würde der Drehimpuls nicht nach außen transportiert werden, so würde das Teilchen zu

schnell rotieren, nicht einfallen und nach außen beschleunigt werden. Physiker sagen in diesem Fall, es würde an der Drehimpulsbarriere reflektiert werden.

Die MRI sorgt über diesen Effekt auch für die **magnetische Turbulenz** (engl. *magnetic turbulence*) im Akkretionsfluss. Mittlerweile wird dies gegenüber der rein hydrodynamischen Turbulenz favorisiert. Die MRI konnte 1991 von den Astrophysikern *Balbus* und *Hawley* abgeleitet werden. Bisweilen sprechen Akkretionsphysiker deshalb von der *Balbus-Hawley Instabilität* (BHI). Inzwischen wurde ihre Funktionsweise vielfältig in MHD-Simulationen demonstriert z. B. von *De Villiers* & *Hawley* 2002. Die MRI ist ein bedeutsamer Mechanismus in der magnetohydrodynamischen Akkretionsphysik.

14.6 Magnetohydrodynamik

Dieser Begriff, kurz **MHD** genannt, subsumiert eine Theorie, die die Wechselwirkung zwischen Magnetfeldern und Plasma beschreibt. Das Plasma wird dabei als kontinuierliches Medium beschrieben, so dass eine Verbindung zwischen den Gleichungen der Hydrodynamik einerseits und den Maxwell-Gleichungen der Elektrodynamik andererseits Inhalt der MHD ist.

14.6.1 MHD + Einstein = kompliziert

Eine Beschreibung im Rahmen der Relativitätstheorie ist mithilfe des Maxwellschen Feldtensors und des Maxwellschen Energie-Impuls-Tensors umsetzbar. Außerdem ist eine Formulierung der **kovarianten MHD-Gleichungen** (*General Relativistic Magnetohydrodynamics*, **GRMHD**) in der Kerr-Metrik über den 3+1-Split (dem ADM-Formalismus) möglich.

Von Interesse sind diese Gleichungen natürlich bei der Beschreibung der Akkretion auf ein Schwarzes Loch, weil die Wechselwirkung des Plasmas mit Magnetfeldern wichtig ist. In der gekrümmten Raumzeit kommt es dabei zu speziellen Effekten, die Newtonsch nicht erklärbar sind. Dazu zählen der **gravitomagnetische Dynamo**, der besonders in Nähe des Schwarzen Loches starke, toroidale Magnetfelder erzeugt (siehe dazu auch Frame-Dragging und Lense-Thirring-Effekt). Diese Felder können eine wesentliche Rolle bei der Emission von Synchrotronstrahlung in dieser Raumregion spielen.

14.6.2 magnetische Erzeugung von relativistischen Jets

Der Blandford-Znajek Mechanismus kann bei vorhandenem Magnetfeld Rotationsenergie vom Schwarzen Loch elektromagnetisch extrahieren und könnte so die Bildung von Jet im innersten Bereich des Systems aus Schwarzem Loch und Akkretionsscheibe (siehe auch Standardscheibe) bewirken. Diese Prozesse spielen eine Rolle bei Röntgendoppelsternen und Aktiven Galaktischen Kernen (AGN).

14.6.3 magnetische Turbulenz & magnetische Akkretion

Die **Magnetorotationsinstabilität** (MRI) oder *Balbus-Hawley-Instabilität* treibt die **magnetische Turbulenz** in magnetisierten Akkretionsflüssen an. Die Turbulenz ist besonders relevant für den **Transport von Drehimpuls** in der Akkretionsscheibe. Außerdem restrukturiert sie den globalen Akkretionsfluss und sorgt für Materieeinflüsse und Materieausflüsse.

14.7 Magnitude

Siehe dazu unter Helligkeit.

14.8 marginal gebundene Bahn

Dies bezeichnet einen charakteristischen Orbit um ein Schwarzes Loch.

14.8.1 Allgemeines zur Himmelsmechanik

Zur besseren Veranschaulichung des Begriffs sei zunächst auf die Bewegungen von Himmelskörpern im Sonnensystem verwiesen: Ganz allgemein sind die Bahnen um die Sonne **Kegelschnitte**, also Schnittfiguren einer Ebene mit einem Kegel, d. h. Ellipse, Kreis, Parabel oder Hyperbel. Die empirisch gefundenen Kepler-Gesetze können mathematisch mit der Newtonschen Gravitationsphysik erklärt werden. Mit den Mitteln der klassischen Mechanik sind so Bahnbewegungen im Zentralpotential einer Masse berechenbar.

Welche dieser Bahnen ein Körper beschreibt, hängt von seiner Geschwindigkeit und seiner relativen Position zur Zentralmasse ab:

Kreisbahn, Ellipsenbahn

Die gebundenen Bahnen um die Sonne sind gerade die Kreise (Exzentrizität null) und Ellipsen, wie sie die Planeten oder Kometen beschreiben. Dabei sind die Exzentrizitäten der Kometen wesentlich höher, als die der Planeten, so dass sie scheinbar für lange Zeit das Sonnensystem verlassen, um dann wiederzukehren. Ein berühmtes Beispiel ist der *Halleysche Komet*, der eine Umlaufperiode von etwa 76 Jahren hat. Die Gesamtenergie dieser Körper ist kleiner als null.

Parabelbahn

Die parabolischen Orbits vollführen die **marginal gebundenen Körper**, die gerade auf der kritischen Grenze zwischen potentieller Energie durch die Anziehung der Sonnenmasse und kinetischer Energie durch eigene Bahngeschwindigkeit liegen: ihre Gesamtenergie ist gerade null.

Hyperbelbahn

Die Körper auf hyperbolischen Bahnen haben eine Gesamtenergie größer als null.

14.8.2 Fluchtgeschwindigkeit

Man könnte sich die Verhältnisse auch mit der **Fluchtgeschwindigkeit** klarmachen:

$$v_{\mathrm{esc}} = \sqrt{2\mathrm{G}M/r},$$

mit der Zentralmasse M, der Gravitationskonstante G und einem Radius r, z. B. dem Oberflächenradius des Körpers, von dem man die Fluchtgeschwindigkeit bestimmen möchte. Bei der Erde beispielsweise müssen Raketen eine Geschwindigkeit von 11.18 km/s (mehr als 40000 km/h!) aufbringen, um ihrem gravitativen Anziehungsbereich entkommen zu können

(Erdmasse $M_{\text{Erde}} = 5.974 \times 10^{24}$ kg, Erdradius $r_{\text{Erde}} = 6378$ km). Die Fluchtgeschwindigkeit hängt natürlich vom Abstand ab und wird entsprechend kleiner, wenn das Testteilchen weiter von der Zentralmasse entfernt ist.

Für kleinere Geschwindigkeiten als die Fluchtgeschwindigkeit beschreiben Körper gebundene Bahnen (Ellipsen) um eine Zentralmasse, für den exakten Wert der Fluchtgeschwindigkeit sind sie auf parabolischen Bahnen und bei größeren Geschwindigkeiten als die Fluchtgeschwindigkeit sind die Bahnen hyperbolisch.

14.8.3 Was ist nun die marginal gebundene Bahn?

In der Physik Schwarzer Löcher handelt es sich bei der marginal gebundenen Bahn um einen der **charakteristischen Radien**, neben der marginal stabilen Bahn, dem Ereignishorizont und dem Photonenorbit. Die marginal gebundene Bahn, üblicherweise mit r_{mb} (mb, engl. *marginally bound*) abgekürzt, kennzeichnet einen Abstand, bei dem ein Testteilchen, das im Unendlichen ruhend erscheint, gerade an der Schwelle ist, um vom Schwarzen Loch angezogen zu werden.

14.8.4 Beispiel: Kerr-Metrik

Man berechnet diesen Abstand in der Kerr-Geometrie (rotierende Schwarze Löcher) über eine Betrachtung eines *effektiven Potentials*, indem man die Bindungsenergie E gleichsetzt mit der Ruhemasse m des Testteilchens (in relativistischen Einheiten, $c = 1$ etc.). Das Verfahren ist also analog zu den Kepler-Bahnen im Newtonschen Fall, nur dass durch die Verwendung des relativistischen Ausdrucks für die Gesamtenergie, $E = mc^2$, einen geschwindigkeits**un**abhängigen Term, den Ruhemassenterm, übrig lässt. Daher nicht $E = 0$, sondern $E = m$. Demnach erhält man:

$$r_{\text{mb}} = 2M \mp a + 2\sqrt{M}\sqrt{M \mp a} = \left(\sqrt{M} + \sqrt{M \mp a}\right)^2 .$$

Der marginal gebundene Radius folgt für Schwarzschild ($a = 0$) gerade zu 4 Gravitationsradien und im extremen Kerr-Fall ($a = M$ in geometrisierten Einheiten) zu einem Gravitationsradius.

Abbildung 14.2 fasst sämtliche Strukturen eines Kerr-Loches (mit $0 < a/M < 0.7$) inklusive charakteristischen Radien zusammen:

14.8.5 Empfehlung: gleich weiter lesen

Der nächste Eintrag marginal stabile Bahn bietet weitere Informationen zum Thema, insbesondere eine Darstellung der effektiven Potentiale.

14.9 marginal stabile Bahn

Dies bezeichnet einen charakteristischen Orbit um ein Schwarzes Loch.

14.9.1 Stabile Rotation am Abgrund

Nicht alles in der Umgebung Schwarzer Löcher muss unbedingt in sie hineinfallen. Um ein Schwarzes Loch ist ebenso eine stabile Rotation auf Kepler-Bahnen möglich, wie bei den Planeten um die Sonne.

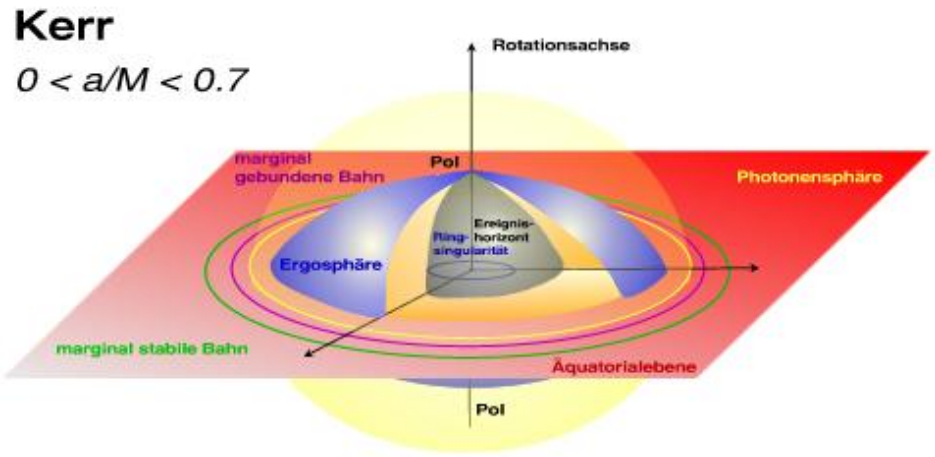

Abbildung 14.2: Strukturen eines Kerr-Loches inklusive Ergosphäre.

Es gibt allerdings eine charakteristische Grenze, die markiert, wo **keine stabile Rotation** mehr möglich ist: diese Grenze ist die marginal stabile Bahn. Es ist ein charakteristischer Radius bei Schwarzen Löchern, den man mit r_{ms} abkürzt. Etwas aussagekräftiger ist die alternative Bezeichnung **ISCO**, die für *innermost stable circular orbit*, also der 'innersten, stabilen Kreisbahn' steht. Ein Objekt, das sich auf *kleineren* Abständen als der marginal stabilen Bahn bewegt, muss entweder in das Loch fallen oder auf einer ungebundenen Bahn den Bereich des Lochs verlassen.

14.9.2 mächtiges Werkzeug: das effektive Potential

Ebenso wie bei der Diskussion von Planetenbahnen im Gravitationspotential der Sonne (gebundene Keplerbahnen) kann man Bahnen in einem *effektiven Potential* eines Schwarzen Loches für die Schwarzschild-Metrik oder die Kerr-Metrik diskutieren. In Diagramm 14.3 wird das in der Schwarzschild-Geometrie demonstriert: Im Diagramm ist das Potential V über den Radius aufgetragen, wobei die Potentialkurven mit dem spezifischen Drehimpuls L/m des Probeteilchens mit Masse m parametrisiert sind. Die genaue Form des Potentials hängt also davon ab, wie schnell das Teilchen um das Loch rotiert. Der Radius wird wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie üblich in Einheiten der Lochmasse M gemessen; dies sind gerade die geometrisierten Einheiten.

14.9.3 Tal: stabil - Berg: labil

Wie in der klassischen Mechanik auch, kann man mit diesen Potentialkurven das Schicksal von Teilchen diskutieren. Die Minima der Potentialkurven legen gerade die stabilen Keplerbahnen in der Äquatorebene des Loches fest. Die Potentialkurven für die spezifischen Drehimpulse L/m größer 3.464 zeigen ein ausgeprägtes Maximum. Reicht die Gesamtenergie einlaufender Teilchen aus, um diesen *Potentialberg* zu überwinden, so fällt das Teilchen in das Loch. Ist die Gesamtenergie kleiner als das Maximum von V, so wird das Teilchen am *Potentialwall* reflektiert. Es kann dann den Bereich des Loches wieder verlassen oder sich bei weiterem Energieverlust auf einer elliptischen Bahn 'einschwingen'. Im Potentialminimum nimmt das

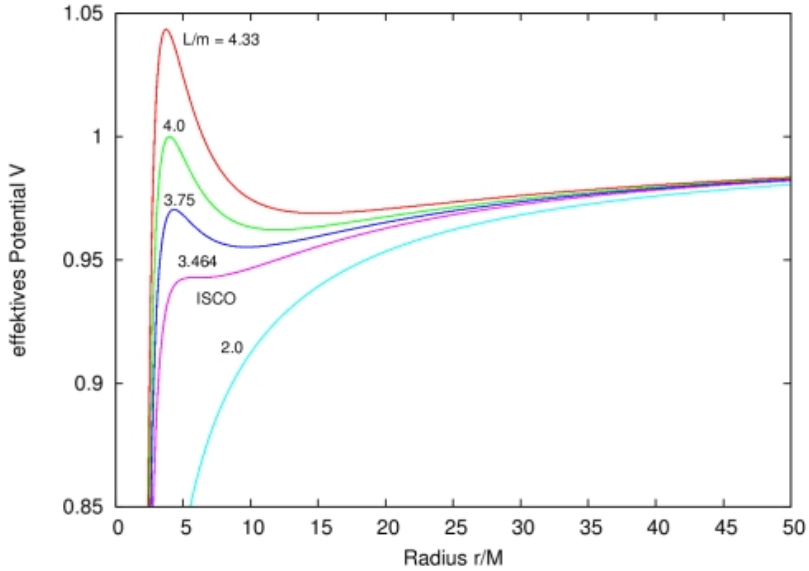

Abbildung 14.3: effektives Potential in Schwarzschild, parametrisiert durch den spezifischen Drehimpuls.

Teilchen eine stabile Kreisbahn ein (konstanter Radius).

14.9.4 marginale Stabilität am Wendepunkt

Bei dem bestimmten Wert $L/m = 3.464$ sieht man einen **Wendepunkt** im Potentialverlauf (violette Kurve). Von der Schulmathematik ist bekannt, dass in Wendepunkten die zweite Ableitung - hier die des Potentials nach dem Radius r - verschwindet. Diese spezielle Kurve kennzeichnet die engste Bahn um das Schwarze Loch, den **Radius marginaler Stabilität** oder **ISCO**. Hier ist gerade noch eine stabile Rotation um das Loch möglich. Wird jedoch das Teilchen gestört, so dass es sich nur ein wenig nach innen bewegt, fällt es in das Loch. Die Raumzeitstruktur des statischen Schwarzen Loches verbietet enge stabile Kreisbahnen nahe am Loch!

14.9.5 Lochrotation diktiert Ort der marginalen Stabilität

Für Schwarzschild (Kerrparameter a ist null) liegt die marginal stabile Bahn bei 6.0 Gravitationsradien. Im Diagramm oben ist bei diesem Abstand der Wendepunkt lokalisiert.

Für den extremen Kerr-Fall (Kerrparameter a ist eins) fällt rr_{ms} mit dem äußeren Horizontradius zusammen und liegt bei nur einem Gravitationsradius. Für die Kerr-Geometrie kann ein ähnliches, effektives Potential diskutiert werden.

14.9.6 Die Mastergleichung in Kerr

Allgemein berechnet sich der ISCO gemäß folgender Gleichungen (Kerrparameter a, Masse des Schwarzen Loches M):

$$r_{\mathrm{ms}} \quad = \quad M\left(3 + Z_2 \mp \sqrt{(3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2)}\right)$$

$$
\begin{aligned}
Z_1 &= 1 + \left(1 - \frac{a^2}{M^2}\right)^{1/3} \left(\left(1 + \frac{a}{M}\right)^{1/3} + \left(1 - \frac{a}{M}\right)^{1/3}\right) \\
Z_2 &= \sqrt{3\frac{a^2}{M^2} + Z_1^2}
\end{aligned}
$$

14.10 Markariangalaxien

Markariangalaxien ist ein bestimmter Typus aktiver Galaxien, für die wiederum Astrophysiker den Oberbegriff Aktive Galaktische Kerne (AGN) verwenden. Markariangalaxie ist eine historisch bedingte Bezeichnung und heute nicht mehr so gebräuchlich. Heutzutage verwenden Astronomen eher den Ausdruck Seyfert-Galaxie anstelle von Markariangalaxie.

14.10.1 Eigenschaften und Pionier

Markariangalaxien zeigen ein abnorm starkes Kontinuum im Ultraviolett sowie breite, thermische Emissionslinien. Sie wurden Anfang der 1970er Jahre entdeckt und sind nach dem sowjetischen Astronom *B.E. Markarian* benannt.

14.10.2 Prototyp und weitere Quellen

Eine bekannte Quelle und der leuchtkräftigste Vertreter unter den Markariangalaxien ist **Mrk 231**. Unter den Mrk-Objekten gibt es auch einen anderen AGN-Typ, die Blazare, wie beispielsweise Mrk 421 und Mrk 501. Beide nennt man TeV-Blazare, weil sie im höchsten Energiebereich elektromagnetischer Strahlung emittieren: bei einigen Teraelektronenvolt (10^{12} eV).

14.11 Maxwell-Tensor

Der Maxwell-Tensor ist ein Tensor und damit ein Objekt von Einsteins Relativitätstheorie. Dieser Tensor heißt auch elektromagnetischer Feldstärketensor und ist eingebettet in eine kovariante Formulierung der Elektrodynamik, d. h. die klassische Maxwellsche Theorie wurde relativistisch verallgemeinert.

14.11.1 Wie sieht so ein Tensor aus?

Der Maxwell-Tensor hat als Matrix notiert folgende Gestalt:

$$
\mathbf{F}^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & B_z & -B_y \\ -E_y & -B_z & 0 & B_x \\ -E_z & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix}
$$

Wie man sieht enthält er sowohl Komponenten des elektrischen Feldes (E), als auch des Magnetfeldes (B). Die Indizes x,y,z stehen dabei für die drei Raumrichtungen in kartesischen Koordinaten. Die Kenner der Matrizen sehen auch, dass der Maxwell-Tensor offensichtlich nicht symmetrisch ist: spiegelt man die Komponenten des Tensors an der Hauptdiagonalen, so erhält man zwar die gleiche Komponente des Feldes, aber umgekehrtes Vorzeichen. In Einsteins Theorie schreibt man das kompakt so: $\mathbf{F}_{\mu\nu} = -\mathbf{F}_{\nu\mu}$.

14.11.2 Aus 4 mach 2

Der Maxwell-Tensor bündelt also in kompakter Schreibweise die Komponenten des elektrischen und magnetischen Feldes. Damit ermöglicht er eine sehr elegante und kompakte kovariante Schreibweise der vier Maxwellschen Gleichungen der klassischen Elektrodynamik. Im Vakuum und in einer flachen Raumzeit, also für die Minkowski-Geometrie der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) reduzieren sich die Maxwellschen Gleichungen auf nur zwei Gleichungen:

$$\begin{aligned} \nabla_\nu F^{\mu\nu} &= j^\mu \\ \partial_{[\lambda} F_{\mu\nu]} &= 0 \end{aligned}$$

14.11.3 Elektrodynamik in gekrümmten Raumzeiten

In der Allgemeinen Relativitätstheorie konstituiert dieser Tensor zusammen mit dem metrischen Tensor den Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Tensors. Damit wird eine Behandlung der Elektrodynamik in gekrümmten Raumzeiten möglich. Es resultieren dann die so genannten **Einstein-Maxwell-Gleichungen**. Als Lösungen dieser Nicht-Vakuum-Feldgleichungen kennt man eine statische, elektrische Punktladung, die Reissner-Nordstrøm-Lösung, und eine rotierende, elektrische Ringladung, die so genannte Kerr-Newman-Lösung. Letztere repräsentiert eine sehr allgemeine Form von Schwarzes Löchern 'mit den meisten Haaren' (vergleiche Keine-Haare-Theorem). Es weist die physikalischen Eigenschaften Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung auf.

14.11.4 relativistische Astrophysik: SRMHD & GRMHD

Der Maxwell-Tensor wird ebenfalls benötigt, wenn die Astrophysiker Plasmen beschreiben wollen und dabei relativistische Effekte voll berücksichtigen wollen. In der flachen Raumzeit der SRT heißt dieses Forschungsfeld Speziell Relativistische Magnetohydrodynamik, (*special relativistic magnetohydrodynamics*, SRMHD). Forschungsgegenstand sind dann z. B. die fast lichtschnellen Jets von radiolauten Quasaren und Radiogalaxien (also von Aktiven Galaktischen Kernen). Diese extrem schnellen Materieströmungen werden mit aufwendigen Berechnungen auf Supercomputern simuliert.

Geht man zu den gekrümmten Raumzeiten über, so sprechen die Astrophysiker von Allgemein Relativistischer Magnetohydrodynamik, (*general relativistic magnetohydrodynamics*, GRMHD). Forschungsgegenstand ist dann beispielsweise die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Loches, wo die Wechselwirkung des Loches mit (als Flüssigkeit beschriebene) Materie und Akkretion untersucht werden.

14.12 Membran-Paradigma

Das Membran-Paradigma (engl. *membrane paradigm*) ist ein Modell, das auf den Ereignishorizont Schwarzer Löcher angewendet werden kann. Insbesondere bei der Elektrodynamik und Magnetohydrodynamik Schwarzer Löcher ist diese Sichtweise erfolgreich.

14.12.1 Väter des Membran-Paradigmas

Das Membran-Paradigma geht in seinen Anfängen auf *Richard Hanni* und *Remo Ruffini* zurück (1971). Sie erkannten, dass der äußere Horizont eines Schwarzen Loches ($\mathbf{r}_+$) wie eine **elektrisch leitende Kugelschale** aufgefasst werden kann.

14.12.2 Wie geht das?

Man kann sich das so veranschaulichen: In einer Versuchsanordnung der klassischen Elektrostatik nähert man elektrisch positive Ladung einer ruhenden, neutralen Metallkugel. Dabei werden die beweglichen Ladungsträger in der Kugel, die Elektronen, in denjenigen Bereich der Kugelschale gezogen werden, der der äußeren positiven Ladung am nächsten ist, weil sich ungleichnamige Ladungen anziehen. Es findet also in der Metallkugel eine Ladungsumverteilung statt, anders gesagt: Die Metallkugel wird **polarisiert**.

Berechnet man nun die elektrischen Feldlinien einer elektrischen Punktladung im starken Gravitationsfeld eines Schwarzen Loches, so wird die Feldkonfiguration durch die gekrümmte Raumzeit stark deformiert. Die Feldtopologie hat eine starke Ähnlichkeit zum gerade besprochenen Beispiel einer Metallkugel, wie *Hanni* und *Ruffini* feststellten. Dem Membran-Paradigma zufolge darf man nun den kugelsymmetrischen Ereignishorizont als dünne Kugelschale (engl. *stretched horizon*) auffassen. In dieser Membran (engl. *membrane*) befinden sich gleich viele elektrisch positive und negative Ladungsträger. Nähert sich nun eine elektrische Ladung dem Horizont, so wird die Membran analog zur Metallkugel polarisiert.

14.12.3 Anwendungsgebiete des Paradigmas

Das Membran-Paradigma Schwarzer Löcher kann beim Blandford-Znajek-Mechanismus angewendet werden. Bei diesem Prozess wird dem rotierenden Schwarzen Loch (Kerr-Geometrie) Rotationsenergie entzogen. Die so extrahierte Energie kann benutzt werden, um über Magnetfelder **ergosphärische Plasmaausflüsse** zu treiben. *Blandford* und *Znajek* fanden 1977, dass bei dieser Energieextraktion elektrische Ströme an den Polen des rotierenden Horizonts eintreten und nahe am Äquator des Horizonts wieder austreten. Der Eintritt wird durch den Einfall elektrisch positiver Ladungsträger (*Ionenrümpfe*) repräsentiert. Der Austritt hingegen wird durch den Einfall negativer Ladungsträger (Elektronen) bewerkstelligt. Das rotierende Kerr-Loch kann dabei wie ein **Spannungsgenerator** aufgefasst werden, der elektrische Ströme aus der Äquatorebene treibt. Der elektrische Stromkreis folgt poloidalen Feldlinien und wird beim Wiedereintritt in die Polregion wieder geschlossen. Dies generiert die charakteristische **Magnetosphäre rotierender Schwarzer Löcher**. Das Plasma in der Umgebung Schwarzer Löcher wird durch die elektrischen Ströme getrieben und erzeugt die Jets. Diese großskaligen Plasmaströmungen können mühelos relativistische Geschwindigkeiten erreichen und den Bereich des Schwarzen Loches verlassen. Man beobachtet sie in vielen Typen Aktiver Galaktischer Kerne (AGN) in Form von Radioemission von der Synchrotronstrahlung der Elektronen, vor allem in Radiogalaxien und radiolauten Quasaren. Die gleiche Physik kommt auch beim anisotropen Feuerball-Modell der Gamma Ray Bursts zum Einsatz - hier sind die Lorentz-Faktoren sogar um ein bis zwei Zehnerpotenzen größer!

14.12.4 noch mehr Papas

Znajek und *Damour* erkannten 1977/78, dass man die elektrischen Ströme in das Bild des Membran-Paradigmas von *Hanni* und *Ruffini* einbetten kann, indem man sich vorstellt, dass die Ströme an die Ladungen im Horizont, in der Membran, koppeln. Die Ströme knüpfen an die Ladungsträger im Horizont an und führen von der Polregion zu äquatorialen Gebieten. Es stellte sich heraus, dass man mathematisch **Verallgemeinerungen der klassischen Gesetze der Elektrodynamik** erhält, die analog sind zum Ampèreschen Gesetz, Gauß'schen Gesetz, Ohmschen Gesetz und zur Ladungserhaltung.

14.12.5 Analoga zur klassischen Elektrodynamik

- **Ampèresches Gesetz:** Der Oberflächenstrom des Ereignishorizonts ist gerade so groß, so dass sämtliche parallelen magnetischen Feldlinien eliminiert werden und ihr Anteil im Innern hinter dem Horizont verschwindet.

- **Gauß'sches Gesetz:** Die Oberflächenladung des Ereignishorizonts ist gerade so groß, so dass sämtliche elektrische Feldlinien an ihm enden und nicht ins Innere hinter dem Horizont eindringen.

- **Ohmschen Gesetz:** Der Oberflächenstrom des Ereignishorizonts ist proportional zu den elektrischen Feldern, die tangential zum Horizont orientiert sind. Der Proportionalitätsfaktor entspricht einem *endlichen Widerstand* von 377 Ohm.

- **Ladungserhaltung:** Die Ladungsbilanz ist null. Der Anteil elektrisch positiver Ladung, der an den Polen am Horizont eindringt, ist gerade so groß wie der Anteil negativer Ladungen, die ihn am Äquator verlassen.

Das Membran-Paradigma ist ein mächtiger Formalismus in der Elektro- und Magnetohydrodynamik Schwarzer Löcher.

14.12.6 Aber Vorsicht...

Eines muss jedoch klar gestellt werden: Innerhalb des Ereignishorizonts verliert das Membran-Paradigma seine Vorhersagekraft. Insbesondere 'spürt' ein Beobachter, der in ein Schwarzes Loch fallen würde, **nicht** irgendwelche Ladungen, die am Horizont lokalisiert sind!

14.12.7 Quellen

- Buch von *Kip Thorne*: Black Holes and Time Warps, 1994

- Papier von *S.S. Komissarov* 2002, astro-ph/0211141

- Buch von *Thorne, Price & Macdonald*: The Membrane Paradigm, Yale University Press, 1986

14.13 Mesonen

Die Mesonen (grch. *meson*: mittel) sind neben den Baryonen eine Unterklasse der Hadronen. Sie bestehen aus zwei Quarks, und zwar einem Quark und einem Antiquark (siehe auch Antimaterie), die aber nicht unbedingt dasselbe *Flavor* haben müssen. Aber daraus erklärt sich ihre **Kurzlebigkeit**. Alle Mesonen sind Bosonen, weil die Spins ihrer fermionischen Konstituenten zu ganzzahligen Spins koppeln.

14.14 Metalle

Metall bezeichnet in der Astronomie im Unterschied zur Chemie alle Elemente, die im Periodensystem der Elemente nach Wasserstoff (H) und Helium (He) folgen!

Für den Astronomen ist nicht nur Gold ein Metall, sondern auch Kohlenstoff.

14.14.1 Hoppla!

Die sonderbare Regelung kam deshalb zustande, weil Wasserstoff, Deuterium (schwerer Wasserstoff, D) Helium und Lithium (Li) die mit Abstand häufigsten Elemente im Universum sind. Diese leichten Elemente wurden in der **primordialen Nukleosynthese** bereits in der Frühphase des Kosmos erzeugt. Alle schwereren Elemente bis zum Element Eisen (Fe) werden erst im Innern von Sternen durch thermonukleare Fusion gebildet. Noch schwerere Elemente oberhalb der Atommasse von Eisen werden erst in den Explosionen massereicher Sterne am Ende ihrer Sternentwicklung, den Supernovae und in Sterngiganten, den Roten Riesen, erzeugt. Hier unterscheidet man verschiedene Einfangprozesse von Nukleonen (Proton und Neutron): den s-Prozess, den r-Prozess und den seltenen p-Prozess.

14.14.2 Nicht-Metalle gab es schon vor den Sternen

Wasserstoff, Helium und Lithium wurden bereits *primordial* in den Frühphasen des Universums erzeugt. Ursache dafür war der heiße Feuerball, der nach dem Urknall expandierte. In dieser Phase war der Feuerball mit etwa 10^9 Kelvin so heiß, dass er selbst als riesiger Fusionsreaktor fungierte: die Temperaturen reichten für das Wasserstoff- und Heliumbrennen aus.

'Brennen' ist der zweite Begriff, der abweichend zur Chemie verwendet wird: damit ist nicht etwa eine chemische Reaktion gemeint, an der Sauerstoff beteiligt ist, sondern die Fusion der jeweiligen Spezies.

14.14.3 Die ersten Sterne

Die ersten Sterne, die sich überhaupt im Universum gebildet haben, die **Population III**, unterschieden sich deutlich von den Sternen der Folgegenerationen. Sie bestanden ausschließlich aus primordialem Material (also *H*, *D*, *He-3*, *He-4 Li-7*) und konnten deshalb viel massereicher sein. Der Bereich ab 100 Sonnenmassen, der im lokalen Universum nur noch bei Exoten wie η *Carinae* (Sternbild *Schiff*) tangiert wird, war für PopIII-Sterne durchaus üblich. In diesem Zusammenhang sprechen die Astronomen häufig von *Very Massive Stars* (VMS), sehr massereiche Sterne.

14.14.4 Begriff der Metallizität

Eine wichtige Kenngröße in der Stellarphysik ist *Metallizität* (engl. *metallicity*) . Es handelt sich dabei um den Metallgehalt pro Einheitsvolumen, wobei 'Metall' wieder astronomisch zu verstehen ist (Elemente schwerer als Helium). An diese Größe gelangen Astronomen recht einfach über die Auswertung von Spektren. Metalle machen sich in Sternspektren als Absorptionslinien bemerkbar. Diese Linien heißen **Metalllinien**. Die relative Stärke dieser Linien wächst mit der Metallhäufigkeit im Stern. Ein gutes Maß ist der Vergleich der relativen Stärken von der Absorptionslinie von Eisen zu der von Wasserstoff, in der Regel mit $[Fe/H]$ abgekürzt. Dieses Verhältnis wird außerdem logarithmiert. Die Metallizität wird an der Sonne geeicht, d. h. man bezieht $[Fe/H]$ des beobachteten Objekts auf dasjenige der Sonne. So gewinnen die Astronomen die Metallizität in Einheiten der **solaren Metallizität** (engl. *solar metallicity*).

14.14.5 Zahlenbeispiele

Ein metallarmes Objekt hat zum Beispiel $[Fe/H]$ = -2, also zwei Hundertstel der solaren Metallizität. Generell gilt die Nomenklatur, dass ein Objekt mit $[Fe/H] >$ als -1 **metallreich** (engl. *metal-rich*) und mit $[Fe/H] <$ als -1 **metallarm** (engl. *metal-poor*) genannt wird.

14.14.6 Recycling erhöht Metallizität

PopIII-Sterne sind extrem metallarm und weisen Metallizitäten von $[Fe/H] <$ -6 auf, d. h. sie haben weniger als ein Millionstel der solaren Eisenhäufigkeit. Diese Verhältnisse änderten sich mit der schnellen Sternentwicklung der gigantischen PopIII-Sterne: entweder sie gingen am Ende ihrer Entwicklung im Gravitationskollaps mehr oder weniger direkt in stellare Schwarze Löcher (möglicherweise z.T. auch in andere kompakte Objekte) über, oder sie wurden durch die **Paarinstabilitäts-Supernova** völlig zerrissen. Egal was davon geschah: auf jeden Fall konnte auf diese Weise das interstellare Medium (ISM) mit **reprozessiertem Material höherer Metallizität** angereichert werden. Es folgten neue Sterngenerationen, die in ihrem heißen Innern weitere schwerere Elemente fusionierten, wenn sie nur genügend heiß waren. Dieser Materiekreislauf erhöhte damit nach und nach die Metallizität des Universums. Diese Elementvielfalt war sicher eine Voraussetzung für die Entstehung komplexen Lebens auf der Erde.

14.14.7 Populationen

Der Begriff der *Population* für Sterngruppen geht auf den deutschen Astronomen *Walter Baade* (1893 - 1960) zurück. **Population I** waren die jüngsten, d. h. zuletzt gebildeten, Sterne und bevölkern vornehmlich die galaktische Scheibe, offene Sternhaufen und die Spiralarme. **Population II** bezeichnet hingegen die so genannte *Halo-Population*, also alte Sterne, die im galaktischen Halo sitzen. In diesem Halo, einer sphäroiden Region, die die galaktische Scheibe umhüllt, befinden sich die ältesten Objekte einer Galaxie, die Kugelsternhaufen.

Das ständige Recycling interstellaren Materials und die obigen Definitionen der Populationen lassen sofort erkennen, dass die Metallizität von Population III über II nach I beständig zunahm.

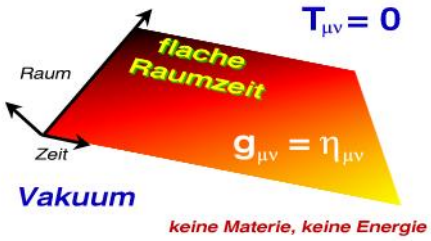

Abbildung 14.4: Illustration einer flachen Metrik.

14.15 Metrik

Die Metrik ist in Einsteins Relativitätstheorie ein geometrisches Gebilde, das von den drei Raumdimensionen und der Zeitdimension aufgespannt wird. Diese *vierdimensionale Mannigfaltigkeit* wird auch Raum-Zeit-Kontinuum oder kurz Raumzeit (engl. *space-time*) genannt.

Raum und Zeit bilden eine Einheit und stellen die 'Bühne (die *Welt*), wo sich die Geschehnisse ereignen. Diese 'Bühne; ist jedoch *dynamisch* (siehe auch Diffeomorphismus) und in ihrer Dynamik beeinflusst von jeder Energieform, z. B. von der Masse.

In Einsteins Theorie ist die Metrik ein Tensor. Dieser **metrische Tensor** ist *symmetrisch* und besteht deshalb aus (im Allgemeinen) zehn unabhängigen Komponenten. Wegen der vier Dimensionen kann der metrische Tensor als 4×4-Matrix geschrieben werden, der eigentlich $4 \times 4 = 16$ Komponenten hat. Die Symmetrie reduziert die 16 auf zehn unabhängige Komponenten.

Im Prinzip kann man die Begriffe Raumzeit, Metrik, metrischer Tensor und Linienelement synonym verwenden. Das Linienelement stellt die Metrik kompakt als eine Gleichung dar.

14.15.1 flache Metrik

Der einfachste metrische Tensor ist derjenige einer **flachen Raumzeit** (siehe Grafik 14.4), die so genannte Minkowski-Metrik. In Abwesenheit von Massen und Energie oder bei verschwindend kleinen Energien liegt diese **Vakuum-Raumzeit** vor, die auch den Hintergrund der Speziellen Relativitätstheorie bildet. Der Minkowski-Tensor ist deshalb sogar **diagonal**, hat nur vier von null verschiedenen Komponenten auf der Matrixdiagonalen. Diese sind sogar **konstant**, was in eine ungekrümmte und statische Raumzeit mündet. Die Zeit zeichnet sich gegenüber den Raumkoordinaten dadurch aus, dass sie entgegengesetztes Vorzeichen trägt. Dieser Umstand sichert die Lorentzinvarianz des Linienelements. D.h. verschiedene Beobachter in unterschiedlichen Bezugssystemen mögen unterschiedliche Zeitabstände oder Raumabstände für sich genommen messen, aber **raumzeitliche Abstände** stimmen überein und sind in diesem Sinne absolut. Die Relativisten sagen auch: das Linienelement ist eine *Invariante*.

14.15.2 Signatur der Metrik

Es gibt genau zwei mögliche Konventionen für die Vorzeichenwahl in der Minkowski-Metrik: (- + + +) oder (+ - - -). Dies nennt man die *Signatur der Metrik*. Kurz sagt man auch, die

Abbildung 14.5: Illustration einer allgemeinen, gekrümmten Metrik.

Signatur sei +2 oder -2, entsprechend der Summe der Vorzeichen.

Diese Freiheit bei den Vorzeichen gilt für *alle* Metriken der Relativitätstheorie. Im Vorzeichenunterschied schlägt sich letztendlich die unterschiedliche Natur von Raum und Zeit nieder: Die drei Raumdimensionen haben alle das gleiche Vorzeichen, entweder + + + oder - - -; legt man diese Vorzeichen fest, so *muss* die Zeit das entsprechend gegensätzliche Vorzeichen haben. Raum und Zeit bilden zwar ein Kontinuum, doch ihr unterschiedliches Wesen besteht einzig in diesem scheinbar harmlosen Vorzeichenunterschied.

14.15.3 gekrümmte Metrik

Die Morphologie der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit ändert sich entscheidend, wenn **Quellen des Gravitationsfeldes** auftauchen. Das illustriert Grafik 14.5. Der metrische Tensor einer gekrümmten Metrik enthält Komponenten, die *koordinatenabhängig* sind. Sie legen gerade die **Krümmungseigenschaften** der betreffenden Metrik fest.

14.15.4 Beispiel 1: die gekrümmte Schwarzschild-Metrik

Die historisch erste Lösung einer daraus resultierenden **gekrümmten Raumzeit** war die Schwarzschild-Metrik (1916). Sie beschreibt kugelsymmetrische und statische Raumzeiten von Punktmassen und wird in der Astrophysik auf relativistische, aber nicht rotierende Sterne und insbesondere auf statische, nicht rotierende Schwarze Löcher angewendet. Die Schwarzschild-Lösung ist eine Vakuumlösung der Einsteinschen Feldgleichungen, der Energie-Impuls-Tensor ist null, aber die Quelle der Gravitation ist eine punktförmige Singularität im Symmetriezentrum der Raumzeit.

Der zugehörige metrische Tensor der Schwarzschild-Lösung ist ebenfalls diagonal wie die Minkowski-Metrik, aber die Diagonalelemente sind koordinatenabhängig. Daraus folgen die Krümmungseigenschaften der Schwarzschild-Raumzeit fest, die vor allem nahe der Singularität wesentlich werden.

14.15.5 Beispiel 2: die gekrümmte Kerr-Metrik

Eine rotierende Verallgemeinerung der statischen Schwarzschild-Lösung wurde erst 1963 von dem neuseeländischen Mathematiker *Roy Patrick Kerr* gefunden, die seither Kerr-Metrik heißt. Bei dieser Metrik sind auch zwei Nebendiagonalelemente (die tΦ-Komponente und ihr symmetrisches Pendant) von null verschieden, in denen sich gerade die **Rotation der Raumzeit** widerspiegelt (siehe auch Lense-Thirring-Effekt).

14.15.6 Symmetrien der Raumzeit

Transformationen, die die Metrik in ihrer Gestalt nicht verändern, also *forminvarinat* lassen, nennt man Isometrien. Die Isometriebedingung führt auf die **Killing-Gleichung** und liefert die Killing-Felder einer Metrik, die eng mit deren Symmetrie zusammenhängen. Dies ist ein wichtiges Werkzeug, um die Symmetrieeigenschaften von Raumzeiten zu studieren.

14.15.7 Determinante der Metrik

Eine wichtige Größe, die man aus dem metrischen Tensor ableitet, ist die *Determinante* der Metrik, üblicherweise mit g bezeichnet. Stellt man den metrischen Tensor als 4×4-Matrix dar, folgt die Determinante nach den üblichen Regeln der Matrizenrechnung.

g geht zum Beispiel in die Lagrangedichte der ART ein (*Einstein-Lagrangedichte*, *Einstein-Hilbert-Wirkung*) und kann Ausgangpunkt einer Quantenfeldtheorie der Gravitation genutzt werden. In den Eichtheorien ist das eine mächtiger, mathematischer Apparat.

14.15.8 Metriken der Kosmologie

Die zentrale Metrik der Kosmologie ist die Robertson-Walker-Metrik, die der Schwarzschild-Metrik sehr ähnelt. Allerdings ist in dieser relativistischen Beschreibung des materiegefüllten Universums neu, dass die Friedmann-Weltmodelle *keine* Vakuumraumzeiten sind. Dann wird der Energie-Impuls-Tensor verschieden von null und die Materie im vorliegenden Fall durch eine ideale Flüssigkeit beschrieben. Außerdem kann in **Lambda-Universen**, was offensichtlich auch in der Natur realisiert ist, ein *kosmologischer Term* berücksichtigt werden. Die zusätzliche Quelle des Gravitationsfeldes neben der als Flüssigkeit beschriebenen Materie ist dann die Dunkle Energie, die *antigravitativ* wirkt und die Expansion des Universums beschleunigt. Der metrische Tensor der Robertson-Walker-Metrik ist ebenfalls diagonal, aber mit koordinatenabhängigen Komponenten.

14.15.9 Analysen der Raumzeit mit konformen Metriken: Penrose-Diagramme

In der Analyse von Metriken hat es sich als Vorteil erwiesen, das Verhalten der Raumzeit im Unendlichen mit einer unphysikalischen Metrik zu studieren, die man aus der Raumzeit gewinnt. Man führt eine konforme Transformation durch und gewinnt aus einer gegebenen Metrik eine dazu konforme Metrik. Diese Prozedur ist die Voraussetzung zur Gewinnung von **Penrose-Diagrammen**, die von großer Relevanz bei der Untersuchung von Raumzeiten in der ART sind.

14.16 Mikroblazar

In Analogie zu den Blazaren ist der Mikroblazar ein Mikroquasar, bei dem der (stellare) Jet in Richtung des Beobachters zeigt. Dadurch kommt es zu starken Blauverschiebungseffekten (*beaming*), weil der Jet sich typischerweise mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegt.

14.17 Mikrolinse

In der Astronomie bezeichnet Mikrolinse eine **massearme Gravitationslinse**, z. B. ein Brauner Zwerg, ein Stern der Spektralklasse M oder ein extrasolarer Planet.

14.17.1 Mikrolinsen verstärken Licht einer Hintergrundquelle

Mikrolinsen sorgen zwar für eine 'Bildverzerrung' des gelinsten Objekts im Hintergrund. Dieser Effekt ist allerdings so schwach ausgeprägt, dass es nur photometrisch bzw. spektroskopisch über eine Messung des charakteristischen Anstiegs der Helligkeit in der Lichtkurve zu messen ist.

14.17.2 Beispiele astronomischer Beobachtungen

Eine Mikrolinsenbeobachtung von 2002, katalogisiert als OGLE-2002-BLG-055, wurde 2004 erneut untersucht, weil sich herausstellte, dass viele Interpretationen der Beobachtung möglich sind (*Gaudi & Han* 2004, astro-ph/0402417).

Im April 2004 wurde die Entdeckung eines **planetarischen Mikrolinsen-Ereignisses** bekannt gegeben: OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 ist ein Binärsystem aus Stern und jupiterartigem Planet, die etwa einen Abstand von drei Astronomischen Einheiten voneinander haben und fast 17 000 Lichtjahre von der Erde entfernt sind (*Bond et al.* 2004, astro-ph/0404309).

14.17.3 Weiter im Lexikon

Mehr zum Thema liefert der Eintrag Gravitationslinse.

14.18 Mikroquasar

Ein Mikroquasar ist eine sternartige Quelle, die eine sehr ähnliche Physik aufweist, wie die Quasare, allerdings auf einer viel kleineren Längenskala.

14.18.1 Quasare sind die größeren Brüder

Während Quasare AGN sind, also helle Kerne ganzer Galaxien, deren Motor im Wesentlichen die Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch ist, sind Mikroquasare Doppelsterne, wobei die kompakte Komponente ein stellares Schwarzes Loch ist. Die andere Komponente ist ein massereicher Stern (typischerweise 10 bis 30 Sonnenmassen schwer) vom Spektraltyp O bis B, der Materie an das Schwarze Loch verliert. Dies geschieht dadurch, dass dieses System aus zwei Körpern einen *inneren* Lagrange-Punkt besitzt, wo keine effektive Gravitationskraft herrscht, weil sich die Gravitations- und Zentrifugalkräfte von der einen Komponente mit der der anderen gerade aufheben. Liegt dieser kritische Punkt innerhalb des massereichen Wirts- oder Donatorsterns - Astronomen sprechen dann von der Überschreitung des Roche-Volumens - so verliert er Materie an das kompakte Objekt. Astrophysiker nennen das im Fachjargon den *Roche-lobe overflow*, den die Illustration 14.6 zeigt: Üblicherweise blasen die massereichen Donatorsterne kräftige Winde (vergleichbar dem Sonnenwind) in das interstellare Medium, so dass *Wind-Akkretion* stattfinden kann. Das Aufsammeln dieses Sternenwinds stellt eine Alternative zum *Roche-lobe overflow* dar. Typische Akkretionsraten auf die kompakte Komponente liegen bei 10^{-4} Sonnenmassen pro Jahr. Weil die überfließende Materie Drehimpuls besitzt, spiraliert sie genauso wie beim 'großen Bruder', dem Quasar, in einer flachen Akkretionsscheibe langsam in das Schwarze Loch. Dabei heizt sich die Scheibe so sehr auf und Comptonisierung setzt ein, die in einer starke Emission im Röntgenbereich resultiert. Mikroquasare sind also auch Röntgendoppelsterne (engl. *X-ray binaries*, kurz

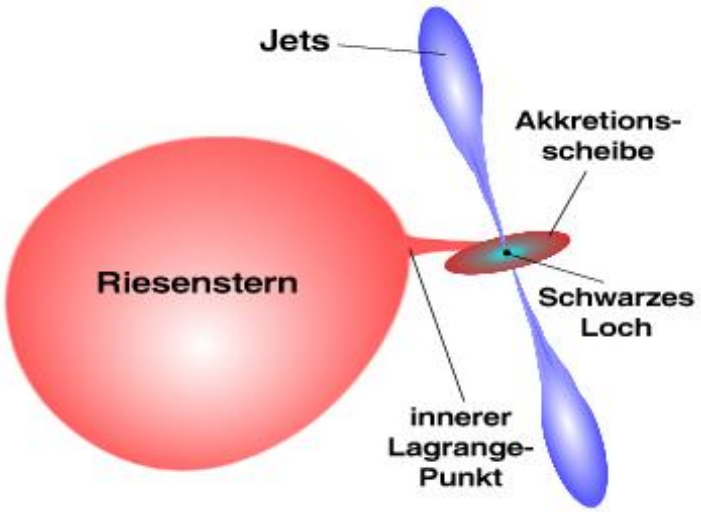

Abbildung 14.6: Mikroquasar: überfließende Materie von einem massereichen Stern auf ein kompaktes Objekt.

XRBs). Die Akronym-Sucht wird jedoch noch weiter getrieben: XRBs werden in LMXBs (*low-mass X-ray binaries*), HMXBs (*high-mass X-ray binaries*), BHXBs (*blck hole X-ray binaries*), SSS (*supersoft sources*) und ULX (*ultraluminous X-ray source*) unterschieden.

14.18.2 Woher kommen Mikroquasare?

Die Entwicklung hin zu einem solchen System muss recht katastrophal gewesen sein: im Rahmen der Sternentwicklung muss nämlich das kompakte Objekt aus einem Gravitationskollaps des vormaligen 'normalen' Doppelsternsystems hervorgegangen sein. Dabei hat das System jedoch seine Rotation umeinander mehr oder weniger beibehalten.

Im strengen Sinne sind Mikroquasare nur solche XRBs, die ein stellares Schwarzes Loch enthalten, eben genau wie das große Vorbild, der Quasar, der ein supermassereiches Schwarzes Loch enthält. Mittlerweile bezeichnet man jedoch auch häufig solche Systeme als Mikroquasar, die einen Neutronenstern als kompaktes Objekt enthalten. Oftmals sind sich die Beobachter auch gar nicht sicher, welche Natur das kompakte Objekt hat. Um was es sich genau handelt, kann nur mit einer **genauen Massenmessung** bestimmt werden: ist die kompakte Komponente schwerer als drei Sonnenmassen, so muss es ein Schwarzes Loch sein.

14.18.3 relativistische Jets

Eine weitere Übereinstimmung von Mikroquasaren und Quasaren ist die Bildung von Jets. Astronomen entdeckten die Plasmaströme erstmals im Bereich der Radiostrahlung - mittlerweile gibt es auch viele optische Fotos und Röntgenbilder von Jets. Die morphologische Übereinstimmung von radiolauten Quasaren und Mikroquasaren ist die Begründung für den Terminus *Mikroquasar*. Je nachdem, wie der Jet hydrodynamisch oder magnetohydrodynamisch entstand, kann es zu morphologischen Unterschieden kommen: die extragalaktischen Jets von AGN sind in der Regel ein recht kontinuierlicher, kollimierter Plasmastrahl. Wohingegen man bei den stellaren Jets von Mikroquasaren auch

diskontinuierliche Plasmaauswürfe beobachtet (Radio- und Röntgenbeobachtungen). Man spricht bei den diskontinuierlichen Materiepaketen von *Blobs* oder *Bullets*, die ballistisch das interstellare Medium um den Mikroquasar durchqueren und dabei Bremsstrahlung und Synchrotronstrahlung emittieren.

14.18.4 Bedeckung verrät Umlaufperiode

Die Astronomen wollen so viele Parameter der Mikroquasare messen wie nur geht. Wenn sie Glück haben, ist die räumliche Orientierung des Doppelsternsystems so, dass der massereiche Stern die kompakte Komponente bedecken kann. Häufig ist der Stern ein Wolf-Rayet-Stern. Bei geeigneter Orientierung kommt es deshalb zu **Bedeckungsphänomenen**, die sich in der Variabilität der Röntgenemission widerspiegeln: immer wenn der massereiche Stern vor der Akkretionsscheibe steht, sehr wir auf der Erde keine Röntgenstrahlung. Daraus kann man die **Umlaufperiode** ableiten - eine für Astronomen wertvolle Information.

14.18.5 relativistische Jets

Auch die Orientierung des Jets ist wesentlich: zeigt er in Richtung Erde, können Überlichtgeschwindigkeitseffekte auftreten, wie bei den Blazaren. Manchmal spricht man dann auch von **Mikroblazaren**. Außerdem ist bei diesen kleinen Inklinationen des Jets die Radioemission unterdrückt. Möglicherweise können sie in Zukunft durch die Emission von UHE-Neutrinos identifiziert werden.

14.18.6 Bekannte Vertreter

Einige Mikroquasare in der Milchstraße sind: Cyg X-1, Cyg X-3, GRS 1915+105, SS 433, Cir X-1, XTE J1748-288, LS 5039, GRO J1655-40, XTE J1550-564 und Sco X-1.

14.18.7 Weitere Literatur

- ◇ Web-Artikel: In Kompakte Objekte des Himmels stelle ich ein paar Mikroquasare etwas detaillierter vor.

- ◇ Publikation: *Distefano et al., ApJ, 575, 378-383 (2002)* stellen die Emission von UHE-Neutrinos verschiedener Mikroquasare vor und geben erwartete Raten an.

14.19 Milchstraße

Der klare Nachthimmel präsentiert uns Myriaden von Sternen. Beobachtet man die Verteilung der Sterne sehr genau, so fällt schon mit bloßem Auge auf, dass sich einige davon in einer Art Band zu häufen scheinen. Dieses Band umspannt den ganzen Globus. Es verläuft am Nordhimmel beispielsweise durch die Sternbilder Schlangenträger, Leier, Kepheus, Cassiopeia, Perseus, Fuhrmann und Zwillinge. Mit einem Feldstecher oder einem Fernrohr lässt sich das Band in viele Einzelsterne auflösen. Wir haben hier das **Band der Milchstraße** entdeckt.

14.19.1 Zuhause in der Milchstraße

Die Milchstraße ist eine gigantische Ansammlung von Sternen, und wir befinden uns mittendrin. Solche Sternsysteme heißen **Galaxien**. Die Milchstraße (engl. *Milky Way*) ist unsere Heimatgalaxie - es gibt aber noch viel mehr Galaxien im Universum: etwa einige hundert Milliarden!

Die Milchstraße besteht aus einigen hundert Milliarden Sternen, die sich zusammen mit leuchtendem Gas und kalten Staub in einer gigantischen, rotierenden Materiescheibe angesammelt haben. Diese Materiescheibe hat einen **Durchmesser von gut 100000 Lichtjahren**, eine Masse von etwa 40 Milliarden Sonnenmassen und heißt **galaktische Scheibe**. Im Abstand von etwa 26000 Lichtjahren vom Zentrum der Scheibe umkreisen wir Erdlinge mit der Sonne das Zentrum der Milchstraße. Die Scheibe erscheint am Himmel als das Milchstraßenband. Schon das Band verrät uns daher viel über die Struktur der Milchstraße. Außerdem zeigen genauere astronomische Messungen, dass die Scheibe eine innere, spiralförmige Struktur besitzt. Die Milchstraße ist eine **Spiralgalaxie**.

Nach innen verdickt sich die Scheibe zu einem nuklearen Sternhaufen. Diese Verdickung nennen die Astronomen *Bulge* (engl.: 'Verdickung, Wulst'; ausgesprochen wie 'balsch') oder *Sphäroid*. Wie eine riesige, kugelförmige Kuppel umspannt die Scheibe der **galaktische Halo**. In dieser Kugelschale tummeln sich tausende Kugelsternhaufen, die ihrerseits etwa 100000 sehr alte Sterne beherbergen (z. B. Weiße Zwerge, RR Lyrae-Sterne, siehe auch Population).

14.19.2 Didaktisches zu galaktisch & extragalaktisch

Alles, was sich innerhalb der Milchstraße befindet, wird mit dem Attribut **galaktisch** bedacht, z. B. Galaktischer Schwarz-Loch-Kandidat (Galaktische Schwarze Löcher dürfen also nicht mit supermassereichen Schwarzen Löchern in den Zentren von Galaxien verwechselt werden!). Alles, was sich außerhalb der Milchstraße befindet, erhält das Attribut **extragalaktisch**.

14.19.3 Ein infraroter Blick auf die Milchstraße

Wir befinden uns in der Milchstraße, so dass wir uns kein Bild der Milchstraße von außen machen können. Die Astronomen können jedoch faszinierende Innenansichten einer Galaxie fotografieren: Das Falschfarbenbild 14.7 ist kein Gemälde oder eine Computersimulation, sondern basiert tatsächlich auf vielen Einzelbeobachtungen. Es zeigt den ganzen Himmel (*All Sky Survey*; dargestellt im galaktischen Koordinatensystem) im Licht der Infrarotstrahlung bei 2 Mikrometer Wellenlänge (Credit: 2MASS, University of Massachusetts und JPL/NASA). Strahlung bei dieser etwas höheren Wellenlänge als rotes Licht hat den Vorteil, dass sie den Staub in der Milchstraße mühelos durchdringt. Im Optischen ist die Sicht entlang der galaktischen Scheibe, insbesondere ins Zentrum der Milchstraße stark beeinträchtigt durch Staub. Erst bei Radio-, Infrarot oder auch bei harter Röntgenstrahlung ist die Sicht ungetrübt.

Das Foto zeigt nun das Band der Milchstraße, das sich von links nach rechts zieht. Das helle Zentrum der Milchstraße ist klar in der Bildmitte zu erkennen. Auch der Bulge ist gut zu sehen: die Verteilung der Sterne verdichtet sich zum Zentrum und formt eine Verdickung. Nach oben und unten nimmt die Sterndichte deutlich ab, weil das die Regionen ober- bzw. unterhalb der galaktischen Scheibe sind. Hier tummeln sich noch einige Sterne; vor allem ist das die Region des kuppelförmigen Halos, in dem sich die Kugelsternhaufen, die ältesten Objekte der Milchstraße, befinden.

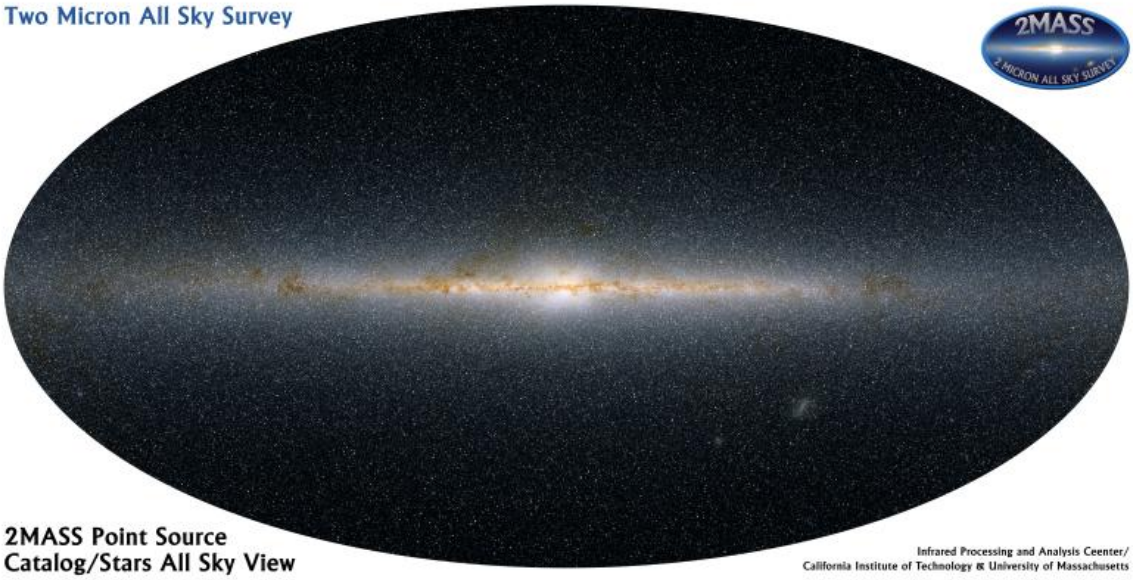

Abbildung 14.7: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit 2MASS (Infrarot).

14.19.4 Nachbarn der Milchstraße

Im Bild sind außerdem unten rechts ('auf 4 Uhr') zwei Flecken zu sehen. Das sind nicht etwa Planetarische Nebel oder Kugelsternhaufen - es sind ebenfalls Galaxien! Es sind die beiden **Magellanischen Wolken**: die *Große Magellanische Wolke* (engl. *Large Magellanic Cloud*, LMC) und die *Kleine Magellanische Wolke* (engl. *Small Magellanic Cloud*, SMC). Die Galaxien begleiten die Milchstraße als eigenständige Galaxien jeweils in etwa 50 kpc Entfernung. Es sind also extragalaktische Systeme. Die Magellanischen Wolken sind deutlich masseärmer als die Milchstraße und haben sich durch die Gezeitenwechselwirkung stark verändert. Es sind *irreguläre Galaxien* geworden (siehe auch Hubble-Klassifikation). Von Europa aus sind die Magellanischen Wolken leider nicht zu sehen, aber auf der Südhalbkugel der Erde sind LMC und SMC gut zu beobachten und erscheinen als diffuse, kugelige Wölkchen.

In größerer Entfernung gibt es noch einen weiteren Nachbarn der Milchstraße: die **Andromedagalaxie** (Messierobjekt M31) ist 667 kpc entfernt. Die Andromedagalaxie zeigt einen Blauverschiebungseffekt gegenüber der Milchstraße, weil sich beide durch die Wirkung der Gravitation aufeinander zu bewegen. Früher oder später werden die beiden Galaxien zusammenstoßen und miteinander verschmelzen. Von außen betrachtet wird dieser Verschmelzungsprozess so ähnlich aussehen, wie er schon jetzt bei den Antennengalaxien beobachtet werden kann (siehe Foto unter Gezeitenkräfte, Abschnitt 'Galaxienhochzeit'). Kosmologisch gesehen ist die Entfernung zwischen Andromeda und Milchstraße noch zu klein, als dass die kosmologische Rotverschiebung ins Gewicht fallen würde. Deshalb kann es lokal noch zu Blauverschiebungen kommen.

Andromeda ähnelt sehr der Milchstraße in Gestalt (*Morphologie*) und Masse. Beide Galaxien dominieren eine Ansammlung von Galaxien. Dieser Galaxienhaufen heißt **Lokale Gruppe**. Neben Andromeda, LMC, SMC sowie Dreiecksgalaxie gibt es viele kleine Zwerggalaxien in der Lokalen Gruppe. Einige von ihnen werden von Dunkler Materie

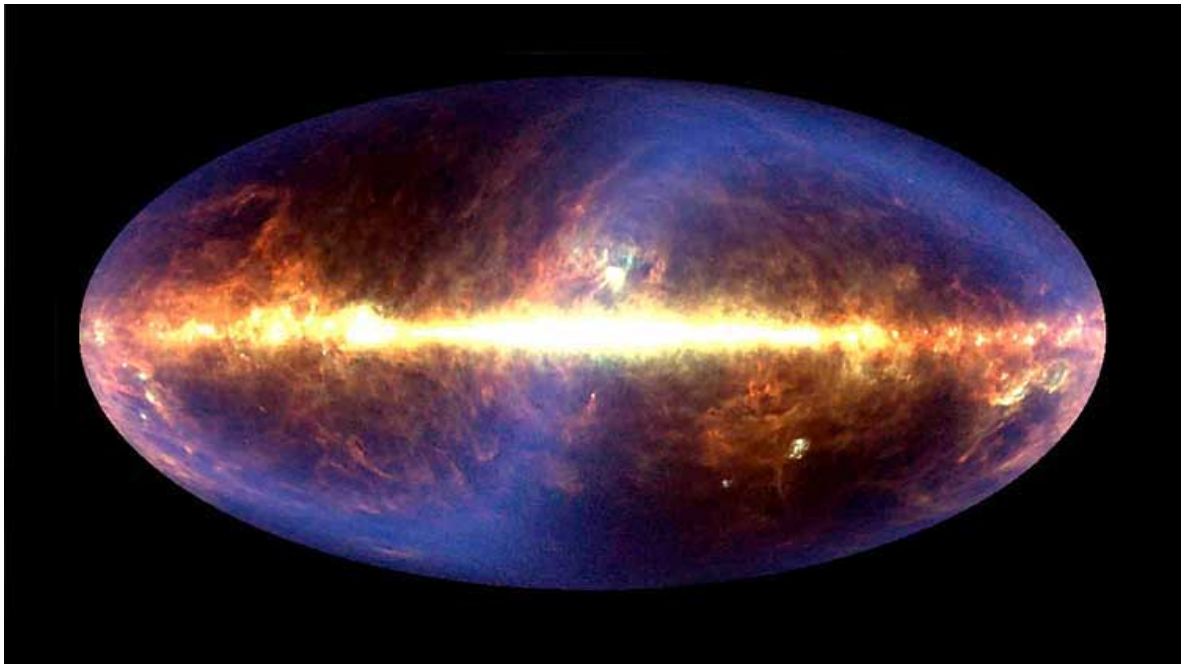

Abbildung 14.8: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COBE, DIRBE (Infrarot).

dominiert und sind extrem leuchtschwach (siehe Eintrag Dunkle Materie, Abschnitt 'Galaktischer Gasdiebstahl').

14.19.5 Ein zweiter Blick auf die Milchstraße

Das Bild 14.7 zeigt im Wesentlichen die Sterne in der Milchstraße. Wenn die Astronomen die Wellenlänge um den Faktor 30 bis 100 erhöhen, dringen sie noch tiefer in das Infrarote ein. Die Milchstraße sieht dann anders aus: Das Foto 14.8 zeigt den **kosmischen Infrarothintergrund** (Credit: COBE/DIRBE/NASA, *M. Hauser* 1998). Es ist ein Falschfarbenbild, bei dem blau einer Wellenlänge von 60, grün einer Wellenlänge von 100 und rot einer Wellenlänge von 240 Mikrometern zugeordnet wurde. Das Band der Milchstraße erscheint nun hell und diffus, weil hier **interstellares Gas und Staub** leuchten. Das interstellare Gas wiegt etwa 5 Milliarden Sonnenmassen (*Robin et al.* 2003). In der Scheibenebene scheint es förmlich zu kochen: Sternexplosionen wie die Supernovae und kräftige Sternenwinde treiben das interstellare Material heraus aus der Ebene und 'pusten' es zu hohen, galaktischen Breiten. Astronomen nennen die aufsteigenden, extrem schnellen Gaswolken **Superblasen** (engl. *superbubbles*). Sie werden auch im Radiobereich beobachtet. In der Milchstraße geht es ziemlich turbulent zu!

Bei den höheren Wellenlängen sind die Magellanischen Wolken viel besser zu sehen, als im Beispiel oben und erscheinen hier als weiße Flecken rechts unten. Außerdem fällt eine blaue, S-förmige Struktur auf, die sich von links unten durch das Zentrum der Milchstraße nach rechts oben zieht. Wir erinnern uns: blau ist die kürzeste Wellenlänge von 60 Mikrometern. Das ist gerade **interplanetarer Staub**, der sich im Sonnensystem befindet (siehe auch Zodiakallicht). Dieser 'Staub vor unserer Haustür' trübt die Sicht ins Weltall. Wir sehen

hier in blau also nichts anderes als die Ebene der **Ekliptik**! Entlang des blauen Bands ordnen sich die zwölf Tierkreiszeichen an. Genau in der Mitte, im **Galaktischen Zentrum**, befindet sich das Sternbild Schütze (*Sagittarius*, Sgr).

14.19.6 Das Monster im Zentrum der Milchstraße

Im Galaktischen Zentrum (Sgr A*) befindet sich wie in (nahezu) jeder Galaxie eine hochkompakte, dunkle Masse. Sie ist dunkel, weil die Gravitation das Licht einfängt. Dieser Gravitationsrotverschiebungseffekt kann nur mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie verstanden werden.

Eine genaue Analyse der Sternbewegungen im Zentrum der Milchstraße mithilfe von Nahinfrarotbeobachtungen (Infrarotgruppe um Reinhard Genzel, MPE) ergibt, dass die kompakte Masse ein **supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen** sein muss!

14.19.7 Ein dritter Blick: Die Milchstraße im Röntgenlicht

Der unter deutscher Führung betriebene Röntgensatellit ROSAT war von 1990 bis 1999 aktiv. Das MPE Garching ist das wichtigste Datenzentrum für ROSAT. Die erfolgreiche ROSAT-Mission hat die Röntgenastronomie mit vielen neuen Erkenntnissen bereichert. Der Röntgenhimmel bildet spektakuläre und sehr energiereiche, kosmische Prozesse ab. In der Milchstraße sind prominente Röntgenquellen heißes Gas, Supernovaremnants und Röntgendoppelsterne; in der extragalaktischen Röntgenastronomie kommen vor allem die hellen Zentren anderer Galaxien, die Aktiven Galaktischen Kerne (AGN), und das sehr heiße, intergalaktische Plasma dazu.

Die Himmelskarte 14.9 fasst die ROSAT-Daten zu einem Bild des ganzen Röntgenhimmels zusammen: Es handelt sich dabei um diffuse, weiche Röntgenstrahlung zwischen 0.1 und 2 keV Strahlungsenergie, die als Falschfarbenbild dargestellt wurde (Credit: Röntgengruppe MPE): das Energieband zwischen 0.1 und 0.4 keV wurde rot, zwischen 0.5 und 0.9 keV gelbgrün und das energiereichste Band zwischen 0.9 und 2 keV blau dargestellt. Das galaktische Halo trägt zum energieärmsten Band bei und erscheint rot. Heiße Gasblasen mit einigen Million Kelvin Temperatur erscheinen gelbgrün. Die energiereichste Emission stammt von Supernovaüberresten und dem Zentrum der Milchstraße. Die weiße, extrem helle Quelle innerhalb der galaktischen Ebene rechts ist der Vela-Supernovaüberrest, der intensiv mit ROSAT untersucht wurde (siehe auch Velapulsar). Die weiße, helle Punktquelle in der galaktischen Ebene links vom Zentrum ist Cygnus X-1, ein Röntgendoppelstern, der ein stellares Schwarzes Loch mit etwa 10 Sonnenmassen enthält. Einige blaue Punkte sind extragalaktische Punktquellen wie AGN - viele Punktquellen wurden jedoch zur Erstellung des Bildes abgezogen. Die dunklen Streifen sind Artefakte von der Datenauswertung.

14.19.8 Ein vierter Blick: Gammahimmel der Milchstraße

Ein bestimmtes Isotop des Elements Aluminium (Al-26) ist radioaktiv und ein β^+-Strahler: ein Proton im Atomkern verwandelt sich durch Beta-Zerfall in ein Neutron, ein Positron und ein Antineutrino, so dass aus Aluminium das neue Element Magnesium wird. Dabei entsteht ein hochangeregter Magnesiumatomkern Mg^*, der sich durch Aussendung hochenergetischer Gammaphotonen der Energie 1809 keV abregt. Diese aus dem Gamma-Zerfall entstandene Strahlung hat eine so hohe Energie, dass sie mühelos alles durchdringt.

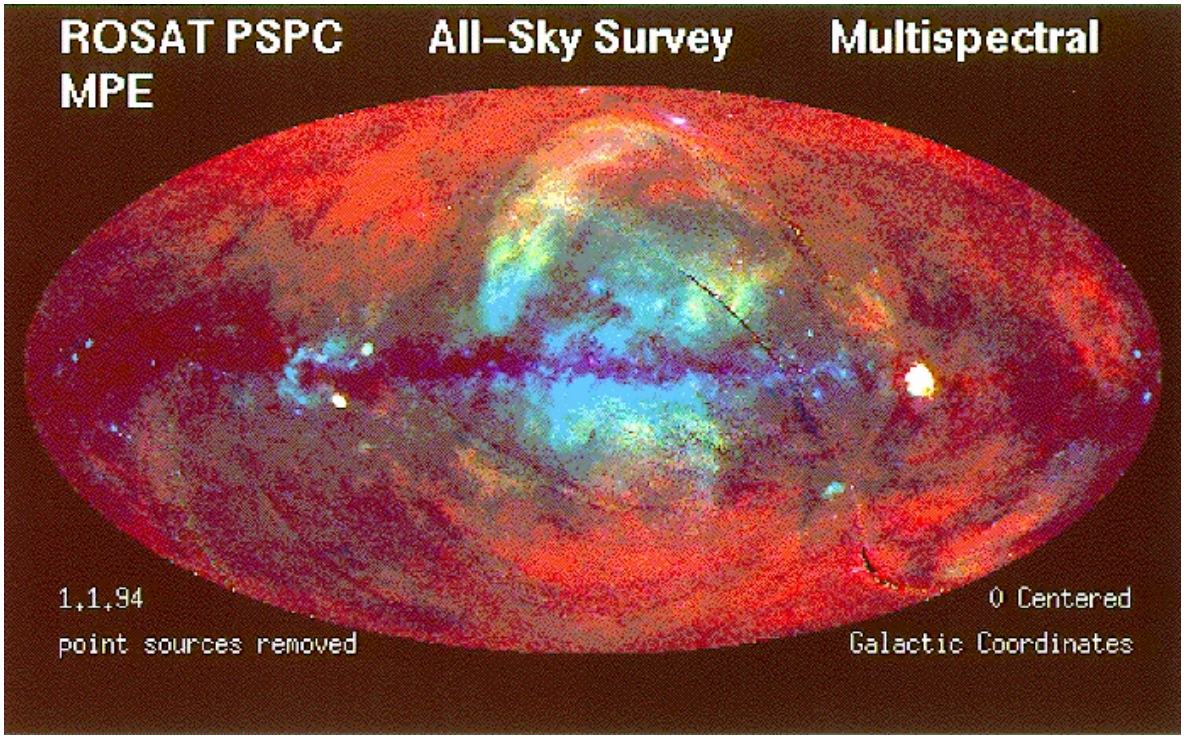

Abbildung 14.9: ROSAT-Panorama der Milchstraße (weiche Röntgenstrahlung).

Was hat das mit der Milchstraße zu tun? Dieses Aluminium wird wie viele andere Elemente von massereichen Sternen in der Milchstraße erzeugt. Es reichert sich mit der Zeit im interstellaren Medium an, weil die Sterne es durch starke Winde (Wolf-Rayet-Phasen) in die Umgebung befördern. Da Al-26 mit einer Halbwertszeit von 720000 Jahren zerfällt, sollte die Gammastrahlung des angeregten Tochterkerns Mg-26 nachweisbar sein. In der Tat gibt es diese Strahlung und Abbildung 14.10 zeigt den ganzen Himmel im Licht der hochenergetischen Aluminiumspektrallinie bei 1809 keV (Credit: CGRO/COMPTEL, *Plüschke et al.* 2001): In dieser Spektrallinie stecken sehr viele Informationen: wie man auf der Himmelskarte sieht, gibt es offensichtlich eine Häufung von Aluminium in der Galaktischen Ebene und dort speziell nahe am Galaktische Zentrum. Das verwundert nicht, weil dort die meisten Sterne zu finden sind, die dieses Material in der stellaren Nukleosynthese hergestellt haben. Die Emission von Al-26 bildet also direkt die Population massereicher, junger Sterne ab. Ausgedehnte Sternentstehungsregionen mit vielen jungen, massereichen Sternen treten besonders hervor. Auf der Karte ist sind beispielsweise die *Cygnus-Region* (in der galaktischen Ebene, roter Fleck ganz links) und der *Orionnebel* (etwas unterhalb der galaktischen Ebene, grüner Fleck ganz rechts).

Aufgrund des Doppler-Effekts wird die Spektrallinie verändert, je nachdem wie sich das emittierende Material relativ zur Erde bewegt. Tatsächlich belegt die breite Linienform die galaktische Rotation der Milchstraße. Weiterhin konnte mit neuen, hochpräzisen Beobachtungsdaten des ESA-Teleskops Integral aus dem Linienfluss, zunächst auf die Gesamtmasse des Aluminiums und schließlich auf die Rate der Supernovae (Typen Ib, Ic, II) in unserer Heimatgalaxie geschlossen werden: die Rate liegt bei 1.9 ± 1.1 pro Jahrhundert

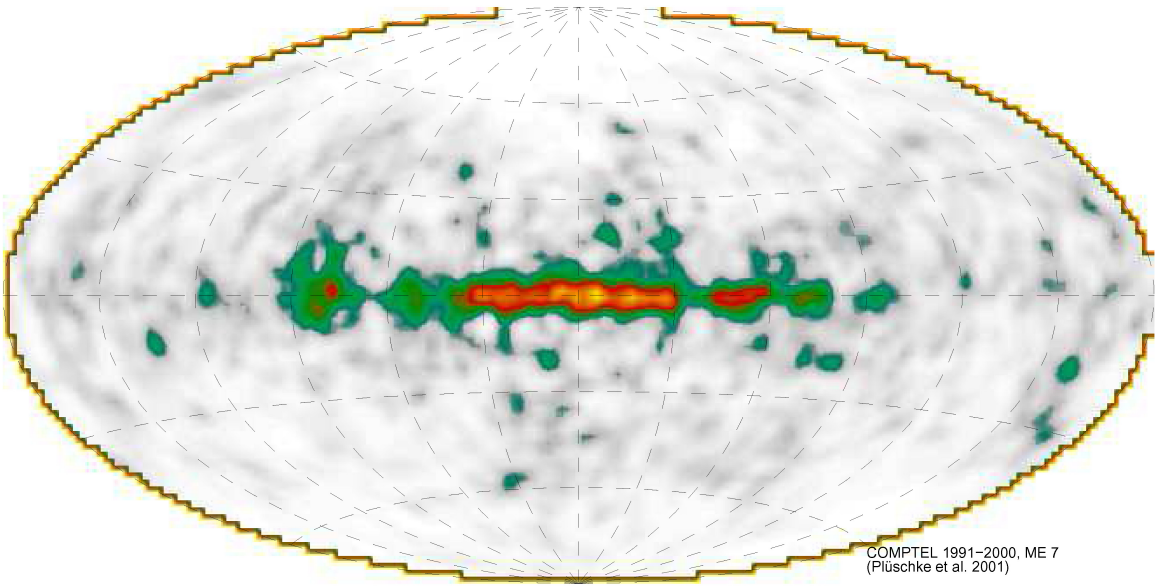

Abbildung 14.10: Panorama der Milchstraße, beobachtet mit COMPTEL (Gammastrahlung).

(*Diehl et al.*, Nature 2006). Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit anderen Methoden.

14.19.9 Weitere Literatur

- Web-Artikel: Das größte Schwarze Loch der Milchstraße
- ROSAT am MPE
- *R. Diehl* (MPE): Al-26 Radioaktivität in unserer Galaxis

14.20 Minkowski-Metrik

Die Minkowski-Metrik beschreibt den **flachen Raum**, also eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit *ohne Krümmungen*, d. h. in Abwesenheit von Massen oder Energien. In Berechnungen wird diese Metrik auch benutzt, wenn lokale Krümmungen vernachlässigbar sind, weil die Energien betrachteter Testteilchen (Photonen etc.) sehr klein sind.

14.20.1 Metrik der SRT

Die Minkowski-Metrik ist die Metrik oder Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Sie wurde nach dem Mathematiker *Hermann Minkowski* (1864 - 1909) benannt, der die elegante Formulierung der Zusammenfassung von Raum und Zeit 1908 begründet hat. Minkowski war der Mathematikprofessor von *Albert Einstein* und fand nach der Veröffentlichung der SRT (1905) die bündige Schreibweise in Vierervektoren und Matrizen.

14.20.2 einfache Eigenschaften

Die Metrik hat eine sehr einfache, mathematische Gestalt:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = diag(+,-,-,-).$$

Das ist der metrische Tensor der Minkowski-Metrik als 4 × 4-Matrix dargestellt. Wie man unmittelbar sieht, ist die Matrix **diagonal**. Auf der Hauptdiagonalen der Matrix stehen die Zahlen 1, -1, -1, -1; in der Relativitätstheorie hat man die Freiheit auch die Folge -1, 1, 1, 1 zu wählen. Die *Signatur*, also der Überschuss an positivem oder negativem Vorzeichen bei der Summenbildung der Diagonalelemente, ist entsprechend -2 oder +2. Im Unterschied zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) sind die Matrixkomponenten *konstant* und hängen nicht von den Raum- oder der Zeitkoordinate ab. Die Minkowski-Metrik ist eben im Unterschied zu den Raumzeiten der ART **flach** und überall in der Raumzeit gleich. Dass die Matrixkomponenten vom Betrag her 1 sind, liegt daran, weil relativistische Einheiten mit der Vereinfachung Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 1$ gewählt wurde (siehe auch geometrisierte Einheiten).

Damit ähnelt die Minkowski-Metrik zwar der **Euklidischen Metrik** - der Unterschied besteht nur in einem Vorzeichen, der jedoch gewichtig ist und die **Lichtkegelstruktur** von Raum und Zeit in der SRT prägt.

Die Minkowski-Metrik ist ein Zustand sehr hoher Symmetrie: sie besitzt zehn Killing-Vektoren.

14.21 Missing-Mass-Problem

Mit diesem Begriff benennen Astronomen die Problematik, dass der gesamte Materieinhalt des Universums zwar global mit Satelliten wie COBE oder WMAP aus der kosmischen Hintergrundstrahlung und alternativen Methoden bestimmt werden kann, aber sich die Materieformen der *direkten* Beobachtung entziehen. Dieser Eintrag wird zeigen, dass das Missing-Mass-Problem zwei Facetten (eine baryonische und eine nicht-baryonische) hat.

14.21.1 Der Normalfall: baryonische Materie

Baryonische Materie ist der physikalische Fachbegriff für die uns sehr vertraute Materieform, aus der wir selbst und unsere Umgebung bestehen. So zählen die Nukleonen (Protonen und Neutronen) und Quarks (deren Konstituenten) zu der baryonischen Materie. In diesem Sinne ist diese Materieform nicht exotisch. Das Sonnensystem, Sterne, interplanetares, interstellares und intergalaktisches Gas und Staub, extrasolare Planeten und auch Braune Zwerge bestehen aus baryonischer Materie. Auch die Massen aller Schwarzen Löcher im Universum werden der baryonischen Materie zugerechnet. Dieses ganze Material ist jedoch mit steigender Entfernung äußerst schwer detektierbar, weil es nicht oder kaum leuchtet. Diese Schwierigkeit ist verschärft, wenn das Material kalt ist und nur im Infraroten oder Radiobereich leuchtet. Dann kann es sich der Sicht der Astronomen leichter entziehen. Nur als heißes, baryonisches Gas ist es gut sichtbar, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden.

14.21.2 Kosmische Mengen baryonischer Materie

Nach aktueller Datenlage der experimentellen Kosmologie beträgt der Anteil baryonischer Materie **nur etwa 4%** an allen Energieformen im Kosmos! 96% sind demzufolge unbekannt und unverstanden! Doch selbst die 4% baryonische Materie sind mit astronomischen Einzelbeobachtungen nicht messbar (z. B. *Cen & Ostriker* 1999; *Fukugita et al.* 1998; *Tytler et al.* 1996). So befinden sich in Galaxienhaufen große Mengen heißen, intergalaktischen Gases. Es wurde durch die Wechselwirkung der Galaxien im Haufen auf einige Millionen Grad aufgeheizt. Der Antrieb für die Heizung ist letztendlich die Gravitation. Als Konsequenz strahlt dieses Gas **thermische Röntgenstrahlung** ab und ist leicht mit Röntgenteleskopen beobachtbar. Es zeigt sich dabei, dass sich das Gas in Filamenten und blattartigen Strukturen anordnet (z. B. *Zappacosta et al.* 2002). Der Vergleich des Anteils baryonischer Materie auf der Grundlage der kosmischen Hintergrundstrahlung mit demjenigen auf der Grundlage der Galaxienbeobachtungen zeigt, dass zu wenig baryonische Materie beobachtet wird! Diese Diskrepanz bezeichnet man als **baryonisches Missing-Mass-Problem**.

14.21.3 Wie steht's mit Neutrinos?

Neutrinos **haben eine Masse**, wie die Cerenkov-Detektoren von Super-Kamiokande (*Kamioka Neutrino Detection Experiment*) in Japan belegen. Sie werden in großer Zahl in Sternen wie der Sonne (*solare Neutrinos*) und in Supernovae erzeugt; aber sie wechselwirken kaum mit Materie: etwa **70 Milliarden der solaren Neutrinos** treffen pro Sekunde allein einen menschlichen Daumennagel - ohne eine Reaktion mit den Atomen einzugehen. Das macht den Charakter der schwachen Wechselwirkung aus und gestaltet die Detektion der Neutrinos so schwierig.

Der Knackpunkt ist, dass trotz dieser unglaublich großen Zahl Neutrinos sie aufgrund ihrer Leichtigkeit **nicht** entscheidend zur Gesamtmasse des Kosmos beitragen. Neutrinos werden zur so genannten heißen Dunklen Materie (engl. *hot dark matter*, HDM) gerechnet.

14.21.4 kosmologische Bedeutung baryonischer Materie

Die oben erwähnten 4% Anteil der normalen Materie legt nahe, dass Baryonen so gut wie irrevant für die Dynamik des Kosmos sind. Wo steckt der Rest der Energie? Die Problematik in dieser Frage könnte man als **nichtbaryonisches Missing-Mass-Problem** bezeichnen.

14.21.5 Dunkle Materie

Einen nicht geringen Anteil an den verbleibenden 96% hat die **Dunkle Materie** (engl. *dark matter*, **DM**). Sie macht etwa 22% von der Gesamtenergie aus. Die Forderung nach dieser Materieform wird nicht nur aufgrund kosmologischer Messungen laut, sondern beispielsweise auch auf der Basis von lokalen Messungen der Kinematik innerhalb von Galaxien - auch innerhalb der Milchstraße. Dunkle Materie macht sich hier gravitativ bemerkbar und hält die Galaxie zusammen, aber sie strahlt nicht und ist dunkel. Ihre Natur wird nach wie vor erforscht. Ohne Dunkle Materie könnte man die Beobachtungen nur mit alternativen Gravitationstheorien wie MOND erklären.

Im engeren Sinne bezeichnet Dunkle Materie nur die *nicht-baryonische Form*. Das könnten schwach wechselwirkende Teilchen wie die hypothetischen WIMPS (engl. Akronym für *Weakly Interacting Massive Particles*) sein.

Ebenso kommen supersymmetrische Teilchen in Betracht: Das Standardmodell der Elementarteilchen hat eine Erweiterung in der Supersymmetrie (SUSY) gefunden. Ob die Natur tatsächlich SUSY erfordert ist noch unklar. Diese Theorie fordert weitere, neue Teilchen, wie das Neutralino, das Photino, das Gluino, Squarks etc. Sollten diese Teilchen existieren und darüber hinaus eine nicht verschwindende Masse haben, so sind es Kandidaten für die Dunkle Materie. Ihre große Anzahl im Universum würde einen signifikanten Anteil der Gesamtmasse bilden, was den gemessenen Wert für Ω_{m} physikalisch in den aktuellen WMAP-Daten erklären könnte.

Als letzte exotische Alternative bleibt noch das Axion, das mit einer speziellen Symmetrie in der Quantenchromodynamik verknüpft ist.

14.21.6 Dunkle Energie

Die wichtigste, weil dominante Ingredienz für die Kosmologie, ist die **Dunkle Energie**. Sie hat einen Anteil von 74% an allen Energieformen, ist aber völlig unverstanden. Die beste physikalische Erklärung für die Dunkle Energie ist, dass das Vakuum selbst auf diese Weise kosmologisch in Erscheinung tritt. Die Physiker rechneten diesen Ansatz auf der Grundlage physikalischer Gesetze nach - und scheiterten! Mit den Gesetzen der Quantenfeldtheorie können sie Quantenvakuum und Dunkle Energie nicht vereinen. Damit gehört dieses Problem zu den größten Rätseln der modernen Physik!

Fakt ist, dass die Zustandsgleichung der Dunklen Energie einen *negativen* Druck aufweist (siehe auch w-Parameter). Ihre Wirkung ist daher **antigravitativ**. Die Dunkle Energie ist gerade der Motor für die Expansion des Universums. Die Ausdehnung wird nach aktuellen Messdaten ewig fortschreiten und sogar beschleunigt.

14.22 mittelschwere Schwarze Löcher

Die Schwarzen Löcher können anhand ihrer Masse klassifiziert werden. Als wohl etablierte Klassen gelten die stellaren Schwarze Löcher (ca. 3 bis 100 Sonnenmassen), die aus dem Gravitationskollaps massereicher Sterne hervorgehen und die supermassereichen Schwarzen Löcher (ca. 1 Mio. bis 10 Mrd. Sonnenmassen), die sich in den Zentren von Galaxien, insbesondere von Aktiven Galaktischen Kernen befinden. Die mittelschweren Schwarzen Löcher sind nun solche, die soviel Masse haben, dass sie zwischen die Massendomänen von stellaren und supermassereichen Schwarzen Löchern fallen, nämlich **100 bis 1 Mio. Sonnenmassen**. In den letzten Jahren haben astronomische Beobachtungen die Existenz dieser in der Fachsprache auch *intermediate-mass black holes* (IMBHs) genannten Löcher nahe gelegt. Dabei ist eine Häufung im Massenbereich zwischen 1000 und 10000 Sonnenmassen festzustellen. Gibt es wirklich mittelschwere Schwarze Löcher?

14.22.1 Refugien mittelschwerer Löcher

Die Systeme, in denen mittelschwere Schwarze Löcher enthalten sein sollen, sind junge Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien. Die Löcher verraten sich aus der Bewegung der Sterne im Haufen bzw. der Galaxie oder durch ultrahelle Röntgenquellen. Im Folgenden sollen diese Beobachtungen vorgestellt werden.

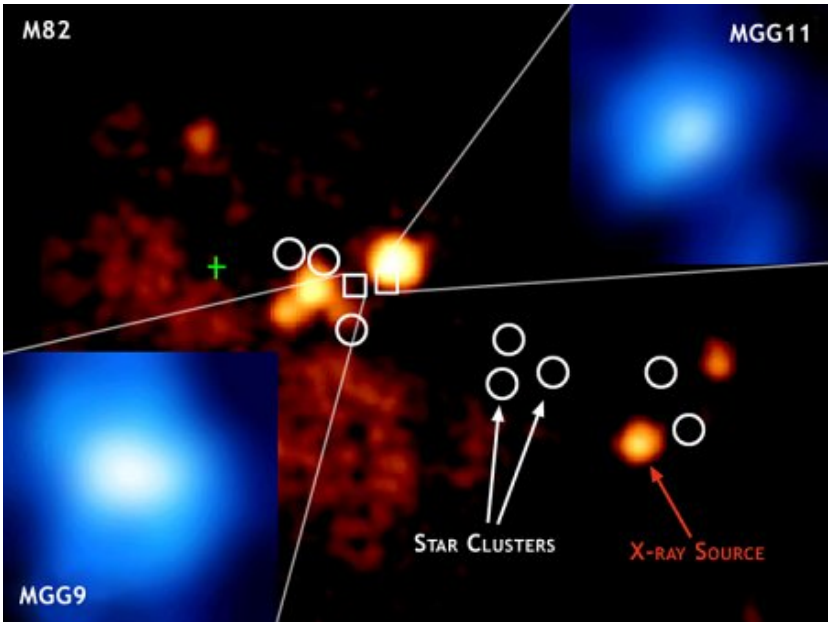

Abbildung 14.11: zwei Sternhaufen im Röntgen- und Infrarotlicht.

Junge Sternhaufen in M82

Der junge Sternhaufen MGG 11 ist etwa 200 pc vom Zentrum der Starburstgalaxie M82 entfernt. Dieser Haufen enthält eine helle Röntgenquelle. Die beste Erklärung dafür ist ein **Schwarzes Loch mit mindestens 350 Sonnenmassen** - ein IMBH. Simulationen mit dem japanischen Supercomputer GRAPE-6 konnten zeigen, dass dynamische Reibung im Sternhaufen (kein Kugelsternhaufen!) dazu führen kann, dass die Sterne (typischerweise Hauptreihensterne mit 30-50 Sonnenmassen) ins Haufenzentrum auf kreisförmigen Bahnen absinken und zusammenstoßen (*Zwart et al.* 2004). In der Astrophysik heißen solche Verschmelzungsprozesse *runaway mergers*. Dabei kann ein supermassereicher Superstern von 800 bis 3000 Sonnenmassen entstehen. Supersterne mit mehr als 260 Sonnenmassen explodieren ohne großen Massenverlust in Supernovae (*Heger et al.* 2003), so dass der Superstern in MGG 11 direkt zu einem IMBH kollabierte. Akkretierte diese mittelschwere Schwarze Loch nun Gas oder Sterne, so kann die ultrahelle Röntgenquelle zünden. Dieser so genannte **ULX** (engl. *ultraluminous X-ray source*) wurde tatsächlich bei MGG 11 mit Chandra beobachtet. ULXs haben ihrer Definition nach Röntgenleuchtkräfte zwischen 10^{39} und 10^{41} erg/s im Band zwischen 0.2 und 10 keV. Die Bezeichnung **M82 X-1** ('hellste Röntgenquelle in M82') ist somit plausibel.

Die Simulationen erklären auch, dass der Nachbarhaufen MGG 9 kein IMBH produzieren kann, weil er zu groß ist: Dadurch ist die Zeitskala für dynamische Reibung deutlich größer, so dass die massereichen Sterne in Supernovae explodieren, noch bevor sie das Zentrum erreichen. MGG 9 enthält daher kein IMBH und keine helle Röntgenquelle (*Zwart et al.* 2004).

Das Beobachtungsfoto 14.11 (Credit: CXC/NASA 2004) zeigt in orange die Zentralregion von M82 wie sie mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra beobachtet wurde (Credit: *Matsumoto et al.* 2001; Detektion des ULX in M82). Die Quadrate entsprechen den Positionen der beiden jungen, etwa 10 Millionen Jahre alten Sternhaufen MGG 9 und MGG

11, die in den Ecken vergrößert und in blau im Licht der Wärmestrahlung zu sehen sind (Credit: *McCrady et al.* 2003).

M82 X-1 zeigt außerdem Quasi-periodische Oszillationen und eine relativistisch verbreiterte Eisenlinie (*Strohmayer & Mushotzky* 2003). Der QPO weist darauf hin, dass M82 X-1 tatsächlich sehr kompakt sein muss: aus der gemessenen QPO-Frequenz folgt eine Ausdehnung von **höchstens vier Sonnenradien!** Nimmt man an, dass die höchste QPO-Frequenz mit einer Keplerbahn auf dem marginal stabilen Orbit um ein Schwarzschild-Loch assoziiert sei, folgt die **Lochmasse zu höchstens 18700 Sonnenmassen**. Die Diskrepanz zur oben angegebenen kleineren Lochmasse verwundert - und in der Tat werden QPOs in diesem Fall nicht als zuverlässige Massenindikatoren angesehen.

IMBH in Kugelsternhaufen

Michele Trenti hat die Dynamik von Kugelsternhaufen und die Signaturen von IMBHs darin untersucht (Arbeiten von 2006). Er vermutet, dass ähnliche Sternzusammenstöße wie in den jungen Sternhaufen auch in alten Sternhaufen wie den Kugelsternhaufen geschehen. Dabei arbeiten zwei Prozesse gegeneinander: Das Haufenzentrum heizt sich durch die Sternzusammenstöße auf; durch die Expansion des Haufens gibt es eine Dissipation dieser Wärme, d. h. eine Abkühlung. Ob sich nun im Haufen ein IMBH bildet, hängt davon ab, welcher der beiden Prozesse dominiert.

Trenti konnte zeigen, dass das Verhältnis zweier charakteristischer Haufenradien, dem Kernradius r_c über dem Halbmassenradius r_h, sich nach einiger Zeit immer bei etwa 0.3 einstellt, falls im Haufen ein IMBH existiert. Das geschieht mehr oder weniger unabhängig vom Dichteprofil der Sterne im Haufen. Numerische Untersuchungen auf der Basis von N-Körper-Simulationen zeigen, dass das Radienverhältnis ohne IMBH deutlich abweichende Werte annimmt: $r_\mathrm{c}/r_\mathrm{h} \sim 0.02$, falls der Haufen aus Einzelsternen besteht oder $r_\mathrm{c}/r_\mathrm{h} \sim 0.05$, falls der Haufen aus Doppelsternen besteht. Deutlich größere, beobachtete Quotienten $r_\mathrm{c}/r_\mathrm{h} > 0.5$ könnten sogar auf ein **Binär-IMBH** hinweisen! Trenti kommt mithilfe des Radienkriteriums zu dem Schluss, dass mehr als die Hälfte der 57 Kugelsternhaufen im betrachteten Sample innerhalb der Milchstraße ein mittelschweres Loch enthalten sollten. Es ist nicht leicht, diese Zahl zu verallgemeinern, weil sicherlich Auswahleffekte involviert sind - stimmt diese Überlegung jedoch, so haben wir es mit einer nicht unbedingt erwarteten Zahl mittelschwerer Löcher allein in der Milchstraße zu tun.

Es gibt zwei Kugelsternhaufen, die als sehr gute Kandidaten für Wirte mittelschwerer Schwarzer Löcher gelten, nämlich M15 und G1. Unsicherheiten, die eine klare Aussage über ein IMBH beeinträchtigen, liegen einerseits in der präzisen Bestimmung der Sternkinematik im jeweiligen Haufen begründet; andererseits ist die Lokalisierung von Röntgenquellen schwierig.

M15 ist ein galaktischer Kugelsternhaufen, der im Sternbild *Pegasus* liegt. Er sitzt wie alle Kugelsternhaufen der Milchstraße im galaktischen Halo und ist von der Erde etwa 9.8 kpc entfernt. Aus den Sternbewegungen folgt hier kinematisch eine Lochmasse von etwa **3400 Sonnenmassen** innerhalb einer Zentralregion von nur 0.05 pc (*van den Bosch et al. 2005*).

Der andere Kugelsternhaufen G1 gehört hingegen nicht zur Milchstraße, sondern bewegt sich im Halo der Andromedagalaxie. Es verwundert daher nicht, dass G1 mit 720 kpc deutlich weiter weg ist - entsprechend schwieriger gestaltet sich die Auflösung des Haufens in Einzelsterne. Dieser Kugelsternhaufen ist mit 10 Mio. Sonnenmassen der massereichste Kugelsternhaufen überhaupt. Aus den Sternbewegungen um das Zentrum folgt hier sogar eine Lochmasse von etwa **18000 Sonnenmassen** (*Gebhardt et al.* 2005).

IMBH in Zwerggalaxien

Die Lochmassen, die man in Kugelsternhaufen vermutet, sind schon beeindruckend, wie das letzte Beispiel G1 zeigt. Diese Massen können durch die mittelschweren Massen in Zwerggalaxien übertrumpft werden.

Ein Beispiel ist die Seyfert-Zwerggalaxie NGC 4395 im Sternbild *Jagdhunde*. Die Entfernung beträgt 4.2 Mpc. Die Masse des zentralen mittelschweren Schwarzen Loches beträgt etwa 10000 bis 100000 Sonnenmassen (*Shih et al.*, 2003), maximal allerdings etwa 6.2 Mio. Sonnenmassen (*Filippenko & Ho*, 2003).

Die zweite elliptische, ebenfalls aktive Zwerggalaxie heißt POX 52 und ist etwa 93 Mpc entfernt. Die Sternbewegungen um den Galaxienkern deuten auf eine kompakte Zentralmasse von 160000 Sonnenmassen hin (*Barth et al.* 2003, 2004). Stimmt die Massenangabe tatsächlich, so würde POX 52 gerade an die Massengrenze reichen, die zu den supermassereichen Schwarzen Löchern führt.

Schließlich wurde vor kurzem ein weiterer IMBH-Kandidat in einer Zwerg-Seyfertgalaxie aus dem *Sloan Digital Sky Survey* gefunden. Die Zwerggalaxie hat den Katalognamen SDSS J160531.84+174826.1 und weist eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 0.032$ auf. Die Lochmasse wurde in diesem Fall aus der Doppler-Verbreiterung der Spektrallinie Hα kinematisch zu 70000 Sonnenmassen bestimmt (*Dong et al.* 2006).

14.22.2 weitere Typen Schwarzer Löcher

Physiker und Astronomen spekulieren über die Existenz Schwarzer Löcher am unteren Ende der Massenskala. Dafür haben sich die Namen **Mini-Löcher** (siehe dazu unter Schwarze Löcher) und **primordiale Schwarze Löcher** eingebürgert. Es bestehen allerdings derzeit noch berechtigte Zweifel an deren Existenz.

14.22.3 wissenschaftliche Publikationen & Quellen

- ◇ *Matsumoto et al.*: Discovery of a Luminous, Variable, Off-Center Source in the Nucleus of M82 with the Chandra High-Resolution Camera, ApJ **547**, L25, 2001
- ◇ *Zwart et al.*: Formation of massive black holes through runaway collisions in dense young star clusters, Nature **428**, 724, 2004
- ◇ *Strohmayer & Mushotzky*: Discovery of X-ray quasi-periodic Oscillations from an Ultraluminous X-ray source in M82: Evidence against Beaming, ApJ **586**, L61, 2003
- ◇ *Trenti, M.*: Dynamical evidence for intermediate mass black holes in old globular clusters, Preprint unter astro-ph/0612040
- ◇ *Trenti et al.*: Star Clusters with Primordial Binaries: III. Dynamical Interaction between Binaries and an Intermediate Mass Black Hole, Preprint unter astro-ph/0610342
- ◇ *Dong et al.*: SDSS J160531.84+174826.1: A Dwarf Disk Galaxy With An Intermediate-Mass Black Hole, Preprint unter astro-ph/0610145
- ◇ Web-Artikel: Kompakte Objekte des Himmels mit mehr Einzelheiten zu diesen und weiteren Himmelsobjekten

14.23 MOND

MOND steht für ***MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics*, und es handelt sich dabei um eine alternative Gravitationstheorie. Diese Theorie wurde 1983 von dem israelischen Physiker *Mordehai Milgrom* publiziert und wird seither von ihm und anderen Wissenschaftlern weiterentwickelt.

14.23.1 Motivation für MOND

Die Newtonsche Gravitation sollte Bewegungen innerhalb von Galaxien gut beschreiben können, weil Gravitationsfelder schwach und Geschwindigkeiten klein sind. Tatsächlich jedoch wurden Abweichungen gefunden, z. B. in der Bewegung von Gaswolken in den rotierenden Scheiben von Spiralgalaxien. Die gemessene Rotation und Zufallsbewegungen sind größer als erwartet. Anders gesagt, es treten *Beschleunigungsvariationen* auf, die Newtonsch nicht erklärbar sind. Auch die Pioneer-Anomalie besteht in einer rätselhaften Beschleunigung der Sonden Pioneer 10 und 11.

In der konventionellen Astrophysik wird diese Diskrepanz durch die Existenz einer unsichtbaren Materieform, **Dunkle Materie** (DM), gelöst (Das funktioniert leider nicht beim Pioneer-Problem). Die Dunkle Materie erzeugt dabei eine *zusätzliche* Gravitationskraft zur sichtbaren, baryonischen Materie und schon sind die rätselhaften Beschleunigungen erklärbar. Im Falle der Galaxien erklärt eine kugelige Verteilung Dunkler Materie um die galaktische Scheibe, das so genannte **DM Halo**, die gemessenen Rotationskurven recht gut.

MOND stellt nun eine alternative Erklärung für die Beschleunigungen *ohne* DM bereit. Generell sind Alternativen ohne DM dadurch motiviert, dass bis heute keiner der nicht-baryonischen DM-Kandidaten (z. B. ein exotisches Teilchen) experimentell aufgefunden wurde.

14.23.2 Wie funktioniert MOND?

Milgroms Ansatz besteht nun in einem modifizierten Newtonschen Gravitationsgesetz in dieser Form

$$\mu(|\mathbf{a}|/a_0)\,\mathbf{a} = -\nabla\Phi_N$$

Die rechte Seite ist gerade der negative Gradient des Gravitationspotentials - genau wie in der Newtonschen Gravitation. Auf der linken Seite steht eine Beschleunigung $\mathbf{a}$, was auch in Übereinstimmung zu Newton ist. Die Modifikation besteht in der neuen Funktion μ, die auf der linken Seite die Newtonsche Beschleunigung modifiziert: Im Fall der Newtonschen Gravitation gilt immer $\mu = 1$ (oder äquivalent a_0 geht gegen 0). Milgrom hat hingegen nun eine **glatte, beschleunigungsabhängige Funktion** μ angesetzt, die nur bei Beschleunigungen $|\mathbf{a}| \gg a_0$ nahe bei 1 liegt. Dabei ist a_0 eine Konstante, die etwa 1.2×10^{-10} m/s^2 beträgt. Dieser Zahlenwert resultiert aus MOND-Studien an vielen Galaxien (*Begeman et al.* 1991). Zwei Vorschläge für den Verlauf von μ zeigt Diagramm 14.12.

14.23.3 Leistungen von MOND

Dieser Ansatz würde die beobachtete Abflachung der Rotationskurven in Spiralgalaxien erklären, weil bei genügend großem Abstand das neue Milgrom-Gravitationspotential

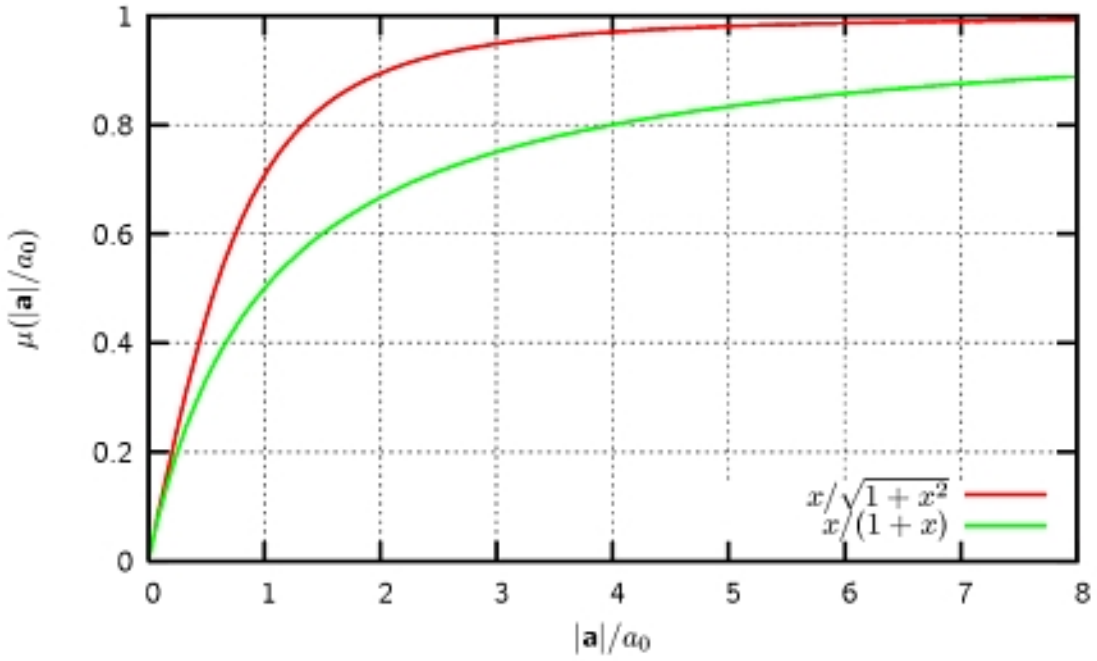

Abbildung 14.12: Verlauf der Milgrom-Funktionen in MOND.

unabhängig vom Radius wird. Ebenso ist MOND konsistent mit der *Tully-Fisher-Relation*, einer Korrelation zwischen Rotationsgeschwindigkeit und Blauhelligkeit, und den Beobachtungsdaten vieler weiterer Galaxien (Einzelheiten in *Bekenstein* 2007 und Referenzen darin).

1984 ist es Milgrom und seinem Kollegen *Jacob D. Bekenstein* (siehe auch Bekenstein-Hawking-Entropie) gelungen, das richtige Lagrange-Funktional (*Lagrangian*) zu finden, um das angesetzte Kraftgesetz ableiten zu können. Die entsprechend erweiterte Theorie nannten die beiden Autoren **AQUAL**, ein Akronym, das *Aquadratic Lagrangian Theory* bedeutet. Aus AQUAL folgt der Ansatz mit der μ-Funktion oben tatsächlich mathematisch. Der AQUAL-Lagrangian gewährleistet auch die Erhaltungssätze für Energie, Impuls und Drehimpuls, die von fundamentaler Bedeutung in der Physik sind. Außerdem ist AQUAL konsistent mit dem **schwachen Äquivalenzprinzip**.

14.23.4 relativistische Version von MOND

MOND ist eine veränderte Newtonsche Gravitation, aber im Kern ist sie ein Newtonsches Konzept. In der modernen Astrophysik sind jedoch viele Beobachtungen nur mit **relativistischen Modellen** zu verstehen - der Gravitationskollaps auf ein kompaktes Objekt, die Annäherung von Neutronensternen in einem Doppelsternsystem aufgrund der Emission von Gravitationswellen oder die Expansion des Universums im Rahmen der Kosmologie beispielsweise. Vermag die Milgrom-Theorie auch solche 'Extremfälle der Gravitation' zu beschreiben?

Die ersten Versuche einer relativistischen Verallgemeinerung von MOND mündeten in

RAQUAL (relativistische AQUAL) und einer Feldtheorie mit zwei Skalarfeldern namens **Phasengekoppelte Gravitation** (engl. *phase-coupled gravity*, PCG). Beide Theorien wurden jedoch aufgegeben: In RAQUAL traten akausale Überlichtgeschwindigkeitseffekte auf. Es wurde versucht, dies in PCG zu beheben, doch diese Feldtheorie entpuppte sich als nicht verträglich mit Beobachtungen im Sonnensystem (Drift der Kepler-Konstante a^3/P^2 aus dem dritten Kepler-Gesetz).

Auch die Implementation eines **neuen Vektorfelds** in AQUAL durch *R.H. Sanders* 1997 brachte neue Einsichten, doch alte Probleme: Zwar war diese relativistische Variante von MOND nun mit beobachteten, kosmologischen Gravitationslinsen verträglich, aber man handelte sich mit dem Vektorfeld eine ausgezeichnetes Bezugssystem im Kosmos ein - das ist nicht vereinbar mit dem kosmologischen Prinzip und sollte eine neue Form von '*Äther*' bedingen, den die Physiker doch erfolgreich mit der Relativitätstheorie los geworden sind. Sanders relativistische MOND-Version war außerdem nicht kovariant.

Erst wenn das neue **Vektorfeld dynamisch** wird, können diese Probleme beseitigt werden. Das Resultat wird **TeVeS** genannt. Dieses Akronym steht für ***Te**nsor-**Ve**ctor-**S**calar theory of gravity*, also Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie. TeVeS wurde 2004 erstmals von Bekenstein formuliert und wird seither weiterentwickelt. Die Bezeichnung ist plausibel, weil diese Gravitationstheorie durch einen Tensor, einen zeitartiger Vektor und einen Skalar konstruiert wird. Das ist ein klarer Unterschied zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART), eine Gravitation, die nur durch einen Tensor, den metrischen Tensor, vermittelt wird. Die Unterschiede treten auf dem feldtheoretischen Niveau zutage, wenn man die Lagrangians der beiden Theorien vergleicht: Die ART basiert auf der Einstein-Hilbert-Wirkung, die nur von der Determinante des metrischen Tensors abhängt; TeVeS involviert dagegen weitere Terme im Lagrangian, die von dem neuen Vektor und dem neuen Skalar abhängen. Dennoch verhält sich die Kosmologie mit TeVeS in vielerlei Hinsicht so wie die Einsteinsche Kosmologie.

14.23.5 GR mit DM vs. TeVeS ohne DM

Kosmologische Gravitationslinsen sind im konventionellen Bild hohe und dichte Ansammlungen von normaler und Dunkler Materie. Die Standard-Gravitationsphysik besagt, dass sowohl normale Materie, als auch Dunkle Materie jeweils für sich genommen ein Gravitationspotential erzeugen, die beide an dem Licht 'ziehen'. In TeVeS gibt es keine Dunkle Materie. Daher bleibt nur das Gravitationspotential der normalen Materie bestehen, und den Part der Dunklen Materie übernimmt in TeVeS eine nicht-lineare Gleichung der AQUAL-Theorie.

14.23.6 aktueller Stand und kritische Einschätzung

MOND und dessen relativistische Erweiterung TeVeS sind Theorien in der Gravitationsforschung, die sich deutlich vom Mainstream absetzen. Ganz objektiv betrachtet gibt es unter Gravitationsforschern und Physikern zurzeit deutlich mehr Anhänger am Standardmodell mit Dunkler Materie, als an MOND/TeVeS. Diese Beobachtung bedeutet jedoch gar nichts, weil in den Naturwissenschaften die bewährten Theorien gewinnen. Es wird sich also in einem langwierigen Prozess erweisen, welche Theorie die Natur am besten beschreibt.

Mit Blick auf die Struktur von TeVeS könnte man kritisch das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung anführen, das im Kern ein Plädoyer für eine genügend einfache Theorie

ist. Ist nun eine Gravitationstheorie einfach, die Tensor, Vektor und Skalar erfordert? Oder ist eine Theorie einfach, die nur tensoriell ist, aber eine zusätzliche Materieform postuliert, die nie direkt beobachtet wurde? Darüber kann man sicher streiten.

Der moderne, orthodoxe Kosmologe mag MOND/TeVeS-Theorien mit dem Einwand abschmettern wollen, dass das ΛCDM-Konsensmodell bestens mit den Beobachtungen an der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) und Supernovae Ia vereinbar sei. Doch kürzlich ist es gelungen, dass das CMB-Spektrum mit einer TeVeS-Kosmologie **ohne** Dunkle Materie erklärt werden könne (*Skordis et al.* 2006): Die kosmologische Konstante bliebe dann erhalten, und eine massereiche Form von Neutrinos (mit einer Masse noch innerhalb tolerabler Grenzen des Standardmodells) wäre vonnöten. Aktuell deutet sich in einigen TeVeS-Modellen sogar an, dass auch auf die rätselhafte Dunkle Energie verzichtet werden könne, falls eine TeVeS-Gravitation bemüht werde. Diese Entwicklungen sind sicherlich äußerst interessant - aber erst viele überstandene Hypothesentests von MOND/TeVeS werden das Gros der Wissenschaftler überzeugen, die fest an die Existenz von Dunkler Materie und Dunkler Energie glauben.

14.23.7 Originalveröffentlichungen & Quellen

- ◇ *Milgrom, M.*: A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis, ApJ **270**, 365, 1983
- ◇ *Bekenstein, J. D.*: The modified Newtonian dynamics - MOND - and its implications for new physics, Preprint unter astro-ph/0701848, 2007

14.24 Monopolproblem

Ein Problem in der Kosmologie, das durch die **Inflation** gelöst wird. Unter dem Eintrag Inflation werden Problem und Auflösung erläutert.

14.25 Morphismus

Morphismen sind Abbildungsvorschriften (engl. *map*), manchmal auch 'Pfeile' genannt, wie sie in einem Teilgebiet der Mathematik, der **Kategorietheorie**, behandelt werden.

14.25.1 Denken in anderen Kategorien

Eine Kategorie besteht aus Objekten und Morphismen, die die Objekte aufeinander abbilden können. Als Objekte kommen (mathematische) Gruppen, Vektorräume, (differenzierbare) Mannigfaltigkeiten wie eine Riemannsche Metrik (z. B. die Raumzeit der ART) etc. in Betracht. Generell nennt man Morphismen auch *Homomorphismen*. Findet beispielsweise die Abbildung von einer Gruppe in die andere statt, so nennt man den Morphismus einen *Gruppenhomomorphismus*.

14.25.2 -ismen

Je nach Eigenschaften unterscheidet man einen Homomorphismus in Automorphismus, Endomorphismus, Epimorphismus, Homöomorphismus, Isomorphismus oder Monomorphismus.

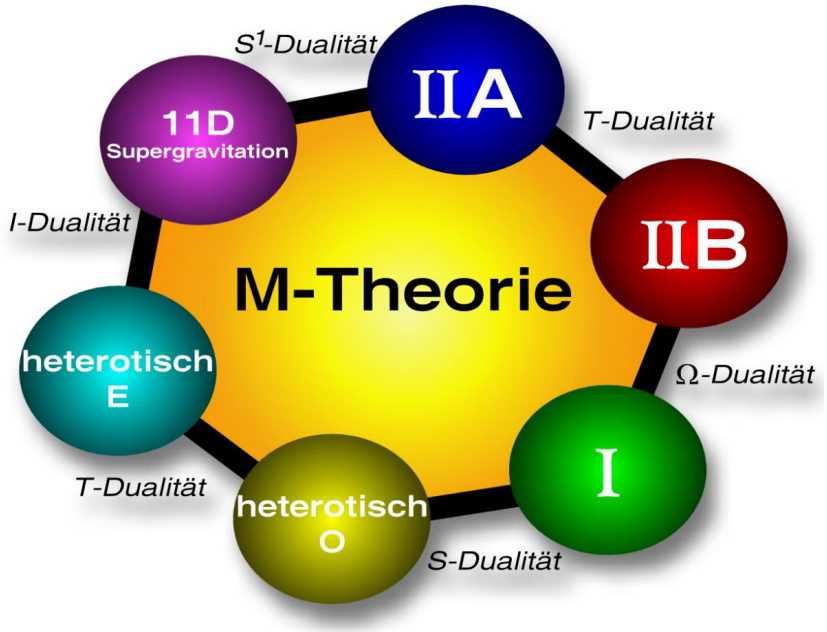

Abbildung 14.13: duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.

14.25.3 ART braucht den Diffeomorphismus

Von besonderer Wichtigkeit in der theoretischen Physik ist der Diffeomorphismus. Denn die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) mit ihren umwälzenden Vorstellungen von Raum und Zeit diktiert **Diffeomorphismusinvarianz** (engl. *diff-invariance*). Diese **Hintergrundunabhängigkeit** ist eine der wesentlichen Zutaten der Loop-Quantengravitation.

14.26 M-Theorie

Die M-Theorie bezeichnet die **M**utter (engl. mother; alternativ: membrane, mystery, magic) aller Theorien und die elfdimensionale, vereinigte Theorie der fünf Stringtheorien und der Supergravitation. Der Physiker *Edward Witten* hat diesen Begriff geprägt und konnte zeigen, dass alle bis dato existenten, als verschiedenen angesehenen Stringtheorien Ausfluss ein und derselben, übergeordneten Theorie sind: der M-Theorie.

14.26.1 Dualitäten

Die Verbindung zwischen den sechs einzelnen Theorien bilden mathematische Relationen, die so genannten *Dualitäten*, was schematisch Grafik 14.13 zeigt.

14.26.2 M-Branen

Die mathematischen Objekte der M-Theorie sind die **M-Branen**, Strings und p-Branen (mit Dimension p). Gegenstand der M-Theorie bzw. Stringtheorien ist die Definition,

Quantisierung und Wechselwirkung solcher Objekte. Dabei wird die Fragestellung verfolgt, wie sie zu interpretieren sind, beispielsweise mit welchen Teilchen oder physikalischen Objekten (z. B. auch Schwarzen Löchern) sie assoziiert sind.

14.26.3 Zutat: nicht Uschi, sondern Susy

Es stellte sich heraus, dass die M-Theorie zur Vermeidung von akausalen Tachyonen (mit imaginärer Masse) notwendigerweise supersymmetrisch sein muss. Diese Eigenschaft erhöht die Anzahl möglicher bosonischer und fermionischer Teilchenkandidaten enorm! Supersymmetrie resultiert in einem riesigen Teilchenzoo.

14.26.4 Durchbruch oder Holzweg?

Die M-Theorie ist noch weit von einer konsistenten Theorie und vollständigen, mathematischen Beschreibung entfernt, die darüber hinaus praktikabel und verständlich ist. Anschaulich gesprochen, sind die Stringtheorien nur wenige Fragmente eines großen Puzzles, das in seiner Gesamtheit die mutmaßliche M-Theorie darstellt. Sowohl Stringtheorien und M-Theorie sind Gegenstand der aktuellen Forschung. Inwieweit diese Theorien tatsächlich die Natur adäquat beschreiben, muss noch gezeigt werden. Eine Hoffnung verbinden die Stringtheoretiker mit der M-Theorie: Ähnlich wie Relativitätstheorie und Quantentheorie die **Physikalischen Revolutionen des 20. Jahrhunderts** waren, so sollte die M-Theorie diejenige des 21. Jahrhunderts werden.

14.26.5 andere Konzepte

Neben diesem Kandidaten einer übergeordneten Theorie ist die Loop-Quantengravitation (LQG) getreten. Sie versucht mit den Prinzipien und Methoden der Allgemeinen Relativitätstheorie und Quantenmechanik die Konzepte einer robusten Quantengravitation zu definieren. Nimmt man das Unifikationsbestreben von Theorien als Kriterium, so will die LQG weniger (eine 'quantisierte Gravitation'), während die Stringtheorien bzw. die M-Theorie **alle** fundamentalen Wechselwirkungen in der Natur zu vereinigen sucht.

14.26.6 WANTED: experimenteller Input

Wesentliche Impulse von experimenteller Seite erhoffen sich die Physiker von modernen Teilchenbeschleunigern der nächsten Generation (2008: LHC am CERN) sowie kosmologischen Beobachtungsdaten. Diese Daten legen generell den Theorien Beschränkungen auf, die in eine Bewährung, Modifikation oder Falsifikation einer Theorie münden können.

14.27 Myonen

Myonen gehören zur großen Teilchengruppe der Leptonen und sind schwerer als ihre 'nächsten Verwandten': die Elektronen. Die Ruhemasse von Myonen (negative Ladung) und Antimyon (positive Ladung) beträgt jeweils 105.658357 MeV (Quelle: *Particle Physics Booklet*, Juli 2002).

14.27.1 Myonen fallen vom Himmel

Myonen (eingedeutscht auch als *Müonen* zu lesen) können in der **Höhenstrahlung** (siehe kosmische Strahlung) entstehen. Der Prozess läuft so ab, dass hochenergetische Gammastrahlung Elektron-Positron-Paare erzeugt. Die beiden Zerfallsteilchen fliegen diametral (Impulserhaltung) auseinander und können direkt nach der Entstehung auch wieder annihilieren (siehe auch Antimaterie). Auf diese Weise entstehen **Kaskaden von Teilchenschauern** in der Hochatmosphäre. Es ist aber auch möglich, dass sich über einen schwachen Prozess (siehe schwache Wechselwirkung) das entstandene Elektron-Positron-Paar in ein **Myon-Antimyon-Paar** umwandelt. Diese Teilchen zerfallen dann üblicherweise auch wieder in verschiedenen Zerfallskanälen.

14.27.2 Bedeutung für Neutrinoastronomie

Myonen haben eine hohe Relevanz in der Neutrinoastronomie, weil sie durch kosmische Neutrinos in Cerenkov-Detektoren gebildet werden. Das Detektionsprinzip der Neutrinodetektoren der neusten Generation, wie AMANDA und bald ICECUBE am Südpol, basiert gerade darauf, dass paradoxerweise *durch* die Erde beobachtet wird. Dies liegt daran, weil hochenergetische Neutrinos kosmischer Quellen Myonen in der Erdmaterie erzeugen können. Schaffen diese Myonen es, in das Detektorvolumen zu gelangen, erzeugen sie dort einen Cerenkov-Lichtkegel und können eindeutig einer extraterrestrischen Quelle zugeordnet werden. Der Richtungsversatz zwischen Neutrino und daraus gebildetem Myon ist minimal und beträgt maximal ein Grad. Die Myonen der Höhenstrahlung hingegen - die tatsächlich 'von oben' kommen - sind in der Neutrinoastronomie nur ein Störeffekt (*Untergrundrauschen*).

14.27.3 Wie kommt ihr eigentlich hierher?

Die **atmosphärischen Myonen** sollten aufgrund ihrer kurzen, mittleren Lebensdauer von 2.197 Mikrosekunden am Erdboden gar nicht nachweisbar sein. Dies ist trotzdem gelungen! Man erklärt dies mit der Speziellen Relativitätstheorie: da sich die Myonen mit Geschwindigkeiten bewegen, die vergleichbar sind mit der Lichtgeschwindigkeit, werden **relativistische Effekte** wirksam. Die Zeitdilatation dehnt die Zerfallszeit im Ruhesystem gegenüber der Zeitspanne im Beobachtersystem aus. Dadurch können die Myonen einen längeren Weg durch die Atmosphäre zurücklegen als klassisch abgeleitet: sie schaffen es bis auf den Erdboden!

14.27.4 Das Myon-Atom

Mit Myonen kann man eine exotische Form von Materie kreieren: **Myon-Atome**, in denen schwere Myonen anstatt Elektronen den Kern 'umkreisen'. Die Myon-Chemie wäre allerdings ein recht teueres Unternehmen.

15 Lexikon N

15.1 Neutrino

Neutrinos sind extrem leichte, elektrisch neutrale, schwach wechselwirkende Elementarteilchen.

15.1.1 Das rempelfreie Leben der Neutrinos

Die schwache Wechselwirkung manifestiert sich darin, dass die mittlere freie Weglänge eines Neutrinos bei etwa 1000 Lichtjahren liegt! Jede Sekunde durchströmen 70 Milliarden Neutrinos allein den menschlichen Daumennagel - ohne dass es irgendwelche Auswirkungen gäbe! Weil der Wirkungsquerschnitt sehr gering ist, werden die Neutrinos kaum von Atomkernen eingefangen. Und selbst wenn es bei einem Nukleon im Atomkern geschehen sollte, so wandelt sich nur das Proton in ein Neutron um, und es entsteht ein Positron oder Elektron, wie die Zerfallsgleichungen des β-Zerfalls zeigen. Die Folgen sind nicht gravierend. Bei den 70 Milliarden Neutrinos pro Sekunde und pro Quadratzentimeter sind sogar nur die Neutrinos berücksichtigt, die von der Sonne kommen - aus den Tiefen des Alls erreichen und noch viel mehr!

15.1.2 Leicht, aber oho!

So unscheinbar diese Teilchen auch sein mögen, sie haben eine ungeheure Relevanz für die Astrophysik! So tangieren sie Kosmologie (Missing-Mass-Problem), die Entwicklung der Sterne (Supernova-Kollaps), die Physik der Sonne (*solares Neutrinoproblem*) und die Hochenergiephysik (kosmische Strahlung).

15.1.3 Einordnung ins Standardmodell

Die Neutrinos gehören nach dem **Standardmodell der Elementarteilchen** zur Teilchengruppe der Leptonen. Das heißt auch, dass sie punktförmig sind. Mithilfe des **schwachen Isospins** gelingt eine Klassifikation in eine *Trichotomie* (Dreiheit) dieser Familie: Genauso wie es Elektron, Myon und Tauon gibt, gibt es das Elektron-Neutrino ν_e, Myon-Neutrino ν_μ und Tau-Neutrino ν_τ.

15.1.4 Paulis Erfindung

Erstmals prognostiziert wurde das Neutrino als leichtes und neutrales Teilchen 1930 durch den österreichischen Quantenphysiker *Wolfgang Pauli* (1900 - 1958). Er war so kühn dieses Teilchen zu 'erfinden', um die fundamentalen Sätze von Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung aufrechterhalten zu können. Dieser Schritt war deshalb sehr kühn, weil zu dieser Zeit nur Proton und Elektron bekannt waren! Das Spektrum der entstehenden Teilchen (Elektron und Proton im β^--Zerfall bzw. Positron und Neutron im β^+-Zerfall)

sind *kontinuierlich*. Aus diesem Grund muss es sich um einen Drei-Körper- oder **Dalitz-Zerfall** handeln; ein drittes Teilchen muss existieren, das kinetische Energie aufnehmen kann: **das Neutrino**. Den Namen bekam das neue Teilchen 1933 von dem italienischen Quantenphysiker *Enrico Fermi* (1901 - 1954) verliehen. Übersetzt aus dem Italienischen heißt Neutrino so viel wie 'das kleine Neutrale'. Im Jahre 1949 konnte das Neutrino durch *Chalmers Sherwin* in simultanen Impulsmessungen von β-Teilchen und emittierenden Kern experimentell nachgewiesen werden. Das bestätigte Paulis Hypothese bravourös.

15.1.5 Neutrinos aus der Sonne

Lange Zeit hat es den Physikern Kopfzerbrechen bereitet, doch nun ist es gelöst: das so genannte *solare Neutrino-Problem*. Durch die Kenntnis der thermonuklearen Prozesse im Sonneninnern und möglicher Sekundärreaktionen, kennen die Sonnenphysiker ziemlich genau die **Bildungsrate von Neutrinos**. Sie erwarten aufgrund der Reaktionsgleichungen die bevorzugte Produktion von nur einem Neutrinotyp aus der Familie, nämlich **Elektron-Neutrinos** ν_e. Der **solare Neutrinofluss** beträgt auf der Erde etwa 70 Milliarden Neutrinos pro Quadratzentimeter und Sekunde.

In zahlreichen Experimenten (Gallex, Chlor-Sonnenneutrino-Experiment, Kamiokande und Superkamiokande) haben die Neutrinojäger versucht die Rate der solaren Neutrinos zu messen. Beim Experiment *Gallex* verwendete man das Element Gallium (Ga), das sich bei sehr seltenen (wegen schwacher Wechselwirkung) Einfängen von Neutrinos in das andere chemische Element Germanium (Ge) umwandelt. Das liegt daran, weil ein Neutron im Atomkern von Gallium sich nach dem Einfang eines Anti-Elektronneutrinos in ein Proton und ein Elektron umwandelt. Die Ordnungszahl erhöht sich dabei um eins, so dass Germanium entsteht. Die Experimentatoren umspülten die Anordnung mit Chlor, so dass sich bei einem Ereignis das leicht flüchtige (und damit gut detektierbare) Germaniumchlorid bildete. Für eine signifikante Ereignisrate (ein bis drei Ereignisse pro Monat) benötigten die Forscher fast die Weltjahresproduktion von Gallium, etwa 30 Tonnen! Trotzdem erbrachte die Messung **immer weniger Sonnen-Neutrinos als erwartet**. Nun waren sich die Experimentatoren jedoch ganz sicher, dass sie alle Elektronneutrinos detektieren könnten. Also wo zum Kuckuck war der fehlende Rest?

15.1.6 Des Rätsels Lösung: Neutrino-Oszillationen

Er hat sich umgezogen, würde man in der Modebranche sagen. Die Teilchenphysiker sagen: klarer Fall von **Neutrino-Oszillation**. Die Elektronneutrinos hat es demnach in eine andere Leptonenfamilie gezogen: auf dem Weg vom Sonneninnern zum irdischen Detektor wurden aus Elektronneutrinos Myonneutrinos und Tauneutrinos (oder entsprechende Antineutrinos). Weil diese Möglichkeit des Typenwechsels nicht in Betracht gezogen wurde und weil nur wenige Experimente für alle drei Neutrinotypen ν_e, ν_μ und ν_τ empfindlich waren, war das diese Umwandlung lange Zeit nicht aufgefallen. Die Super-Kamiokande-Messungen in der Kamioka-Mine in Japan bewiesen, dass dieser Prozess geschieht.

15.1.7 Durchbruch mit Super-Kamiokande

Das Experiment begann im April 1996 und machte die spektakuläre Entdeckung im Juni 1998: Die Neutrinos verändern ihren Typus, wenn sie sich durch Materie oder Vakuum bewegen. Die Forschungsanlage **Super-Kamiokande** (***Kamioka Neutrino Detection Experiment***)

befindet sich 1000 m im Untergrund, in der Kamioka-Mine in Japan. In der Tiefe der Mine, unter Tonnen von Gestein, werden störende Strahlung und andere Elementarteilchen effektiv abgeschirmt. Das Messprinzip beruht darauf, dass durch elastische Elektronen-Neutrino-Streuung Cerenkov-Strahlung vom zurückgestoßenen Elektron emittiert wird, die durch Photomultiplier (*photo multiplier tubes*, PMTs) detektiert werden kann. PMTs sind extrem, lichtempfindliche Detektoren. Um eine signifikant hohe Anzahl von Messereignissen zu erhalten, verwenden die Physiker 50 000 Tonnen Wasser und 13000 PMTs! Die Anordnung ist für zwei Typen von Neutrinos, nämlich Elektron- und Myon-Neutrinos, empfindlich. Die schwersten Neutrinos, die Tau-Neutrinos, können nicht detektiert werden.

Wesentliches Resultat der Messungen war, dass Neutrinos eine **Ruhemasse** haben (*Y. Fukuda and the Super-Kamiokande collaboration*, hep-ex/9807003 bzw. Phys. Rev. Lett. 81, 1562-1567, 1998). Damit gehören Neutrinos zu den Tardyonen, und es muss sie als **links- und rechtshändige Neutrinos** geben (siehe Helizität). Neuere Messungen besagen, dass das Quadrat der Differenzmasse von Elektron- und Myon-Neutrino zwischen 1.6×10^{-3} eV^2 und 4.0×10^{-3} eV^2 liegt (*T. Toshito and the Super-Kamiokande collaboration*, hep-ex/0105023). Von großem Interesse sind die **absoluten Neutrinomassen**. Derzeit wird hier der **Massenbereich zwischen 0.05 und 3 eV** diskutiert. Genaue Erkenntnisse werden mit dem ***Ka**rlsruhe **Tri**tium **N**eutrino Experiment* (KATRIN) möglich werden, das voraussichtlich 2008 startet.

15.1.8 Feuern mit Neutrinostrahlen

2001 starteten japanische Physiker ein spektakuläres Experiment: Sie schossen einen im Kernreaktor KEK *künstlich* erzeugten Neutrinostrahl 250 Kilometer durch das japanische Festland, um ihn dort mit einem Detektor in der Kamioka-Mine zu registrieren! Das Experiment mit der Bezeichnung **K2K** für ***K**EK **to K**amioka-Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment* gelang: Myon-Neutrinos mit der Energie von etwa 100 GeV trafen tatsächlich bei der Mine nachweislich ein - jedoch fehlten ein paar der ursprünglich abgefeuerten Myon-Neutrinos, weil sie sich verwandelt hatten. Auch das Neutrinospektrum hatte sich beim Durchgang durch Materie verändert. Neutrino-Oszillation wurde so mit künstlich erzeugten Neutrinos bewiesen (*K2K collaboration, Ahn et al.*, hep-ex/0606032 bzw. Phys. Rev. D74, 072003, 2006).

15.1.9 Kosmisch gesehen doch unbedeutend

Anfangs wurde gemutmaßt, dass Neutrinos durch ihre Masse weitreichende, kosmologische Bedeutung haben könnten: Da sie im Universum sehr zahlreich sind, könnten sie damit zur Masse des Universums beitragen und entscheidend dessen Entwicklung beeinflussen. Die aktuellen Daten des Mikrowellensatelliten WMAP (3^{rd} year data, 2006), der die kosmische Hintergrundstrahlung ausmisst, legen allerdings eher eine kosmologisch unbedeutende Rolle für die Neutrinos nahe. Die machen einen Teil der so genannten heißen Dunklen Materie (engl. *hot dark matter*, HDM) aus, der für die Dynamik des Universums irrelevant ist.

WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*) sind die großen Brüder der Neutrinos. Die WIMPs wechselwirken ebenfalls schwach und sind deutlich schwerer als Neutrinos. Damit wären es interessantere Kandidaten für die Kosmologie.

15.1.10 Energiedieb bei Sternexplosionen

Eine entscheidende Rolle spielen Neutrinos bei den Supernovae (SN). Während des Gravitationskollapses eines alternden, schweren Sterns gibt es zahlreiche, kernphysikalische Reaktionen, die Neutrinos produzieren. Normalerweise verlassen sie daraufhin ungehindert die kollabierende Sternmaterie, weil sie ja der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Auf diese Weise kühlen sie den Kollaps, weil sie Energie forttragen. Bei einer bestimmten, hohen Materiedichte, der so genannten **Einschlussdichte** (engl. *trapping density*), die bei etwa 3×10^{11} g/cm^3 liegt, wird die **Neutrino-Opazität** so groß, dass die Neutrinos von der kollabierenden Materie festgehalten, mitgerissen und eingefangen werden (engl. *trapping*). Dadurch bildet sich ein 'Fermi-See' aus Neutrinos. Dann wird der Mechanismus der **Neutrino-Heizung** im Prä-Neutronenstern wichtig. Die hydrodynamischen Simulationen zeigen jedoch, dass dieser Heizmechanismus nicht ausreicht, um die Supernovaexplosion selbst zu treiben. Insofern befindet sich die klassische Kernkollaps-Supernova des Typs II (engl. *core-collapse SN*) in einer Verständniskrise.

Die Neutrinos werden allerdings effektiv an den Atomkernen gestreut (**Neutrino-Diffusion**). Dieser Streuprozess ist gegenüber dem Streuakt am einzelnen Proton oder Neutron dominant, weil der Wirkungsquerschnitt mit der Massenzahl A quadratisch skaliert. Die Diffusionszeitskala der Neutrinos bestimmt daher die Kollapszeitskala, bis der Kollaps bei Erreichen der **Kernmateriedichte** von 10^{14} g/cm^3 stoppt. Dann hat sich das Innere des Vorläufersterns in einen Neutronenstern verwandelt.

15.1.11 SN 1987a - Prototyp einer Sternexplosion

Die **Supernova 1987a** (Typ II) bot den Astronomen erstmals direkt die Möglichkeit **extragalaktische Neutrinos** (genau genommen 19 Anti-Elektronneutrinos) zu messen. Bis dato konnte man nur die **solaren Neutrinos** detektieren, die aus dem Inneren der Sonne kommen. Die SN 1987a fand in einer Begleitgalaxie der Milchstraße statt, der *Großen Magellanischen Wolke* (engl. *Large Magellanic Cloud*, LMC), die ebenfalls Mitglied der *Lokalen Gruppe* ist.

Die frei werdende Energie für eine Supernova liegt bei etwa 1 foe. Diese exotische, inoffizielle Einheit (keine SI-Einheit!) bezeichnet 10^{51} erg (engl. *10 to the power of* **f**ifty-**o**ne **e**rg). Die Energie stammt aus der Bindungsenergie der Kerne. Bei einer Sonnenmasse dieser Kerne wird gerade dieser Betrag an Bindungsenergie von 1 foe frei. Glücklicherweise gehen 99% der Supernovaenergie in die Neutrinos und nur 1% in die Bewegungsenergie (davon wiederum nur 1% Lichtenergie). Denn sonst könnten SN-Explosionen auch dem Leben auf der Erde gefährlich werden.

15.1.12 Darf's ein bisschen mehr sein?

Bei den Hypernovae sieht das schon ganz anders aus: Diese heftigere Form einer Supernova ist mit Strahlungsausbrüchen im höchsten Energiebereich assoziiert, den Gamma Ray Bursts (GRBs). Die freiwerdende Explosionsenergie ist nochmals um einen Faktor 100 bis 1000 größer als bei den Supernovae. In diesem Ereignis werden stellare, hoch relativistische Jets gebildet. Der sterbende, massereiche Stern sendet also gebündelte Materieströme aus, die Geschwindigkeiten nahe an der Lichtgeschwindigkeit haben. Dann werden die Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie wesentlich. GRB-Jets sind in der Tat lebensbedrohlich, wenn sie in großer kosmischer Nähe stattfinden, besonders dann, wenn einer der Jets in Richtung

Erde zeigt. Der Superstern η *Carinae* in etwa 10000 Lichtjahren Entfernung ist ein Kandidat für eine Hypernova.

Die Darstellung zeigt - gerade wenn man die enormen Lichtintensitäten der SN berücksichtigt - welch ungeheure Energiereserven in der Materie stecken.

15.1.13 Neutrinos zerstrahlen mit sich selbst?

Es ist möglich, dass das Neutrino ein **Majorana-Teilchen** ist. So nennt man Teilchen, die ihr eigenes Antiteilchen sind. Die Ergebnisse der Heidelberg-Moskau-Kollaboration, die den doppelten Beta-Zerfall untersucht, legen dies nahe. Allerdings ist das Ergebnis in der wissenschaftlichen Welt umstritten. Gälte dieses Resultat, so wäre die Leptonenzahlerhaltung verletzt (*Klapdor-Kleingrothaus et al.*, hep-ph/0201231).

15.1.14 Neutrinoastronomie - ein neues Fenster ins Universum

Die Neutrinoastronomie ist mittlerweile ein etabliertes und wertvolles Beobachtungsfenster der Astronomen. Aktuell öffnet sich dieses Fenster weiter, denn zu den niederenergetischen Neutrinos sind die **ultra-hochenergetischen Neutrinos** hinzugetreten. Diese sehr energiereichen Neutrinos haben Energien bis in den PeV-Bereich, d. h. 10^{15} Elektronenvolt!. Sie sind sekundäre Produkte und entstehen über viele Einzelreaktionen aus ultra-hochenergetischen (UHE) Protonen. Die UHE-Protonen wurden auf diese hohen Geschwindigkeiten durch Fermi-Beschleunigungsprozesse gebracht. Zunächst bilden sich aus Reaktionen zwischen Protonen untereinander oder Proton und Photon die Pionen (siehe dort für Details und Zerfallsgleichungen), die in optisch dünnen Umgebungsgasen wie in den Jets weiter zerfallen zu Myonen und Myon-Neutrinos. In einem letzten Schritt zerfallen schließlich auch die Myonen und bringen Elektronen, Positronen und vor allem UHE-Neutrinos der Elektron- und Myon-Familie hervor. Astronomen erwarten, dass eine Reihe kosmischer Quellen als **UHE-Neutrino-Emitter** in Frage kommen: es werden diverse Jetquellen diskutiert, wie Quasare und Blazare unter den Aktiven Galaktischen Kernen, Jets von GRB-Kollapsaren, Mikroquasare (wie SS 433, Cyg X-1, Cyg X-3), Supernovae und ebenso deren Relikte (engl. *remnants*) von GRBs und SN, die SNRs und GRBRs.

15.1.15 Neutrinojagd in Wasser und Eis

Die Detektoren verwenden dasselbe Messprinzip wie in Super-Kamiokande: die Neutrinos dringen in das Detektorvolumen ein und bilden Myonen, die man **neutrino-induzierte Myonen** nennt. Diese emittieren entlang ihrer Trajektorie Cerenkov-Strahlung, die mit einem aufwendigen Array einiger hundert Photo-Multiplier Tubes (PMTs) registriert wird. Die PMTs werden kettenförmig an Drahtseile gehängt. Diese lichtempfindliche Perlenschnuranordnung heißt *PMT-String*. Aus den PMT-Daten muss die Myonenspur und mit einigem Versatz die Neutrinospur rekonstruiert werden, damit man die Neutrinoquelle am Himmel lokalisieren kann. Die Genauigkeit der Positionsmessung ist etwa bis auf ein halbes Grad genau. Man kann als Detektormedium flüssiges Wasser oder Wassereis verwenden.

Es gibt schon einige solcher **Neutrinodetektoren** auf der Welt, wie NT-200 (im Wasser des Baikalsees), NESTOR im Mittelmeer vor der griechischen Küste, DUMAND vor der Küste Hawaiis und besonders exponiert am Südpol AMANDA und zukünftig ICECUBE (mit einem Detektorvolumen von einem Kubikkilometer antarktischem Eises!). Die letzten beiden Experimente verwenden das Eisschild der Antarktis, um 2.1 bis 2.3 Kilometer tief mit einer

zylindrischen Anordnung vieler PMT-Strings die Teilchenbahnen zu registrieren. In beiden Fällen muss der Hintergrund atmosphärischer Myonen (als Komponente der kosmischen Strahlung) abgezogen werden. Diese Myonen weisen jedoch ein anderes Spektrum. Zudem misst man die Neutrinos kosmischer Quellen paradoxerweise *durch* die Erde hindurch, weil sie beim Durchgang kaum beeinflusst werden (aufgrund der Schwachen Wechselwirkung). Die atmosphärischen Myonen kommen also im Detektor 'von hinten' und können so leichter identifiziert und rausgerechnet werden: Neutrinoteleskope schauen auf den Boden!

15.1.16 Vortrag

- ◇ Mehr Details zu ultrahochenergetischen Neutrinos in Cosmic Jets as Sources for ultra-high energetic Neutrinos (Stand Januar 2003).

15.1.17 Weblinks - Neutrinoastronomie am Südpol

- ◇ AMANDA
- ◇ ICECUBE

15.2 Neutronenreaktionen

Ganz allgemein Kern- oder Teilchenreaktionen unter Beteiligung von Neutronen. Neutronen sind Baryonen, und liegen zusammen mit den Protonen als Nukleonen in Atomkernen vor.

Man könnte zwar in dieser Allgemeinheit auch den Beta-Zerfall zu den Neutronenreaktionen rechnen, im Speziellen meint man jedoch damit den r-Prozess und den s-Prozess, die wichtig sind, um schwere Elemente (Metalle) aus leichten zu erzeugen.

Dieselben Konsequenzen ergeben sich im p-Prozess, der jedoch ein **Protonenprozess** ist. Dabei entstehen protonenreiche Kerne, die **p-Kerne**, durch den Einfang von Protonen bei hohen Temperaturen im Bereich einiger Milliarden Kelvin.

15.3 Neutronenstern

Neutronensterne sind stabile Endkonfigurationen, die aus dem Gravitationskollaps massereicher Sterne entstehen. Massereiche Sterne durchlaufen alle Brennstoffzyklen thermonuklearer Fusion bis sie im Innern einen **Eisenkern** (vergleiche Nife-Kern der Erde) gebildet haben. Dieser Vorläufer des Neutronensterns (engl. *neutron star progenitor*) weist typische Massen von 1.2 bis 1.6 Sonnenmassen auf.

15.3.1 Zusammenfall & Explosion

Da weitere exotherme Reaktionen im Innern nach der Phase des Siliziumbrennens unterbleiben, ist das hydrostatische Gleichgewicht des Sterns gestört: der Strahlungsdruck (ebenso der Gasdruck, der über Strahlungstransport an den Strahlungsdruck koppelt) verringert sich im Sterninnern rapide, was zugunsten des Gravitationsdrucks geht. Die Konsequenz ist katastrophal: Der innere Teil des sterbenden Sterns fällt im Gravitationskollaps in sich zusammen. Durch die einlaufende Schockwelle wird die Sternmaterie stark komprimiert. Irgendwann ist die Materie so dicht, dass die Schockwelle

daran reflektiert wird (*rebounce*). Als Folge dessen läuft eine etwa kugelförmige Schockfront wieder nach außen, reißt die äußeren Sternschichten mit sich und produziert eine spektakuläre Supernova-Explosion (Typ II). In diesem letzten Aufflammen wird der sterbende Stern gleißend hell und überstrahlt sogar das Licht seiner Heimatgalaxie. Erstaunlicherweise geht die meiste freigesetzte Energie dieser Explosion gar nicht in elektromagnetische Strahlung, sondern in die Neutrinos.

15.3.2 kosmische Häufigkeit

Allein in der Milchstraße gibt es mehr als 100 Millionen Neutronensterne - bei insgesamt einigen hundert Milliarden Sternen also anteilig im Promillebereich.

15.3.3 Pulsare: kosmische Leuchttürme

Zahlreiche Neutronensterne können die Astronomen beobachten und als Pulsare identifizieren. Von ihnen nahm man zunächst an, dass es sich um pulsierende Sterne handelt (daher der Name). Die scheinbar gepulste Strahlung kommt jedoch durch **Rotation** eines Neutronensterns zustande. Dabei sitzt die Strahlungsquelle an einem der magnetischen Pole des Neutronensterns. Differieren nun Rotations- und Magnetfeldachse, so dreht sich der Strahlungskegel um den Neutronenstern im Raum wie bei einem Leuchtturm. Diese geometrische Restriktion macht klar, dass Astronomen bei weitem nicht alle Neutronensterne in Form von Pulsaren beobachten können. Denn in der Regel wird der enge Strahlungskegel an der Erde vorbei schwenken.

15.3.4 Neutronensternjagd mit Röntgenteleskopen

In kompakten Röntgendoppelsternen (engl. Akronym XRBs für *X-ray binaries*) kann man aus den Kepler-Gesetzen indirekt auf die Existenz von Neutronensternen schließen, auch wenn man keine Pulsarstrahlung misst. Hier verraten sich die Neutronensterne durch die gemessene Sternmasse, die in einem bestimmten Massenbereich liegt (dazu im nächsten Absatz mehr). Eine weitere Methode des indirekten Nachweises sind charakteristische Strahlungssignaturen wie Strahlungsausbrüche. Diese können Folge eines Sternbebens (engl. *star quake*) in der Neutronensternkruste sein oder durch Akkretion der Materie eines Begleiters auf die Neutronensternoberfläche hervorgerufen werden.

15.3.5 Was wiegen die schwersten Neutronensterne?

Eine strittige Frage aus theoretischer Sicht ist, wie schwer Neutronensterne werden können. Die Astrophysiker wissen, dass sie schwerer werden können als Weiße Zwerge, aber ab einer bestimmten Massengrenze nicht mehr stabil sind. Denn dann kollabiert ein Neutronenstern zu einem stellaren Schwarzen Loch.

Die klassische Massengrenze von Neutronenmaterie ist die **Oppenheimer-Volkoff-Grenze von 0.7 Sonnenmassen**, die bereits 1939 berechnet wurde. Dieses Neutronensternmodell ist jedoch nicht wirklichkeitsnah, weil Neutronensterne viel komplexer aufgebaut sind, wie die Kernphysiker mittlerweile wissen. Ein anderer konservativer Zahlenwert für die Maximalmasse eines Neutronensterns resultiert aus sehr allgemeinen Überlegungen auf der Basis von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie und beträgt **3.2 Sonnenmassen** (*Rhoades & Ruffini*, PRL 1974). Neuere Arbeiten setzen dieses Limit

deutlich herab: So wird ein Massenbereich für Neutronensterne wird **zwischen 1.5 und 1.8 Sonnenmassen** diskutiert (*Burgio* 2004, nucl-th/0410040). Andere Autoren finden kleinere Maximalmassen, z. B. kleiner als 1.4 Sonnenmassen, wenn nur baryonische Materie im Neutronensterninnern angenommen wird; sobald jedoch eine Komponente nicht-baryonischer Materie, nämlich Quarkmaterie dazukommt, kann ebenfalls eine Maximalmasse von **etwa 1.8 Sonnenmassen** abgeleitet werden (*Schulze et al.*, Phys. Rev. C 2006). Die neueren Zahlenwerte folgen im Rahmen der theoretischen Kernphysik.

Nach wie vor, ist dieser Massenbereich unsicher und Gegenstand der Forschung, weil das Innere der Neutronensterne nicht vollständig geklärt ist. In üblichen Modellen besteht das Innere des Neutronensterns in den äußeren Zonen aus Neutronen und Hyperonen (als hadronische Phase), und der Sternkern besteht aus Quarks (Quarkphase). Die größte Unsicherheit steckt in der Zustandsgleichung und in der Frage, wie Hadronen in Quarks bei hohen Dichten übergehen. Wertvolle Hinweise für das richtige Massenregime kommen aus der astronomischen Beobachtung. Entdecken Astronomen z. B. einen Neutronenstern mit mehr als 1.8 Sonnenmassen, so müssen die letztgenannten Modelle korrigiert werden. Leider ist auch die astronomische Messung schwierig und fehleranfällig.

15.3.6 Zweige theoretischer Kernphysik

Ein Neutronenstern besteht aus verschiedenen Materieformen, die in seinem Innern in etwa kugelförmigen Schalen angeordnet sind. Die physikalische Beschreibung dieser Materie unter extrem hohen Dichten ist besonders anspruchsvoll und erfordert Konzepte der Kernphysik und der Quantenfeldtheorien. Ein wesentlicher Zweig aus der Theorie ist dabei die **Brückner-Vielteilchentheorie** (nicht-relativistisch: Brückner-Hartree-Fock Theorie; relativistisch: Dirac-Brückner-Theorie). Welche Theorie am besten geeignet ist, ist ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung.

15.3.7 Neutronisierung

Die Ursache für das Überwiegen der Neutronen ist die ungleich höhere Dichte der Prä-Neutronensterne. Überschreitet die Zentraldichte des Eisenkerns im Gravitationskollaps den kritischen Wert von etwa 1.14×10^9 g cm^{-3}, setzt der **inverse β^--Zerfall** ein, der die Materie nach und nach **neutronisiert**.

$$p + e^- \rightarrow n + \nu_e$$

Dabei fangen die Atomkerne Elektronen ein, und es bilden sich Neutronen, gemäß der allgemeinen Reaktionsgleichung (Element X habe die Ordnungszahl Z und eine Atommasse A:

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X} + e^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{X} + \nu_e$$

Bezogen auf das schwerste Element, das sich im Sternkern gebildet hat, Eisen-56 (^{56}Fe), ergibt sich diese Reaktionskette:

$${}^{56}_{26}\mathrm{Fe} + e^- \rightarrow {}^{56}_{25}\mathrm{Mn} + \nu_e$$

$${}^{56}_{25}\mathrm{Mn} + e^- \rightarrow {}^{56}_{24}\mathrm{Cr} + \nu_e$$

Es wandelt sich in Mangan (Mn) um, dieses wiederum wird zu Chrom (Cr). Chrom bleibt stabil, bis im Zuge des anhaltenden Kollapses noch höhere Zentraldichten erreicht werden. Ab

einer Dichte von 1.5×10^{10} g cm^{-3} zerfällt auch Chrom. Bei noch höheren Dichten, ab 3.9×10^{10} g cm^{-3} kann sich sogar Kohlenstoff zu Elementen kleinerer Ordnungszahl umwandeln

$$^{12}_{6}\mathrm{C} \rightarrow ^{12}_{5}\mathrm{B} \rightarrow ^{12}_{4}\mathrm{Be}.$$

Die Neutronisierung ist demnach ein sukzessiver Vorgang, der die Atomkerne nach und nach mit immer mehr Neutronen anreichert: Sie werden zu **neutronenreichen Atomkernen** (engl. *neutron-rich atomic nuclei*). Wie die Reaktionen zeigen, werden aufgrund der *Leptonenzahlerhaltung* immer **Elektron-Neutrinos ν_e frei**. Diese wechselwirken nur schwach mit der Umgebung und können (unterhalb der Neutrino-Trapping-Dichte, s. u.) das Sterninnere verlassen, Energie und Wärme wegtragen und damit den Kollaps kühlen. Unter normalen, irdischen Bedingungen würden die neutronenreichen Atomkerne schnell zerfallen und zum Betastrahler werden. Dies geschieht im Neutronenstern jedoch nicht, weil sich die Neutronen bei diesen hohen Plasmadichten *im Gleichgewicht* mit Protonen und Elektronen befinden. Physikalisch formuliert liegt das daran, weil die **Fermienergie** des entarteten Elektronengases in der Größenordnung der Zerfallsenergie der Neutronen ist (etwa 780 keV).

15.3.8 Nehmen wir ein Neutrinobad

Es gibt weitere Prozesse, bei denen Neutrinos unterschiedlichen Typs emittiert werden können. So kommt es zur **Paarvernichtung** (*Paarannihilation*) von Elektron und Positron (Austausch von W- und Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung). Dies zeigt diese Reaktionsgleichung

$$e^- + e^+ \rightarrow \nu_l + \bar{\nu}_l, \quad l = e, \mu, \tau.$$

Es handelt sich hierbei um den so genannten **Plasmon-Zerfall**, wobei l ein Platzhalter für alle drei Typen der Leptonenfamilie ist: Elektron, Myon und Tauon. D.h. *alle* möglichen Neutrinos können dabei entstehen! Im Gegensatz zur Sonne, die nur Elektronneutrinos aussendet (die jedoch danach in andere Typen oszillieren), emittieren sterbende, massereiche Sterne von Anfang an Neutrinos aller drei Familien. Außerdem entstehen Neutrinos in der **Photo-Annihilation**:

$$e^- + \gamma \rightarrow e^- + \nu_l + \bar{\nu}_l.$$

Auch bei der Emission von **Bremsstrahlung** werden weitere Neutrinos freigesetzt:

$$e^- + ^A_Z\mathrm{X} \rightarrow e^- + ^A_Z\mathrm{X} + \nu_l + \bar{\nu}_l.$$

Insgesamt bildet sich ein **Neutrinobad** aus.

15.3.9 Neutronisierungsgegner

Es gibt zur Neutronisierung auch konkurrierende Prozesse, so genannte **pyknonukleare Reaktionen** (grch. *pyknos*: dicht), die bei sehr hohen Dichten ablaufen können. *Cameron* (1959) sowie *Van Horn* und *Salpeter* (1969) konnten zeigen, dass sich auf einer typischen Zeitskala von etwa 100 000 Jahren

- ◇ Wasserstoff in Helium (oberhalb etwa 10^6 g/cm^3),
- ◇ Helium-4 in Kohlenstoff-12 (oberhalb etwa 8×10^8 g/cm^3),
- ◇ und Kohlenstoff-12 in Magnesium-24 (oberhalb etwa 10^{10} g/cm^3)

umwandeln können. Je nach Verhältnis von Hin- und Rückreaktionen findet so allmählich eine Neutronisierung statt. Da die Zeitskala des Gravitationskollapses weit kürzer ist, als diejenige der pyknonuklearen Reaktionen, gewinnt schließlich die Neutronisierung: ein *Neutronenstern* ist entstanden!

15.3.10 Quantendruck stabilisiert

Innerhalb der Sternrestmassen von etwa 1.2 bis 3.2 Sonnenmassen (nehmen wir mal die konservative Maximalmasse an) bildet sich eine stabile Konfiguration aus, die vor allem durch den **Entartungsdruck der Neutronen** stabilisiert und so vom Kollaps im freien Fall aufgehalten wird. Dieser Quantendruck hat dieselbe Natur wie bei Weißen Zwergen, nur dass das Fermionengas großteils aus Neutronen besteht und nicht aus Elektronen - sie sind nur eine Beimischung im Innern von Neutronensternen. Fermionen unterliegen dem Pauli-Prinzip und können nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen. Sie können nur dann denselben Zustand besetzen, wenn ein Neutron Spin 'nach oben' (engl. *spin-up*) und das andere im gleichen Zustand Spin 'nach unten' (engl. *spin-down*) hat. Anschaulich gesprochen, können sich die Neutronen nicht (wie die Bosonen) beliebig nahe kommen, was einem Druck, dem Entartungsdruck, entspricht. Das ist die tiefe, physikalische Ursache für die Existenz von Neutronensternen. Die Berechnung des Entartungsdruckes erfolgt im Rahmen der statistischen Physik: Die Theoretiker setzen eine Phasenraumbeschreibung an. Hier integrieren sie über alle möglichen Impulszustände der Neutronen, von Impuls null bis zum Fermi-Impuls ('Integration über die Fermi-Kugel'). Daraus resultiert der Entartungsdruck, der dann die Gestalt einer polytropischen Zustandsgleichung hat und nur in einer Potenz von der Massendichte abhängt. Anschaulich bedeutet dies: je dichter das Material (die Neutronen) gepackt ist, umso entscheidender wird der Einfluss des Pauli-Prinzips, das dann bei hoher Kompression eine neue Druckkomponente bereitstellt.

In einer Abschätzung des Verhältnisses der Massen von Neutronen zu Elektronen, was einen Faktor von etwa 1840 liefert, wird unmittelbar klar, weshalb die Neutronensterne notwendigerweise sehr viel kleiner sein müssen, als Weiße Zwerge.

15.3.11 Die 4-Parameter-Raumzeit von Neutronensternen

Die Raumzeit oder **Metrik** außerhalb der Oberfläche eines Neutronensterns ist ebenso wie die eines rotierenden Schwarzen Loches (der so genannten Kerr-Lösung) stationär und axialsymmetrisch. Vor wenigen Jahren wurde eine exakte Formulierung dieser Metrik in gebrochenrationalen Polynomen gefunden (*Manko et al., 2000*, gr-qc/0001081), die mathematisch etwas komplizierter ist als für Kerr-Löcher. Der entscheidende Unterschied ist, dass Neutronensterne - im Gegensatz zu Schwarzen Löchern, die 'keine Haare' haben (Keine-Haare-Theorem) - mehr Eigenschaften aufweisen. Neutronensterne werden durch ihre **Masse**, ihren **Drehimpuls** sowie durch ihr **Massen-Quadrupolmoment** und ihr **magnetisches Moment** charakterisiert. Daraus resultiert eine 4-Parameter-Klasse von Lösungen für die **Einstein-Maxwell-Gleichungen** (siehe dazu Maxwell-Tensor) der Allgemeinen Relativitätstheorie.

15.3.12 Ganz schön dicht!

Neutronensterne gehören zu den **kompakten Objekten**: sie haben nur **Radien von etwa 15 km**, aber Massen von etwa 1.5 Sonnenmassen! Beide Wertebereiche werden

durch astronomische Beobachtungen gestützt. Die Kernmateriedichte liegt - wie aus der Kernphysik bekannt - bei 0.17 fm^{-3}, 140 MeV fm^{-3} oder 2.5×10^{14} g cm^{-3} im cgs-System. Aus diesen bekannten, typischen Werten für Masse und Radius kann eine mittlere Dichte der Neutronensterne von etwa 2×10^{15} g cm^{-3} abgeleitet werden. Das entspricht demgemäß **mehrfacher Kernmateriedichte** (*supranukleare Dichten*), genau genommen knapp zehnfache.

Das **Innere eines Neutronensterns** muss daher mit einer Physik der hohen Dichten beschrieben werden. Es stellt sich heraus, dass eine konsistente Beschreibung des Innern *mit einer einzigen* Theorie nicht möglich ist, sondern man in verschiedenen Dichteregimes unterschiedliche Theorien verwenden muss. Dies ist im Wesentlichen der Grund dafür, dass man **keinen festen Grenzwert für die Maximalmasse** eines Neutronensterns angeben kann. Es ist allenfalls möglich ein unteres und ein oberes Limit aus einer Synopsis der Theorien anzugeben.

15.3.13 Wir schneiden einen Neutronenstern auf

Im Folgenden sind die Dichtebereiche und assoziierte, physikalische Modelle kurz skizziert. Neutronensterne sind - wie obige Kalkulation der mittleren Dichte nahe legt - wesentlich dichter als die Weißen Zwerge. Zunächst kann man das Innere der Neutronensterne in **Kruste** und **Kern** unterteilen. Die Kruste besteht, wie mit der Sternentwicklung nachzuvollziehen ist, aus einem *Coulomb-Gitter von Eisen-56-Atomkernen* und einem *Fermigas entarteter Elektronen*. Die **Festkörperphysik** liefert den theoretischen Rahmen einer Beschreibung. Der Kern setzt sich aus einer *Neutronenflüssigkeit*, einigen *Elementarteilchen* und einer *Quark-Phase* zusammen. Hier muss man auf Methoden der **Kernphysik**, **Quantenchromodynamik** (QCD) und **Teilchenphysik** zurückgreifen.

Es erweist sich als sinnvoll Kruste und Kern weiter zu unterteilen, weil die Zustandsgleichungen und die zugehörigen Teilchenspezies und Teilchenphasen in den unterschiedlichen Dichteschalen stark differieren. Unterhalb der dünnen, nur etwa einen Kilometer durchmessenden Neutronensternkruste vermutet man **drei wesentliche Phasen von Materie**, die miteinander im Gleichgewicht stehen:

- ◇ eine normale **hadronische Phase**, bestehend aus neutronenreichen Atomkernen und einer Neutronenflüssigkeit,
- ◇ eine Phase aus **kondensierten Kaonen** (eine bestimmte Form von Mesonen, bestehend aus einem Quark und einem Antiquark)
- ◇ und eine **Quark-Phase** (QP) oder auch **Quark-Gluonen-Plasma** (QGP) genannt.

In der theoretischen Kernphysik gilt die Hadronenphase als gut etabliert. Für dessen Beschreibung verwendet man die **relativistische Mean-field-Theorie** (RMF). Im Speziellen handelt es sich um den *Brueckner-Bethe-Goldstone-Formalismus*, wo man die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung mit dem *Paris-Potential* und Drei-Körper-Kräfte mit dem *Urbana-Modell* beschreibt. Als Additiv berücksichtigt man die Hyperon-Nukleon-Wechselwirkung.

Die Quark-Kondensation und die Existenz von Kaonen sind eine Folge der **spontanen Brechung der chiralen Symmetrie** (einer bestimmten Symmetrie des QCD-Lagrangian). Dann treten nämlich fast masselose, so genannte *Goldstone-Bosonen* auf, wie Pionen, das

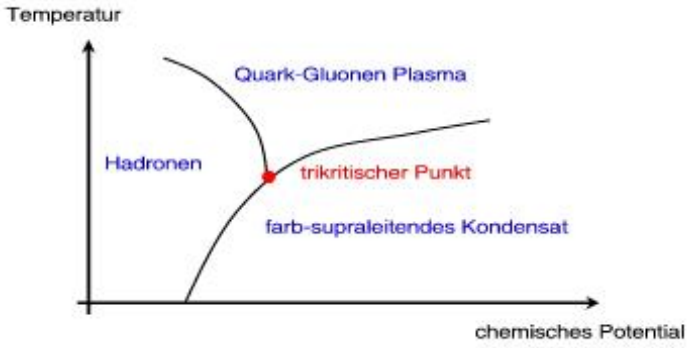

Abbildung 15.1: QCD-Phasendiagramm.

η-Teilchen oder eben Kaonen. So gibt es im Innern der Neutronensterne Prozesse, wo ein Bose-Kondensat aus Kaonen entsteht, wie diese beiden Reaktionsgleichungen demonstrieren:

$$\begin{aligned} e^- &\rightarrow \mathrm{K}^- + \nu_e \\ n &\rightarrow \mathrm{K}^- + p \end{aligned}$$

15.3.14 Rolle der Kaonen

Neben den Nukleon-Nukleon-Wechselwirkungen werden dann auch Kaon-Nukleon-Wechselwirkungen relevant. Dies beeinflusst maßgeblich **Transport- und Kühlungsprozesse** im Innern. In der Zustandsgleichung gibt es somit für die Energiedichte der Neutronensternmaterie einen Beitrag von den Kaonen; für den Gesamtdruck gibt es *keinen* Beitrag von Kaonen, weil sie Bosonen sind und somit *kein Partialdruck* entsteht. Kaonen '**weichen die EoS auf**', so dass eine **Maximalmasse für Neutronensterne** durch ihren Einfluss *reduziert wird*. Außerdem erwartet man einen Einfluss der Kaonen auf die Entwicklung des Prä-Neutronensterns während des Supernova-Kollapses.

15.3.15 Quarkmaterie

Bei mehrfacher Kernmateriedichte erwartet man einen Übergang zu Quarkmaterie, die einerseits aus **Quarkpaaren** und andererseits aus dem **Quark-Gluonen-Plasma** besteht. Die Beschreibung der ersten Komponente, den so genannten *Diquarks*, ist analog zur BCS-Theorie der Supraleitung in Festkörpern, nur dass die *Cooper-Paare* nicht aus Elektronen, sondern aus Quarks bestehen. Daher rührt die Bezeichnung Farbsupraleitung. Vermutlich spielt sie neben Neutronensternen auch im Innern so genannter Quarksternen eine Rolle. Die Beschreibung der Quarkphase gestaltet sich weit schwieriger. Hier nutzt man ein eher phänomenologisches Modell (darin liegt eine Schwäche) und beschreibt sie mit dem **MIT Bag-Modell** (Näheres dazu bei den Quarksternen). Abbildung 15.1 zeigt schematisch in einem **QCD-Phasendiagramm**, wie die drei Phasen voneinander abgrenzen. Aus diesen Überlegungen ergibt sich insgesamt folgende **Schalenstruktur eines Neutronensterns**, wie sie in Abbildung 15.2 dargestellt wird.

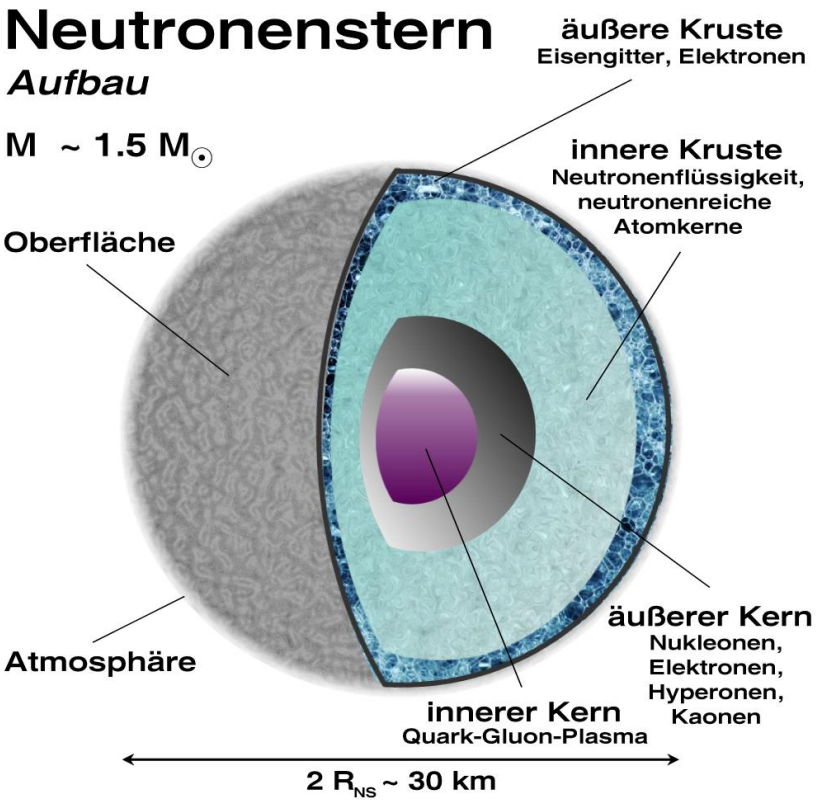

Abbildung 15.2: Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenaufbau und Konstituenten.

◇ Um den Neutronenstern herum befindet sich eine *nur wenige Zentimeter* durchmessende **Atmosphäre**.

◇ Der eigentliche Neutronenstern hat am Rand eine **äußere Kruste**, die aus einem Gitter von Atomkernen, vor allem **Fe-56**, und einem Fermigas relativistisch entarteter Elektronen besteht. Nach innen setzt die Neutronisierung ein, die zunächst nur die Atomkerne mit Neutronen anreichert.

◇ Dann schließt sich eine **innere Kruste** an, die aus einer *warmen Neutronenflüssigkeit* und einem Gitter neutronenreicher Atomkerne besteht. Diese Zone wird außen durch diejenige Dichte definiert, bei der die Neutronen aus den mit Neutronen stark übersättigten Atomkernen 'austropfen'. Bei einer Dichte von etwa 4×10^{11} g cm^{-3}, der so genannten *neutron drip density*, ist die Bindungsenergie der Neutronen an den Atomkern so gering, dass sie in 'Tropfen' den Kernverbund verlassen können. Daher nennt man diese Phase auch **Neutronenflüssigkeit**. Inwärts schließt die innere Kruste bei der Übergangsdichte von 1.7×10^{14} g cm^{-3} ab: bei diesen Dichten ist die **Neutronisierung abgeschlossen** und kein Atomkern mehr vorhanden.

◇ Nun schließt sich der **äußere Kern** an, wo alle Atomkerne in ihre Bestandteile zerlegt wurden: den **Nukleonen**, also den Protonen und den Neutronen. Daneben existieren immer noch Elektronen als entartetes Fermigas. Der äußere Kern enthält neben diesen Spezies auch besonders massive Baryonen, die **Hyperonen** und auch die Kaonen. Die *Hyperonisierung* setzt bei typischen Dichten im Bereich von **zwei- bis dreifacher Kernmateriedichte** ein. In Überlappungsbereich zwischen äußerem und innerem Kern sollten bereits Beimischungen der farbsupraleitenden Phase, also **Diquarks**, existieren.

◇ Tief im Innersten, dem **inneren Kern**, wurden auch die Nukleonen aufgebrochen. Hier erwartet man, dass der Einschluss (*confinement*) der Quarks aufgehoben wird und sie in **freier** Form im Gleichgewicht mit ihren ebenfalls Farbe tragenden Austauschteilchen, den Gluonen, existieren: dies ist die Domäne des **QGPs**. Quarks und Gluonen bewegen sich *quasi-frei* und bilden eine plasmaartige Phase. Dieser besonders exotische Materiezustand wird unter ultrahohen Dichten (fünf- bis zehnfache Kernmateriedichte) und enormen Temperaturen von einer Billion Grad (entsprechend 150 MeV) erreicht. Das QGP ist noch Physik innerhalb des Standardmodells der Teilchenphysik und im Rahmen der QCD ableitbar.

15.3.16 So nimmt die Dichte nach innen zu

Die letzte Abbildung 15.3 dieses Lexikoneintrages zeigt den Verlauf des *Dichtegradienten* im Innern eines Neutronensterns. Man erkennt, dass die supranuklearen Dichten vor allem im inneren Kern angenommen werden und das Quark-Gluonen-Plasma bilden. Natürlich sind die numerischen Werte für die Dichten, ebenso wie die Radien der Schalen modellabhängig, und es gibt noch keine Formulierung, die bis auf die Nachkommastelle einheitlich ist. Ebenso ist die Einteilung in Schalen relativ willkürlich, weil man auch noch mehr Substrukturen einbauen könnte (Hyperonenschale o.ä.).

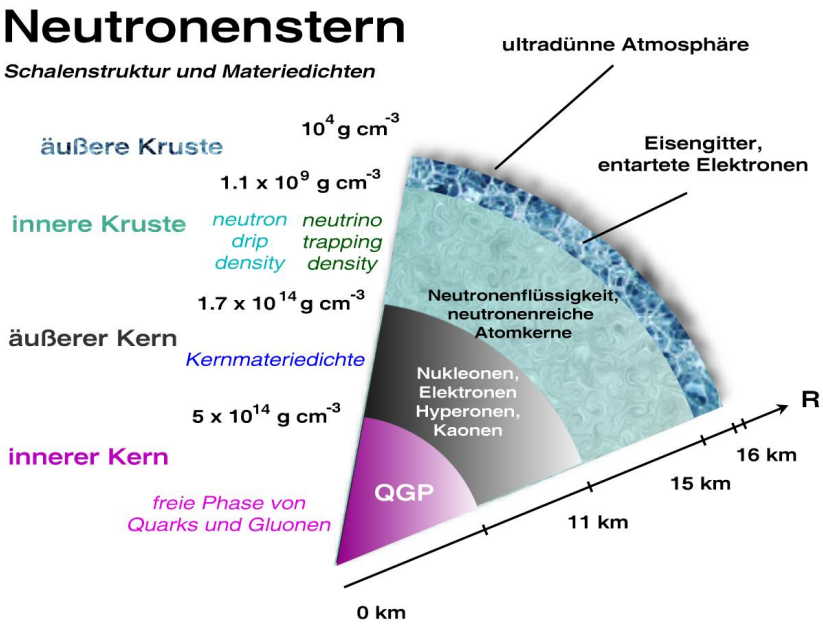

Abbildung 15.3: Innere Struktur eines Neutronensterns: Schalenradien und Dichtedomänen.

15.3.17 Ein Neutronensternschicksal

Nach Kenntnis dieser Ingredienzien für die **Zustandsgleichungen eines Neutronensterns** bestimmt man über die klassische **Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung** die Obergrenze für die Masse eines Neutronensterns. Oberhalb dieser Grenzmasse muss auch der Neutronenstern kollabieren und wird aller Wahrscheinlichkeit nach ein stellares Schwarzes Loch. Dieses Szenario ist denkbar, wenn beispielsweise in einem Doppelsternsystem eine der beiden Komponenten im Rahmen der Sternentwicklung zu einem Neutronenstern wurde. Ist die andere Komponente ein Riesenstern, der sein Roche-Volumen überschreitet, kann Materie des Riesen durch den inneren Lagrange-Punkt des Systems auf die kompakte Komponente überfließen. Durch Akkretion kann somit ein Neutronenstern an das Limit seiner Stabilitätsgrenze getrieben werden und bei Überschreitung des Limits weiter kollabieren.

Die Unfähigkeit, eine klare Grenzmasse analog zur Chandrasekhar-Grenze Weißer Zwerge angeben zu können, resultiert aus einer Unsicherheit in den Zustandsgleichungen. Die Theorie des Neutronensterninnern ist noch nicht eindeutig und die Kern- und Elementarteilchenphysik lässt noch Spielraum für die Massengrenze. Die Forschung engt diesen jedoch sukzessive ein und führt sogar auf mögliche Unterklassifikationen von Neutronensternen.

15.3.18 Masse-Radius-Relationen

Hinzu kommt, dass selbst bei eindeutiger theoretischer Kenntnis der Zustandsgleichung, diese nur äußerst schwierig in der Beobachtung verifiziert werden kann. Die Astronomen können natürlich nicht ins Innere der Neutronensterne hineinblicken und müssen indirekt - beispielsweise über die äußere Gestalt des Sterns (Radiusmessungen) oder hochenergetischen Strahlungsausbrüchen - auf das Innere und die Richtigkeit von Zustandsgleichungen schließen. Über Messungen der **Masse-Radius-Relationen** aus Pulsardaten versuchen Astronomen

diese Kenntnis zu erlangen. Die typische Masse-Radius-Relation eines Neutronensterns lautet $M \sim R^{-3}$, was in starkem Gegensatz zu den kompakteren Strange Stars steht, $M \sim R^{+3}$! Astronomische Messungen von Masse (Kepler-Gesetze) und Radius (Fluss messen bei bekannter Distanz) an verschiedenen Kompakten Objekten, sollten Vertreter der jeweiligen Klasse enthüllen oder wenigstens einen schwachen Hinweis zur Unterscheidung geben.

15.3.19 Irdische Neutronensternmaterie

Die Frage, ob im tiefsten Innern von Neutronensternen tatsächlich **neue Physik** vorgefunden werden kann, ist Gegenstand aktueller Forschung. Die extremen Materiebedingungen versuchen die Physiker im Labor nachzustellen. Die Forschung wird u. a. mit dem **Teilchenbeschleuniger** RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) und an der GSI (*Gesellschaft für Schwerionenforschung*) Darmstadt und bald auch am LHC (*Large Hadron Collider*) am CERN betrieben. Extreme Materiezustände wie das extrem kurzlebige QGP können aus den Stößen sehr schwerer Ionen wie Gold- oder Bleiatomkerne erzeugt werden. Denn bei solchen Zusammenstößen werden kurzfristig auf sehr kleinen Raumskalen Dichten wie im Innern von Neutronensternen erreicht. Tatsächlich gelang den RHIC-Physikern die Erzeugung eines QGPs im Jahr 2004, wie unter dem Eintrag Quark-Gluonen-Plasma beschrieben wird.

Teilchenphysiker untersuchen auch die Produktion von Kaonen. Die messtechnischen Anforderungen solcher Experimente sind außerordentlich hoch! Die Physiker hoffen, dass irdische Teilchenbeschleuniger den Bereich hoher Dichte und hoher Temperatur ausloten, während astronomische Beobachtungen von Neutronensternen den Bereich hoher Dichten und niedriger Temperaturen liefern. In dieser Forschung zeigt sich abermals eine Annäherung von Teilchenphysik und Astrophysik, wie in der Kosmologie.

15.3.20 Magnetare: stark magnetisierte Neutronensterne

Stark magnetisierte Neutronensterne nennt man Magnetare, die Pulsare haben sich als rotierende Neutronensterne erwiesen.

15.3.21 Neutronensterne im Doppelpack

Ein Binärsystem aus Neutronensternen, der **Hulse-Taylor-Pulsar** mit der Katalogbezeichnung PSR 1913+16, erlangte Berühmtheit, weil es bei diesem System gelang, indirekt die Abstrahlung von Gravitationswellen nachzuweisen. Dies war ein weiterer, gewichtiger Beleg für die Existenz von Gravitationswellen und die Richtigkeit der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins*.

15.4 Newtonsche Gravitation

Die Newtonsche Gravitation ist die historisch gesehen **erste Gravitationstheorie**, die von dem englischen Mathematiker und Physiker *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) erfunden wurde. Newtons Theorie beschreibt, wie **Massen** miteinander wechselwirken: sie tauschen nämlich eine Kraft, die *Gravitationskraft*, aus. Es gibt nur positive Massen und keine negativen, so dass die Gravitationskraft **immer anziehend** (*attraktiv*) wirkt. Newton entdeckte, dass die Gravitationskraft **überall im Kosmos wirkt** und beschrieb erfolgreich rein theoretisch

die Bahnbewegungen von Planeten und Kometen im Sonnensystem. Sein Monumentalwerk *Principia* ist eines der wertvollsten Bücher der Wissenschaft und erschien 1687. Mit diesem ersten Lehrbuch der theoretischen Physik konnte Newton die empirisch gefundenen Kepler-Gesetze *mathematisch* ableiten. Um dazu in der Lage zu sein, erfand er (etwa zeitgleich, aber unabhängig voneinander mit dem Deutschen Leibniz) 'nebenbei' die Differential- und Integralrechnung!

15.4.1 Newtons Gravitation als Formel

Die quantitative Berechnung der Gravitationskraft funktioniert gemäß Gleichung:

$$F = \mathrm{G}\,\frac{Mm}{r^2}$$

Zwischen zwei Massen M und m, die sich im Abstand r voneinander befinden mögen, wirkt die Gravitationskraft **F**. Dabei ist G eine **fundamentale Naturkonstante**, die Newtonsche Gravitationskonstante mit dem Zahlenwert 6.672×10^{-11} $\mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$ in SI-Einheiten. In der modernen Sprache der Eichtheorien ist G die **Kopplungskonstante der Gravitation**. Die Daten G, M, m und r müssen rechts eingesetzt werden, um die Gravitationskraft **F** links auszurechnen. Anmerkung: Diese Kraft ist ein *Vektor*, weil sie Betrag und Richtung hat; r ist also eigentlich der Betrag des Differenzvektors der beiden Ortsvektoren, die die Positionen der beiden Massen angeben). Wie man sieht, hat die Gravitationskraft eine berühmte Eigenschaft:

Die Gravitationskraft fällt mit dem dem Abstandsquadrat ab.

Anders gesagt: Je weiter die beiden Massen M und m voneinander entfernt sind, umso schwächer ist die Gravitation. Diese Eigenschaft hat die Gravitation mit der *Coulombkraft* aus der Elektrostatik gemein.

15.4.2 Voraussetzungen und Grenzen von Newtons Theorie

Die Newtonsche Physik beruht auf drei Axiomen, die auch als *Newtonsche Gesetze* bezeichnet werden.

- ◇ **1)** Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung, falls keine Kräfte auf ihn wirken (**Trägheitsgesetz**).
- ◇ **2)** Die Beschleunigung eines Körpers ist proportional zu der Kraft, die sie verursacht (**dynamisches Grundgesetz**).
- ◇ **3)** Kräfte, die zwei Körper aufeinander ausüben, sind vom Betrag her immer gleich groß, aber von der Richtung her genau entgegengesetzt (**Reaktionsprinzip**; *actio = reactio*).

Auf der Grundlage dieser Axiome formulierte Newton seine Gravitationsphysik. Seine Theorie ist nach wie vor in der zeitgenössischen Physik wichtig und gehört zum Standardlehrstoff eines jeden Physikstudenten in der *klassischen Mechanik* am Anfang des Studiums. Viele Probleme der Physik können *Newtonsch gelöst* werden, z. B. alltägliche Gravitationsphänomene wie der Fall einer Masse im Gravitationsfeld der Erde. Das funktioniert mit **Punktmassen**, aber selbstverständlich auch mit ausgedehnten Massen; dann muss man nur den **Schwerpunkt** der ausgedehnten Masse als Positionsangabe verwenden. Newtons Theorie eignet sich dann zur Berechnung von Gravitationseffekten, wenn

- ◇ auftretende Geschwindigkeiten deutlich kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c sind;
- ◇ beteiligte Massen nicht allzu kompakt sind.

15.4.3 Was passiert, wenn diese Voraussetzungen nicht gelten?

Falls die genannten Bedingungen nicht erfüllt sind, muss eine Theorie verwendet werden, die der Newtonschen Gravitationsphysik übergeordnet ist. Das ist die Relativitätstheorie, genauer gesagt die **Allgemeine Relativitätstheorie** (ART) von *Albert Einstein*, die 229 Jahre nach Newtons Veröffentlichung der *Principia* publiziert wurde.

15.4.4 Newtons geisteswissenschaftliche Leistung

In Newtons Denken ist eine damals nicht selbstverständliche Annahme eingegangen: **Er vereinheitlichte den Kosmos und die Erde.** Das ist dehalb nicht selbstverständlich, weil die (insbesondere katholische) Kirche eine strikte Trennung von Himmel und Erde proklamierte. Aus der Retrospektive kann dieser erkenntnistheoretische Schritt Newtons daher als **erste Stufe der Unifikation** in der Physik angesehen werden. Dieses Bestreben dauert in der modernen Physik noch an und zeichnet sich als sehr erfolgreich, um die Natur zu beschreiben (siehe dazu elektroschwache Theorie und GUT).

15.4.5 wichtiger Lesehinweis

Ausführliche Informationen zur Newtonschen und anderen Gravitationstheorien gibt es in einem der bedeutenden Begriffe in diesem Lexikon der Astrophysik, nämlich **Gravitation**.

15.5 No-Hair-Theorem

Dieses Keine-Haare-Theorem beruht auf einem Zitat des Relativitätstheoretikers *John A. Wheeler*:

Schwarze Löcher haben keine Haare.

Diese Aussage bezieht sich darauf, dass Schwarze Löcher erstaunlich wenig Eigenschaften bzw. physikalische Parameter aufweisen verglichen mit anderen physikalischen Objekten. Maximal sind es drei Parameter, nämlich bei der Kerr-Newman-Lösung: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung. Gegenstände mit komplexen Eigenschaften, die in das Schwarze Loch fallen, werden auf das Einfachste reduziert (**Verlust an Information**), so dass dieser Einfall nur etwas an den Parametern Masse, Drehimpuls und Ladung ändern kann.

15.6 Nova

Eine Nova bezeichnet in der Astronomie eine Eruption, einen Helligkeitsausbruch eines Sterns. Somit zählen die Novae zu den Veränderlichen.

15.6.1 irreführende Etymologie

Die Wortbedeutung *nova* kommt aus dem Lateinischen für *neu*. Das Phänomen Nova hielt man ursprünglich für einen neuen Stern, weil der Helligkeitsausbruch dort auftauchte, wo Astronomen zuvor keinen Stern sahen. Tatsächlich ist es kein neuer Stern (im Sinne eines Protosterns, YSOs), sondern ein leuchtschwacher Stern, der plötzlich hell in Erscheinung tritt.

15.6.2 soziale Sterne: Riese gibt Zwerg Materie

Die physikalische Erklärung für Novae ist, dass ein **Materietransfer in einem Doppelsternsystem** von einer Komponente auf die andere stattfindet. Diesen Mechanismus gibt es auch bei Röntgendoppelsternen. Die heiße Komponente ist in der Regel ein Weißer Zwerg, die andere, kühlere meist ein Roter Riese oder seltener ein Roter Zwerg. Kommen sich die beiden Sterne recht nahe, so kann durch Akkretion Materie auf die heiße Komponente übertreten. Was sich dann ereignet, ist vergleichbar mit einer Fusionsbombe: Bei Erreichen einer kritischen Temperatur zündet eine Explosion. Im Speziellen wird Wasserstoff auf der Oberfläche des Weißen Zwergs akkretiert. Diese Wasserstoffhülle durchmischt sich mit der Atmosphäre des Weißen Zwergs. Bei hohen Temperaturen kann dann der CNO-Zyklus ablaufen, der thermonukleare Fusionsenergie freisetzt. Die Konsequenzen gleichen einem Inferno: die freigesetzte Energie treibt die Gashülle um den Weißen Zwerg auf Geschwindigkeiten von einigen tausend km/s. Die Gashülle strahlt dabei vor allem thermisch (Planckscher Strahler) und kühlt sich mit der Ausdehnung ab. Die elektromagnetische Emission ist anfangs hochenergetisch und im Bereich der Röntgen- und Ultraviolettstrahlung und kommt infolge Abkühlung in den optischen und infraroten Spektralbereich.

15.6.3 Beobachtungsbeispiel: Nova T Pyxidis

Novae wurden bereits vielfach astronomisch beobachtet. Besonders eindrucksvoll sind Beobachtungen mit dem Weltraumteleskop Hubble, wo die Auflösung der expandierenden Gashülle dokumentiert werden konnte. Ein solches Beispiel zeigt das optische Beobachtungsfoto 15.4: die Nova *T Pyxidis* (Credits: *Shara et al.* STScI/NASA 1997). Diese Nova geschieht etwa alle 20 Jahre und zählt daher zu den rekurrierenden Novae. *T Pyxidis* hat eine Entfernung von 6000 Lichtjahren und befindet sich im Sternbild *Pyxis* (dt. *Schiffskompass*) am Südhimmel. Im Foto festgehalten sind nun Myriaden von Explosionstrümmern, die sich in einer Explosionswolke von etwa einem Lichtjahr Durchmesser um den Weißen Zwerg (oben) scharen. Auch der spendable Begleitstern ist zu sehen (unten). Die Trümmer zeugen von einer verheerenden Nuklearexplosion auf der Oberfläche des Zwergs, die einer Wasserstoffbombenexplosion ähnelte.

15.6.4 Novatypen

In der Analyse von Novae spielen **Lichtkurven** die herausragende Rolle. Der zeitliche Abfall der beobachteten Helligkeit verrät viele Eigenschaften des Binärs, in dem die Nova stattfand. Typische Helligkeitsanstiege bei Novae liegen zwischen 7 und 20 Größenklassen oder Magnituden. Die Astronomen unterscheiden je nach Geschwindigkeit, mit der die Helligkeit zunimmt

- **sehr langsame** (geringe Erhöhung der Helligkeit),

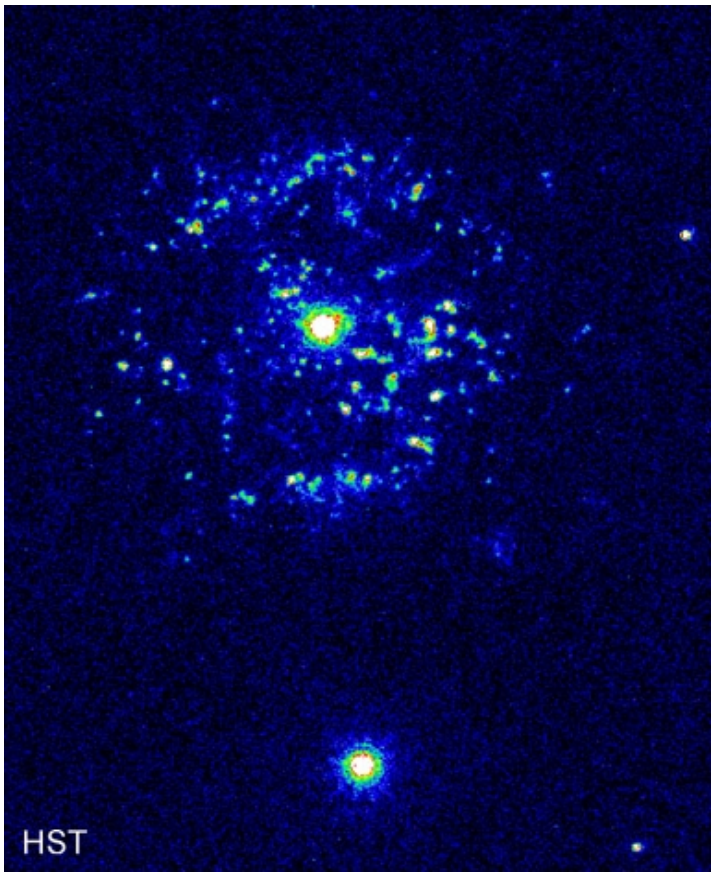

Abbildung 15.4: Nova T Pyxidis, beobachtet 1997 mit HST.

- ◇ **langsame** (Helligkeitsabnahme von drei Magnituden innerhalb von 100 Tagen),
- ◇ **schnelle** (Helligkeitsabnahme von mehr als drei Magnituden innerhalb von 100 Tagen)
- ◇ und **rekurrierende** (dt. *wiederkehrende*) Novae (einige Helligkeitsausbrüche pro Jahrhundert).

Der Energieoutput liegt bei etwa 10^{38} Joule oder 10^{45} erg. Dies ist deutlich kleiner (etwa um einen Faktor von einer Million) als bei Supernovae (Typ II), die typische Energien von 10^{51} erg ('1 foe') oder 10^{44} Joule freisetzen.

15.6.5 Ein Zwergenschicksal

Der Weiße Zwerg kann nicht beliebig viel Masse von seinem Begleiter aufnehmen. Überschreitet er durch den Massentransfer seine Chandrasekhar-Grenze (etwa 1.46 Sonnenmassen), so findet keine Nova, sondern eine **Supernova vom Typ Ia** statt. Der heiße Zwergstern überdauert dann nicht die heftige Explosion, sondern wird vollständig zerrissen.

15.6.6 Was unterscheidet Nova von Supernova?

Genau das ist der entscheidende Unterschied zwischen Nova und Supernova: Eine Nova kann von einem Stern mehrmals durchlaufen werden, weil der Stern die Explosionen, den Abstoß der Gashüllen überlebt. Eine Supernova löscht den Vorläuferstern aus (Typ Ia) oder bildet ein neues kompaktes Objekt (Typ II). Welches kompakte Objekt resultiert ist eine Frage der Restmasse des kollabierenden Sterns: Unterhalb von etwa 1.5 bis 1.8 Sonnenmassen (konservatives Limit bei 3 Sonnenmassen) bleibt ein Neutronenstern, oberhalb davon ein stellares Schwarzes Loch übrig. Es ist auch denkbar, dass nach der Supernova Typ II kein Relikt bleibt.

Der Unterschied von Nova zu Supernova erklärt auch die Beobachtungen: Novae sind mit etwa 50 Stück pro Jahr und Galaxie deutlich häufiger als Supernovae, die nur ein- bis viermal pro Jahr und Galaxie stattfinden.

15.7 Nukleon

Ein geeigneter deutscher Begriff für Nukleon ist Kernteilchen (lat. *nucleus*, dt. eigentlich '[Nuss-]Kern)'. Protonen und Neutronen sind die Teilchen, die sich im Atomkern befinden. Daher heißen sie *Nukleonen*. Das Proton unterscheidet sich vom Neutron durch die elektrische Ladung: das Proton hat die Elementarladung $+e$; das Neutron ist hingegen elektrisch neutral. Beide Nukleonen haben eine Substruktur und bestehen aus jeweils drei elektrisch geladenen Quarks. Durch deren drittelzahlige Ladungen ist es nun möglich Teilchen der Gesamtladung 0, $+e$, etc. zu kombinieren.

15.7.1 So verschieden sind Proton und Neutron nicht

Der Quantenphysiker Werner Heisenberg hat den Isospin als Quantenzahl vorgeschlagen, um Proton und Neutron einheitlich als Zustände eines Nukleons aufzufassen. Ist die dritte Komponente dieses Nukleons -1/2, so spricht man vom Neutron; ist er +1/2, so handelt es sich um das Proton (Vorzeichen können je nach Konvention auch umgekehrt zugeordnet werden). Siehe auch Kaonen.

15.8 Nukleosynthese

Allgemein bezeichnet Nukleosynthese die Bildung von Atomkernen (*Nuklei*) aus Kernteilchen (*Nukleonen*), also die Bindung von Protonen und Neutronen zu einem Kern eines bestimmten Elements im Periodensystem (PSE). Eine chemisches Element wird dabei ausschließlich von der Anzahl der Protonen bestimmt. Diese Anzahl heißt daher auch *Ordnungszahl* (weil sie die Elemente aufsteigend im PSE ordnet) oder *Kernladungszahl Z*. Unterschiedlich schwere Kerne desselben Elements heißen Isotope.

15.8.1 Was bindet Teilchen gleichnamiger Ladung zu einem Kern?

Die Protonen stoßen sich aufgrund ihrer gleichen elektrisch positiven Ladung untereinander durch elektromagnetische Kräfte (*Coulomb-Kraft*) ab. Dennoch können sie durch noch größere Kräfte gebunden werden: das sind gerade die Yukawa-Kraft und die starke Kraft. Diese Wechselwirkungen ermöglichen die Existenz von Atomkernen und Nukleonen und sind unabdingbare Voraussetzung für unsere facettenreiche Welt - für komplexe Moleküle, für Leben und letztendlich für Intelligenzen, die über Nukleosynthese nachdenken können.

15.8.2 Zwei Arten der Nukleosynthese

Generell unterscheidet man in der Astrophysik die **stellare Nukleosynthese** von der **primordialen Nukleosynthese**. Die stellare Nukleosynthese ist die Fusion von Atomkernen im Innern von Sternen; die primordiale Nukleosynthese ist die Fusion in einer Frühphase des heißen Universums. Beides soll nachfolgend kurz erläutert werden.

stellare Nukleosynthese

In der thermonuklearen Fusion im **Innern von Sternen** werden aus leichten schwere Atomkerne 'verschmolzen'. Genauer gesagt handelt es sich um physikalische Kernreaktionen, bei denen verschiedene Erhaltungssätze (für Energie, Impuls, Drehimpuls, Leptonenzahl tc.) gelten. So bilden sich aus leichten Elementen die schweren Elemente, was im Innern von Sternen bis zum Element Eisen (*Fe*) funktioniert. Elemente, die schwerer als Eisen sind, werden in Einfangprozessen von Protonen oder Neutronen und nicht mehr durch Fusionsprozesse erzeugt. Darunter fallen der s-Prozess, r-Prozess (beide Neutroneneinfang) und p-Prozess (Protoneneinfang). Die r- und p-Prozesse laufen in Sternexplosionen ab, den Supernovae. Der s-Prozess findet in schweren Sternen, den Roten Riesen und AGB-Sternen statt. Der Facettenreichtum an schweren Elementen (schwerer als Eisen), wie Silber, Gold, Platin, Quecksilber und Blei geht allein auf diese Mechanismen zurück.

primordiale Nukleosynthese

Nukleosynthese in der Kosmologie - die primordiale Nukleosynthese - meint eine Epoche in der Evolution des Kosmos, wo die ersten leichten Elemente erzeugt wurden. Es gab bis dato nur die Grundbausteine für Atomkerne und den einfachsten Atomkern, Wasserstoff, der einem einzelnen Proton entspricht. Das Universum war so klein und heiß, dass es selbst als **gigantischer Fusionsreaktor** fungierte. Die Zutaten zum Fusionsprozess, das primordiale Gas, bestand zunächst aus Hadronen, die in der Hadronen-Ära erzeugt wurden. Im frühen Universum war das Materiekonglomerat aus Leptonen, Hadronen und Photonen

allerdings deutlich weniger dicht als im Innern von Sternen. Deshalb erforderte die primordiale Nukleosynthese auch deutlich höhere Temperaturen, um effizient zu sein: Typischerweise liegen sie im Bereich von etwa 10^9 Kelvin, während im dichten Sterninneren bereits etwa 15 Millionen Kelvin ausreichen. Zeitlich ist die Nukleosynthese-Ära etwa **drei Minuten** nach dem Urknall einzuordnen.

Die thermonuklearen Fusionsprozesse im frühen Universum erzeugten nun die **primordialen Häufigkeiten** der Elemente. Es konnten nur die leichten Elemente (Atommassenzahlen $A = 2, 3, 4, 7$) fusioniert werden: schwerer Wasserstoff (*Deuterium* oder *H*-2), der im Atomkern ein Proton und ein Neutron hat; Helium (*He*-3 und *He*-4) und Spuren von Lithium (*Li*-7). Wasserstoffatomkerne in Form von Protonen lagen wie gesagt bereits vor der Fusion vor. Deshalb stellt Wasserstoff den größten Anteil am Urgas am Ende der Nukleosynthese-Ära. Bereits im Jahr 1946 hatte der Physiker *George Gamow* (1904 - 1968) theoretisch gezeigt, dass die primordiale Nukleosynthese im frühen Kosmos so stattgefunden haben muss, wie sie hier dargestellt wurde. Gamow war ein brillanter Vordenker: Er war es auch, der bereits 1948 die Temperatur der kosmischen Hintergrundstrahlung aus rein theoretischen Überlegungen heraus auf 5 Kelvin bezifferte; wie wir heute auf der Grundlage gesicherter Beobachtungen wissen, ist es eine Drei-Kelvin-Strahlung!

15.8.3 primordiale Nukleosynthese konsistent mit Hintergrundstrahlung

Die Anteile an baryonischer Materie, wie sie u. a. von Mikrowellendaten der kosmischen Hintergrundstrahlung (besonders von den Satelliten COBE, WMAP) gemessen werden, dienen als zu reproduzierende Größe in Simulationen, die von primordialen Häufigkeiten und einem umfangreichen Reaktionsnetzwerk ausgehen (z. B. *Coc et al.* 2004, astro-ph/0401008).

15.8.4 Buchempfehlung

- ◇ **Die ersten drei Minuten** von Teilchenphysiker und Nobelpreisträger *Steven Weinberg*

15.9 Nullgeodäte

Nullgeodäten sind die Bahnen des Lichts in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die Berechnung von Nullgeodäten ist erforderlich, wenn man daran interessiert ist, wie sich Photonen in einer gekrümmten Raumzeit ausbreiten. Damit sind z. B. Gravitationslinseneffekte zu berechnen. Eine numerische Methode, um die Bahnen vieler Lichtteilchen zu berechnen, heißt Ray Tracing. Siehe auch Geodäten.

16 Lexikon O

16.1 Öffnung

Öffnung ist auch ein Fachbegriff der Astronomie und bezeichnet den *Objektivdurchmesser*, also den Durchmesser desjenigen Teils eines Teleskops, der zum Himmel gewandt ist. Die Öffnung ist entscheidend für die **Lichtstärke** einer astronomischen Aufnahme. Auch das **Auflösungsvermögen** ist umgekehrt proportional zur Öffnung.

16.2 Olbers-Paradoxon

Eines der berühmten Paradoxa der Astronomie, benannt nach dem Arzt und Amateurastronomen *Wilhelm Olbers* (1758 - 1840).

16.2.1 Die Ausgangsfrage

Olbers stellte sich die Frage, warum der Nachthimmel eigentlich dunkel ist, wenn doch das unendlich große Universum angefüllt ist mit Abertausenden kosmischen Lichtquellen.

Das Paradoxe ist also, warum es auf der Nachtseite der Erde dunkel ist, obwohl sehr viele Sterne (die vielfach hintereinander stehen, wie das **Band der Milchstraße** belegt) und andere kosmische Quellen die Nachtseite der Erde beleuchten.

16.2.2 Erster Ansatz: Fehlschlag

Mit mehr mathematischem Aufwand für eine Begründung, könnte man darauf kommen, dass der Strahlungsstrom einer Quelle am Himmel mit dem Entfernungsquadrat abnimmt; allerdings nimmt ebenso die Zahl der Sterne (bei vorausgesetztem unendlichen, homogenen Universum) mit dem Entfernungsquadrat zu. Somit würde der Nettostrahlungsstrom gemessen auf der Erde konstant bleiben! Warum ist es nachts also nicht hell?

16.2.3 Die Auflösung

Die Lösung des Paradox besteht darin, dass die Ausbreitung des Sternenlichts mit extrem hoher, aber dennoch mit *endlicher* Geschwindigkeit, nämlich der Vakuumlichtgeschwindigkeit c von fast 300 000 km/s, geschieht. Die Konsequenz: Nicht das Licht **aller** kosmischen Quellen hat also die Erde bereits erreicht, seitdem sie entstanden sind bzw. seitdem sie emittieren. Die Strahlung ist noch unterwegs in den Weiten des Alls. Es gibt also einen Beobachtungshorizont: Nicht alle Objekte des Universums können *auf einmal* erfasst werden. Die beobachtete **Expansion des Universums** (Hubble-Effekt), getrieben durch die Dunkle Energie, schränkt die Beobachtung weiter ein. Denn durch die anhaltende Expansion entfernen sich entfernte Objekte von der Erde noch mehr, dadurch dass sie mit der expandierenden Raumzeit 'schwimmen'. Andererseits nimmt gleichermaßen der Beobachtungsradius zu, und zwar mit einer Lichtsekunde pro Sekunde bzw. einem Lichtjahr pro Jahr.

16.2.4 Rötung gibt es zwar, löst aber nicht das Paradoxon

Der oft angeführte Effekt der Extinktion reicht **nicht** als Erklärung aus. Durch Extinktion findet jedoch nur eine Verschiebung des Lichts im Spektrum statt, beispielsweise vom optischen Bereich in den infraroten oder Radiobereich. Die Strahlung der Sterne sollte also nach wie vor, jedoch nur in anderen Wellenlängenbereichen detektierbar sein: Es wäre für Detektoren, die einen größeren Spektralbereich abdecken, als das menschliche Auge, demnach trotz Extinktion 'hell'.

16.2.5 Fazit

Extinktion löst nicht das Olbers-Paradoxon! Das Paradoxon verschwindet bei der Berücksichtigung der Endlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht. Der Kern der Lösung ist also in Einsteins Spezieller Relativitätstheorie zu finden - die kannte *Wilhelm Olbers* freilich nicht.

16.3 O-Prozess

Der O-Prozess, meist eher **Sauerstoff-Brennen** genannt, ist ein wichtiger Mechanismus zur Energieumwandlung durch thermonukleare Fusion (siehe unter diesem Eintrag für Details) in mittelschweren bis schweren Sternen.

Das O bezieht sich auf das chemische Symbol des Elements Sauerstoff (engl. *oxygen*), das in Form des Isotops O-16 bei diesen Reaktionen fusioniert wird. Die 'Asche' dieser Prozesse sind im Wesentlichen Silizium (Si), Schwefel (S), Phosphor (P) und Magnesium (Mg).

16.4 Oppenheimer-Volkoff-Grenze

Die Oppenheimer-Volkoff-Grenze ist eine wichtige Grenzmasse in der Astrophysik kompakter Objekte. Die beiden Physiker *J.R. Oppenheimer* und *G.M. Volkoff* berechneten 1939 erstmals diese charakteristische Masse, indem sie ein **relativistisches, entartetes Fermionengas** betrachteten. Sie waren daran interessiert zu zeigen, wie schwer eine Ansammlung aus Neutronenmaterie werden kann, ohne im Gravitationskollaps zu einem kompakteren Objekt zu werden, z. B. zu einem Schwarzen Loch. In der Astrophysik ist die Oppenheimer-Volkoff-Grenze ein wesentliches Element bei der Untersuchung von Fermionensternen.

16.4.1 Quantendruck vs. Gravitationsdruck

Da Neutronen einen Spin 1/2 haben, gehören sie zur Teilchengruppe der Fermionen und unterliegen dem Pauli-Prinzip. Das unterscheidet sie grundsätzlich von den Bosonen. Der Entartungsdruck der Fermionen vermag dem Gravitationsdruck standzuhalten, allerdings nur unterhalb der Oppenheimer-Volkoff-Grenze.

16.4.2 Grenzmasse und Grenzradius im Oppenheimer-Volkoff-Modell

Bei der Entwicklung eines physikalischen Modells geht man ähnlich vor, wie bei der Betrachtung von **Bosonensternen**. Auch bei den Fermionen unterscheiden die Physiker, ob sie (über das Pauli-Prinzip hinaus) miteinander wechselwirken können oder nicht. Die

Oppenheimer-Volkoff-Grenze basiert auf *nicht wechselwirkenden Neutronen*. Eine numerische Berechnung liefert folgende Oppenheimer-Volkoff-Grenzmasse M_{OV} und zugehörigen Radius R_{OV} (entnommen aus *Bilic & Viollier* 1999):

$$M_{\mathrm{OV}} \simeq 0.7\,\mathrm{M}_{\odot} \left(\frac{1\,\mathrm{GeV}}{m}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{g}}$$
$$R_{\mathrm{OV}} \simeq 9.6\,\mathrm{km} \left(\frac{1\,\mathrm{GeV}}{m}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{g}}$$

wobei m die Fermionenmasse und g der *Entartungsfaktor der Fermionen* ist. Für Neutronen gilt $m = 939.565$ MeV ~ 1 GeV und $g = 2$. Die Gleichungen sind für Neutronen spezifiziert worden und zeigen, dass ein Neutronenstern im Oppenheimer-Volkoff-Modell **höchstens 0.7 Sonnenmassen** schwer werden kann und dabei einen **Sternradius von nur knapp 10 Kilometern** hätte.

Diese beiden Gleichungen eignen sich auch, um die Oppenheimer-Volkoff-Grenzen für völlig andere Fermionenspezies zu berechnen (siehe dazu Beispiele im Eintrag Fermionenstern).

16.4.3 Grenzen des Modells

Das fast 70 Jahre alte Oppenheimer-Volkoff-Modell war ein physikalische Glanzleistung - dennoch handelt es sich um ein sehr einfaches Modell: Erstens werden ausschließlich Neutronen und keine anderen Teilchenspezies wie z. B. Kaonen oder Hyperonen oder Übergange in andere Materiephasen wie z. B. dem Quark-Gluonen-Plasma betrachtet. Bei den hohen Dichten finden jedoch kernphysikalische Umwandlungsreaktionen, die eine solche Berücksichtigung erfordern. Zweitens werden Wechselwirkungen zwischen den Neutronen außer Acht gelassen - das wird jedoch gerade bei großen Dichten der kompakten Materie wichtig.

Modernere Modelle mit einer komplizierteren inneren Struktur werden im Eintrag Neutronenstern vorgestellt. Sie zeigen, dass realistische Maximalmassen von Neutronensternen **höher** sind als die Oppenheimer-Volkoff-Grenze, etwa zwischen 1.5 und 3.2 Sonnenmassen. Das deckt sich auch mit den astronomischen Beobachtungen, denn Neutronensterne oberhalb der Oppenheimer-Volkoff-Masse wurden bereits entdeckt..

16.4.4 wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ Pionierarbeit: *Oppenheimer, J.R. & Volkoff, G.M.*: On Massive Neutron Cores, Phys. Rev. 55, 374, 1939
- ◇ *Bilic, N. & Viollier, R.D.*: Gravitational Phase Transition of Fermionic Matter in a General-Relativistic Framework, Eur. Phys. J. C11, 173, 1999; Preprint: hep-ph/9809563

16.5 optische Tiefe

Die optische Tiefe ist eine bedeutsame Größe in der **Strahlungsphysik**. Bei der Wechselwirkung von Strahlung mit Materie kommt es zur Streuung, Absorption, Emission und ggf. Reabsorption sowie Reemission.

Die Details sind von genereller Wichtigkeit in der Astronomie, um die kosmischen Quellen zu verstehen und die Beobachtung beurteilen zu können.

16.5.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Betrachtet man eine elektromagnetische Welle, die sich durch eine Materieschicht fortpflanzt, so verändert sich im Allgemeinen dabei ihre Strahlungsintensität und Richtung. Die Strahlung kann von der Schicht total absorbiert, gestreut, reemittiert, durchgelassen (*transmittiert*) oder polarisiert werden. Eine Sonnenbrille ist nichts anderes als ein Polarisationsfilter, der eine bestimmte Polarisationsrichtung des Lichts ausblendet und damit insgesamt die Intensität für unsere Augen angenehm schwächt.

16.5.2 Verschlucken von Licht

Die optische Tiefe eignet sich, um die Lichtdurchlässigkeit - oder eleganter formuliert das *Transmissionsvermögen* - einer Schicht zu charakterisieren. Eine weitere wichtige Größe der Strahlungsphysik, die damit zusammenhängt, ist der **Absorptionskoeffizient** (in der Regel mit α bezeichnet). Im Allgemeinen ist er wellenlängenabhängig, weil die Farbe des Lichts/die Energie der Strahlung über die Stärke der Absorption entscheidet. Darüber hinaus hängt es natürlich von jeweiligen Strahlungsprozess ab: Absorption verhält sich bei thermischer Strahlung (Wärmestrahlung) anders, als z. B. bei Bremsstrahlung oder Synchrotronstrahlung.

16.5.3 Aufsummieren liefert optische Tiefe

Ist der Absorptionskoeffizient aus der Theorie der Strahlungsphysik bekannt, so ergibt sich die optische Tiefe aus dem Wegintegral über diesen Absorptionskoeffizient. Anschaulich gesagt summiert man über den Weg des Strahls durch das Medium, wo die Absorption stattfindet. Salopp formuliert, geht vorne eine Strahl bestimmter Intensität, Energie und Richtung in die Schicht hinein und kommt mit in der Regel anderer Intensität, Energie und Richtung heraus. Die Astrophysiker nennen das **Strahlungstransport**.

16.5.4 Beispiel Sonne

Genau das geschieht im Innern der Sonne: Im Kern der Sonne entstehen aus der thermonuklearen Fusion solare Photonen. Diese müssen sich nun einen Weg nach außen durch das dichte Sonnenplasma bahnen, werden gestreut, absorbiert und verlassen schließlich am Sonnenrand, der Photosphäre, die Sonne.

16.5.5 Zusammen gehen wir durch optisch dick und optisch dünn

Die aus dem Absorptionskoeffizient errechnete optische Tiefe wird üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben τ bezeichnet. Für das jeweilige Strahlungsproblem wird die optische Tiefe - für Strahlung einer bestimmten Wellenlänge - diskutiert. Ist sie viel kleiner als 1, sprechen Astronomen von einer *optisch dünnen* Schicht mit guten Transmissionseigenschaften. Ist die optische Tiefe hingegen vergleichbar mit 1 oder gar viel größer, so bezeichnen die Astronomen die Schicht als *optisch dick*. Die Transmissionseigenschaften sind in diesem Fall schlecht und können dazu führen, dass die Strahlung von der Schicht 'verschluckt' wird.

In der theoretischen Astrophysik werden auch Akkretionsflüsse auf ihre Transmissionsfähigkeit untersucht. Das ist relevant bei der damit assoziierten Strahlungsphysik. So sind beispielsweise Standardscheiben optisch dick, ADAFs hingegen (in der Regel) optisch dünn.

16.5.6 Schlimme Lichtschlucker: Dunkelwolken

Starke Absorber in der Astronomie sind z. B. die **Dunkelwolken** in Sternentstehungsregionen. Man gibt ihr Absorptionsvermögen, die so genannte Extinktion, in Magnituden ($^{\mathrm{mag}}$) an (siehe auch Helligkeit). Dunkelwolken erreichen typischerweise Extinktionen von 20^{mag}! Das erklärt, weshalb Protosterne von den kalten, dunklen Molekülwolken zumindest im Bereich optischer Wellenlängen vollständig verhüllt werden. Astronomen weichen aus diesem Grund auf die energieärmere Infrarotstrahlung aus, um in die Dunkelwolken Einblicke zu bekommen.

Ein irdisches Beispiel hoher Extinktion ist Nebel. Die fein verteilten Wassertröpfchen lassen sichtbares Licht nicht mehr durch.

16.5.7 Olbers-Paradoxon

Das Olbers-Paradoxon wird allerdings nicht durch die Rötung der Strahlung gelöst, sondern durch die Relativitätstheorie. Unter dem Eintrag Extinktion befindet sich das Foto einer berühmten Dunkelwolke: des *Pferdekopfnebels* im Sternbild *Orion*.

16.5.8 Buchempfehlung

- ◇ Standardwerk der Strahlungsphysik in der Astronomie: **Radiative Processes in Astrophysics** von *Rybicki* & *Lightman* (1979)

16.6 Orthogonalität

Orthogonalität, Spezialität und Unitarität sind bestimmte Eigenschaften von Transformationsmatrizen - oder allgemeiner gesprochen von Operatoren.

16.6.1 Motivation

Operatoren sind besonders relevant in der Quantentheorie, weil sie dort in Form von Operatorgleichungen Quantensysteme beschreiben.

Transformationen können Gruppen oder Symmetriegruppen bilden und sind dann besonders wichtig in der Gruppentheorie der Physik, wie sie besonders in der Teilchenphysik angewandt wird.

16.6.2 Was ist nun Orthogonalität?

Die Eigenschaft Orthogonalität heißt im mathematischer Symbolik:

$$O^T = O^{-1}.$$

Sie besagt: Falls das Transponierte (hoch gestelltes T) der quadratischen Matrix O gleich dem Inversen (hoch gestellte -1) der Matrix entspricht, so heißt die Matrix O orthogonal.

Eine $m \times n$-Matrix ist eine Anordnung von m Spalten und n Zeilen. Ist $m = n$ so heißt die Matrix quadratisch. Transponieren ist eine Matrixoperation, bei der man Spalten und Zeilen miteinander vertauscht. In der Matrizenrechnung ist genau definiert, wie man Matrizen miteinander multipliziert. Die inverse Matrix O^{-1} ist hier gerade diejenige Matrix,

die multipliziert mit der gegebenen Matrix O die Einheitsmatrix ergibt. Die Einheitsmatrix hat auf der Hauptdiagonalen 1 stehen und sonst nur 0.

17 Lexikon P

17.1 Paradoxon

Paradox ist, wenn Herr Braun - um dem grauen Alltag zu entfliehen - blau macht um ins Grüne zu fahren. Sein Chef sieht rot, weil er nicht zur Arbeit erscheint, daher sieht Herr Braun die Welt nicht mehr durch eine rosa Brille, sondern für seine berufliche Zukunft schwarz. Jetzt weiß er's.

17.1.1 Jetzt mal im Ernst...

Paradoxa in der Physik sind Aussagen, die auf einen Widerspruch hinauslaufen, der nicht ohne weiteres auflösbar scheint.

Olbers-Paradoxon

So beschreibt das Olbers-Paradoxon in der Astronomie die Problematik, dass der Nachthimmel schwarz ist, obwohl doch das Licht sämtlicher Sterne, die dicht beieinander und hintereinander stehen, in der Summe einen hellen Himmel auch in der Nacht hervorrufen sollten. Dieses Paradoxon löst sich, wenn man berücksichtigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes zwar sehr hoch, aber doch endlich ist, so dass das Licht einiger Quellen **noch nicht** die Erde erreicht hat. Die **interstellare Extinktion** ruft durch das interstellare Medium (ISM) eine *Rötung* des Sternenlichts hervor. Beim Durchgang durch besonders dichte, fast opake **Dunkelwolken** ist die Extinktion zwar besonders hoch und kann zehn bis zwanzig Magnituden betragen! Das allein würde allerdings das Olbers-Paradoxon jedoch nicht lösen, weil in der Bilanz dennoch die Strahlung - bei anderen Farben - ankommen würde.

Zwillingsparadoxon

Ein anderes Paradox, das Zwillingsparadoxon, wird gerne in der Science-Fiction bemüht und hängt damit zusammen, dass aufgrund relativistischer Effekte der Zeitablauf verändert werden kann. Der Effekt heißt Zeitdilatation und kann mit den Methoden der Relativitätstheorie betrachtet werden. Das Paradoxe ist, dass die Zwillinge scheinbar austauschbar sind - aber wer ist dann der Ältere? Bei genauer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die Zwillinge bzw. ihre Bezugssysteme **nicht** austauschbar sind: das System des reisenden Zwillings ist nicht immer ein Inertialsystem. Einzelheiten werden unter dem Eintrag Zwillingsparadoxon beschrieben.

Informationsverlustparadoxon

In der Physik Schwarzer Löcher taucht das Informationsverlustparadoxon oder auch Entropie-Paradox auf. Es behandelt die Frage, was eigentlich mit der **Information** geschieht, die in ein Schwarzes Loch fällt. Denn was nach dem Einfall bleibt, sind nur maximal die Parameter:

Masse, Rotation und elektrische Ladung. Was ist mit der großen Informationsmenge passiert, die ins Loch fiel? Wurde sie vernichtet oder bleibt die Information in irgendeiner Form im Loch erhalten oder wird beispielsweise kodiert in der Hawking-Strahlung abgestrahlt? Die Lösung ist, dass Information aufgrund des Entropiesatzes der Thermodynamik nicht vernichtet werden kann; Information bleibt erhalten, so wie es die Quantentheorie fordert. Allerdings ist die Rekonstruktion aller Information erschwert. Dieses Paradoxon wird im Detail im Eintrag Bekenstein-Hawking-Entropie geklärt.

17.2 Paralleluniversum

Dieser schon oft in der Science-Fiction-Literatur bemühte Begriff, meint ein Universum oder viele Universen, die neben dem Unsrigen koexistieren könnten. Die sich ergebende Ansammlung von Universen nennt man auch **Multiversum**. Natürlich ist diese Hypothese sehr spekulativ, aber es gibt einige Szenarien in der modernen Kosmologie, die diese Möglichkeit in Erwägung ziehen.

17.2.1 Anregung durch die Quantentheorie

Die Vorstellung von Paralleluniversen ist schon älter und geht auf die **Wahrscheinlichkeitsaussagen der Quantentheorie** ('Schrödingers Katze') zurück: Quantenphysikalische Zustände werden mit der Wellenfunktion (Ψ, 'Psi') beschrieben. Das Betragsquadrat dieser Wellenfunktion kann gerade so interpretiert werden, dass sie eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit für einen Zustand angibt. Beschreibt die Wellenfunktion ein Teilchen, so ist das Absolutquadrat der Wellenfunktion eine Wahrscheinlichkeitsverteilung dafür, das Teilchen an einem bestimmten Ort anzutreffen. Dort, wo die Wahrscheinlichkeitsverteilung ihr Maximum annimmt, besteht die höchste Wahrscheinlichkeit, das assoziierte Teilchen anzutreffen. Im *Orbital-Atommodell* sind die Orbitale gerade dreidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Elektronen, die in der Atomschale den Kern umhüllen.

17.2.2 Rolle des quantenmechanischen Messprozesses

Der Zusammenhang zwischen **Wellenfunktion und Messprozess** wurde mit der Kopenhagener Deutung erklärt (*Max Born* 1925/26): Im Moment der Messung 'kollabiert' die Wellenfunktion auf einen bestimmten Zustand, derjenige der in Form der *Observable* beobachtet wird. 'Schrödingers Katze' wird tot oder lebendig aufgefunden.

17.2.3 Viele Welten

Die Viele-Welten-Theorie (*H. Everett* 1957) erweitert diese Sichtweise: Alle möglichen Zustände seien auch realisiert. Jede Realisierung existiere in ihrer eigenen Welt, ihrem eigenen Universum. In dem einen Universum ist 'Schrödingers Katze' tot, in dem anderen lebt sie.

Beflügelt durch diese Vorstellungen des '*Alles ist möglich, wahrscheinlich und irgendwo auch realisiert.*', gipfelte dies in einer nicht verschwindenden Wahrscheinlichkeit für ein koexistentes Paralleluniversum.

Eine präzisere Formulierung erhielt das Auftreten von Paralleluniversen in der Quantenkosmologie. In dieser Theorie wurde der Quantisierungsapparat, der bisher auf

Teilchen angewendet wurde, auf das Universum als Ganzes übertragen. Dieser Formalismus mündet in Wellenfunktionen für ein Universum und in der Möglichkeit ganze Universen mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren zu erzeugen bzw. zu vernichten. Der Vakuumzustand - 'kein Universum' - wird **void** genannt. Angeregte Zustände sind **Baby-Universen**. In Form eines Quantenschaums könnten viele Baby-Universen koexistieren. Auf der Quantenskala könnten sich einzelne **makroskopische Universen** gebildet haben, weil sie durch Inflation aus den Baby-Universen hervor gingen.

17.2.4 andere Branenwelten

Eine zweite Vorstellung, die den Terminus *Paralleluniversum* rechtfertigen würde, ist das Ekpyrotische Szenario von *Steinhardt & Turok* (2001). Sie verwenden den Branenformalismus der Stringtheorien und hatten die Idee, dass das durch Beobachtung nahe gelegte Urknall-Modell die Folge einer **Kollision zweier Universen** gewesen sei - nämlich unseres Universums und eines Paralleluniversums. In dieser 'Weltenkollision' (*Branenkollision*) hätten sich beide Universen komplett reorganisiert und restrukturiert. Die Stringtheorien erlauben bei einer Existenz von Extradimensionen neben den klassischen vier Dimensionen, dass die beiden Universen sogar in einer Extradimension sehr nah beieinander sind: Der 'kosmische Nachbar' könnte auf der Planck-Skala entfernt sein, also nur etwa 10^{-35} m!

Die avantgardistischen Kosmologie von *Steinhardt et al.* geht noch weiter und spekuliert über eine zyklische Wiederholung des Ekpyrotischen Szenarios. Dieses Zyklische Universum wird durch ein fluktuierendes Skalarfeld, das Radion, geleistet. Dieses Feld solle sich im Universum als Dunkle Energie manifestieren. Die Existenz Dunkler Energie wird von der Beobachtung (WMAP) gestützt. Sie macht sogar nach den aktuellen Messungen 74% aller Energieformen im Universum aus. Damit dominiert sie die Kosmodynamik zu späten Entwicklungsphasen des Universums und treibt die Expansion des Universums. Aktuell erhärten Permanenzmessungen der Dunklen Energie an Supernovae vom Typ Ia eher die kosmologische Konstante (Λ) als das Radion-Feld: die Beobachtungsdaten bevorzugen Λ als zeitlich konstante Form Dunkler Energie gegenüber zeitlich variablen Dunklen Energien - und das Radion ist zeitlich variabel. Andere solche als Quintessenzen bezeichnete Arten variabler Dunkler Energie sind topologische Defekte oder auch die Phantom-Energie.

17.2.5 Gibt es ein oder mehrere Paralleluniversen?

Abschließend lässt sich zum Thema *Paralleluniversum* sagen: Die Richtigkeit solcher Spekulationen, den Sprung vom Reißbrett der Theorie in die Natur, muss das Experiment bzw. die Beobachtung erweisen. Bislang ist es nicht gelungen Paralleluniversen nachzuweisen. Bis das geschieht müssen diese Szenarien unter dem Etikett **hypothetische, avantgardistische Kosmologie** laufen. Zumindest haben Kosmologen eine theoretische Vorstellung vom **Multiversum**, eine Hypothese, die geprüft werden kann.

17.3 Parsec

Dies ist eine äußerst gebräuchliche Entfernungseinheit in der Astronomie. Parsec ist die Kurzform von Parallaxensekunde und wird mit *pc* abgekürzt. *Parsec* ist ein zusammengesetztes Wort aus *Parallaxe* und *Sekunde*. Sie ist definiert als der Abstand, unter dem der Abstand von der Erde zur Sonne im Winkel von *einer* Bogensekunde erscheint.

Dabei beträgt der mittlere Abstand Erde-Sonne im Mittel etwa 150 Millionen Kilometern - das ist gerade eine Astronomische Einheit (engl. *astronomical unit*, **AU**). Rechnet man diese geometrische Definition mittels Trigonometrie nach, so erhält man:

$$1\,\mathrm{pc} = 3.09 \times 10^{16}\,\mathrm{m} = 206264.8\,\mathrm{AU} = 3.26\,\mathrm{Lichtjahre} \tag{17.1}$$

Parsec ist gerade in der Profi-Astronomie sehr gebräuchlich und wird dort sogar häufiger verwendet, als das bekanntere Entfernungsmaß Lichtjahr. Die Einheit *pc* bekommt oft folgende Präfixe, um Zehnerpotenzen von Parsec auszudrücken:

- ◇ 1 kpc = 1000 pc,
- ◇ 1 Mpc = 10^6 pc,
- ◇ 1 Gpc = 10^9 pc.

17.4 partielle Ableitung

Eine Differentialoperation, die es in der Mathematik in der Infinitesimalrechnung mehrerer Veränderlicher gibt und die auch in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) und Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) auf Tensoren angewendet wird.

$$\partial_\nu X^\mu \equiv X^\mu{}_{,\nu} = \frac{\partial X^\mu}{\partial x^\nu}$$

17.4.1 Anwendung auf Tensoren

Das Ergebnis der partiellen Ableitung eines Tensors ist kein Tensor mehr, wie man anhand der Transformationsgesetze eines Tensors nachweist! Man sagt daher:

*Die partielle Ableitung ist nicht **tensoriell**.*

17.4.2 Unterschied zur kovarianten Ableitung

Die partielle Ableitung ist immer mindestens in einem Term bei der kovarianten Ableitung enthalten. Die kovariante Ableitung eines Skalars (Tensor mit Typ (0,0)) ist identisch mit seiner partiellen Ableitung.

17.4.3 konkrete Berechnung

Praktisch geht man bei der partiellen Ableitung so vor, dass man die betreffende Größe wie gewohnt nach der Variable im Nenner ableitet, wobei *alle anderen Variablen konstant* gehalten werden.

17.4.4 Von der SRT zur ART: $\partial_\mu \to \nabla_\mu$

Die Gleichungen der SRT enthalten vielfach partielle Ableitungen. In der Regel kann man formal den Übergang zur ART vollziehen, indem man die partiellen Ableitungen (symbolisiert mit ∂) durch kovariante Ableitungen (symbolisiert mit ∇) ersetzt. Anhand der Definition der kovarianten Ableitung (siehe unter dem Eintrag dort) wird klar, warum das so ist: die

kovariante Ableitung enthält neben der partiellen Ableitung einen weiteren Term, der von den Christoffel-Symbolen ('Ableitungen der Metrik') abhängt. In der SRT, die auf einer flachen Raumzeit, der Minkowski-Metrik, basiert, verschwinden gerade diese Christoffel-Symbole. In der gekrümmten Raumzeit der ART verschwinden sie nicht mehr und müssen berücksichtigt werden.

17.5 Pauli-Prinzip

Ein nach dem österreichischen Quantenphysiker *Wolfgang Pauli* benanntes Verbot, das exklusiv für Fermionen (aber nicht für Bosonen) gilt. Es besagt, dass Fermionen nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen, also nicht denselben quantenmechanischen Zustand besetzen dürfen. Dieses Prinzip ist von hoher Relevanz für den Aufbau der Materie und erklärt quantentheoretisch das **Periodensystem der Elemente**, also die Quantenphysik der Elektronenhülle im Atom.

17.5.1 kein Verbot für Bosonen

Weil Bosonen diesem Verbot nicht unterliegen, können sie bei tiefen Temperaturen denselben Zustand besetzen: Es bildet sich dann ein **Bose-Einstein-Kondensat**. Siehe dazu auch Spin sowie Spin-Statistik-Theorem.

17.6 Penrose-Diagramm

Penrose-Diagramme, die in kompletter Bezeichnung eigentlich *Carter-Penrose-Diagramme* heiß sind unerlässliche Werkzeuge, um in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) die **Struktur einer Raumzeit im Unendlichen**, insbesondere ihre **kausale Struktur**, zu untersuchen.

17.6.1 Die Grundidee

Diese Technik wurde vom brillanten Mathematiker und Relativisten *Roger Penrose* 1964/65 entwickelt. Dabei dient eine spezielle mathematische Operation, die konforme Transformation, dazu, um sich eine konforme Metrik aus der zu untersuchenden Raumzeit zu beschaffen. Die Eigenschaften der Metriken sind aufgrund der Konformität übertragbar.

17.6.2 konforme Transformation

Das Penrose-Diagramm ist dann im Prinzip ein *Raumzeit-Diagramm* der **konform kompaktifizierten Raumzeit**. Das klingt komplizierter, als es ist: Kompaktifizierung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass eine unendlich ausgedehnte, physikalische Raumzeit auf eine 'unphysikalische' Raumzeit in ein endliches Gebiet transformiert wird. Bei der Transformation bildet man vereinfacht gesagt unendliche Intervalle auf endliche Intervalle ab.

17.6.3 Wie geht's weiter?

Penrose-Diagramme werden studiert, indem man den Verlauf von Teilchenbahnen verfolgt: wo beginnen sie, wo enden sie? Diese Bahnen nennt man in der ART **Geodäten**. Die Relativitätstheoretiker unterscheiden *zeitartige Geodäten*, denen Teilchen und Beobachter mit endlicher Ruhemasse folgen; Nullgeodäten, die von elektromagnetischer Strahlung (Photonen, die Lichtquanten, haben verschwindende Ruhemasse) genommen werden und *raumartige Geodäten*, die 'unphysikalisch' bzw. tachyonisch sind, weil sie die Kausalität verletzen. Diese Geodäten werden in das Penrose-Diagramm eingezeichnet, um zu verstehen, wie sich die Teilchen in der Raumzeit bewegen.

17.6.4 verschiedene Unendlichkeiten

Die *Nomenklatur in Penrose-Diagrammen* ordnet bestimmten Punkten und Flächen im Diagramm ein Symbol zu. Sie sind assoziiert mit unterschiedlichen *Typen von Unendlichkeiten*:

- ◇ Die *vergangene zeitartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Zeitkoordinate gegen negativ unendlich geht, während die Raumkoordinate endlich bleibt. Hier beginnen zeitartige Geodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index - gekennzeichnet.

- ◇ Die *zukünftige zeitartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Zeitkoordinate gegen positiv unendlich geht, während die Raumkoordinate endlich bleibt. Hier enden zeitartige Geodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index + gekennzeichnet.

- ◇ Die *raumartige Unendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Raumkoordinate gegen positiv unendlich geht, während die Zeitkoordinate endlich bleibt. Bis hier erstrecken sich raumartige Flächen. In der Symbolik wird dies mit einem großen oder kleinen Buchstaben i mit Index 0 gekennzeichnet.

Diese bisher genannten Unendlichkeiten treten typischerweise als **Punkte** in Penrose-Diagrammen in Erscheinung, weil höhere Dimensionen oft aus Gründen der Überschaubarkeit unterdrückt werden.

Daneben gibt es auch Gebiete, die in Penrose-Diagrammen wie **Kanten** aussehen und an sich Flächen sind. Sie werden mit einem besonderem Symbol versehen: dem großen **Skript-I**. Relativisten sprechen es wie '*skrai*' aus, was ein Neologismus ist, der aus der phonetischen Verkürzung für die englische Bezeichnung 'script i' folgt.

17.6.5 Noch mehr Unendlichkeiten

- ◇ Die *vergangene Nullunendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Differenz t - r gegen negativ unendlich geht, aber die Summe $t + r$ endlich bleibt. Von hier aus kommen Nullgeodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen Skript-I mit Index - (gesprochen 'skrai minus') gekennzeichnet.

- ◇ Die *zukünftige Nullunendlichkeit* ist ein Gebiet, wo die Summe $t + r$ gegen positiv unendlich geht, aber die Differenz t - r endlich bleibt. In diese Gebiete erstrecken sich

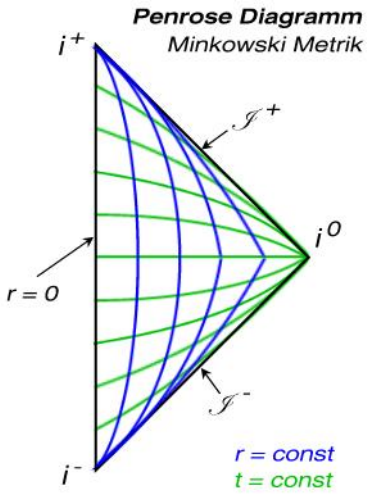

Abbildung 17.1: Penrose-Diagramm der Minkowski-Raumzeit.

auslaufende Nullgeodäten. In der Symbolik wird dies mit einem großen Skript-I mit Index + (gesprochen 'skrai plus') gekennzeichnet.

17.6.6 Transformation mit Tangens

Die konforme Transformation wird häufig mit der trigonometrischen Tangensfunktion umgesetzt. Der Tangens bildet endliche auf unendliche Intervalle ab, seine Umkehrfunktion macht entsprechend die inverse Transformation.

17.6.7 Beispiel 1: Minkowski-Metrik

Ein einfaches Beispiel für ein Penrose-Diagramm ist die flache Minkowski-Metrik der Speziellen Relativitätstheorie (Abbildung 17.1, zwei Dimensionen wurden unterdrückt!). Man kann das Minkowski-Linienelement sowohl in kartesischen, als auch in sphärischen Koordinaten ausdrücken. Auf der linken Kante, der Zeitachse, verschwindet die Radialkoordinate, $r = 0$. Man muss sich das Penrose-Diagramm um diese Achse rotiert vorstellen, um die beiden anderen, unterdrückten Dimensionen (ϕ, θ) zu erhalten. In der Abbildung sind außerdem Linien konstanten Radius und konstanter Zeit eingetragen. Die zeitartigen Geodäten verlaufen von unten, $\mathbf{i}^-$, nach oben, $\mathbf{i}^+$. Die raumartige Unendlichkeit befindet sich rechts, $\mathbf{i}^0$. Radiale Nullgeodäten bilden einen Winkel von 45° mit der Vertikalen (einlaufend -45°, oben; auslaufend +45°, unten).

*An dieser Winkelstellung von 45° kann man **immer** Nullgeodäten in Penrose-Diagrammen erkennen.*

17.6.8 Beispiel 2: kollabierender Kugelstern

Ein weiteres Beispiel ist ein (idealisierter) sphärisch symmetrischer Gravitationskollaps eines massereichen Sterns zu einem stellaren Schwarzen Loch – gezeigt in Penrose-Diagramm 17.2.

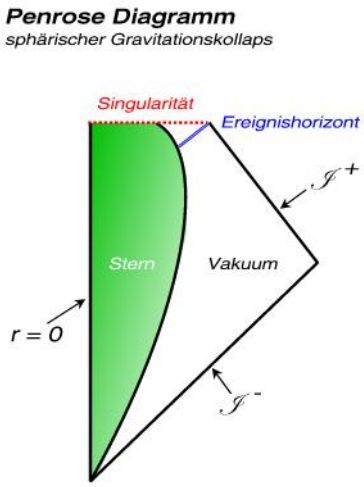

Abbildung 17.2: Penrose-Diagramm eines kugelsymmetrischen Gravitationskollapses.

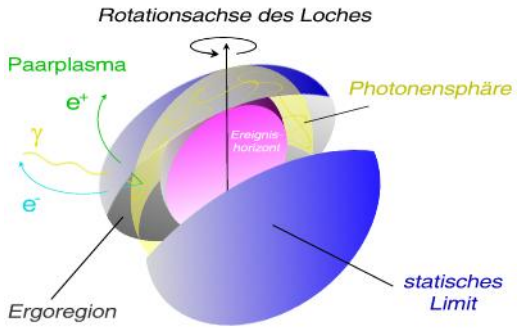

Abbildung 17.3: Penrose Paarbildung in der Ergosphäre.

Wiederum schließen die Nullgeodäten einen halben rechten Winkel mit der Vertikalen ein und markieren die Kanten der vergangenen (unten) und zukünftigen (oben) Nullunendlichkeit. Der Stern kollabiert und schrumpft immer mehr, bis sich der Ereignishorizont (blau) abschnürt. Er umschließt die intrinsische Singularität (rot), hier vom Schwarzschild-Typ. Das Gebiet zwischen roter und blauer Linie heißt *eingefangene Fläche* (engl. *trapped surface*).

17.6.9 Beispiel 3: Wurmloch

Das Penrose-Diagramm der Schwarzschild-Geometrie folgt durch Transformation auf *Kruskal-Szekeres-Koordinaten*. In diesem Diagramm (hier nicht gezeigt) erkennt man sehr gut die beiden Seiten des Wurmlochs, die durch die Einstein-Rosen-Brücke miteinander verbunden sind.

17.7 Penrose-Prozess

Der Relativist *Roger Penrose* hat darauf hingewiesen, dass es möglich sein könnte, aus einem rotierenden Schwarzen Loch Energie, genauer gesagt *Rotationsenergie*, zu gewinnen. Dieser Vorgang wird *Penrose-Prozess* genannt.

17.7.1 Wie kann das gehen?

Rotierende Schwarze Löcher werden in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie durch die Kerr-Metrik beschrieben. Diese Raumzeit hat eine einzigartige Eigenschaft: sie besitzt eine Ergosphäre, die eine besonders schnelle Rotation des Raumes markiert. Penrose hatte sich nun das Gedankenexperiment ausgedacht, dass Teilchen in die Ergosphäre geschossen werden. Dort sollte jedes Teilchen in zwei Teile zerfallen, z. B. infolge eines radioaktiven Zerfalls: ein Teil fällt in das Schwarze Loch, der andere entweicht aus der Ergosphäre in den Außenraum. Die Situation zeigt Grafik 17.3.

Die Rechnungen zeigen nun, dass die ausströmende Materie **mehr Energie** haben kann als die eingefallene! Dies geschieht dadurch, dass das rotierende Schwarze Loch Drehimpuls verlieren kann, um ihn auf das entkommene Teilchen zu übertragen. Anders gesagt: **Das Loch verliert Rotationsenergie.** Die Energiegewinnung aus Kerr-Löchern scheint damit theoretisch möglich zu sein.

17.7.2 klassischer Penrose-Prozess

Im **klassischen Penrose-Prozess** (*Penrose et al.*, 1969) nehmen retrograd rotierende Teilchen (gegenläufige Rotation im Vergleich zum Kerr-Loch) in der Ergosphäre Zustände **negativer Energie** an, gemessen von einem Beobachter im Unendlichen. Allerdings können diese Teilchen nicht direkt ins Unendliche entkommen und dem System Energie entnehmen. Jedoch kann durch Streuprozesse zwischen zwei Teilchen in der Ergosphäre eines einen retrograden Orbit und damit negative Energie erhalten, während das andere seine Energie bekommt und forttragen kann.

17.7.3 PPP: Penrose-Paarbildung

Ein besonderes Szenario unter den Penrose-Prozessen ist die *Penrose-Paarbildung* (engl. *Penrose pair production*, **PPP**). Hier geht man davon aus, dass Photonen, die in der Photonensphäre gefangen sind, mit Photonen, die auf radialen Geodäten einlaufen kollidieren. Wie diese Reaktionsgleichung darstellt

$$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-,$$

kann bei dieser Kollision ein Paarplasma aus Elektronen und Positronen erzeugt werden. Typischerweise wird angenommen, dass die Photonen im Orbit Energien im Bereich von MeV bis GeV haben, während das einlaufende Photon nur etwa 10 keV haben muss. Das würde nach $E = mc^2$ ausreichen, um aus hochenergetischem Licht leptonische Materie zu erzeugen.

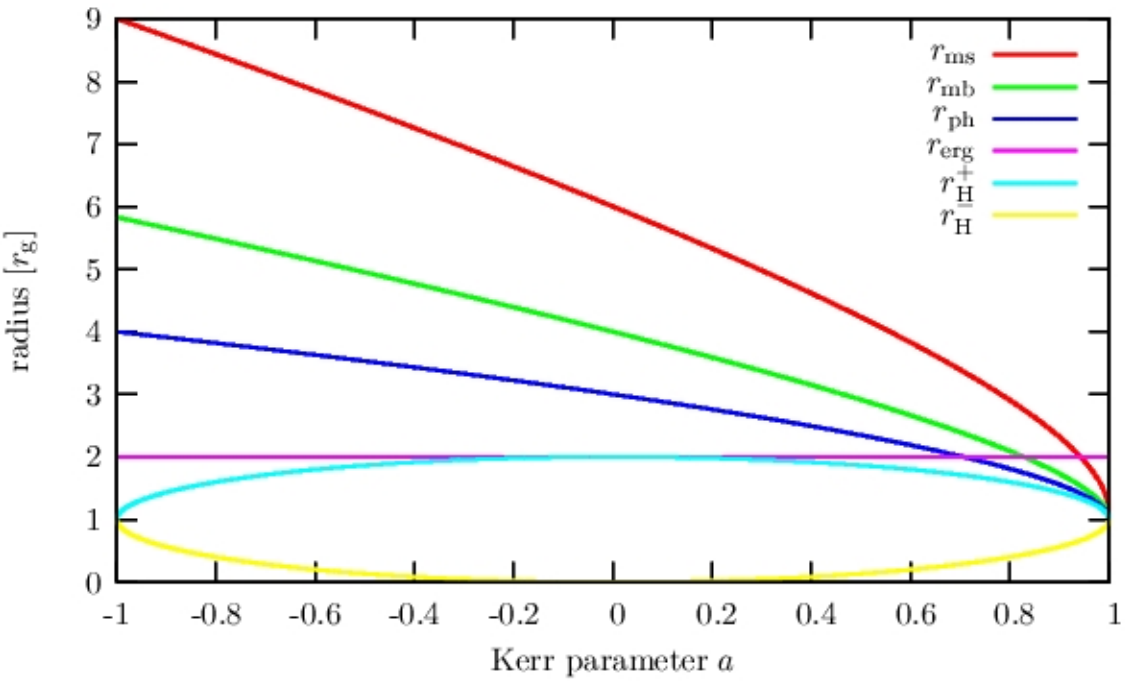

Abbildung 17.4: charakteristische Radien eines Schwarzen Loches.

17.7.4 Jetentstehung durch Gravitomagnetismus

Die Ergosphäre als Gebiet zwischen statischem Limit, r_{stat}, und Ereignishorizont erlangt erst bei hohen Rotationen eine signifikante Größe. Im Schwarzschild-Fall gibt es keine Ergosphäre und keine rotierende Raumzeit: diese Raumzeit ist statisch. Eine Darstellung aller charakteristischer Radien (siehe Diagramm 17.4) bei Schwarzen Löchern zeigt, dass der Photonenorbit erst bei einer Rotation von $a \sim 0.7M$ in die Ergosphäre eintaucht. In der Ergosphäre gibt es dann allgemein relativistische Effekte wie Frame-Dragging bzw. Lense-Thirring-Effekt - dort werden sie besonders stark. Das *gravitomagnetische Feld* stellt eine **gravitomagnetische Kraft** (als Pendant zur Lorentz-Kraft im magnetischen Feld) bereit, die vor allem nicht-äquatoriale Teilchenbahnen beeinflusst: sie werden zur *Lense-Thirring-Präzession* veranlasst. Insbesondere kann diese gravitomagnetische Wechselwirkung zu **einseitigen Jets** führen, wie man sie in vielen Quasaren und anderen Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) beobachtet. Denn die gravitomagnetische Kraft zieht vorzugsweise die Teilchen mit der Rotationsrichtung des Kerr-Loches mit. Dies bricht also die Reflexionssymmetrie zwischen oberer und unterer Hemisphäre. Damit kann die Einseitigkeit von Jets nicht nur auf Beaming infolge des Doppler-Effekts bei entsprechender Orientierung zurückgeführt werden, sondern auch gravitomagnetische Effekte. Eine gute Darstellung dieses Modells findet sich bei *R.K. Williams* 2002/2003, astro-ph/0203421 sowie in Anwendung auf die Quasare 3C 279 und 3C 273, astro-ph/0306135.

17.7.5 Blandford-Znajek-Mechanismus

Ein weiterer Prozess, der dem rotierenden Schwarzen Loch Rotationsenergie zu entziehen vermag, ist der so genannte Blandford-Znajek-Mechanismus. Im Unterschied zum Penrose-Prozess sind hier elektrische und vor allem magnetische Felder beteiligt. Die Extraktion der Rotationsenergie geschieht auf **elektromagnetischem Wege**.

17.7.6 Motor aktiver Galaxien

Penrose-Prozess und Blandford-Znajek-Mechanismus sind besonders wichtig für die Physik der AGN und das AGN-Paradigma, wonach die enorme Leuchtkraft aus der Akkretion von interstellarem Gas und Sternen auf ein supermassereiches Schwarzes Loch erzeugt wird ('AGN-Motor').

17.8 Pentaquark

Das Pentaquark ist ein völlig neues Quarksystem, das aus **fünf Quarks** besteht.

17.8.1 Vorlage aus der Theorie

Prinzipiell gestattet das Standardmodell der Teilchenphysik im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) Teilchen, die aus mehr als nur zwei Quarks (Mesonen) oder drei Quarks (Baryonen) zusammengesetzt sind. Allerdings beobachteten die Experimentatoren jahrzehntelang nicht derartige 'Quarkbälle'.

Auf theoretischer Seite entwickelten *Diakonov, Petrov & Polyakov* 1997 im Rahmen des **chiralen Soliton-Modells** weitere Realisierungen von Teilchen (Papier hep-ph/9703373). Wesentlicher Ausfluss dieser Überlegungen war ein Schema von zehn baryonischen Teilchen (*Anti-Dekuplett*). Darunter befand sich ein Teilchens namens $Z^+(1530)$, einem Pentaquark.

17.8.2 Fund im Experiment: Θ^+

Motiviert durch diese theoretische Grundlage gelang schließlich im Jahr 2003 der japanischen LEPS-Kollaboration der Nachweis dieses Pentaquarks (Papier von *Nakano et al.*, hep-ex/0301020). LEPS (***L**aser **E**lectron **P**hoton beamline at **S**Pring-8*) produziert Photonen mit GeV-Energien (!) aus der inversen Compton-Streuung von UV-Laserphotonen an hochrelativistischen Elektronen der Energie 8 GeV. Die Elektronen erreichen diese Energien bzw. Geschwindigkeiten nach mehrmaligem Durchlaufen der ringförmigen Beschleunigungsstrecke im Teilchenbeschleuniger. Beim nachgewiesenen Pentaquark handelt es sich um das **leichteste Pentaquark**, das seither nicht Z^+, sondern Θ^+ heißt. Im Experiment ging man so vor, dass man Gammastrahlen, also noch energiereichere, elektromagnetische Strahlung als Röntgenstrahlung, auf ein Kohlenstoff-Target (C-12) schoss. Ein Zerfallskanal dieser Reaktion besteht darin, dass die Gammastrahlen auf Neutronen (engl. *photo-production from neutron*) in den Atomkernen des Kohlenstoffs treffen und dabei Kaonen (*K-Mesonen*), eine bestimmte Form von Mesonen, erzeugen. In Vorwärtsrichtung, also wenn man von vorne in den Teilchenstrahl schaut, beobachteten die Experimentatoren eine **scharfe, baryonische Resonanz** bei 1.54 GeV. Eine Resonanz bezeichnet in diesem Zusammenhang einen molekülartigen Verbund aus Meson und Baryon. Dies wurde als ein neues Teilchen, das Pentaquark interpretiert. Es hat als Quarkgehalt zwei up-Quarks, zwei down-Quarks und

ein anti-strange-Quark. Die Quantenzahl *Seltsamkeit* ist also +1. Dieses Quarkkonglomerat zerfällt schließlich nach kurzer Zeit in ein Neutron (udd) und ein positiv geladenes Kaon (u anti-s).

17.8.3 noch eine Pentaquark gefunden: Ξ(1860)

Am CERN wurde bei der NA49-Kollaboration Evidenz für ein weiteres Pentaquark namens Ξ(1860) gefunden (*Alt et al.* 2003, hep-ex/0310014). Es soll aus zwei d-Quarks, zwei s-Quarks und einem anti-u-Quark bestehen. Diese Entdeckung wurde kritisch hinterfragt (*Fischer & Wenig* 2004, hep-ex/0401014). Am US-amerikanischen Jefferson Lab konnten in Experimenten, die denjenigen der japanischen LEPS-Kollaboration vergleichbar waren, **keine Pentaquarks** hergestellt werden. Die Erforschung dieses neuen Gebiets der Teilchenphysik bleibt deshalb spannend.

17.8.4 Tetraquark auch gefunden: X(3872)

Wenige Monate nach der Entdeckung des ersten Pentaquarks gelang der Belle-Kollaboration um *Choi et al.* der Nachweis eines Tetraquarks (Papier hep-ex/0309032). Diese Teilchen bestehen aus vier Quarks. Der spezielle Name dieser baryonischen Resonanz ist **X(3872)**.

17.9 Periastron

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Periastron (grch. *apo*: entfernt von; grch. *astron*: Stern) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um einen Stern**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Zusammen mit dem Begriff Apastron ist Periastron besonders bei der Diskussion von *Doppel- und Mehrfachsternsystemen* gebräuchlich.

17.10 Perigäum

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Perigäum (grch. *peri*: ringsum; grch. *geo*: Erde) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um die Erde**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte oder auch bei sehr präzise bestimmten Bahnen um die Erde (z. B. bei der Satellitennavigation oder **GPS** muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie verwendet werden.

Siehe auch Apogäum.

17.11 Perihel

Dies ist ein typischer Begriff aus der Himmelsmechanik, einer klassischen Disziplin der Astronomie. Das Perihel (grch. *peri*: ringsum; grch. *helios*: Sonne) ist der **nächste Punkt auf einer Bahn um die Sonne**.

Zur Beschreibung dieser Bewegung kommen die Kepler-Gesetze zum Einsatz, die mit der Newtonschen Gravitation mathematisch hergeleitet werden können. Bei engen Bewegungen um kompakte Objekte muss die Einsteinsche Gravitation, d. h. die hyperlinkartAllgemeine Relativitätstheorie verwendet werden. Einsteins Theorie kam historisch z. B. bei der *Periheldrehung des Merkurs* zum Einsatz: der innerste Planet im Sonnensystem ist der Gravitation der Sonne am stärksten ausgesetzt, so dass hier relativistische Effekte wichtig werden. Zwar gibt es eine Periheldrehung (genauer: eine Drehung der *Apsidenlinie*, also der Verbindungslinie von Perihel und Aphel, im Raum) auch in der Newtonschen Physik. Doch nur die Vorhersage von Einsteins Theorie stimmte exakt mit der Beobachtung überein. Dies war einer der ersten bestandenen Bewährungstests von Einsteins Relativitätstheorie.

17.12 periodisch

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

17.12.1 Definition von periodisch

Das Attribut *periodisch* bezeichnet eine Helligkeitsvariation, die **zeitlich regelmäßig wiederkehrt**. Dieser periodischen Helligkeitsvariation ist eine **Periodendauer** zugeordnet, die angibt, in welchem Zyklus sich die Variation wiederholt.

17.12.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. Das kann dazu führen, dass beispielsweise ein Helligkeitsvariation so stark zeitlich gedehnt wird, dass die Periode verschwindet.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. So können Phänomene periodisch auf einer Zeitskala von Millionen oder gar Milliarden Jahren sein - diese Periode würde nicht auffallen, wenn der Beobachter nur auf einer Zeitskala von Jahren oder tausend Jahren beobachtet.

17.12.3 Beispiele

In der Astronomie sind z. B. die Helligkeitsvariationen eines Pulsars, von einigen Veränderlichen sowie Novae, von Röntgendoppelsternen und von bestimmten X-ray burstern periodisch.

17.12.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind quasi-periodisch, persistent und transient.

17.13 persistent

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

17.13.1 Definition von persistent

Das Attribut *persistent* bezeichnet eine **zeitlich konstante Helligkeit**.

17.13.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. So kann ein stark ausgeprägter Zeitdehnungseffekt die Ursache für die Persistenz der Quelle sein. Das ist jedoch sicher die Ausnahme. Von persistenten Quellen sprechen die Astronomen oft in der Stellarphysik und meinen damit einen Stern, der recht beständig Strahlung emittiert.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. So können Phänomene persistent auf einer Zeitskala von Jahren sein, aber eventuell nach Jahrzehnten völlig verschwinden.

17.13.3 Beispiele

In der Astronomie könnte man z. B. die Sonne als persistent bezeichnen - allerdings weist auch unser Heimatgestirn Helligkeitsvariationen (*Sonnenflecken*, *Sonnenflares*). Die Röntgenastronomen verwenden den Begriff persistent häufig, um eine länger andauernde Röntgenemission zu beschreiben.

17.13.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, quasi-periodisch und transient.

17.14 Petrov-Klassifikation

Die Petrov-Klassifikation ist ein Schema, um Raumzeiten nach unterschiedlichen Typen einzuordnen. Das Kriterium zur Klassifikation hängt mit einem bestimmten Tensor in der Allgemeinen Relativitätstheorie zusammen.

17.14.1 Präzise Definition

Diese Klassifikation basiert auf den Symmetrieeigenschaften des Weyl-Tensors. Die Theoretiker verwenden bei dieser Diskussion den so genannten Newman-Penrose-Tetraden-Formalismus, der fünf komplexe, skalare Größen, die **Weyl-Skalare**, liefert. Diese legen den

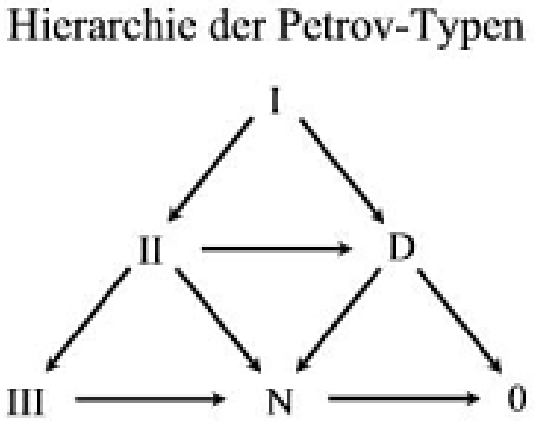

Abbildung 17.5: Hierarchie der Petrov-Typen.

Weyl-Tensor eindeutig fest. Die Weyl-Skalare sind wiederum Wurzeln der Petrov-Gleichung. Je nachdem, welche verschwinden, legt dies den **Petrov-Typ** fest. Die Relativitätstheoretiker unterscheiden

Typ I, II, D, III und N.

17.14.2 Dreieckshierarchie der Petrov-Typen

Roger Penrose schlug eine Dreieckshierarchie der Petrov-Typen vor, die die Raumzeiten in ihren Spezialisierungen unterscheidet (siehe Abbildung 17.5): In der Spitze des Dreiecks ist die Spezialisierung minimal, unten rechts ist sie maximal. Beispiel: Alle ungeladenen Schwarzen Löcher sind Vakuum-Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen. Dabei sind alle Schwarzen Löcher unabhängig davon, ob elektrisch geladen oder neutral, **Petrov-Typ D**.

17.14.3 Ordnung im Zoo der Raumzeiten

Ähnliche Schemata existieren für andere Nicht-Vakuum-Raumzeiten, die *Plebanski-Typologie* und *Karlhede-Klassifikation* heißen. Ziel dieser Klassifikationen ist eine Systematisierung der Raumzeiten der Allgemeinen Relativitätstheorie, um den Lösungsraum der Einsteinschen Feldgleichungen übersichtlicher zu machen und eventuell tiefere Einsichten in die Gravitationsphysik und Geometrie zu bekommen.

17.15 PG1159-Sterne

PG1159-Sterne bezeichnet eine spezielle Klasse veränderlicher Sterne, die nach dem Prototyp *PG 1159-035* benannt wurde. Dabei steht PG für den *Palomar Green Survey*, einer Beobachtungskampagne, in der diverse Himmelsobjekte entdeckt, beobachtet und katalogisiert wurden.

PG 1159-035 ist auch der Prototyp der *GW-Virginis-Veränderlichen*. Das sind Pulsationsveränderliche, die nicht-radiale Pulsationen aufweisen. Der Antrieb für die Pulsationen ist der so genannte κ-γ-Mechanismus (*Starrfield et al.* 1983).

17.15.1 Eigenschaften dieser Sterne

PG1159-Sterne sind an sich **extrem heiße, wasserstoffarme Post-AGB-Sterne** - oder aus der anderen Perspektive betrachtet, Vorläufersterne der Weißen Zwerge. PG1159-Sterne befinden sich im Übergangsstadium von Rotem Riesen nach Weißem Zwerg. Es ist für die Astronomen nicht einfach, die PG1159-Sterne zu finden, weil diese charakteristische Sternphase recht kurz ist. Als Konsequenz der Kurzlebigkeit sind diese Sterne selten anzutreffen. Derzeit sind nur knapp 50 PG1159-Sterne bekannt.

Die Effektivtemperaturen der PG1159-Sterne sind mit 75000 bis 200000 Kelvin extrem hoch. Die thermische Strahlung liegt bei diesen Oberflächentemperaturen im UV-Bereich (siehe auch Spektraltyp).

17.15.2 Weiter geht's mit...

... den **Roten Riesen**, denn in diesem Eintrag werden die PG1159-Sterne und ihre Sternentwicklung in vielen interessanten Einzelheiten vorgestellt. Ihre Rolle ist im Zusammenhang mit der **stellaren Nukleosynthese** von großer Bedeutung.

17.16 Phantom-Energie

Es lohnt sich, in der Klärung des Begriffs *Phantom-Energie* etwas weiter auszuholen und diese Form einer Dunklen Energie in einem allgemeineren Kontext zu beschreiben.

17.16.1 Erfindung, Niedergang und Renaissance von Λ

Die moderne Kosmologie ist ein besonders aufregender Forschungszweig der Astronomie. Das Universum als Ganzes konnte erst mit den mathematischen Werkzeugen der Allgemeinen Relativitätstheorie seit 1916 befriedigend beschrieben werden. Ein zunächst fixer Parameter, die kosmologische Konstante Λ, wurde von *Albert Einstein* 1917 eingeführt, um die Palette von Modell-Universen zu erweitern und insbesondere sein favorisiertes statisches Universum theoretisch erklären zu können. Nach der experimentellen Entdeckung der **Kosmodynamik** durch *Edwin Hubble* wurde die Lambda-Kosmologie zunächst verworfen. Die dynamischen Friedmann-Weltmodelle erlebten fortan eine Blütezeit. Im Zuge neuer Beobachtungsdaten, die 1998 eine **beschleunigte Expansion** des Universums belegten, bekam die Lambda-Kosmologie wieder Zulauf. Mehr noch: der Λ-Term wurde ein freier Parameter und 'kosmische Stellschraube' für die Kosmologie.

17.16.2 Zoo Dunkler Energien

Warum war jedoch die Energiedichte der kosmologischen Konstante gerade vergleichbar groß, wie diejenige der Materie? Um dieses **Koinzidenz-Problem der Kosmologie** zu lösen, wurden neue Formen Dunkler Energie erfunden. Im Zuge moderner Entwicklungen verlor die kosmologische Konstante ihre Konstanz. Die Stringtheorien stellten dazu weitere

Methoden zur Verfügung, um mithilfe von Extradimensionen und Branenwelten eine **zeitlich veränderliche Dunkle Energie** zu etablieren.

Wichtig ist, dass es oft *Dunkle Energie* genannt wird, aber durch verschiedene physikalische Mechanismen generiert wird. Mit **ΛCDM** meinen die Forscher eine Λ-Kosmologie (Λ), die neben einer Dunklen Energie *ohne* zeitliche Veränderlichkeit auch einen signifikanten Anteil kalter Dunkler Materie (*cold dark matter*, CDM) enthält. Der w-Parameter bei ΛCDM ist exakt *w = -1*.

Eine *zeitlich veränderliche* Dunkle Energie nennen die Kosmologen Quintessenz. Oft hört man hier das Akronym **QCDM**, das sich auf ein Quintessenz-Modell (Q) ebenfalls mit Beimischung kalter Dunkler Materie bezieht (engl. ***Q**uintessence **C**old **D**ark **M**atter Cosmology*). Der w-Parameter bei QCDM ist exakt *w = -1/3*.

Gewöhnliche baryonische Materie hat in beiden Kosmologien keine Bedeutung für die Dynamik des Universums! Das belegen die Beobachtungsdaten mit ganz verschiedenen, sogar unabhängigen Methoden.

17.16.3 Physikalische Interpretation der Dunklen Energien

◇ Eine favorisierte Deutung involviert das Quantenvakuum: **virtuelle Teilchenpaare** dieses Vakuums sollen einen niederenergetischen, fein verteilten Untergrund beisteuern. Kosmologisch trete dieses 'Teilchengewusel' als ein konstanter Λ-Term in Erscheinung. Diese Deutung klingt viel versprechend, ist leider in einer detaillierten Rechnung problematisch.

◇ Der Ansatz einer zeitlich veränderlichen kosmologischen Konstante geht bereits auf *M.P. Bronstein* (1933) zurück. Im **Cosmon-Modell** (1987) von *C. Wetterich* (Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg) wird diese Idee wiederbelebt (Papier hep-th/9408025). Die Gravitation koppelt hier an ein Skalarfeld mit exponentiellem Potential.

◇ Im Rahmen der Branenwelt wird ein Quintessenz-Szenario von *Steinhardt et al.* entworfen, das auf einem Skalarfeld namens **Radion** basiert. Das Radion führt einen dynamischen Kosmos herbei, der in einem *Big Crunch* endet. Die Autoren sprechen hier von einer Ekpyrosis und meinen in Anlehnung an die griechische Mythologie einen 'Weltenbrand', in dem sich die Welt reinigt und neu erschafft. Das Radionfeld erlaubt sogar, dass die Ekpyrosis wiederholt stattfindet - ein Szenario, dass Steinhardt und Kollegen Zyklisches Universum genannt haben. Die Leistung dieses Modells ist, dass es *erstmals* den Urknall (Big Bang) *erklärte* (Publikation von *P.J. Steinhardt & N. Turok*, 2001, hep-th/0111030). Dennoch ist es eine mögliche Spekulation von vielen, die bislang nicht durch astronomische Beobachtungen gestützt werden kann.

◇ Der Erfindungsreichtum der Kosmologen ist groß: Im **Spintessenz-Modell** wird die Quintessenz durch ein rotierendes, komplexwertiges Skalarfeld repräsentiert. Die Rotation nimmt hier mit der Expansion ab und führt über diesen *Spin-down*-Mechanismus zur Abnahme der Dunklen Energie (*L.A. Boyle, R.R. Caldwell & M. Kamionkowski*, 2001, astro-ph/0105318).

◇ *S.B. Giddings* deutet hingegen die Dunkle Energie als **kompaktifizierte Extradimensionen**, die plötzlich dekompaktifizieren könnten. Dieses Szenario

würde in einer vollständigen Zerstörung unserer vierdimensionalen Welt enden. Dieses ebenfalls spekulative Modell erfordert eine höherdimensionale Welt, wie sie beispielsweise in den Stringtheorien gefordert wird, allerdings **mit kosmologischer Konstante** (Papier: *The fate of four dimensions*, 2003, hep-th/0303031).

◇ Die neuste Variante stammt von *R.R. Caldwell, M. Kamionkowski & N.K. Weinberg*: die **Phantom-Energie** (Publikation: astro-ph/0302506). Der entscheidende Unterschied ist, dass die Expansionsrate des Universums in Lambda- und Quintessenz-Kosmologien *konstant* bleibt oder stetig *abnimmt*; in Phantom-Energie-Modellen *nimmt sie zu*! Die Folgen sind dramatisch: Weil in endlicher Zeit die Phantom-Energiedichte gegen unendlich geht, wird alles zerrissen! Diesen **Big Rip** kann nichts überstehen: weder Galaxienhaufen, noch Galaxien, weder die Milchstraße, noch Schwarze Löcher, das Sonnensystem oder die Erde, nicht einmal Atome, Atomkerne und Elementarteilchen überdauern dieses Ereignis. Der Grund liegt darin, dass die Phantom-Energie dann alle Naturkräfte übertrumpft. Auf der Planck-Skala mögen Effekte auftauchen, die dieses Szenario modifizieren. Bislang ist dieses weitere spekulative Modell noch konsistent mit den aktuellen Beobachtungsdaten (WMAP). Für das Verhältnis von Druck und Energiedichte der Phantom-Energie (Definition des w-Parameters) legen die Beobachtungen einen Wertebereich von -1.22 bis -0.78 nahe (*Krauss et al.*, astro-ph/0305556). Der Big Rip würde sich bei einem angenommen w-Parameter von $w = -1.2$ in etwa 50 Milliarden Jahren ereignen.

17.16.4 Λ ja, Quintessenzen und Phantom nein

Bei aller 'Spekuliererei und Eselei': Die aktuellen Beobachtungsdaten (Februar 2004 und November 2006) des Weltraumteleskops *Hubble* verleihen Einsteins kosmologischer Konstante wieder hohes Gewicht. Denn die Messdaten hochrotverschobener Supernovae vom Typ Ia mit kosmologischen Rotverschiebungen zwischen 0.2 bis 1.6 belegen, dass die Dunkle Energie auf den betrachteten kosmologischen Distanzen zeitlich kaum variierte (*Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512 und *Riess et al.* 2006, astro-ph/0611572). Sie hatte **schon vor etwa neun Milliarden Jahren den heutigen Wert**. Der w-Parameter liegt also sehr nahe bei -1. Das lässt nur den Schluss zu, dass, wenn überhaupt die Dunkle Energie zeitlich variiert, dann nur sehr langsam. Das macht den Big Crunch unwahrscheinlich und die ewige, beschleunigte Expansion des Universums wahrscheinlich. Wir werden also unsere Rentenprobleme in Deutschland lösen müssen.

17.17 Photon

Ein alternativer Begriff für Photon ist Lichtteilchen. Photonen sind demnach 'Lichtpakete' die Quantencharakter haben.

17.17.1 Der Wegbereiter Maxwell

Etwas präziser gesagt ist ein Photon das Austauschteilchen, Feldquant oder **Eichboson** der elektromagnetischen Wechselwirkung. Vor dieser Erkenntnis im 20. Jahrhundert war die Auffassung, dass Licht aus klassischen Wellen besteht. Diese klassische (unquantisierte) Beschreibung gelang in der Elektrodynamik, die der schottische Physiker *James Clerk Maxwell*

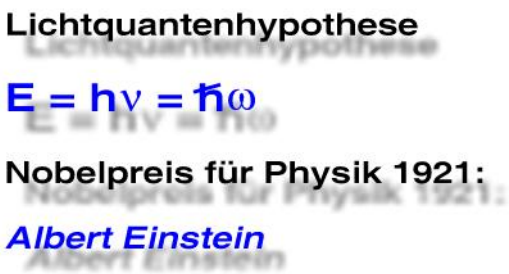

Abbildung 17.6: Lichtquantenhypothese.

(1831 - 1879) im 19. Jahrhundert begründet hat. Er fand vier Gleichungen, die elektrische Felder in Beziehung setzen zu Magnetfeldern: die **Maxwellschen Gleichungen**. Die Felder werden mathematisch als Dreiervektoren beschrieben. Die Maxwell-Gleichungen kann man entweder in integraler oder in differenzieller Form notieren.

Aus den vier Maxwell-Gleichungen kann man mit relativ wenig mathematischem Bemühen eine **Wellengleichung** ableiten. Das ist gerade die **Bewegungsgleichung der elektromagnetischen Welle** ist. Aus der Maxwell-Theorie folgt, dass sich diese Welle mit der Lichtgeschwindigkeit c fortpflanzt. In die Wellengleichung kann man die Komponenten des Magnetfeldes, des elektrischen Feldes und deren Potentiale (magnetisches Vektorpotential, elektrisches Potential) einsetzen. Im Rahmen der klassischen Elektrodynamik ist Licht eine unendlich ausgedehnte elektromagnetische Welle, die sich auch im Vakuum ausbreiten kann. Im strengen Sinne ist dies **noch kein Photon**, weil es nicht diskret, sondern kontinuierlich ist.

17.17.2 Von der klassischen Welle zum Lichtquant

Den nächsten entscheidenden Beitrag lieferte um 1900 der Physiker *Max Planck* (1858 - 1947). Er deutete - in einem 'Akt der Verzweiflung' wie er es umschrieb - die Wärmestrahlung von Körpern bestimmter Temperatur (Schwarze Körper) mit kleinen Oszillatoren, die diskrete Energiezustände einnehmen können. Daraus folgte die berühmte Plancksche Strahlungsformel.

Doch erst *Albert Einstein* (1879 - 1955), der Begründer der Relativitätstheorie, war mutig genug, Plancks Diskretisierung viel allgemeiner zu sehen: Einstein postulierte die **Lichtquanten**. Die elektromagnetische Strahlung solle für jede Strahlungsenergie quantisiert sein. Sie könne nur Vielfache des Planckschen Wirkungsquantums annehmen – dieser Gleichung folgend

$$E = \mathrm{h}\nu = \hbar\omega = \frac{\mathrm{hc}}{\lambda}.$$

Mit dieser Hypothese deutete Einstein in seinem Wunderjahr 1905 erfolgreich den **Photo-Effekt**, also die Fähigkeit von Licht Elektronen aus einer Oberfläche zu schlagen. Quantisierung war noch kein allgemein akzeptiertes Phänomen, weshalb die Deutung des *Franck-Hertz-Versuchs* mit Lichtquanten bahnbrechend war. Für diese Lichtquantenhypothese erhielt Einstein 1921 den Nobelpreis für Physik. In gewisser Weise muss Einstein deshalb als Mitbegründer (nicht als Gegner, wie fälschlicherweise oft zu lesen

ist!) der Quantentheorie angesehen werden. Das, was in später von der Quantentheorie abschreckte, war die Wahrscheinlichkeitsinterpretation und im Speziellen die Kopenhagener Deutung ('*Gott würfelt nicht!*').

17.17.3 Farbe gibt's nur in Häppchen

Je nach seiner *kinetischen Energie*, die man als **Strahlungsenergie** identifiziert, tritt das Photon (aufsteigend mit zunehmender Energie) als Radioquant, Mikrowellenquant, Infrarotquant, optisches Quant, Ultraviolettquant, Röntgenquant oder Gammaquant in Erscheinung. Die Lichtenergie ist gerade ein Maß für die **Farbe**. Die Energie des Quants E berechnet sich aus der Strahlungsfrequenz ν oder Wellenlänge λ, wobei h eine fundamentale Naturkonstante ist: das **Plancksche Wirkungsquantum**, mit der Einheit einer Wirkung (Energie × Zeit, also Joulesekunden im SI):

$$h = 6.62608 \times 10^{-34}\ Js$$

An der Gleichung oben rechts sieht man also direkt die **Quantelung des Lichts**, also Portionierung in diskrete 'Energiepakete', nämlich in Vielfachen von h. Im modernen Sprachgebrauch sind solche Lichtpakete bereits **Photonen**.

17.17.4 Ursprung des Begriffs Photon

Die Bezeichnung *Photon* wurde erst 1926 von dem US-amerikanischen Chemiker *Gilbert Newton Lewis* (1875 - 1946) erfunden. Er schrieb (Nature **118**, 874, 1926):

I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name photon.

Wie aus dem Zitat hervorgeht, meinte Lewis mit Photon **zunächst nicht** das Lichtquant, sondern ein neues, hypothetisches Teilchen. Während sich seine neue Hypothese nicht durchsetzte, blieb der Begriff des Photons und setzte sich als Bezeichnung für das Lichtquant durch. Schon 1930 benutzt Lewis die Begriffe Photonen und Lichtquanten explizit synonym (siehe seine Veröffentlichung mit dem Titel *Quantum kinetics and the Planck equation*, Phys. Rev. **35**, 1533, 1930).

Der Begriff Photon passt wegen seiner griechischen Bedeutung, *phos*: 'Licht', hervorragend.

17.17.5 Quantenfeldtheorie des Lichts

Anfang des 20. Jahrhunderts war der Siegeszug der Quantentheorie nicht aufzuhalten: Viele Physiker trieben die neue quantisierte Theorie voran und fanden andere physikalische Größen (Teilchenspin etc.), die ebenfalls quantisiert sind. Schließlich wurde die Quantenelektrodynamik (QED) entwickelt. Sie war die erste erfolgreich formulierte Quantenfeldtheorie von allen. Die QED hat eine relativ einfache Gruppenstruktur und basiert auf der unitären Symmetriegruppe U(1).

Anschaulich kann man sich den Austausch von Photonen in **Feynman-Diagrammen** vorstellen. Wenn elektrische Ladungen miteinander wechselwirken werden **virtuelle Photonen** ausgetauscht, die so kurzlebig sind, dass sie nicht direkt nachgewiesen werden können. Photonen koppeln immer an elektrische Ladungen: sie sind die 'Botenteilchen' oder **Austauschteilchen** der elektromagnetischen Wechselwirkung.

17.17.6 Eigenschaften des Photons

Eine wichtige Eigenschaft des Photons ist, dass es **Ruhemasse null** hat und deshalb überhaupt die Lichtgeschwindigkeit c erreichen kann. Teilchen mit endlicher Ruhemasse werden nämlich durch einen kinematischen Effekt der Spezielle Relativitätstheorie am Erreichen von c gehindert (siehe auch Tardyon). Dies wird häufig - auch in vielen Physik-Lehrbüchern - etwas unglücklich mit 'relativistischem Massenzuwachs' bezeichnet. Es ist jedoch nicht die Masse, die anwächst, sondern der Impuls! Treffender wäre also der Begriff 'relativistische Impulszunahme'. Die Konsequenz der Tatsache, dass sich Photonen mit c bewegen, ist faszinierend: Photonen altern nicht! Der **Lorentz-Faktor** (siehe dazu Lorentz-Transformation) divergiert im Falle $v = c$: die Zeitdilatation wird daher unendlich und die Längen- oder Lorentz-Kontraktion geht gegen null! Alle Luxonen unterliegen diesem Effekt 'ewiger Jugend'. Die Kosmetikindustrie hat leider noch keine Möglichkeit gefunden, sich dies zunutze zu machen. Die Photonen leben also in einer **zeitlosen Welt**.

Weiterhin besitzen Photonen **Spin 1** und gehören deshalb zur Teilchengruppe der Bosonen. Sie unterliegen nicht dem Pauli-Prinzip, d. h. beliebig viele Photonen können denselben quantenmechanischen Zustand bevölkern (siehe auch Spin-Statistik-Theorem). Das ermöglicht z. B. erst den **Laser**, weil sich hier viele Photonen im gleichen Zustand aufhalten. Photonen zählen wegen der Spin-1-Eigenschaft zu den **intermediären Vektorbosonen**: Vektorbosonen haben Spin 1; intermediär sind alle Austauschteilchen. Man sagt auch: Photonen sind die **Eichbosonen der elektromagnetischen Wechselwirkung**.

Außerdem ist das Photon selbst elektrisch neutral, farbungeladen und *punktförmig* wie die Quarks und Leptonen, d. h. es weist keine weitere Substruktur oder Zusammensetzung auf.

17.17.7 Boten aus der Tiefe des Weltraums

Die Photonen sind die **wesentlichen Informationsträger der Astronomie**, tragen sie doch über Milliarden von Lichtjahren hinweg die Informationen astrophysikalischer Objekte (verschlüsselt in ihrer Energie, Richtung, Anzahl, Polarisation) bis zu unseren Strahlungsdetektoren auf der Erde. Die Astronomie hat sich je nach Energiedomäne der Photonen verzweigt in Radioastronomie, Infrarotastronomie, dem Archetypus der optischen Astronomie, Röntgen- und Gammaastronomie. Jede Teildisziplin hat ihre besonderen Messtechniken. Die CCD-Kameras, im Prinzip eine riesige Digitalkamera mit einem metergroßen Teleskop als gigantisches Objektiv, sind für alle Spektralbereiche empfindlich. CCDs beruhen gerade auf dem erwähnten Photo-Effekt, weil die auf den Pixeln auftreffenden Photonen elektrische Ströme aus Elektronen in jedem Pixel produzieren; diese Ströme werden verstärkt und in ein Bild umgewandelt. Eine Synthese bzw. Synopsis der gewonnenen CCD-Daten liefert dem Astronomen eine puzzleartig zusammengesetzte Vorstellung von kosmischen Objekten, das der theoretische Astrophysiker mit physikalischen Gesetzen zu erklären versucht.

Selbstverständlich sind neben den Photonen auch andere Teilchen hinzugekommen, die das Fenster ins Universum beträchtlich vergrößert haben. So bildet die **Neutrinoastronomie** ein modernes Betätigungsfeld, dass uns sogar aus bisher verborgenen Bereichen Informationen zukommen lässt. Zu diesen verborgenen Stätten gehört das Innere von Sternen, Supernovae-Explosionen und Hypernovae. Es ist zu erwarten, dass bald Akkretionsflüsse nahe kompakter Objekte und relativistische Jets dazukommen werden.

Die hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung (Protonen, α-Teilchen,

Elektronen, Myonen etc.) erweitern die Palette der kosmischen Informationsboten.

Mit Spannung erwarten die Physiker, insbesondere die Relativisten, die experimentelle, *direkte* Messung von Gravitationswellen. Dabei handelt es sich um Störungen in den Krümmungen und Glättungen der Raumzeit, die sich ebenfalls gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten sollen. Sie würden wertvolle Informationsträger sein, weil man mit ihnen sogar tiefer ins Universum blicken kann, als mit elektromagnetischer Strahlung. Denn Gravitationswellen passieren die elektromagnetische Barriere der kosmologischen Rekombinationsepoche. Mit ihrer Hilfe könnten Astronomen vielleicht bis zum Urknall blicken!

Die **Staubastronomie** ist ein weiterer Bereich, in dem die Eigenschaften interstellaren und intergalaktischen Materials untersucht werden. Staub (engl. *dust*) bezeichnet in der Astronomie einfache bis komplexe Verbindungen mit Durchmessern von Bruchteilen eines Mikrometers bis etwa einem Mikrometer. In erdnahen Regionen (Sonnensystem) ist das direkte Studium von Staubteilchen möglich (siehe Zodiakallicht), in fernen Regionen wird indirekt auf den Staub mithilfe sekundärer Teilchen, wiederum den Photonen, geschlossen. Dies begründet sich durch die vielfältigen Reaktionen, die Photonen mit Staubteilchen eingehen (Streuung, Anregung zur Emission, Absorption, Extinktion).

17.17.8 Photonen verwandeln sich

Solange die Erhaltungssätze der Teilchenphysik erfüllt sind, können Photonen sich in andere Teilchen umwandeln. Ein bekanntes Beispiel ist die **Paarbildung**, wo aus Gammaphotonen Materie werden kann, nämlich z. B. Elektron und Positron. Welche Teilchenpaare materialisieren können, hängt von der Ausgangsenergie ab, die die Photonen mitbringen (siehe Reaktionsgleichung im Eintrag Penrose-Prozess).

Ein ähnlicher Vorgang bestünde in der **Oszillation von Photonen in die hypothetischen Axionen**. Axionen sind pseudoskalare Nambu-Goldstone-Bosonen, die die chirale Peccei-Quinn-Symmetrie der Quantenchromodynamik brechen. Dieser Primakoff-Mechanismus wäre von großem Belang für die Teilchenphysik und Kosmologie. Im Gegensatz zur Umwandlung in Leptonen, ist die Umwandlung in Axionen eine bisher nicht bestätigte Hypothese.

17.18 Photonenorbit

Es handelt sich um einen ausgezeichneten Orbit um Schwarze Löcher für Photonen (Lichtteilchen), der **instabil** ist. Die Photonen können auf diesem Orbit im Prinzip unendlich lange das Schwarze Loch umkreisen, jedoch müssen sie zuvor unter geeigneter Richtung in diesen Orbit injiziert werden.

17.18.1 Photonenorbit und Penrose-Prozess

Es gibt einen bestimmten Penrose-Prozess, bei dem im Photonenorbit eingefangene Photonen relevant sind, um mit radial einfallenden Photonen ein **Paarplasma** zu erzeugen. Das so erzeugte (leptonische) Paarplasma könnte die Jets speisen, die in unmittelbarer Umgebung von Schwarzen Löchern entstehen.

17.18.2 Berechnung des Photonenorbits

Die Definition des Photonenorbits ist

$$r_{\mathrm{ph}} = 2M\left[1 + \cos\left(\frac{2}{3}\arccos(-a/M)\right)\right],$$

wobei a der Kerr-Parameter und M die Masse des Schwarzen Loches sind. Wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie üblich, wurden geometrisierte Einheiten (G = c = 1) verwendet, so dass der Photonenorbit in Einheiten der Masse M angegeben wird.

Es ist leicht nachzurechnen der Photonenorbit für die Schwarzschild-Lösung ($a = 0$) bei 3 Gravitationsradien (oder 1.5 Schwarzschildradien) liegt. Für den maximalen Kerr-Fall ($a = M$) ist der Photonenorbit identisch mit dem Ereignishorizont und liegt bei nur einem Gravitationsradius.

17.18.3 Photonensphäre ≠ Photosphäre

Als **Photonensphäre** bezeichnet man dementsprechend die Fläche um ein Schwarzes Loch, auf der alle instabilen Photonenorbits liegen. Dies ist bitte nicht zu verwechseln mit der Photosphäre von Sternen, wie der Oberfläche von der Sonne, aus der der Großteil der Strahlung stammt (s. u.).

17.19 Photosphäre

Die Photosphäre bezeichnet eine bestimmte Schicht in Sternen, und zwar diejenige, aus der der **größte Teil des Lichts** (grch. *phos*) kommt. Wenn wir Sternenlicht sehen, beobachten wir eigentlich die Photosphären der Sterne. Ein Verständnis von den Vorgängen in der Photosphäre ist daher von großer Bedeutung für die Astronomie.

17.19.1 Sternspektren

Wenn Astronomen die Sternspektren analysieren, können sie aus Vorhandensein und Breite der Spektrallinien auf die chemische Zusammensetzung der Photosphäre schließen. Das Element Helium (grch. *helios*: Sonne) wurde auf diese Weise in Sonnenspektren entdeckt. Helium ist die 'Asche' des Wasserstoffbrennens (siehe pp-Kette) und gelangt durch Konvektion auch in die Photosphäre. Dort absorbiert es Strahlung aus dem Sterninnern, was als bestimmte Absorptionslinen, den *Fraunhofer-Linien*, beobachtet werden kann. Die Sternfarbe ist ebenfalls ein Resultat der photosphärischen Vorgänge und führt auf wichtige Zustandsgrößen wie Effektivtemperatur und Spektraltyp. Auch die Leuchtkraft aus der Analyse der (photosphärischen) Sternspektren gewonnen.

17.19.2 Ganz schön dünn!

Die Photosphäre beginnt an der Materieoberfläche der Sterne und reicht **nur einige hundert Kilometer** tief in das Sterninnere hinein - das ist verglichen mit typischen Sternradien sehr wenig. Betrachten wir als Beispiel die Sonne: sie hat einen Radius von knapp 700000 km; die Schichtdicke der Photosphäre beträgt nur etwa 200 km. Der Volumenanteil der Photosphäre beträgt nur knapp 0.1%, doch fast alle Photonen kommen von dort.

17.19.3 Warum schafft es das Licht aus dem Sterninnern nicht direkt zu uns?

Von außen nach innen kommend wird ein Stern immer heißer. Als Konsequenz wird das Sternplasma inwärts immer stärker ionisiert. Ein Plasma ist undurchsichtig, wie jede Kerzenflamme demonstriert, weil man durch Kerzenflammen nicht schauen kann. Die Astrophysiker nennen diese Eigenschaft von Plasma *optisch dick*. Die optische Tiefe ist in dem Sternplasma so groß, dass die Lichtteilchen aus dem Sternkern nicht direkt aus dem Stern austreten können. Sie werden im Sternplasma gestreut, absorbiert und reemittiert und finden erst nach einiger Zeit den Weg in die Photosphäre. Bis sie dort ankommen, haben sie sich jedoch auch verändert: Die hochenergetischen Gammaphotonen, die tief im Sterninnern aus thermonuklearer Fusion erzeugt wurden, sind nun **Ultraviolett- und optische Photonen** geworden, die vergleichsweise weniger Energie haben (Anmerkung: Die Röntgenstrahlung der Sonne kommt aus der extrem heißen Korona, also nicht von der Sonnenoberfläche.).

Dennoch können Astronomen tief ins Innere von Sternen schauen. Sie verwenden dazu allerdings nicht Licht, sondern **Neutrinos**. Diese sehr leichten, schwach wechselwirkenden Teilchen können fast ungehindert das Sternplasma passieren. Das macht ihre Detektion auch sehr schwierig; dennoch ist das gelungen. Ihre Eigenschaften (kinetische Energie und Leptonenfamilie) geben den Astronomen direkt Auskunft über das Milieu im Sternkern und über die Art der Fusionsprozesse, die dort ablaufen. Auch bei Supernovae tragen Neutrinos Informationen direkt aus dem dichten Explosionsgebiet zum irdischen Beobachter.

17.19.4 Photosphäre als Sternrand?

Es wäre falsch zu behaupten, dass die Photosphäre die äußerste Schicht eines Stern wäre, weil sich außerhalb der Photosphäre noch die *Chromosphäre* und die Korona anschließen. Die Ausdehnung der Korona ist verglichen mit der Photosphäre immens: im Fall der Sonne reicht die Korona bis 0.13 AU - das sind rund 28 Sonnenradien!

Die Materiedichte macht einen großen Sprung von der Korona zur Photosphäre, so dass man die Photosphäre mit der **Sternoberfläche** assoziieren kann.

17.19.5 körnige Sonnenoberfläche

Mit geeigneten Sonnenfiltern (z. B. Hα) können die Astronomen sehr viel Struktur in der Photosphäre der Sonne sichtbar machen. Über die ganze Sonnenscheibe ist so die **Granulation** beobachtbar. Das ist ein körniges Muster, das durch die Umwälzung des Sternplasmas (*Konvektion*) im Innern zustande kommt. Die Sonne kocht. Heißes Plasma aus dem Innern steigt auf, kühlt sich ab und sinkt wieder nach unten. Bei der Konvektion findet ein Wärme- und Materietransport statt, der den Energiehaushalt des Sterns reguliert. Die Granulation ist die 'Spitze des Eisbergs' dieser Konvektion: Astronomen sehen kleine Konvektionszellen (*Granulen*), die bei der Sonne mehr als tausend Kilometer durchmessen können und mit bis zu zehn Minuten erstaunlich kurzlebig sind. Im Eintrag Sonne werden weitere photosphärische Erscheinungen wie Supergranulation, Sonnenflecken, Sonnenflares, Protuberanzen etc. erläutert. Auch ein Blick in den Eintrag **Randverdunklung** lohnt sich.

17.20 Pion

Pionen ist eine abkürzende Bezeichnung der π-Mesonen (die also aus Quark und Antiquark bestehen). Die Teilchenphysiker kennen drei verschiedene Pionen: ein neutrales Pion π^0, ein

positiv geladenes Pion π^+ und ein negativ geladenes Pion π^-. Die Zahl 3 ist kein Zufall, weil die Pionen ein **Isospintriplett** (Isospin 1) bilden.

17.20.1 Pionenzerfall

Pionen wurden 1947 in der Höhenstrahlung entdeckt. Sind die Pionen elektrisch geladen, so reichern sie die Höhenstrahlung durch ihren Zerfall mit Myonen an. Ist es das neutrale Pion, so können aus dem Zerfall Photonen erzeugt werden. Diese Zerfallsreaktionen fassen diese Gleichungen zusammen:

$$\begin{aligned} \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^0 &\rightarrow \gamma + \gamma \end{aligned}$$

17.20.2 Pion aus Protonenunfall

Pionen entstehen vornehmlich bei Kollisionen von Atomkernen und werden in gigantischer Zahl bei Schwerionenstößen in Teilchenbeschleunigern erzeugt. Wenn Protonen (geladenes Nukleon im Atomkern) kollidieren (Dinukleonen-Mode), gibt es ab einer Energieschwelle von 300 MeV drei verschiedene Möglichkeiten (*Zerfallskanäe*), was daraus entstehen kann:

$$\begin{aligned} \mathrm{p} + \mathrm{p} &\rightarrow \pi^+ + X \quad \text{geladene Ströme (CC)} \\ &\rightarrow \pi^- + X \quad \text{geladene Ströme (CC)} \\ &\rightarrow \pi^0 + X \quad \text{neutrale Ströme (NC)} \end{aligned}$$

Wie diese Reaktionsgleichungen belegen, können alle drei verschiedenen Pionen entstehen. Die Teilchenphysiker bezeichnen positiv oder negativ geladenen Pionen als geladene Ströme (engl. *charged currents*, CC) und das neutrale Pion als neutralen Strom (engl. *neutral current*, NC). Neben dem jeweiligen Pion, bildet sich irgendein Kern X. Die entstandenen geladenen Pionen können in einem genügend dünnen Medium weiter zerfallen und Myonen und Neutrinos erzeugen (s. o.). Diese Reaktionskette ist wesentlich in den Jets von AGN und GRBs, weil sie favorisierte Kandidaten sind, für die Emission **ultrahochenergetischer Neutrinos**.

17.20.3 Photopionenproduktion

In Stößen, wo Protonen und Photonen beteiligt sind, kann in einem inelastischen Streuprozess ein neutrales Pion entstehen, das Proton bleibt erhalten. Diesen Mechanismus nennt man **Photopionenproduktion**. Bei den AGN-Jets kommen als Photonenquelle der Jet selbst (Synchrotronemission) oder auch Photonen des kosmischen Hintergrunds (engl. *cosmic microwave background*, CMB) in Frage. Eine zweite Möglichkeit besteht im so genannten **Isospin-Flip**. Der Isospin ist eine Quanteneigenschaft (Quantenzahl), die zwischen Protonen und Neutronen unterscheidet. Diese Eigenschaft wurde von *Werner Heisenberg* eingeführt. Wenn der Isospin 'flippt', also umklappt, wird aus einem Proton ein Neutron (oder umgekehrt). Genau dieser Fall kann eintreten und positive Pionen hervorbringen. Aus Gründen der Quantenzahlerhaltung muss daneben ein Neutron entstehen. Da es neutral ist, wird es von Magnetfeldern nicht beeinflusst, so dass - falls dieser Prozess in Jets geschieht - dieses Teilchen entkommen kann und nicht von den Magnetfeldern des Jets eingeschlossen wird. Es ist anzunehmen, dass sich ein **Neutronen-Halo** um die Quelle bildet und Neutronen

über den β-Zerfall zerfallen, was weitere Protonen und Leptonen (Elektronen, Neutrinos) hervorbringt. Diese Verhältnisse fassen die folgenden Reaktionsgleichungen zusammen:

$$\begin{aligned} \mathrm{p} + \gamma &\rightarrow \pi^0 + \mathrm{p} \quad \text{Photopionenproduktion} \\ &\rightarrow \pi^+ + \mathrm{n} \quad \text{Isospinflip} \end{aligned}$$

17.20.4 Eigenschaften der Pionen

Die Massen betragen 134.9766 MeV für das neutrale Pion bzw. 139.57018 MeV für die geladenen Spezies (Quelle: *Particle Physics Booklet*, Juli 2002). Alle Pionen sind - wie alle Mesonen aufgrund ihres Quarkgehalts - recht kurzlebig. Das neutrale Pion hat nur eine mittlere Lebensdauer von nur 84 as (Präfix *a*, atto: 10^{-18}) und hat als dominanten Zerfallskanal zwei Gammaquanten (fast 99%) oder ein Gammaquant und ein Elektron-Positron-Paar (etwa 1%). Die geladenen Pionen zerfallen mit einer mittleren Lebensdauer von 26.033 ns ausschließlich in ein Myon und ein Myon-Neutrino, das derselben Leptonenfamilie (μ) angehören muss - der Grund dafür ist die **Leptonenzahlerhaltung**.

Die kürzere Lebensdauer des neutralen Pions erklärt sich aus seinem Quarkgehalt: es besteht aus einem *up*- und einem *anti-up*-Quark, während das negative Pion aus einem *down*- und einem *anti-up*-Quark und das positive Pion aus einem *up*- und einem *anti-down*-Quark bestehen. Quark und zugehöriges Antiquark zerfallen leichter.

17.20.5 Pionen vermitteln Kernkräfte

Pionen sind von besonderer Wichtigkeit für die starke Wechselwirkung, weil sie die **Kernkräfte** vermitteln. *Hideki Yukawa* konnte 1935 zeigen, dass der **Ein-Pion-Austausch** (*One Pion Exchange*, OPE) die langreichweitige, anziehende Komponente der Kernkraft ist. Dagegen ist der **Zwei-Pionen-Austausch** (*Sigma-Meson*) verantwortlich für die Potentialmulde und das *Omega-Meson* für die kurzreichweitige, anziehende Komponente der Kernkräfte. Diese Beiträge zur resultierenden Gesamtkernkraft kann man durch die **Yukawa-Potentiale** der einzelnen Teilchen unterschiedlicher Masse ableiten.

17.20.6 eine hypothetische Umwandlungsart

Pionen könnten in die hypothetischen Axionen konvertieren, pseudoskalare Nambu-Goldstone-Bosonen, die die chirale Peccei-Quinn-Symmetrie brechen. Dieser Mechanismus wäre von großem Interesse für Teilchenphysiker und Kosmologen.

17.21 Pioneer-Anomalie

Die Pioneer-Anomalie ist ein bisher nicht verstandener Beschleunigungseffekt der US-amerikanischen Raumsonden *Pioneer 10* und *Pioneer 11*.

17.21.1 Das Pioneer-Forschungsprogramm

Die Pioneer-Missionen der NASA zielten auf eine Erforschung des interplanetaren Raumes und insbesondere der Planeten im Sonnensystem. Pioneer 1 startete bereits am 11. Oktober 1958. Die Sonden Pioneer 10 und 11 wurden am 03. März 1972 bzw. am 05. April 1973 gestartet und sollten die Gasplaneten Jupiter und Saturn erforschen. Pioneer 10 (siehe Foto

Abbildung 17.7: Pioneer 10 kurz vor dem Start.

links; Credit: NASA/Ames Research Center) durchquerte als erste Raumsonde überhaupt den Planetoidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Sie passierte Jupiter, den größten Planeten im Sonnensystem, am 03. Dezember 1973 in nur 130000 km Entfernung; Pioneer 11 erreichte am 01. September 1979 auch Saturn. Nach diesen Rendezvous mit den Gasplaneten verließen die Sonden durch ein Swing-by-Manöver am Gasgiganten Jupiter das Sonnensystem in entgegengesetzten Richtungen: Pioneer 10 wird in etwa zwei Millionen Jahren den Stern *Aldebaran*, ein Roter Riese und Hauptstern im Sternbild *Stier*, erreichen; Pioneer 11 steuert auf das Sternbild *Adler* zu und wird in etwa vier Millionen Jahren beim nächsten Stern ankommen. Die Kommunikation mit Pioneer 11 riss am 30. September 1995 ab. Pioneer 10 bewegte sich mit etwa 40000 km/h im Jahr 2001 von Erde weg. Diese Sonde funkte am 23. Januar 2003 das letzte Signal - derzeit dürfte Pioneer 10 etwa 90 Astronomische Einheiten entfernt sein. Kommunikationsversuche am 07. Februar 2003 und 03.-05. März 2006 schlugen fehl, vermutlich weil die Sendeleistung der Sonde nun zu schwach ist. An Bord von Pioneer 10 befindet sich auch die berühmte Goldplatte, in die Gestalten einer nackten Frau und eines nackten Mannes, das Sonnensystem, die Ziffer 8 als Binärzahl, der Hyperfeinstrukturübergang von neutralem Wasserstoff (21cm-Linie), die Silhouette der Sonde und die Position der Sonne relativ zu 14 Pulsaren und des galaktischen Zentrums eingraviert sind.

17.21.2 Kommunikation mit den Pioneer-Sonden

Die interplanetare Kommunikation mit Raumsonden ist ein äußerst raffiniertes Verfahren: Im Fall der Pioneer-Sonden wurde von der Erde aus ein Radiosignal mit der Frequenz ν_{em} zu den Sonden gesendet. Es handelte sich um ein S-Band-Signal der Frequenz 2.11 GHz. Die Sonden bewegen sich relativ zur Erde mit einer Geschwindigkeit, so dass durch den speziell relativistischen Doppler-Effekt eine Frequenzverschiebung stattfindet. Genauer gesagt handelt es sich wegen der zunehmenden Entfernung der Sonden von der Erde um eine Doppler-Rotverschiebung (zweite Gleichung im Eintrag Doppler-Effekt), so dass die Sonde eine kleinere Frequenz des von der Erde kommenden Radiosignals misst. Die Sonde schickt mit der gleichen Radiofrequenz, mit der sie das irdische Signal *empfängt*, ein Signal zurück zur Erde. Dieses Sondensignal wird nun wiederum Doppler-rotverschoben, so dass bei der Erde eine neue Empfangsfrequenz ν_{rec} gemessen wird. Rechnerisch folgt diese Frequenz durch zweimaliges Anwenden der Doppler-Formel. Eliminiert man in diesen Gleichungen Sendefrequenz der Sonde durch Einsetzen, so resultiert eine Relation zwischen ν_{em} und ν_{rec}. Man schreibt diese Relation so um, dass man eine (dimensionslose) *relative Frequenzänderung* erhält:

$$\frac{\nu_{\mathrm{rec}} - \nu_{\mathrm{em}}}{\nu_{\mathrm{em}}} = -2\,\frac{v/c}{1+v/c},$$

mit Vakuumlichtgeschwindigkeit c. Auf der Erde sind beide Frequenzen ν_{em} und ν_{rec} bekannt, so dass aus dieser Gleichung sofort die **Sondengeschwindigkeit v** folgt. Das Pioneer-Team hat über Jahrzehnte diese Dopplergeschwindigkeit der Sonden gemessen. Unabhängig davon wurde die Signallaufzeit Δt gemessen, die nach $2D = c\,\Delta t$ die Entfernung D der Sonden liefert.

17.21.3 Was ist so ungewöhnlich?

Schon 1979 wurde eine **anomale Blauverschiebung** des Doppler-Signals gemessen. Mit anderen Worten unterliegen die Pioneer-Sonden einer **unerklärlichen Beschleunigung in**

Richtung Sonne. Eine Analyse der Messdaten zwischen 1987 und 1998 ergab eine konstante Zunahme dieser Blauverschiebung um etwa 6×10^{-9} Hz/s. Rechnet man dies auf Distanzen um, so folgt, dass sich die Sonden nach 15 Jahren um etwa eine Million Kilometer von der vorhergesagten Position entfernt befinden! Die Blauverschiebungsrate kann in eine konstante Abbremsung (negative Beschleunigung) umgerechnet werden, und man erhält etwa -8.74×10^{-8} cm/s^2 (*Anderson et al.* 1998; 2002). Das hört sich nach einem sehr kleinen Wert an, aber diese Zahl bereitet den Physikern großes Kopfzerbrechen.

17.21.4 Messfehler oder neue Physik?

Woher kommt die Abbremsung der Pioneer-Sonden? Kann man allen Messdaten trauen oder beweist die Pioneer-Anomalie einen neuen, physikalischen Effekt? Nach bekannt werden der rätselhaften Abbremsung wurde eine Fülle von wissenschaftlichen Artikeln publiziert, die die Anomalie zu erklären versuchten. Im Folgenden werden mögliche Ursachen vorgestellt, von denen in der Literatur fast alle als Erklärung ausgeschlossen werden:

Ursachen bei der Sonde

- ◇ Es kann sich nicht um den zufälligen Mess- oder Baufehler bei einer Sonde handeln, weil diese anomale Beschleunigung sogar von beiden Sonden *unabhängig* bestätigt wurde (Abweichung von 3%).
- ◇ Ein Rückstoß der Sonden durch Senden des Radiosignals ist viel kleiner als die anomale Beschleunigung.
- ◇ Ebenso ist eine Beschleunigung durch Emission von Wärmestrahlung ausgeschlossen, weil sie wegen des Leistungsabfalls der Sonde zeitlich variieren würde, aber die anomale Beschleunigung konstant ist.
- ◇ Interplanetare Magnetfelder können nicht die möglicherweise elektrisch aufgeladenen Sonden so sehr beeinflusst haben.
- ◇ Die radioaktive Energiequelle der Sonde ist Plutonium (Pu-238), ein Alpha-Strahler, der Helium erzeugt. Das Ausdampfen des Heliums führt zwar zu einem Rückstoss, kann aber als Ursache aufgrund der Kleinheit des Effekts und der speziellen Anordnung der thermoelektrischen Generatoren ausgeschlossen werden. Falls Variationszeitskalen bei der Anomalie auftreten würden, die vergleichbar mit der Halbwertszeit von Pu-238 (87.74 Jahre) sind, wäre das ein Hinweis auf die Energiequelle als Ursache (*Nieto* 2007).
- ◇ Die Sonden verlieren Treibstoff und werden dadurch beschleunigt - auch das ist ein zu kleiner Effekt verglichen mit der Anomalie.

Ursachen bei der Auswertung

- ◇ Ein Fehler in der Software zur Auswertung der Pioneer-Daten kann es auch nicht sein, weil drei verschiedene Programmpakete zum gleichen Ergebnis kamen.
- ◇ Unsicherheiten in Parametern zur Bahnberechnung gibt es zwar, aber sie erklären nur Tages- und Jahresschwankungen der Pioneer-Daten - jedoch nicht die Jahrzehnte andauernde konstante Beschleunigung.

◇ Probleme bei der Umrechnung in den verschiedenen Koordinatensystemen werden ebenfalls ausgeschlossen.

Ursachen durch bekannte Physik

◇ Die Radiosignale werden durch interplanetares Gas und Plasma beeinflusst, aber auch dieser Effekt ist deutlich kleiner als die Anomalie.

◇ Die Gravitationswirkungen der Körper im Sonnensystem, wie Sonne, Planeten, Monde, Kometen und Planetoiden wurden in aufwendigen numerischen Simulationen berücksichtigt und ergaben keine Erkenntnisse über den Ursprung der Anomalie.

◇ Die relativistische Zeitdilatation (*Shapiro-Effekt*) der Radiosignale wurde berechnet und kann als Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

◇ Interplanetarer und interstellarer Staub bremst tatsächlich die Sonden in ihrer Bewegung in die Tiefen des Alls ab. Allerdings zeigen Berechnungen, dass dieses Material etwa 300000-mal dichter sein müsste, um die Anomalie erklären zu können. Das widerspricht Dichtemessungen, die z. B. mit der Sonde Ulysses durchgeführt wurden.

◇ Der Sonnenwind beschleunigt die Sonden nach außen, würde also der Anomalie *entgegenwirken*. Der solare Strahlungsdruck nimmt außerdem jenseits von 15 Astronomischen Einheiten stark ab. Auch dieser Einfluss wird ausgeschlossen.

◇ Die Rotation von Sender und Empfänger hat Einfluss auf die Doppler-Verschiebung der Radiosignale (*Anderson & Mashhoon* 2003). Allerdings ist auch diese so genannte Spin-Rotations-Kopplung viel zu klein.

◇ Die Bewegung der Sonne senkrecht zur Ekliptik erzeugt zwar auch einen Effekt, der jedoch zu klein ist, als dass er Ursache der anomalen Beschleunigung sein könnte.

◇ Die Expansion des Universum klingt nach einer reizvollen Erklärung für die Anomalie ist aber vernachlässigbar, wie schon Arbeiten von Einstein gezeigt haben (*Einstein & Straus* 1945).

Ursachen durch neue Physik

◇ Ein Vorschlag nimmt Bezug auf die kosmologische Konstante, die nach der aktuellen Datenlage der experimentellen Kosmologie die favorisierte Form der Dunkle Energie im Kosmos ist. *Laurent Nottale* hat vorgeschlagen, dass die kosmologische Konstante zu einer Trägheitskraft führt, die die Pioneer-Sonden und andere freie Testkörper (aber nicht die Planeten!) zusätzlich beschleunige (gr-qc/0307042). Diese Zusatzbeschleunigung sei gerade die beobachtete, anomale Pioneer-Beschleunigung. Um den beobachteten Zahlenwert vollständig erklären zu können, sind allerdings weitere Effekte erforderlich.

◇ Höherdimensionale Branenmodelle würden die Gravitationsgesetze modifizieren. Eine entsprechende Modifikation bei großen Abständen, wie im DGP-Szenario, könnte neue Einblicke in das Pioneer-Rätsel liefern.

- ◇ Milgroms MOND-Theorie erklärt recht gut die Dynamik innerhalb von Spiralgalaxien und Galaxienhaufen, *ohne* dass die Existenz Dunkler Materie gefordert werden müsste. Es ist ein komischer Zufall, dass die empirisch bestimmte Beschleunigungskonstante a_0 die gleiche Größenordnung hat, wie die konstante Beschleunigung bei der Pioneer-Anomalie. Es ist unklar, ob MOND das Pioneer-Problem löst.

- ◇ Viele exotische und spekulative Vorschläge zur Lösung des Pioneer-Problems wurden gemacht, die alternative Gravitationstheorien involvieren, wie sie unter dem Eintrag Gravitation vorgestellt werden. Dennoch ist nicht klar, inwiefern das überzeugende Lösungen darstellen. Klare Hinweise durch weitere Beobachtungen müssen diese Alternativen erst festigen.

Bislang gibt es keine überzeugende Erklärung für die Pioneer-Anomalie. Sehr wahrscheinlich ist eine physikalische Ursache.

17.21.5 Deep Space Gravity Probe

Die Rätsel um die Pioneer-Anomalie haben zu dem Plan geführt, eine neue, speziell zur Untersuchung der Anomalie designte Mission zu starten. Das ESA-Missionsszenario *Deep Space Gravity Probe* soll Klärung verschaffen. Dies gehört jedoch zum *Cosmic Vision Program* der ESA, das erst Starttermine für 2015 - 2025 vorsieht. Eventuell geben auch andere, laufende Missionen wie die Pluto-Mission *New Horizons* Aufschluss über das Pionier-Problem.

17.21.6 Literatur, Datenquellen & Weblinks

- ◇ *Dittus, H.* & *Lämmerzahl, C.*: Die Pioneer-Anomalie, Physik Journal 5, 25, 2006

- ◇ *Anderson, J.D. et al.*: Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration, Phys. Rev. Lett. 81, 2858, 1998

- ◇ *Anderson, J.D. et al.*: Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11, Phys. Rev. D 65, 2004, 2002

- ◇ *Nieto, M.M.*: The Quest to understand the Pioneer Anomaly, 2007, Preprint: gr-qc/0702017

- ◇ Pioneer Website, NASA

17.22 Planck-Ära

Die Planck-Ära kennzeichnet die erste Phase in der Entwicklung des Universums nach dem Urknall.

17.22.1 Was passierte in der Planck-Epoche?

Es gab nach gegenwärtiger Meinung der Wissenschaftler in dieser Phase nur eine fundamentale Kraft, die **Urkraft**. Die vier fundamentalen Kräfte der Physik, die Gravitation, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung waren ununterscheidbar. Dies bezeichnet man auch als Unifikation der Kräfte. Die Planck-Ära leitet ihren Namen

von der Planck-Skala ab, denn das Milieu war bestimmt durch die Planck-Größen: Das Universum war so 'alt' wie die **Planck-Zeit**, also etwa 10^{-43} Sekunden und hatte eine **Planck-Temperatur** von 10^{32} Kelvin oder 10^{19} GeV.

17.22.2 keine Physik in der Planck-Ära

Die physikalische Beschreibung versagt in dieser Phase. Es ist nicht gelungen, eine physikalische Theorie zu entwickeln, die die Physik der Planck-Ära fassen kann. Als Kandidat werden die Stringtheorien gehandelt. Die M-Theorie ist eine Hypothese, die man aus der Verwandtschaft unterschiedlicher Stringtheorien und der Supergravitation ableitet. Vielleicht bietet sie die Werkzeuge, um der Planck-Ära Herr zu werden. Im Kern besteht die Herausforderung darin, die Gravitation mit Quanteneffekten beschreiben zu können. An einer solchen Quantengravitation wird aktuell geforscht, doch sind die Physiker noch weit davon entfernt verlässliche Aussagen machen zu können. In der Loop-Quantengravitation, einer weiteren Variante einer Quantengravitation, versuchen die Forscher die Allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu verknüpfen. Dabei werden allerdings die anderen Quantenfeldtheorien, wie schwache und starke Kraft zunächst außen vor gelassen.

17.22.3 Die Weltformel

Eine Theorie, die die Urkraft zu beschreiben vermag, wird weithin als **Vereinheitlichte Theorie** (engl. *Unified Theory*, **UT**) oder '**Theorie von Allem**' (engl. *Theory Of Everything*, **TOE**) bezeichnet. Populärwissenschaftlich wurde auch der Begriff von der **Weltformel** geprägt. Es bestehen allerdings berechtigte Zweifel daran, dass man aus einer solchen Weltformel unmittelbar den Facettenreichtum der Natur und beispielsweise die Entstehung von Leben ableiten kann.

In der Kosmologie wird allgemein angenommen, dass sich an die Planck-Ära die GUT-Ära bzw. Baryogenese nach einer spontanen Symmetriebrechung anschloss. Dabei spaltete sich die Urkraft in die Gravitation und die X-Kraft auf. Dieses Phänomen kennzeichnet den ersten Phasenübergang im Universum, der sich auf 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall datieren lässt.

17.23 Planckscher Strahler

Der Plancksche Strahler ist vermutlich das wichtigste **Strahlungsgesetz** in der Astronomie. Das liegt daran, weil sehr viele Quellen elektromagnetischer Strahlung im Universum durch ein solches Strahlungsgesetz beschrieben werden. Es handelt sich dabei um **Wärmestrahlung**, d. h. die elektromagnetische Emission wird von elektrischen Ladungen (in der Regel Elektronen, Protonen, Ionen) abgegeben, die sich aufgrund von Wärme bewegen.

17.23.1 Terminologie

Plancksche Strahler werden auch als Hohlraumstrahler, Schwarze Strahler oder Schwarze Körper (engl. *black body*, **BB**) bezeichnet. Der etwas allgemeine Name Wärmestrahler oder **thermischer Strahler** ist ebenfalls verbreitet.

17.23.2 Beispiele

Beispiele für Planck-Strahler aus dem Alltag sind eine Kerzenflamme, unsere Haut, ein Eiswürfel, eine Tasse Kaffee - eigentlich strahlt **alles** Wärmestrahlung ab, weil jeder Gegenstand eine endliche Temperatur hat. Einen Zustand endlicher Temperatur verlangt gerade der **dritte Hauptsatz der Thermodynamik**. Bei welcher Strahlungsenergie (*Farbe*) die höchste Strahlungsintensität liegt, bestimmt gerade die **Temperatur** des Strahlers.

Die kosmischen Planck-Strahler sind beispielsweise die kosmische Hintergrundstrahlung, fein verteilter, interplanetar Staub im Sonnensystem (siehe auch Zodiakallicht), das relativ kühle interstellare Medium in der Milchstraße, heißes intergalaktisches Gas, das zwischen den Galaxien in Galaxienhaufen zu finden ist, natürlich auch die Oberflächen von Sternen (siehe Effektivtemperatur und Spektraltyp) oder auch die Standardscheiben, die um diverse kosmische Objekte (Protosterne, Weiße Zwerge, Schwarze Löcher) rotieren.

17.23.3 Geschichtliches

Der Plancksche Strahler wurde nach dem deutschen Physiker *Max Planck* (1858 - 1947) benannt. Er ist ein Pionier der Quantentheorie, weil er die **Quanten der Wärmestrahlung** im Jahr 1900 entdeckt hat (Nobelpreis für Physik 1918). Erst später wurde klar, dass Licht und elektromagnetische Strahlung *generell* quantisiert sind (Einsteins Lichtquantenhypothese 1905, siehe auch Photon).

17.23.4 Das Planck-Spektrum

Ein Planck-Strahler gibt Wärmestrahlung als **kontinuierliches Spektrum** über einen theoretisch beliebig großen Spektralbereich ab. Die *Plancksche Strahlungsverteilung* ist jedoch nicht konstant über alle Wellenlängen oder extrem schmal wie eine Spektrallinie: es ist eine recht breite Verteilung, die ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge der Strahlung (Strahlungsfrequenz, -energie) annimmt. Die Position dieses Maximums und das Profil der Verteilung diktiert **einzig die Temperatur** als wichtigster Parameter eines Planck-Strahlers.

Die Gestalt einer Planckschen Strahlungsverteilung in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 17.8. Dabei entsprechen 0 Kelvin gleich -273.16° Celsius, so sind z. B. 1000 Kelvin gleich 726.84° Celsius. In der Horizontalen ist die Wellenlänge der Strahlung in Mikrometern (10^{-6} Metern) angegeben. Die Größe in der Vertikalen heißt *spektrale Strahlungsdichte* und ist ein Maß für die Strahlungsintensität des Planckschen Strahlers. Wie man in den Beispielen gut erkennen kann, verschiebt sich das Maximum der Verteilung zu kleineren Wellenlängen, wenn die Temperatur des Strahlers anwächst. Deshalb kann ein besonders heißer Körper auch optische Planck-Strahlung abgeben. Der linke Rand im Diagramm entspricht gerade 0.5 μm = 500 nm, also grünem Licht. Der rechte Rand ist der Bereich der Infrarotstrahlung.

17.23.5 Wo liegt das Strahlungsmaximum?

Das Maximum der Planckschen Strahlungsverteilung kann mit dem **Wienschen Verschiebungsgesetz** berechnet werden

$$\lambda_{\max} = \frac{2\ 880\ 000}{T_{\text{eff}}\ [K]}\ \text{nm}.$$

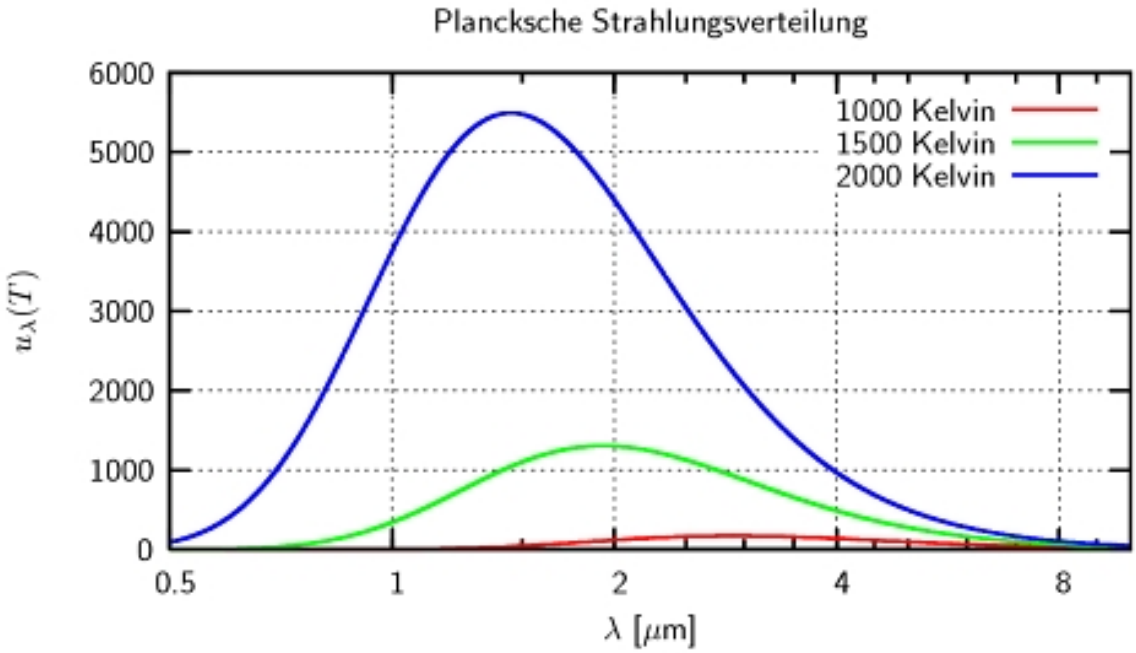

Abbildung 17.8: Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen.

(Dies ist nachzurechnen mittels Kurvendiskussion der unten notierten Strahlungsformel). Dieser Zusammenhang wurde 1893 von dem deutschen Physiker *Wilhelm Karl Werner Wien* (1864 - 1928) gefunden. Einsetzen der Temperatur liefert die Wellenlänge am Strahlungsmaximum. Dieses Maximum bestimmt, bei welcher Strahlungsenergie (=Farbe) der Plancksche Strahler die höchste Strahlungsintensität erreicht. Einfacher gesagt: Die Temperatur bestimmt, wie uns ein Körper erscheint und welche Strahlungsdetektoren man verwenden sollte, um die thermische Strahlung zu messen.

Unsere Haut leuchtet deshalb bei etwa 10 μm im Nahinfrarot. Die einige hundert Grad heiße Glut im Feuer erscheint uns daher rot. Die Sonne mit etwa 6000 Grad Oberflächentemperatur sehen wir als gelben Stern. Ein an der Oberfläche extrem heißer Weißer Zwerg erscheint blau-weiß.

17.23.6 Die Strahlungsformel

Für diejenigen, die es ganz genau wissen wollen, wird im Folgenden die **Plancksche Strahlungsformel** vorgestellt, um die Planck-Spektren berechnen zu können. Dabei wird vereinfachend **Isotropie** der Strahlung vorausgesetzt, was mit einem Faktor 4π in den Strahlungsformeln beiträgt. Was bei der Berechnung Schwierigkeiten bereiten kann, ist die korrekte Umrechnung, je nachdem ob man die Planck-Verteilung als Funktion der Wellenlänge, der Strahlungsfrequenz oder der Strahlungsenergie ausdrückt.

Generell berechnet sich die **totale Energiedichte der Strahlung** $u = U/V$ aus einem Integral über die spektrale Energiedichte u_ν. Je nachdem, ob man über Wellenlänge λ, Frequenz ν bzw. $\omega = 2\pi\nu$ oder Energie E integriert, entscheidet man sich für eines der

folgenden vier Integrale:

$$u = \int u_\lambda(T) d\lambda = \int u_\nu(T) d\nu = \int u_E(T) dE = \int u_\omega(T) d\omega$$

$$\begin{aligned}
u_\lambda(T) &= \frac{8\pi\,\mathrm{hc}}{e^{\mathrm{hc}/\lambda \mathrm{k_B} T} - 1} \frac{1}{\lambda^5} \\
u_\nu(T) &= \frac{8\pi \mathrm{h}}{\mathrm{c}^3} \frac{1}{e^{\mathrm{h}\nu/\mathrm{k_B} T} - 1} \nu^3 \\
u_E(T) &= \frac{8\pi}{(\mathrm{hc})^3} \frac{1}{e^{E/\mathrm{k_B} T} - 1} E^3 \\
u_\omega(T) &= \frac{\hbar}{\pi^2 \mathrm{c}^3} \frac{1}{e^{\hbar\omega/\mathrm{k_B} T} - 1} \omega^3
\end{aligned}$$

$$\frac{8\pi\mathrm{hc}}{\lambda^5}\, d\lambda = \frac{8\pi \mathrm{h}\nu^3}{\mathrm{c}^3}\, d\nu = \frac{8\pi E^3}{(\mathrm{hc})^3}\, dE = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 \mathrm{c}^3}\, d\omega$$

Hier muss man auf die Vorfaktoren aufpassen. Substitution der Wellenlänge durch eine Frequenz involviert andere Vorfaktoren, damit u bzw. alles unter dem Integral immer die Dimension Energie pro Volumen haben. Als Rechenhilfe zeigt die letzte Zeile die Umrechnungen, die sich aus den Substitutionen im Integral ergeben.

17.23.7 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Das oben gezeigte Integral für die gesamte Energiedichte u lässt sich explizit ausführen (Verwendung von Gamma- und Zeta-Funktion) und führt auf das berühmte **Stefan-Boltzmann-Gesetz** oder T^4-*Gesetz*. Es besagt, dass die Energiedichte eines Photonengases (ebenso wie dessen Druck und innere Energie) proportional zur vierten Potenz in der Temperatur ist. Die Proportionalitätskonstante heißt **Stefan-Boltzmann-Konstante** mit dem Zahlenwert $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}. Diese Relation wurde 1879 empirisch von dem österreichischen Physiker *Josef Stefan* (1835 - 1893) gefunden und fünf Jahre später von seinem Landsmann *Ludwig Boltzmann* (1844 - 1906) theoretisch hergeleitet.

Dass der Druck eines Photonengases (*radiativer Druck*) so stark mit der Temperatur ansteigt, ist bedeutsam für die Stabilität von Sternen in der Astrophysik (siehe auch hydrostatisches Gleichgewicht).

17.23.8 Rayleigh-Jeans- und Wien-Ast

Es ist auch interessant sich zu überlegen, was mit der Planckschen Strahlungsverteilung im Grenzwert großer Wellenlängen (kleiner Frequenzen) bzw. kleiner Wellenlängen (großer Frequenzen) geschieht. Mit den Reihenentwicklungen der Exponentialfunktion folgen dann die beiden wichtigen Grenzfälle, die bei kleinen Frequenzen **Rayleigh-Jeans-Ast** und bei großen Frequenzen **Wien-Ast** heißen:

$$\begin{aligned}
u_\nu^{\mathrm{Rayleigh}}(T) &\simeq \frac{4\mathrm{k_B} T}{\mathrm{c}^3} \nu^2; \mathrm{h}\nu \ll \mathrm{k_B} T \\
u_\nu^{\mathrm{Wien}}(T) &\simeq \frac{8\pi \mathrm{h}}{\mathrm{c}^3} \nu^3\, e^{-\mathrm{h}\nu/\mathrm{k_B} T}; \mathrm{h}\nu \gg \mathrm{k_B} T
\end{aligned}$$

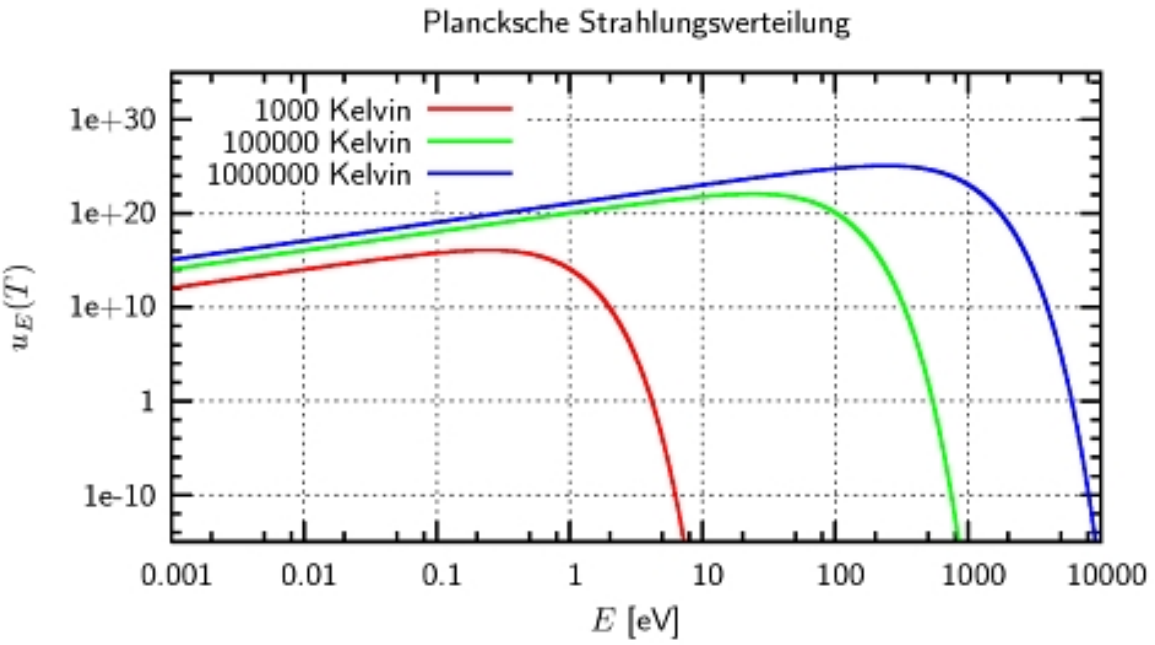

Abbildung 17.9: Plancksche Strahlungsverteilung in Abhängigkeit der Strahlungsenergie für verschiedene Temperaturen.

Rayleigh-Jeans-Formel und *Wiensche Strahlungsformel* sind demnach verschiedene Limites der Planckschen Strahlungsformel. Historisch war gerade das Rayleigh-Jeans-Gesetz (erste Gleichung) der Ausgangspunkt für Max Plancks bahnbrechende Entdeckung. Die Gleichung macht Probleme bei hohen Frequenzen, weil sie dann gegen unendlich strebt. Dieses Verhalten bezeichnen Physiker als **Ultraviolettkatastrophe** oder **Ultraviolettdivergenz**.

Plancks Quantisierungsansatz der Wärmestrahlung bereinigte diese UV-Divergenz. Anhand der zweiten Gleichung für den Wien-Ast sieht man wieso: der Exponentialterm dominiert bei großen Frequenzen und 'dämpft' damit die Divergenz ab.

Die Forderung nach Quantisierung läutete eine Vielzahl wichtiger Entdeckungen und Anwendungen in der modernen Physik des 20. Jahrhunderts ein, von der wir heute noch profitieren.

17.23.9 Hochenergetische Wärmestrahlung

Abschließend betrachten wir noch ein Beispiel, das demonstriert, dass Wärmestrahlung nicht immer Infrarotstrahlung sein muss. Dazu verwenden wir die Gleichung der spektralen Energiedichte in Abhängigkeit von der Energie und stellen die Verteilung für verschiedene recht hohe Temperaturen von tausend bis eine Million Kelvin dar – das Ergebnis zeigt Diagramm 17.9.

Wie beim Strahlungsmaximum besprochen, bestimmt die Temperatur die Position des Maximums. Ist es denkbar, dass ein Körper so heiß ist, dass seine Plancksche Strahlungsverteilung vor allem im hochenergetischen Röntgenbereich emittiert? Ja, das zeigt uns ein Blick auf die Energieachse im Diagramm: einige keV sind gerade typische Energien der Röntgenstrahlung. Solche Planck-Strahler sind wichtig in der **Röntgenastronomie**. So ist

das intergalaktische Medium (IGM) in Galaxienhaufen so heiß, dass seine thermische Emission typischerweise mit Röntgenteleskopen beobachtet wird.

17.24 Planck-Skala

Eine fundamentale Skala in der Physik, die den Gültigkeitsbereich von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie absteckt und den Bereich neuer physikalischer Theorien wie der Quantengravitation markiert.

17.24.1 Herleitung der Planck-Skala

Der deutsche Physiker und 'Vater der Quantentheorie' *Max Planck* (1858 - 1947) wies bereits darauf hin, dass eine kritische Masse existiere, ab der eine Beschreibung mit Relativitätstheorie und Quantentheorie versagen müsse. Seither nennt man diese kritische Masse die **Planck-Masse** (oder äquivalent Planck-Energie). Formal folgt sie aus der Gleichsetzung der Gleichungen für den Gravitationsradius und der Compton-Wellenlänge:

$$r_{\mathrm{g}} = \frac{\mathrm{G}M}{\mathrm{c}^2},\ \lambda_{\mathrm{C}} = \frac{\hbar}{M\mathrm{c}}.$$

Auflösen nach der Masse M ergibt:

$$\begin{aligned} \mathrm{M_P} &= \sqrt{\frac{\hbar \mathrm{c}}{\mathrm{G}}} && (17.2)\\ &\approx 2.2 \times 10^{-5}\ \mathrm{g} && (17.3)\\ &\approx 1.2 \times 10^{19}\ \mathrm{GeV}. && (17.4) \end{aligned}$$

Anschaulich wird bei diesem kritischen Wert die Gravitation so stark wie die starke Wechselwirkung, und es werden Quanteneffekte bei der Gravitation wichtig. Allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie sind für sich genommen ab diesen Energien nicht mehr ein adäquates Konzept zur Beschreibung der Vorgänge und eine Quantengravitation - eine quantisierte Gravitationstheorie - muss angewendet werden.

17.24.2 Planck-Temperatur, -Länge, -Zeit, -Dichte

Zur Planck-Masse von 1.2×10^{19} GeV lassen sich entsprechende Werte für andere physikalische Größen ableiten:

- ◇ **Planck-Temperatur**: 1.4×10^{32} K (verwende Gleichung $E = \mathrm{k}T$)
- ◇ **Planck-Länge**: 1.6×10^{-35} m
- ◇ **Planck-Zeit**: 5.4×10^{-44} s (Der Zeit, die das Licht für das Zurücklegen der Planck-Länge benötigt.)
- ◇ **Planck-Dichte**: 1.3×10^{93} g/cm^{-3} (Planck-Masse in einer Kugel mit Radius der Planck-Länge).

17.24.3 Sub-Planck-Physik vs. Super-Planck-Physik

Anmerkung: Es gibt bisweilen unterschiedliche Konventionen, die h oder h/2π verwenden (ħ, 'h quer'), je nach Einheitensystem (SI, cgs, Heaviside).

Werden Planck-Masse, Planck-Dichte und Planck-Temperatur überschritten bzw. Planck-Länge und Planck-Zeit unterschritten beginnt die Domäne der Quantengravitation. Der Planck-Wert teilt die Welt in **Sub-Planck-Physik** und **Super-Planck-Physik**.

17.24.4 Hoffnung auf eine reduzierte Planck-Skala?

Die Stringtheorien postulieren die Existenz weiterer Dimensionen, den so genannten Extradimensionen, um das **Hierarchieproblem** der vier fundamentalen Wechselwirkungen zu lösen. Die Extradimensionen sind - sollten sie tatsächlich existieren - kompaktifiziert und treten auf großen Raumskalen daher nicht in Erscheinung. Die Gravitation breite sich jedoch nach einer Idee in allen Dimensionen aus: den gewöhnlichen, nicht-kompaktifizierten und den kompaktifizierten. Dabei zeigt sich, dass zusätzliche Dimensionen die Planck-Masse herabsetzen. Dies nennt man **reduzierte Planck-Skala**.

Eine aufregende Möglichkeit besteht darin, dass man diese reduzierte Skala in modernen Teilchenbeschleunigern überprüfen könnte - und vielleicht sogar die Anzahl der Extradimensionen zählen könnte. Die klassische Planck-Masse bei den üblichen vier Dimensionen (siehe auch Raumzeit) liegt in oben genannten gigantischen Energiebereichen von 10^{19} Protonenmassen. Schon bei zehn Extradimensionen reduziert sich die Planck-Skala bis auf etwa 1 TeV (Stichwort: *TeV quantum gravity*). Die modernsten Teilchenbeschleuniger wie der Tevatron oder der noch im Bau befindliche LHC (*Large Hadron Collider*, Start 2007) am CERN stoßen in dieses Energieregime vor, so dass hier die Extradimensionen in Erscheinung treten könnten.

17.24.5 Produktion Schwarzer Mini-Löcher?

Es ist noch dramatischer: Superbeschleuniger wie der LHC könnten im Kollisionsereignis ein - für kosmische Verhältnisse kleines - Schwarzes Loch erzeugen! Diese Minilöcher sind um Größenordnungen kleiner als die primordialen Schwarzen Löcher und würden in Sekundenbruchteilen (einige hundert fm/c, also etwa 10^{-22} Sekunden) durch Emission von Hawking-Strahlung zerfallen. Wegen dieser kurzen Lebensdauer wären sie nicht direkt, sondern nur indirekt nachweisbar. So nehmen die Hochenergiephysiker an, dass die Minilöcher ein recht kugelsymmetrisches Ereignis im Detektor produzieren würden.

Das klingt schon faszinierend und wäre ein Fenster in aufregende, neue Physik. Natürlich müssen diese Erkenntnismöglichkeiten mit den Risiken abgewogen werden. Die Betriebssicherheit der Teilchenbeschleuniger hat immer Vorrang! Darüber sind sich natürlich die Experimentatoren im Klaren. Es steht eine **Laborphysik mit Schwarzen Löchern** in Aussicht, die erstmals die Detektion von Hawking-Strahlung ermöglichen, den Nachweis von Extradimensionen erbringen und eine neue Quantengravitation experimentell greifbar machen würde!

17.25 Planet

Das Wort Planet kommt aus dem Griechischen: *πλᾰνήτου*, *planetos*, 'Umherschweifender'. Ein Planet ist ein kugelförmiges Himmelsobjekt, in dessen Innern im Gegensatz zu einem

Stern wie unserer Sonne keine thermonuklearen Fusionsprozesse ablaufen. Planeten kreisen um einen zentralen Stern und bewegen sich auf elliptischen oder kreisförmigen Bahnen. Aber Planeten sind keine Monde, denn Monde sind kleine Himmelskörper, die ihrerseits um einen Planeten kreisen.

Die Bewegungen dieser Massen im Sonnensystem können mit den Kepler-Gesetzen beschrieben werden. Sie folgen aus Rechnungen, die auf der Newtonsche Gravitation basieren.

Astronomen unterscheiden Gasplaneten von erdähnlichen Planeten mit fester Oberfläche. Sie unterscheiden weiterhin innere Planeten (innerhalb der Erdbahn: Merkur und Venus) von äußeren Planeten (außerhalb der Erdbahn: Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun).

17.25.1 Die Vorgeschichte zum neuen Planetenbegriff

Im August 2006 trafen sich mehr als 2500 Astronomen in Prag zu einer Konferenz der Internationalen Astronomischen Union (*International Astronomical Union*, **IAU**). Im Zuge der immer besseren Beobachtungstechnologien wurden in den letzten Jahren viele neue Objekte im Sonnensystem jenseits der Bahn von Pluto entdeckt. Um nicht eine Fülle von Planeten im Sonnensystem zu haben, die aus einer sehr inhomogenen Gruppe bestehen, sahen sich die Astronomen gezwungen, den Planetenbegriff zu überdenken. Sie stimmten bei der IAU-Konferenz über neue Definitionen ab, die seither offiziell festlegen, was Planet ist und was nicht.

17.25.2 Definitionen: Planet

Ein *Planet* ist nach der neuen Definition seit August 2006 ein Himmelskörper, der...

- ... um die Sonne kreist,
- ... ein Gravitationsfeld hat, das stark genug ist, dass der Himmelskörper nahezu rund ist
- ... und eine um seinen unmittelbaren Orbit freie Nachbarschaft hat.

Somit gibt es nun **acht Planeten im Sonnensystem**: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun.

17.25.3 Definitionen: Zwergplanet

Weiterhin wurde eine zweite Objektklasse *Zwergplanet* definiert. Ein Zwergplanet...

- ... kreist um die Sonne,
- ... besitzt ein Gravitationsfeld, das stark genug ist, dass der Himmelskörper nahezu rund ist,
- ... hat **keine** freie Nachbarschaft in der Nähe seines Orbits
- ... und ist kein Satellit.

(Quelle: IAU-Website)

Der letzte Zusatz schließt die zahlreichen Monde im Sonnensystem von den Zwergplaneten aus. Daher gibt es **drei Zwergplaneten**: Ceres (ein ehemaliger Planetoid), Pluto (ein ehemaliger Planet) und 2003 UB_{313} (ein neu entdecktes Objekt jenseits der Plutobahn). Pluto wurde außerdem zum Prototypen einer neuen Kategorie gemacht: den **Trans-Neptunischen Objekten** (engl. *trans-Neptunian objects*, **TNOs**). Der unschöne Katalogname 2003 UB_{313} wurde bereits im September 2006 durch **Eris** ersetzt. Dieser Name wurde von den Entdeckern *M.E. Brown*, *C.A. Trujillo* und *D. Rabinowitz* vorgeschlagen, die Eris am 05. Januar 2005 entdeckten. Eris ist in der griechischen Mythologie die Göttin der Zwietracht - die Namensgebung darf sicherlich als ironische Anspielung auf den Streit um den Status von Pluto angesehen werden. Denn die 'Degradierung von Pluto' vom Planeten zum Zwergplaneten hatte heftige Diskussionen ausgelöst. Der Mond dieses Zwergplaneten Eris, der vorläufig S/2005 (2003 UB_{313}) 1 hieß, heißt fortan offiziell **Dysnomia**. Die Fachbezeichnung des Monds lautet (136199) Eris I. Dysnomia ist in der Mythologie der Dämon der Gesetzlosigkeit und die Tochter von Eris.

Außerdem gibt es bereits eine Kandidatenliste für weitere Zwergplaneten, weil jenseits der Plutobahn weitere Himmelskörper des Sonnensystems entdeckt wurden, die in diese Kategorie passen. Eine diagrammatische Übersicht der mittleren Entfernungen im Sonnensystem befindet sich im Eintrag Astronomische Einheit.

17.25.4 extrasolare Planeten

Diese Planeten kreisen um Sterne außerhalb unseres Sonnensystems und sind äußerst schwer zu entdecken. Sie leuchten im Vergleich zu einem Stern sehr schwach und werden vom Hauptstern überstrahlt. Es gibt im Wesentlichen zwei Methoden, um sie aufzuspüren:

1) Eine indirekte Methode heißt **Doppler-Whobbling-Methode** (siehe auch Doppler-Effekt). Durch sie kann man feststellen, dass sich der Hauptstern minimal hin- und herbewegt, weil Planet/en und Hauptstern um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Mithilfe dieser Methode können Astronomen sogar Planetenmassen bestimmen. Aufgrund der Unempfindlichkeit der Methode muss der Planet schon sehr massereich sein und sich im Bereich von Jupitermassen bewegen, um detektiert zu werden.

2) Eine alternative Methode zur Entdeckung von Planeten heißt **Bedeckungsmethode**. Bei geeigneter Orientierung kann es passieren, dass ein Planet vor der Sternscheibe des Hauptgestirns vorüberzieht und für eine gewisse Zeit das Sternlicht verdunkelt. Dieses Phänomen heißt in der Fachsprache Transit. Mithilfe photometrischer Methoden messen Astronomen die Helligkeiten des Sterns und können aus der Lichtkurve auf den Planeten schließen.

17.25.5 Zahl der extrasolaren Planeten

Mittlerweile kennt man etwa 200 solcher extrasolaren Planeten.

17.26 Planetarische Nebel

Planetarische Nebel (engl. *planetary nebula*) haben nichts mit Planeten zu tun. Die Bezeichnung ist historisch bedingt, weil die Astronomen die ausgedehnten, im Fernrohr flächenhaft erscheinenden Nebel mit Planetenscheiben in Verbindung brachten. Heute wissen wir, dass das ein Irrtum war.

Denn die farbenprächtigen Planetarischen Nebel sind das Überbleibsel einer sehr aktiven Phase einer bestimmten Klasse von Sternen: den **Roten Riesen**.

17.26.1 Relikte eines Sternenlebens

Rote Riesen geben **starke Sternwinde** ab und blasen damit Sternmaterie ins interstellare Medium. Die Sonne wird ebenfalls diese Rote-Riesen-Phase in etwa 6.5 Mrd. Jahren durchlaufen und durch den

Sonnenwind fast die Hälfte ihrer Masse verlieren! Nach der Riesensternphase bleiben zwei Relikte: ein ausgedehnter Planetarischer Nebel und in dessen Zentrum ein **Weißer Zwerg**.

17.26.2 Warum sehen wir den Nebel?

In diesem Zwerg laufen keine thermonuklearen Fusionsprozesse mehr ab. Aber der Weiße Zwerg ist extrem heiß und gibt Wärmestrahlung sogar im Ultravioletten ab. Diese energiereiche Strahlung regt die abgestreifte Sternmaterie in der Umgebung zum Leuchten an: der Planetarische Nebel erstrahlt und präsentiert sich dem entzückten Beobachter.

17.26.3 attraktives Beispiel: Der Katzenaugennebel NGC 6543

Das Beobachtungsfoto 17.10 zeigt den farben- und formenprächtigen Planetarischen Nebel NGC 6543, auch Katzenaugennebel (engl. *Cat's Eye nebula*) genannt, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: STScI/ACS/ESA *Corradi et al.*, April 2004). Der Nebel ist etwa 3000 Lichtjahre entfernt und liegt im Sternbild *Draco* (dt. Drachen) am Nordhimmel. Etwa alle 1500 Jahre wirft der Stern Materie in kugelartigen Blasen aus. Die konzentrischen Ringe sind Relikte dieser Sternwinde und entstehen durch Projektion an die Himmelssphäre. Entlang einer Achse befinden sich stellare Jets und Gasknoten, die die Ringstrukturen durchstoßen (gut zu sehen oben rechts und unten links). Die komplexe Struktur im Innern ist noch nicht genau verstanden und rührt vermutlich von der Überlagerung nicht-kugelförmiger Winde sowie vom Einfluss durch Magnetfelder.

17.26.4 aktuelles Beispiel: NGC 2440, ein ganz heißes Teil

Das Beobachtungsfoto 17.11 stammt ebenfalls vom Weltraumteleskop Hubble und zeigt den Planetarischen Nebel NGC 2440, der dem Katzenaugennebel kaum in Schönheit nachsteht (Credit: NASA/ESA *Noll et al.*, STScI, Februar 2007). NGC 2440 ist etwa 3600 Lichtjahre entfernt (und gehört damit zur Milchstraße) und befindet sich am Südhimmel im Sternbild *Puppis* (dt. Hinterdeck). Im Zentrum des Nebels befindet sich wie erwartet ein Weißer Zwerg, der mit **200000 Kelvin** Oberflächentemperatur (präzise: Effektivtemperatur) zu den heißesten überhaupt gehört!

Die Kompositaufnahme entstand nach dem verhängnisvollen Defekt der Kamera ACS und wurde mit der noch voll funktionsfähigen Kamera WFPC2 aufgenommen.

17.27 Poincarégruppe

Die Poincarégruppe bzw. Poincaré-Transformation ist benannt nach dem Mathematiker *Jules Henri Poincaré* (1854 - 1912). Es handelt sich um eine bestimmte, mathematische Gruppe, die wesentlich ist für die Allgemeine Relativitätstheorie.

17.27.1 Eigenschaften der Poincarégruppe

Im Gegensatz zur Lorentzgruppe ist die Poincarégruppe eine *lineare,* ***inhomogene*** *Transformation*, denn sie entspricht gerade der Lorentzgruppe **erweitert um die endlichen Translationen**. Dies sieht man direkt an der Transformationsvorschrift

$$x^\mu \to x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu + b^\mu,$$

wo ein zusätzlicher Term auftritt, der eine Verschiebung in Raum und/oder Zeit sein kann (der Vierervektor $\mathbf{b}^\mu$).

Abbildung 17.10: Katzenaugennebel NGC 6543.

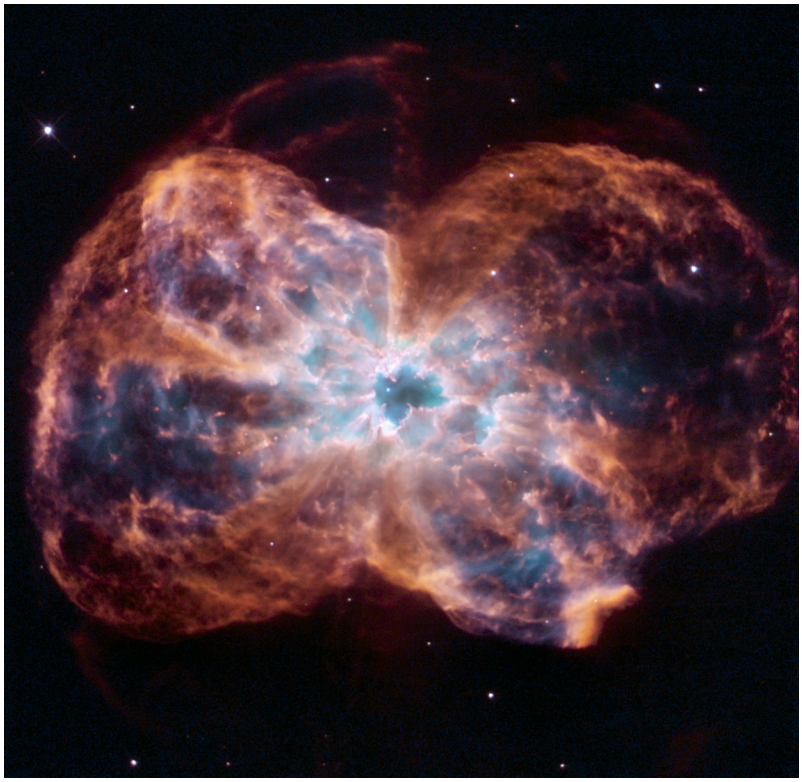

Abbildung 17.11: Planetarischer Nebel NGC 2440.

17.27.2 Vergleich von Lorentzgruppe mit Poincarégruppe

Weil die Lorentz-Transformation eine *lineare,* ***homogene*** *Transformation* ist, leuchtet unmittelbar ein, dass die Lorentzgruppe eine (eigentliche) **Untergruppe** der Poincarégruppe ist. Die Translationen, ebenfalls lineare Transformationen, bilden eine (invariante) Untergruppe der Poincarégruppe. So kann man schnell ableiten, dass die Poincarégruppe eine **zehnparametrige Gruppe** ist: Sechs Lorentzparameter, die sie von der sechsparametrigen Lorentzgruppe erhält und vier Translationsparameter, die gerade die Einträge im translatierenden Vierervektor $\mathbf{b}^{\mu}$ sind.

17.27.3 Bezug zur Symmetrie und Physik

Die Poincarégruppe konstituiert sämtliche Transformationen, die die Minkowski-Metrik invariant lassen, also die komplette Menge ihrer Isometrien.

Die physikalische Relevanz der Poincarégruppe rührt daher, weil sie unterschiedliche, ausgezeichnete Bezugssysteme eines physikalischen Beobachters (**Inertialsysteme**) ineinander überführt!

17.28 Poincaré-Transformation

Die Poincaré-Transformation entspricht einer erweiterten Lorentz-Transformation, weil sie zusätzlich die Translationen enthält. Daher ist es eine inhomogene, lineare Transformation. Die Poincaré-Transformation bilden eine Gruppe: die Poincarégruppe. Die Lorentzgruppe der Relativitätstheorie ist eine **Untergruppe** der Poincarégruppe. Das erklärt die Relevanz der Poincaré-Transformationen für die Relativitätstheorie. Die Transformationsvorschrift und weitere Erläuterungen finden sich unter dem Eintrag Poincarégruppe.

17.29 Polytrop

Polytrop ist die Fachbezeichnung für eine ganz bestimmte Zustandsgleichung. Zum Verständnis sind einige Grundkenntnisse in der Thermodynamik (Wärmelehre) nötig. Eine Zustandsgleichung stellt eine Beziehung zwischen thermodynamischen Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck und Materiedichte her. In der Astronomie werden polytropische Zustandsgleichungen zur Beschreibung von Sternmaterie und Gas benutzt.

17.29.1 barotrope und polytrope Zustandsgleichungen

In der Astrophysik werden häufig *barotrope* und *polytrope* Zustandsgleichungen verwendet. Beides sind vereinfachte Zustandsgleichungen: die barotrope Form ist dadurch gekennzeichnet, dass der **Druck nur von der Dichte abhängt**, während ein Polytrop die Form hat, wie sie die Gleichung links zeigt (K: Polytropenkonstante, n: Polytropenindex).

17.29.2 zwei wesentliche Polytrope

Die beiden wichtigsten Spezialfälle sind $n = 3/2$ ($\Gamma = 5/3$), was ein **nicht-relativistisches** Gas beschreibt und $n = 3$ ($\Gamma = 4/3$), was ein **relativistisches** Gas (z. B. relativistische Elektronen) beschreibt.

17.29.3 Weiße Zwerge sind polytropisch

Ein Paradebeispiel aus der Astrophysik sind die Weiße Zwerge. Die kompakte Sternmaterie im Innern dieses kompakten Objekts besteht vor allem aus Elektronen, die sich infolge des Pauli-Prinzips nicht beliebig nahe kommen können. Das baut einen Druck auf, der den kompakten, kleinen Stern stabilisiert, den so genannten *Entartungsdruck*.

Diese Form eines 'Quantendrucks' kann jedoch nicht beliebig lange den Zwerg stabilisieren: Wird der Weiße Zwerg zu schwer und überschreitet eine charakteristische Grenzmasse, die Chandrasekhar-Grenze, so explodiert der Zwerg in einer Supernova Typ Ia. Diese thermonukleare Supernova lässt kein kompaktes Relikt übrig.

17.29.4 Buchtipp: Standardwerk von Chandrasekhar

- ◇ *Chandrasekhar, Subrahmanyan*: An introduction to the study of stellar structure, The University of Chicago press (1939)

17.30 Population

In der Astronomie unterscheidet man unterschiedliche Generationen von Sternen. Diese Sternpopulationen heißen **Population I, II** und **III** und werden bei dem Begriff des Metalls im Detail beschrieben.

17.31 Post-Newtonsche Approximation

Eine approximatives Gravitationsmodell zwischen Einsteinscher Allgemeiner Relativitätstheorie und Newtonscher Gravitation - siehe Gravitation für weitere Erläuterungen.

17.32 Poynting-Fluss

Der Poynting-Fluss ist ein elektromagnetischer Energie-Fluss, der durch Magnetfelder getrieben wird. Die Astrophysiker rechnen in der Theorie Poynting-Flüsse aus, um die Plasmaphysik diverser kosmischer Objekte zu verstehen.

17.32.1 Wozu braucht man das?

Generell hängen Poynting-Flüsse mit einer physikalischen Disziplin zusammen, die **Magnetohydrodynamik (MHD)** heißt. Hier werden die physikalischen Gesetze der Fluiddynamik und Elektrodynamik verknüpft - das klingt kompliziert, und das ist es leider auch. Zur Lösung der MHD-Differentialgleichungen sind die Physiker fast ausnahmslos auf Computer angewiesen.

17.32.2 Beispiele: Plasmaphysik der Sonne und der Schwarzen Löcher

Wesentliche Anwendungen sind die Sonnenphysik, genauer gesagt die **solare MHD**, sowie die Physik Schwarzen Löchern, hier die **allgemein relativistische MHD auf der Kerr-Geometrie**. Der Poynting-Fluss wird im Falle der Sonne von der Photosphäre emittiert. Bei rotierenden Schwarzen Löchern gibt es um den Ereignishorizont den Bereich der Ergoregion, den nach außen durch die Ergosphäre begrenzt ist. Ragt die innere Akkretionsscheibe bis in die Ergoregion herein, sprechen Astrophysiker von *ergosphärischen Akkretionsscheiben*. Der Poynting-Fluss kann unter dieser Voraussetzung von der inneren Scheibenoberfläche abgestrahlt werden. In beiden Fällen - Sonne und Kerr-Loch - betrachten Astrophysiker **magnetische Flussröhren** (engl. *flux tubes*). Im Prinzip sind das Magnetfeldlinien, die von den elektrischen Ladungen im Plasma erzeugt (*induziert*) werden. Die Dynamik und Wechselwirkung der Flussröhren bestimmt gerade, wie Plasma aus der Oberfläche der Sonne bzw. Akkretionsscheibe gerissen wird.

17.32.3 magnetische Energie wird Bewegungsenergie

Nun kommt ein Mechanismus ins Spiel, der in der MHD **Rekonnexion** genannt wird. Dies meint gerade den Vorgang, bei dem Magnetfeldlinien entgegengesetzter Polarität vernichtet werden. Dabei wird magnetische Energie frei, die in den Feldlinien gespeichert ist: sie wird in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt. Die Magnetfeldlinien durchstoßen die Oberfläche des Plasmas. Bei der Sonne bilden sich an diesen Stellen gerade die Sonnenflecken aus. Das Plasma wird entlang der Magnetfeldlinien aus der Oberfläche extrahiert und durch magnetische Wellen, so genannte Alfvén-Wellen, weiter getrieben (siehe auch Alfvén-Geschwindigkeit). Dadurch entsteht ein ausfließender Partikelstrom. Bei der Sonne nennen das die Astrophysiker den *Sonnenwind*, ansonsten sprechen sie generell von einem *Teilchenwind*.

Die Beschreibung der Flussröhren mit sieben Erhaltungsgrößen führt schließlich über die Betrachtung der Vierer-Geschwindigkeiten auf die **Wind-Gleichungen**, die in der solaren MHD den Sonnenwind beschreiben und in der MHD magnetisierter Akkretionsscheiben einen Teilchenwind liefern (siehe dazu auch Blandford-Payne-Szenario).

17.32.4 MHD bei aktiven Galaxien

Solche Winde sind wichtig bei besonders aktiven Zentren von Galaxien, den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), z. B. bei Quasaren oder Radiogalaxien. Denn allgemein nehmen Astrophysiker an, dass die Scheibenwinde und Poynting-Flüsse das Jetplasma speisen. Ein weiterer Effekt, der dabei eine Rolle zu spielen scheint, ist der Blandford-Znajek-Mechanismus. Die zentralen Ausflüsse des AGN werden auf der großen Längenskala in Anwesenheit von Magnetfeldern durch Lorentzkräfte zu den relativistischen Jets der AGN gebündelt. Diese Bündelung breiter Plasmaausflüsse nennen die Physiker *Kollimation*. Sie vollzieht sich erst bei viel größeren Abständen zum Schwarzen Loch, typischerweise ab 100 Schwarzschildradien.

17.32.5 generelle Bedeutung

Das mag sich nun insgesamt sehr theoretisch und kompliziert anhören, aber diese magnetischen Prozesse sind von Bedeutung - für den **kosmischen Materiekreislauf** und letzten Endes auch für Menschen. Weshalb? Nun, die Materiestrahlen, die von Akkretionsscheibe und Schwarzem Loch herausgeschossen werden, können sich unglaublich weit von ihrem Entstehungsort entfernen: bis zu kpc und Mpc! Auf einer ganz großen Längenskala, die vergleichbar ist mit dem Durchmesser ganzer Galaxien und Galaxienhaufen, finden hier Umwälzungsprozesse von Materie statt. Die verschiedenen Elemente, die sich im Materiekonglomerat befinden, werden durchmischt. Die Metallizität verteilt sich gleichmäßig. Das ist aber gerade die unabdingbare Voraussetzung für die Bildung komplexer Moleküle, die aus verschiedenen Elementen bestehen - und damit für **Leben**. Aus der Vogelperspektive betrachtet wird klar, das aktive, supermassereiche Schwarze Löcher entscheidend an unserer Existenz beteiligt waren.

17.33 pp-Kette

Der wichtigste Mechanismus zur Energieumwandlung aus thermonuklearer Fusion (siehe diesen Link für Details) in massearmen Sternen wie der Sonne.

17.33.1 'Brennen' in der Astrophysik

Geläufiger ist der Name **Wasserstoffbrennen**, wenn er auch physikalisch nicht ganz korrekt ist. *Brennen* hat im Jargon der Astrophysiker nichts mit einer chemischen Reaktion mit Sauerstoff zu tun, sondern meint ausschließlich (auch bei Helium-, Kohlenstoff-, Sauerstoff-, Siliziumbrennen) die **Fusion** (Verschmelzung) von leichten Atomkernen zu schweren Atomkernen. Der Oberbegriff für diese Fusionsreaktionen im Sterninnern heißt **stellare Nukleosynthese**.

17.33.2 stabile Lichtquelle ist gut für Leben

Die pp-Kette ist von wesentlicher Bedeutung für die Entstehung und Aufrechterhaltung von Leben auf der Erde. Die langfristige, externe Versorgung mit Strahlungsenergie eines einigermaßen stabil strahlenden Sterns ist unbedingte Voraussetzung für die Entstehung des Lebens überhaupt - wenn man mit gewohnt irdischen Maßstäben urteilt.

17.34 p-Prozess

Der p-Prozess ist neben dem r-Prozess und dem s-Prozess diejenige Kernreaktion, die für die Existenz von Metallen (Astrophysikerjargon: chemische Elemente schwerer als Helium) in der Natur verantwortlich ist.

17.34.1 Ursprung der p-Kerne

Der p-Prozess wurde von *Burbidge, Fowler & Hoyle* 1957 postuliert, weil man einige Kerne mit sehr geringer Isotopenhäufigkeit identifizierte, die weder durch den s-Prozess, noch durch r-Prozess entstanden sein konnten. Auf der Nuklidkarte sind dies 32 stabile Kerne, die sehr protonenreich sind und **p-Kerne** genannt werden. Die p-Kerne entstehen nicht durch Neutronen-, sondern durch **Protoneneinfang**. Im Speziellen sind es 32 stabile Nuklide zwischen den Elementen Selen (*Se*-74) und Quecksilber (*Hg*-196). Sie entstehen aus zuvor in s- und r-Prozessen gebildeten Kernen.

17.34.2 Extrem heiß muss es sein

Die erforderlichen Temperaturen sind sehr hoch, damit der p-Prozess abläuft, etwa **eine Milliarde Kelvin**. Dieses Milieu wird in Supernovae Typ II erzeugt, wenn die auslaufende Schockfront das Sternplasma stark aufheizt. Anschaulich führen die hohen Plasmatemperaturen zu hohen mittleren Geschwindigkeiten der Protonen, die nötig sind, um den abstoßenden Coulomb-Wall des Einfangkerns zu überwinden (vergleiche aber auch Tunneleffekt). Mit dem Protoneneinfang ist die Emission von Gammaquanten (hochenergetischen Photonen aus dem Atomkern) verbunden. Diese können ihrerseits von den Kernen reabsorbiert werden und zur Emission von Protonen führen. Es stellt sich ein **Gleichgewicht** zwischen Hin- und Rückreaktion ein. In diesem *Photonenbad* hat auch der Mechanismus der **Photodisintegration** eine Relevanz. Hierbei werden die Gammaphotonen von den Kernen absorbiert und enden in unterschiedlichen Zerfällen zu Fragmenten (Kerne und Nukleonen).

17.34.3 p-Prozess ist selten

Die protonenübersättigten Kerne zerfallen bei tieferen Temperaturen über β^+-Zerfall in protonenärmere Kerne bis sie das Stabilitätstal erreichen (**Gamma-Prozess**). So bewirkt der p-Prozess, dass für den s- und r-Prozess unerreichbare stabile Kerne **doch gebildet** werden können. Wie die geringe Isotopenhäufigkeit der p-Kerne verrät, ist der p-Prozess *relativ selten in der Natur* und funktioniert nur unter den beschriebenen, kurzzeitig vorherrschenden Bedingungen in Supernovae.

17.34.4 Empfohlene Literatur

- ◇ Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Arbeitsgruppe Nukleare Astrophysik

17.35 Prandtl-Zahl

Dies ist eine der charakteristischen, dimensionslosen Zahlen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik, benannt nach dem deutschen Physiker *Ludwig Prandtl* (1875 - 1953), der als Mitbegründer der Aero- und Hydrodynamik gilt.

Die Prandtl-Zahl *Pr* ist definiert als Produkt aus Wärmekapazität bei konstantem Druck mit der dynamischen Viskosität, geteilt durch die thermische Konduktivität.

17.36 primordiale Schwarze Löcher

Bei den primordialen Schwarzen Löchern (engl. *primordial black holes*, PHB) handelt es sich um eine besonders leichte Form Schwarzer Löcher, die sich möglicherweise im frühen Universum entwickelt haben. Auf diese frühe Entstehung nimmt auch das Attribut *primordial* Bezug. Der Begriff stammt aus dem Lateinischen für *primordium*, dt.: Anfang, Ursprung.

17.36.1 Herkunft primordialer Löcher - nach der Inflation

Primordiale Schwarze Löcher sind **nicht** durch den Gravitationskollaps eines Sterns entstanden, denn die gab es im frühen Kosmos noch nicht. Darin unterscheiden sich entwicklungsgeschichtlich die PBHs von ihren 'großen Brüdern', den stellaren Schwarzen Löchern und auch von daraus gewachsenen supermassereichen Schwarzen Löchern. Vielmehr nehmen die Kosmologen an, dass hoch komprimierte Gebiete im heißen, dichten 'Urbrei' des frühen Universums in sich zusammenfielen. Das sollte sich kurz nach dem Urknall (engl. big bang) ereignet haben. Denn auch primordiale Schwarze Löcher benötigen überdichte Massenansammlungen, um sich bilden zu können. Der dichte Kosmos kurz nach dem Urknall hat eine Zeit lang dafür gute Bedingungen geliefert. Eine wesentliche Einschränkung kommt dabei von der Inflation: Falls primordiale Löcher *vor* der Inflationsära entstünden, so würde die danach stattfindende exponentielle Ausdehnung in der Inflationsepoche die PBHs ausgedünnt haben. Wenn also PBHs überhaupt eine Rolle spielen, dann nur diejenigen, die in einer Epoche **nach** der Inflation entstanden sind. Die Kosmologen nennen das die so genannte *post-inflationäre Ära*.

17.36.2 Schwups & weg

Seit den 1970er Jahren wird angenommen, dass Schwarze Löcher nicht für alle Zeiten stabil sein können. Mittels Rechnungen, die sowohl die Quantentheorie, als auch die Allgemeine Relativitätstheorie und Thermodynamik berücksichtigen, fand der bekannte Physiker *Stephen Hawking* 1974, dass von Schwarzen Löchern immer eine diffuse Strahlung ausgeht. Diese Hawking-Strahlung kann als Wärmestrahlung interpretiert werden. Hawkings bisher *unbestätigte Hypothese* besagt, dass Schwarze Löcher durch diesen ständigen Strahlungsverlust Energie und Masse verlieren. Besonders dramatisch ist dieser Masseverlust bei den leichten Mini-Löchern: Sie verschwinden durch Hawking-Emission nach relativ kurzer Zeit und überdauern deshalb nicht bis ins lokale Universum.

17.36.3 Massen primordialer Löcher

Bereits 1967 konnten *Zel'dovich & Novikov* eine Gleichung ableiten, die die Lochmasse M in Beziehung setzt zur kosmologischen Epoche, also der kosmischen Zeit t nach dem Urknall, in der sie sich gebildet haben. Sie lautet:

$$M(t) \sim 10^{15}\,\mathrm{g}\left(\frac{t}{10^{-23}\,\mathrm{s}}\right)$$

Nehmen wir an, das PBH habe sich bereits in der Planck-Ära gebildet, so hätte es eine Masse von 10^{-5} Gramm, also gerade die Planck-Masse. Diese PBHs sollten jedoch die Inflationsära nicht überlebt haben.

Nehmen wir stattdessen eine Zeit von einer Sekunde nach dem Urknall an, so resultiert bereits eine Masse von 10^5 Sonnenmassen - an der Schwelle von supermassereichen Schwarzen Löchern!

Nehmen wir an, dass die primordialen Löcher kurz nach der Inflation in der Strahlungsära, also 5 $\times$ 10^{-24} Sekunden nach dem Urknall, entstanden. Dann ist die Masse der primordialen Löcher aus dieser Epoche vergleichbar mit derjenigen eines irdischen Berges ist, etwa eine Milliarde Tonnen oder $\mathbf{10}^{15}$ **g**. Das ist die kanonische Masse der primordialen Schwarzen Löcher (*Bekenstein* 2004).

17.36.4 Teilchenspektrum primordialer Löcher

Ein Schwarzes Loch, das eine Milliarde Tonnen wiegt, hätte einen Schwarzschild-Radius von nur 10^{-13} Zentimetern oder einem Femtometer (Kernphysikerjargon: 'ein Fermi'). Eine so winzige Länge ist typisch für den subatomaren Bereich und unterhalb der klassischen Größen von Neutron oder Proton! Aufgrund der kleinen Massen ist die Hawking-Temperatur der PBHs relativ hoch, etwa 100 Milliarden Kelvin! Das entspricht einer thermischen Energie von nur 10 MeV, so dass ein primordiales Loch nur Photonen und Neutrinos, aber keine Nukleonen, die mit etwa 1000 MeV Masse viel schwerer sind, im Spektrum der Hawking-Strahlung emittieren könnte.

17.36.5 Lebensdauer primordialer Löcher

Die Lebensdauer der PBHs lässt sich somit abschätzen, indem man annimmt, dass das Loch gegebener Masse beständig Energie und Masse durch die Emission leichter Teilchen verliert. Mathematisch folgt die Lebensdauer aus der Strahlungsleistung eines Wärmestrahlers, wenn man als Oberfläche des Strahlers die Horizontfläche des Loches (siehe dazu Eintrag Bekenstein-Hawking-Entropie) und als Temperatur des Strahlers die Hawking-Temperatur annimmt. Die Lebensdauer als Funktion der Lochmasse ist dann gegeben durch:

$$\tau(M) \sim 10^{64}\,\text{Jahre} \left(\frac{M}{\text{M}_\odot}\right)^3,$$

wobei $\text{M}_\odot$ die Sonnenmasse von 1.99×10^{30} kg ist.

Das führt auf eine Lebenszeit von etwa 1.3 Mrd. Jahren für die eine Milliarde Tonne wiegenden PBHs. Die **Lebensdauer steigt allerdings mit der dritten Potenz der Lochmasse**. Ein deutlich leichteres Loch wäre damit schon früher zerstrahlt. An diesen Rechnungen sieht man, dass PBHs von maximal der Masse eines Bergs schon innerhalb des Alters unseres Universums vollständig zerstrahlt wären.

17.36.6 Nachweis primordialer Löcher schwierig

Das Verdampfen vollzieht sich in der letzten Phase explosionsartig, so dass primordiale Schwarze Löcher Signaturen im Muster der kosmischen Hintergrundstrahlung und kosmischen Strahlung hinterlassen haben sollten. Primordiale Schwarze Löcher, die gerade in unserer gegenwärtigen Epoche zerstrahlen, sollten zum Hintergrund der Gammastrahlung beitragen. Es wurde auch diskutiert, dass vielleicht einige Gammastrahlenausbrüche auf explodierende, primordiale Löcher zurückgingen (*Cline et al.* 1997, *Belyanin et al.* 1997). Für all diese Szenarien gibt es bislang keine Bestätigungen aus astronomischen Beobachtungen, sondern weitaus bessere, konventionelle Erklärungen. In der *scientific community* gelten primordiale Schwarze Löcher als **sehr hypothetisch**.

17.36.7 kosmologische Rolle primordialer Löcher?

Ihre Rolle in der Entwicklung des Kosmos im Rahmen der Kosmologie ist nach wie vor nicht klar. Sie könnten eine **Rolle bei der Strukturbildung**, also der Entstehung von Sternen und Galaxien gespielt haben. Es ist zumindest denkbar, dass die primordialen Schwarzen Löcher die 'Saatkörner' von Sternen und Galaxien waren. Freilich wären die Details zu klären, wie aus subatomaren Löchern makroskopische Objekte wie die Sterne werden. Die kosmologische Rolle Schwarzer Löcher wäre in diesem Szenario allerdings gewichtig, sorgten sie doch für die Entstehung der Welteninseln, in denen sich schließlich Planeten und das Leben bildete. Aber die Kosmologen wissen bislang nicht, ob es sich so abgespielt hat.

17.36.8 Das Potenzial theoretischer Forschung

Nach der Lektüre dieses Eintrags könnte man stutzig werden und sich fragen, was es überhaupt bringt, sich mit so etwas Spekulativem wie primordialen Schwarzen Löchern zu beschäftigen. Immerhin könnte

sich irgendwann herausstellen, dass primordiale Schwarze Löcher definitiv nie existiert haben!

Dieser berechtigen Kritik kann man etwas entgegenstellen, dass für alle Theorien Gültigkeit hat: **fundamentale Erkenntnis**. Der theoretische Astrophysiker *Bernard Carr* von der Universität London nennt die 1974 entdeckte Hawking-Strahlung als eine der wichtigsten Entdeckungen in der Physik des 20. Jahrhunderts. Er begründet dies damit, dass es Hawking gelang drei bis dato getrennte Bereiche der Physik - Quantentheorie, Allgemeine Relativitätstheorie und Thermodynamik - zu verknüpfen, was mit profunden, neuen Erkenntnissen über die Natur verbunden war. Carr rechtfertigt deshalb Grundlagenforschung und formuliert in u.g. Papier pointiert:

Thus the discovery illustrates that studying something may be useful even it does not exist!

17.36.9 Literaturtipps

- ◇ Publikation: *Jacob D. Bekenstein*, Black Holes: Physics and Astrophysics - Stellar-mass, supermassive and primordial black holes, 2004
- ◇ Publikation: *Bernard J. Carr*, Primordial Black Holes as a Probe of Cosmology and High Energy Physics, 2003
- ◇ Web-Essays von *Andreas Müller*: Alles graue Theorie? sowie Brauchen wir Grundlagenforschung?

17.37 Prinzip minimaler gravitativer Kopplung

Das ist eines der wesentlichen Prinzipien, das *Albert Einstein* zu seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) inspirierte. Daneben sind das Äquivalenzprinzip, das Kovarianzprinzip, das Korrespondenzprinzip und das Machsche Prinzip zu nennen.

17.37.1 Warum schwer machen, wenn's einfach geht?

Das Prinzip minimaler, gravitativer Kopplung dürfte dasjenige unter den fünf sein, das am wenigsten bekannt ist. Letztendlich ist es ein Leitprinzip, das in allgemeiner Form fast alle Physiker und Mathematiker verfolgen: ein **Prinzip der Einfachheit**. Die meisten physikalischen (aber auch andere wissenschaftliche) Modelle sind dadurch geprägt, das zunächst der simpelste Zugang zu einer Problemstellung gewählt wird. Das gilt besonders dann, wenn es sich um die 'ersten Schritte' auf wissenschaftlichem Neuland handelt. Es geht darum, ein prinzipielles Verhalten eines Systems unter einfachsten Bedingungen zu erforschen. Erst danach wird das Modell komplexer, kompliziertere Wechselwirkungen werden miteinbezogen oder höhere Ordnungen werden betrachtet. Im Kern ist es wohl gerade das, was man mit **analytischem Denken** in der Naturwissenschaft meint. Eine naturwissenschaftliches Problem wird analysiert, also in Bestandteile zerlegt. Die Komponenten werden in einem logischen Zusammenhang zueinander gebracht und deren Wechselwirkung erörtert. In der Regel beschreibt eine mathematische Gleichung oder ein System gekoppelter Gleichungen (häufig Differentialgleichungen) die Dynamik des Systems. Diese Gleichungen werden mit wohl bekannten (in der Regel numerischen, nicht analytischen) Techniken gelöst. D.h. das Problem ist in dem Sinne gelöst, dass der Naturwissenschaftler ein Verhalten in Vergangenheit oder Zukunft **vorhersagen** kann bzw. ein in der Natur beobachtetes Phänomen **erklären** kann. Erklären heißt wiederum, dass er die komplexe, wechselseitige Beeinflussung der Systemteile logisch und plausibel verknüpfen kann.

17.37.2 Was bringt's Einstein?

Der simplifizierende Ansatz in der Modellbildung lässt auf die Relativitätstheorie folgendermaßen anwenden: angenommen die Gleichungen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) seien bereits bekannt. So folgen die Gleichungen der ART - die dann erst eine Gravitationstheorie darstellt - unter anderem dann, wenn unnötig komplizierte Terme beim Übergang von SRT nach ART weggelassen

werden. Diese vage Formulierung wird konkret, wenn also beispielsweise partielle Ableitungen lediglich in kovariante Ableitungen verwandelt werden, **ohne zusätzliche Terme**, die beispielsweise den Krümmungstensor enthalten. Minimale gravitative Kopplung ist so zu verstehen, dass so wenig neue Terme mit dem Krümmungstensor wie möglich auftreten, wenn man den Übergang von SRT nach ART vollzieht.

17.37.3 Beispiel: der Einstein-Tensor

Der Einstein-Tensor $\mathbf{G}_{\mu\nu}$ stellt gerade die linke Seite der Einsteinschen Feldgleichungen dar. Es ist die 'geometrische Seite', die den Riemannschen Krümmungstensor in verschiedenen Verjüngungen (als Ricci-Tensor und Ricci-Skalar) enthält. Als Tensorgleichung genügt der Einstein-Tensor

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R.$$

Aber wie kommt man gerade darauf, dass der Einstein-Tensor so aussehen muss? Das ist nicht-trivial! Der Tensor wurde nicht umsonst nach Einstein benannt: Es hat ihn und seinen Freund *Marcel Grossmann* mehrere Jahre gekostet, um diese Gestalt abzuleiten! Das Prinzip minimaler gravitativer Kopplung hat bei der Bestimmung dieser Gleichung sicher eine Rolle gespielt, denn es sind auch kompliziertere Enstein-Tensoren denkbar.

17.38 Protostern

Protosterne (wörtlich übersetzt *Vorläufer eines Sterns*) sind junge Sterne, die gerade im Begriff sind zu entstehen. Eine detaillierte Darstellung gibt es auch im Eintrag Sternentstehung.

17.38.1 Wir beginnen im Kühlschrank...

Objekte der **Sternbildungsphase** sind meistens eingebettet in eine dichte Wolke aus interstellarem Material, wie kalten Riesenmolekülwolken (engl. *giant molecular clouds*, GMCs) mit etwa 10^4 bis 10^6 Sonnenmassen oder Dunkelwolken. Dieses Material kollabiert durch gravitative Instabilitäten zu lokalen Verdichtungen (*Überdichten*), wenn genügend Materie vorhanden ist und die so genannte Jeans-Masse erreicht ist. Allerdings kann Rotation der GMC und Magnetfelder (MHD-Turbulenz) dem Gravitationskollaps entgegenwirken. Doch elektrisch neutralen Teilchen (in großer Zahl) kann es gelingen, durch so genannte **ambipolare Diffusion** trotzdem gravitativ zu kollabieren, weil sie *nicht magnetisch* gekoppelt sind wie geladene Teilchen. Die Zeitskalen dieses Prozesses sind jedoch sehr hoch.

17.38.2 ...dann bröckelt es...

Fragmentation produziert ultradichte Subkerne der GMC von Massen typischerweise zwischen 1000 Sonnenmassen und einer Sonnenmasse bei ambipolarer Diffusion. Aus den kollabierten Massen können Sterncluster und Einzelsterne entstehen. Der dichte Staub schluckt sehr viel Strahlung - besonders im optischen Spektralbereich. Die Fachwelt nennt die Abschwächung der Helligkeit eines kosmischen Strahlers durch Staub Extinktion. Die Strahlung geht allerdings nicht verloren, sondern verliert Energie durch mehrmalige Streuprozesse an den winzigen, etwa einen Mikrometer durchmessenden Staubteilchen. Die Strahlung wird also **gerötet** - ein Effekt der durchaus mit der Rötung des Sonnenlichts bei Sonnenauf- und -untergang verglichen werden darf (da sind es allerdings die Gasteilchen und Aerosolpartikel der Erdatmosphäre, die die Rötung hervorrufen: Rayleigh-Jeans Streuung, Mie-Streuung).

Abbildung 17.12: HST-Bild des Adlernebels.

17.38.3 ...noch bleibt es verborgen...

Die Extinktionen von Dunkelwolken sind besonders hoch. Die Dunkelwolken wie der *Kohlensack* oder der *Pferdekopfnebel* (Foto unter Extinktion) in der Milchstraße verschieben damit die Strahlung optischer Wellenlängen ins Infrarote und schwächen die scheinbare Helligkeit um einige 20 Magnituden! Die Protosterne, die typischerweise in Dunkelwolken eingebettet sind, sind deshalb naturgemäß im Optischen schwierig zu beobachten. Die Astronomen weichen aus diesem Grund auf Infrarotteleskope aus, wie das Very Large Telescope, die Keck-Teleskope (die beide noch im Nahinfrarot beobachten können) oder das weltraumgestützte Spitzer-Teleskop.

17.38.4 ...und endlich zündet der Stern!

Sobald jedoch die thermonuklearen Kernfusionprozesse im Innern eines Protosterns ausreichender Masse zünden, bläst der kräftige Strahlungsdruck der Photonen und der Sternenwind aus verschiedenen Teilchenspezies die dichte Wolke nach und nach weg: Der junge Stern bahnt sich den Weg durch dichten Staub und erscheint schließlich auch optisch als hell leuchtender Stern. Diese Verhältnisse belegen eindrucksvolle, farbenprächtige Aufnahmen des Hubble Weltraumteleskops, wie das optische Foto des Adlernebels 17.12 (Credit: NASA/ESA/STScI/AURA 2005). Urteilen Sie selbst: Es gehört sicherlich zu den schönsten Bildern, die Astronomen jemals von der Natur gemacht haben. Man erkennt darauf Wolken aus kaltem Staub, atomaren und molekularen Wasserstoff, in die bizarre Strukturen durch die hydrodynamische Wechselwirkung unterschiedlicher Gase und vom UV-Licht junger Sterne geschliffen werden. Die Natur zeigt sich hier von ihrer kreativen Seite: Als Bildhauer einer etwa zehn Lichtjahre hohen, farbenprächtigen Skulptur, deren Haupt ein Lichtschein krönt. Der aufmerksame Betrachter entdeckt längliche Strukturen, die sich am Kopf in das interstellare Medium bohren. Vermutlich handelt es sich dabei um protostellare Jets. Der Adlernebel ist eine Sternentstehungsregion - eine von vielen Wiegen der Sterne in der Milchstraße. Viele andere Sterne verbergen sich noch in der Dunkelwolke.

17.38.5 Typen junger Sterne

Protosterne werden in der Astronomie auch etwas verallgemeinernd Junge stellare Objekte genannt (engl. *Young Stellar Objects*, YSOs). Dabei unterscheidet man folgende Typen:

- ◇ Die **Braunen Zwerge** sind 'verhinderte Sterne', die eher riesigen Gasplaneten ähneln ('Jupiters'). Sie haben zuwenig Masse (kleiner als 0.08 Sonnenmassen), als dass sie das thermonukleare Feuer im Innern zünden könnten. Sie gewinnen ihre Strahlungsenergie eher aus der **Kontraktion** und strahlen im Infraroten und Radiobereich. Deshalb suchen die Astronomen sie mit Infrarotteleskopen. Das ist schwierig, weil die Braunen Zwerge einerseits sehr leuchtschwach und andererseits sehr klein sind.
- ◇ **Herbig-Haro-Objekte** sind kompakte, helle Nebel in der Nähe von Dunkelwolken, die im Lichte des atomaren Wasserstoffs HI und einiger Molekülspezies (H_2, CO, CS etc.) leuchten. Sie zeigen außerdem auffällige, knotige Strukturen. Dies wird mit Schockanregungen erklärt, und es sind gerade die protostellaren Jets der jungen Sterne, in denen Gas, das kurz zuvor auf einen entstehenden Stern akkretiert wurde, wieder gerichtet ausfließt. Dabei bilden sich im Jetplasma innere Schocks und der prominente Bugschock am Kopfende aus. Diese Jets sind atomar und molekular **strahlungsgekühlt**. Der Massenverlust ist verglichen mit den extragalaktischen Makro-Jets sehr gering: nur im Bereich von 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr. Die Ausflüsse sind beidseitig (*bipolar*) und senkrecht zur **akkretierenden Staubscheibe**. Je nach Orientierung zum Beobachter treten sie ein- oder zweiseitig auf. Im Zentrum zwischen den bipolaren Ausflüssen befindet sich ein junger Stern, meist vom *T Tauri-Typus*.
- ◇ **T Tauri-Sterne** sind mit einem Alter von nur 10^5 bis 10^7 Jahren sehr junge Sterne, die sich im weiteren Verlauf zu 'normalen Sternen' auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms entwickeln. Sie bewegen sich noch senkrecht zur Hauptreihe, d. h. variieren in der Leuchtkraft bzw. Helligkeit, was durch den Akkretionsprozess verursacht wird. Durch Akkretion

können sie einen protostellaren Jet speisen, so dass die Umgebung des T Tauri-Sterns als *Herbig-Haro-Objekt* (s. o.) in Erscheinung tritt. T Tauri-Sterne beginnen gerade durch hohe Sternwindaktivität Gas und Staub ihrer unmittelbaren Umgebung 'wegzublasen'.

◇ **rho Ophiuchi-Sterne** sind nach dem Prototyp in einer anderen prominenten Sternentstehungsregion benannt, dem Ophiuchus-Nebel IC 4604 im Sternbild *Ophiuchus* (dt. *Schlangenträger*, dem bekannten Äskulap der Medizin). In dieser riesigen Dunkelwolke sind wie im Adlernebel auch viele junge Sterne eingebettet, die von der Erde nur etwa 500 Lj entfernt sind. Damit ist rho Ophiuchi die uns nächste Sternentstehungsregion.

◇ **FU Orionis-Sterne** sind eine Unterklasse der T Tauri-Sterne, die mit dem 100 bis 1000fachen typischer Massenverlustraten viel größere Verlustraten durch Sternenwinde aufweisen. Die Akkretionsrate scheint entsprechend größer zu sein.

Die akkretierenden Staubscheiben der Protosterne sind die Vorläufer der planetaren Scheiben, aus denen also **Planeten** fragmentieren können. Man nennt sie daher auch protoplanetare Scheiben (engl. *protoplanetary disks*, kurz **Proplyds**).

◇ **ZAMS-Sterne** sind Sterne die gerade die Hauptreihe im Hertzsprung-Russell-Diagramm erreichen. Das Akronym ZAMS steht für ***Z**ero-**A**ge **M**ain Sequence **S**tars*, also Alter-Null-Hauptreihensterne, die nur ein Alter von etwa 10 bis 100 Millionen Jahre haben. Unsere Sonne war im Alter von 40 Millionen Jahren ein ZAMS. Der Strahlungsfluss hat sich - verglichen mit dem der T Tauri-Veränderlichen - stabilisiert und hat nur noch eine moderate Variabilität. Zeitlich schließen sich die ZAMS an entwickelte T Tauri-Sterne an und haben ein vollständig ausgebildetes Planetensystem, wie wir es vom Sonnensystem her kennen. Die Staubscheibe ist nahezu verschwunden, als Relikt bleibt wenig interplanetares Gas übrig. Im Sonnensystem macht sich dieser Gasrest als Zodiakallicht bemerkbar macht. Typische ZAMS findet man gleich als Sternhaufen in den *Plejaden* (M45).

17.38.6 YSO-Klassen

Bei den Protosternen bzw. YSOs unterscheiden die Astronomen in chronologischer Entwicklung eines Sterns folgende Klassen:

◇ **Klasse 0 YSOs** sind die frühsten Formen. Da dieser Zustand kurzlebig (Maximalalter 100 000 Jahre) ist, entdeckt man sie auch sehr selten. Die Beobachtbarkeit ist nur unterhalb 10 Mikrometer möglich, was thermischen Spektren eines etwa 30 Kelvin kalten Gases entspricht. Auch hier kann man schon die Propagation von Ausflüssen und Schocks beobachten. Eine mögliche Quelle ist: IRAS 03282+3035

◇ **Klasse 1 YSOs** sind schon einige 100 000 Jahre alt und können bereits bei Mittelinfrarot (MIR) und Ferninfrarot (FIR) beobachtet werden. Sie zeigen manchmal Variabilitäten wie *FU Orionis*-Sterne. Erstaunlicherweise sieht man nicht nur Emission im langwelligen Bereich, sondern auch in der **Röntgenstrahlung**! So konnte mit dem Röntgensatelliten *Chandra* im Objekt HH2 Röntgenstrahlung detektiert werden, die wohl eine Signatur für sehr heißes Gas (10^6 Kelvin) ist. Es ist also thermische Röntgenstrahlung. Das heiße Gas entsteht, wenn der schnelle, protostellare Jet auf langsameres Material trifft.

In den Proplyds beobachtet man Jupiter-artige Kerne und kleinere Planetesimale. Klasse 1 - Quellen sind besonders zahlreich in der *Serpens-Wolke* (Sternbild *Schlange*). Eine Klasse 1 - Quelle ist: HH 30.

◇ **Klasse 2 YSOs** sind die klassischen T Tauri-Sterne. Sie zeigen prominente Wasserstoff- und Kalziumlinien und sind optisch variabel. Die 'Proto-Jupiters' sammeln das Wasserstoff- und Heliumgas des Proplyds auf, um einen Gasplaneten zu bilden. Auch erdähnliche Planeten können entstehen.

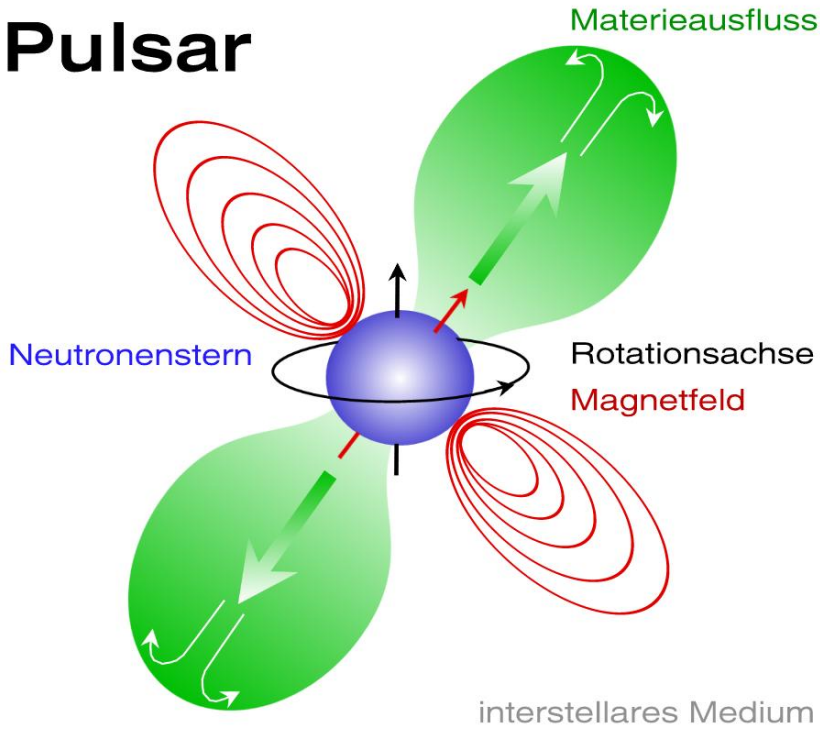

Abbildung 17.13: Pulsar mit Magnetosphäre und Ausfluss.

◇ **Klasse 3 YSOs** sind ebenfalls T Tauri-Sterne, allerdings mit schwach ausgeprägten Emissionslinien (Fachbegriff: *weak-lined T Tauri stars*). Durch die nachhaltige Aktivität des Sternenwinds und weiterlaufende Planetenbildung ist die Staubscheibe stark ausgedünnt und kaum nachweisbar. Die großen Gasplaneten sind fertig, während erdähnliche Planeten weiterhin akkretieren.

17.39 Pseudo-Newtonsche Gravitation

Eine approximatives Gravitationsmodell, in dem versucht wird, einige Effekte der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie nachzuahmen, die jedoch viele Züge der mathematisch einfacheren Newtonschen Gravitation trägt. Das Herzstück der Pseudo-Newtonschen Gravitation ist ein neues Potential, das nach den Erfindern des Konzepts benannt wurde: das **Paczynski-Wiita-Potential** (1980) - siehe dazu auch Gravitation für weitere Erläuterungen.

17.40 Pulsar

Ein Pulsar ist ein **rotierender Neutronenstern**, dessen Rotationsachse **nicht** mit der Magnetfeldachse übereinstimmt, so dass ein Doppelkegel (*Bikonus*) emittierter Strahlung wie bei einem Leuchtturm mit der Rotationsperiode des Sterns mitrotiert. In besonderen Fällen kann diese Strahlung die Erde treffen, was beim Beobachter den Eindruck gepulster Strahlung vermittelt. In Abbildung 17.13 ist die Rotationsachse des Pulsars schwarz, während die Magnetfeldachse rot dargestellt ist. Die roten Linien illustrieren die **Pulsarmagnetosphäre** in Form von Isokonturlinien des Magnetfeldes: Man erkennt eine dominant toroidale (schlauchartige) Magnetfeldstruktur, die aus

der hohen Rotation und den gravitomagnetischen Kräften resultiert (*gravitomagnetischer Dynamo*). Die grünen Gebilde veranschaulichen die Strahlungskeulen, die immer wieder infolge der Rotation einen geeignet orientierten Beobachter treffen.

17.40.1 Ursprung des Pulsarlichts

Die Strahlung ist Synchrotronstrahlung, die von relativistisch schnellen Elementarteilchen (Elektronen und Positronen, auch Protonen und Ionen) in den hohen Magnetfeldern der Pulsarmagnetosphäre entsteht.

17.40.2 schnelle Rotation...

Da der Drehimpuls auch im Gravitationskollaps nahezu erhalten bleibt, übernimmt der Neutronenstern den Drehimpuls des Vorläufersterns (engl. *progenitor*). Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Sternkern typischerweise entkoppelt von äußeren Sternhüllen rotiert und sich 'unter der Sternoberfläche weg dreht'. Demnach überträgt sich nur der Drehimpuls des Sternkerns auf den entstehenden Neutronenstern. Der Neutronenstern als ein Vertreter der Klasse **kompakter Objekte** ist jedoch viel kompakter, so dass die Rotationsgeschwindigkeit um ein Vielfaches höher ist, als beim Vorläuferstern ('Pirouetteneffekt'). Die schnellsten Pulsare drehen sich daher in der Größenordnung von Millisekunden (ms) einmal um sich selbst! Sie heißen **Millisekundenpulsare**.

17.40.3 ...wird abgebremst

Die Rotationsenergie des sich schnell drehenden Pulsars wird aber mit der Zeit abgebaut. Sie speist die Magnetfelder und die elektromagnetische Strahlung, die der Pulsar abgibt. Die Magnetfelder werden durch den gravitomagnetischen Dynamo verstärkt, was auf Kosten der Rotation geht. Aus diesem Grund gibt die gemessene Rotationsperiode bzw. die Abbremsrate des Pulsars eine Information über die Stärke des Magnetfelds und das Pulsaralter. Millisekundenpulsare sind also junge Pulsare.

17.40.4 Entdeckung, Häufigkeit, Magnetfeld

Der erste Pulsar wurde 1967 entdeckt und war ein Radiopulsar. Die Astronomen kennen derzeit mehr als **1700 Pulsare**. Davon sind etwa 170 Millisekundenpulsare, ca. 130 befinden sich in Doppelsternsystemen. Hat der Pulsar ein besonders hohes Magnetfeld ab etwa 10^{14} Gauß, so nennt man ihn **Magnetar**.

17.40.5 Crab - ein optischer Pulsar

Der **Crab-Pulsar** befindet sich im Krebsnebel im Sternbild *Stier* (siehe Beobachtungsfoto 17.14; Credit: NASA/ESA/HST, *Hester & Loll* 2005). Es handelt sich um einen **Supernovaüberrest** (Supernovaremnant, SNR) in ca. 6500 Lichtjahren Entfernung. Das Bild zeigt einen einzigartigen Strukturreichtum des Explosionsgebietes. Im Zentrum leuchten blau und diffus die relativistischen Elektronen, die im Crab-Nebel beschleunigt wurden. Die Supernova (Typ II), die zu diesem Neutronenstern führte, wurde 1054 von chinesischen Astronomen beobachtet. Damals war die Lichtkurve der Supernova mehrere Wochen oder sogar Monate mit bloßem Auge sichtbar! Der Nebel bildete sich durch ausgestoßenes Gas, das von der Supernovaexplosion nach außen getragen wurde. Heute beobachten die Astronomen immer noch eine Gasexpansion mit einer Geschwindigkeit von etwa 1000 km/s. Im Zentrum des Crab-Nebels wurde ein **optischer Millisekundenpulsar** entdeckt! Die Rotationszeit beträgt nur 33 ms, weshalb der assoziierte Neutronenstern mit der Bezeichnung NP 0532 zu den schnellsten Pulsaren gehört, die entdeckt wurden.

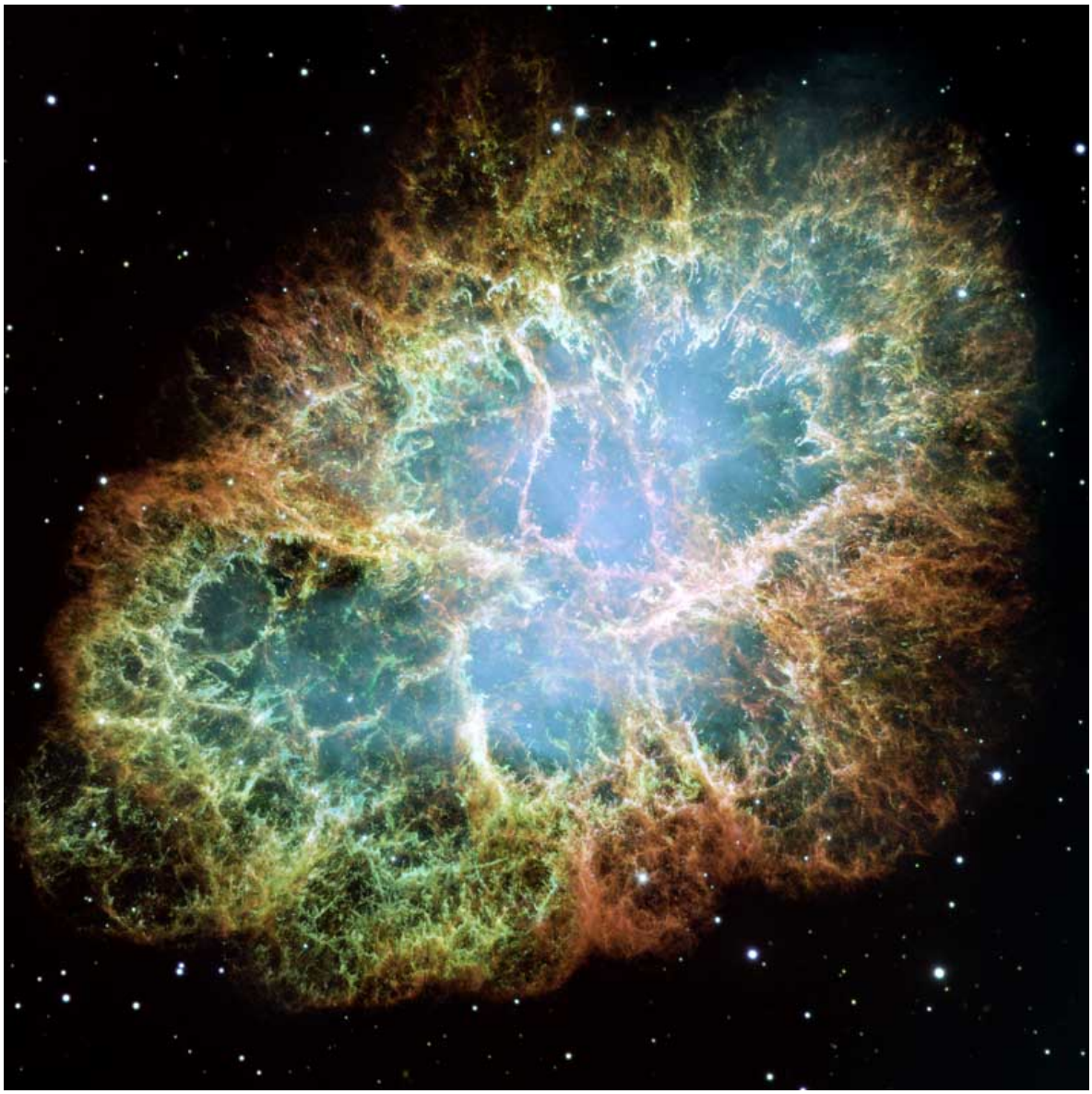

Abbildung 17.14: Crab-Nebel fotografiert mit HST 2005.

17.40.6 Pulsare im Doppelpack

Besonders erwähnenswert ist die Existenz von Doppel-Pulsaren: Das Objekt PSR1913+16 ist ein solcher **Bipulsar**, der sehr berühmt wurde. Die Forscher *Joseph H. Taylor Jr.* und *Russel A. Hulse* bekamen 1993 den Nobelpreis für den **indirekten Beweis der Emission von Gravitationswellen**, die dieses Objekt aussendet. Sie konnten anhand langfristiger Messungen (seit 1974) der Umlaufperioden beider Neutronensterne über die Beobachtung der gepulsten Strahlung nachweisen, dass sie sich infolge des Verlustes an Gesamtenergie des Systems durch Emission von Gravitationswellen sukzessive annähern! Irgendwann werden die beiden Neutronensterne verschmelzen und zu einem stellaren Schwarzen Loch kollabieren. Dieses Ereignis wird mit einem kurzzeitigen Gammastrahlenausbruch (*Gamma Ray Burst*, GRB) einhergehen. Einige Daten zum *Hulse-Taylor-Pulsar*: Die Pulsarperiode beträgt 59 ms, beide Neutronensterne haben etwa 1.4 Sonnenmassen, das System ist zum Beobachter um 14° geneigt, im Periastron beträgt ihr Abstand nur 1.1 Sonnenradien und im Apastron 4.8 Sonnenradien.

In Simulationen konnte gezeigt werden, dass beim Verschmelzen von Neutronensternen (engl. *NS merging*) sehr schwere Elemente wie Gold (chem. Symbol Au) und Platin (Pt) gebildet werden können. Dies ist also eine Alternative zu den s-Prozessen in AGB-Sternen und r-Prozessen sowie p-Prozessen in Supernovae, die zur Bildung von Elementen schwerer als Eisen beitragen.

17.40.7 RRATs - eine neue Pulsar-Klasse

Bei Beobachtungen von transienten Radioquellen wurde eine neue Population von Neutronensternen entdeckt, die Radiobursts abgeben. Sie wurden als rotierende Radiotransienten bezeichnet (engl. *Rotating RAdio Transients*, **RRATs**) bezeichnet. Sie unterscheiden sich von normalen Radiopulsaren und geben Radiostrahlung nur für etwa eine Sekunde pro Tag ab. Der Pulsar PSR B1931+24 ist ein Vertreter dieser neuen Klasse. Es wurde in diesem Fall vorgeschlagen, dass die Radiostrahlung von der Wechselwirkung einer präzedierenden Materiescheibe und der Magnetosphäre des Pulsars kommt.

17.40.8 Pulsare im Gamma- und TeV-Bereich

Im höchsten Energiebereich der elekromagnetischen Strahlung konnten nur wenige Pulsare nachgewiesen werden. Im hochenergetischen Gammabereich wurden vor allem die **Pulsarwindnebel** (engl. *pulsar wind nebulae*, PWN) beobachtet. In diesen magnetohydrodynamisch beschleunigten Strukturen wurden die **höchsten Lorentz-Faktoren** im ganzen Universum gemessen! PWNs strahlen Synchrotronstrahlung vom Radio- bis in den TeV-Bereich ab. Dieses leuchtende Plasma besteht vornehmlich aus relativistischen Elektronen und Positronen. Die zur Beschleunigung nötige Energie stammt von zusammenbrechenden Magnetfeldern (*Rekonnexion*). Die Feldenergie wird wiederum gespeist von der schnellen Rotation des Neutronensterns bzw. seiner Raumzeit (siehe auch Frame-Dragging).

Die Wechselwirkung zwischen dem relativistischen Wind und dem interstellaren Medium, beschleunigt Teilchen in der Schockregion durch Fermi-Prozesse erster Ordnung und produziert **Röntgenstrahlung**, wie sie z. B. im Fall von PSR B1957+20 beobachtet wird.

Als Teil des Pulsarwinds treten auch **stellare Jets** auf, z. B. beim Crab-Pulsar.

17.40.9 Übersichtspapiere

- ◇ *Becker et al.*: On the Present and Future of Pulsar Astronomy, IAU General Assembly, Prag, 2006; Preprint: astro-ph/0702254

- ◇ *Kirk et al.*: The theory of pulsar winds and nebulae, Heraeus Seminar, Bad Honnef, 2006; Preprint: astro-ph/0703116

17.41 Pulsierendes Universum

Diese Idee mit ästhetischem Reiz von ewiger Weltenwiederkehr in einem natürlichen Zyklus stammt von dem Astrophysiker *Richard C. Tolman* (dem Fachmann bekannt von der Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung aus der Theorie relativistischer Sterne). Das Universum **oszilliert** in folgendem Szenario:

- ◇ Seit dem Urknall expandiert es durch den antigravitativen (negativen) Druck der Dunklen Energie (experimentell verifiziert durch Hubble-Effekt, die kosmische Hintergrundstrahlung, Supernova Typ Ia und die großräumige Struktur der Galaxien).
- ◇ Dann erreicht es eine **kritische Dichte**, wo die Gravitation die Expansion aufhalten kann (siehe auch Missing-Mass-Problem).
- ◇ Schließlich kollabiert das Universum wieder, bis ein weiterer Urknall folgt.

17.41.1 zwei Probleme des Szenarios

1) Der erste Haken dieser an sich hübschen Idee hängt mit dem **Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik** zusammen. Nach diesem fundamentalen Satz kann die **Entropie** in einem abgeschlossenem System (wie dem Universum) nicht abnehmen. Anders gesagt: der Zustand der Unordnung im System nimmt zu. Dies manifestiert sich darin, dass nach jedem Zyklus der Pulsation des Universums der Anteil der Strahlung gegenüber der der Materie zunehmen muss. Irgendwann entsteht so ein materiefreies Universum, das nicht mehr kollabieren könnte: Der Zyklus wäre unterbrochen.

2) Der zweite Haken ist, dass das Szenario den aktuellen Beobachtungsdaten (o.g. Methoden) widerspricht: Nach den aktuellen Messungen der kosmologischen Parameter wird der Kosmos ewig und sogar beschleunigt expandieren.

17.41.2 Zyklisches Universum

In der avantgardistischen Idee des Zyklischen Universums von *Steinhardt et al.* wird die Entropie-Problematik dadurch beseitigt, dass die Entropie zwar zunimmt (wie es sich gehört), aber die *Entropiedichte konstant* bleibt. Das Zyklische Universum pulsiert auch, involviert die Kosmologie mit Branen, ist aber insgesamt sehr spekulativ und schwierig zu testen.

17.42 Pyknonukleare Reaktionen

Es handelt sich um eine besondere Form von **Kernreaktionen**, die nur bei **extrem hohen Massendichten** ablaufen (grch. *pyknos*: dicht). Die Stellarphysiker *Cameron* (1959), *Van Horn* und *Salpeter* (1969) sind die Pioniere auf diesem Gebiet. Auf typischen Zeitskalen von 100000 Jahren ereignen sich folgende pyknonukleare Reaktionen:

- ◇ Wasserstoff verwandelt sich in Helium (oberhalb etwa 10^6 g/cm^3),
- ◇ Helium-4 in Kohlenstoff-12 (oberhalb etwa 8×10^8 g/cm^3),
- ◇ und Kohlenstoff-12 in Magnesium-24 (oberhalb etwa 10^{10} g/cm^3).

17.42.1 pykno vs. β

Es werden also aus leichteren Elementen durch diese Reaktionen schwerere Elemente. Damit handelt es sich um konkurrierende Prozesse zu den inversen β-Zerfällen, die gerade die **Neutronisierung** von Neutronensternen herbeiführen.

17.42.2 Was passiert mikrophysikalisch?

Die Behandlung fällt in den Bereich der Kernphysik und Festkörperphysik. Eine mikrophysikalische Erklärung für pyknonukleare Reaktionen gestaltet sich wie folgt: die Atomkerne sind bei diesen hohen Dichten in ein **Gitter** eingebaut, wie bei einem Festkörper. Gemäß der Quantentheorie weisen sie eine *endliche Nullpunktsenergie* auf (siehe auch Quantenvakuum). Normalerweise stoßen sich die positiven Atomkerne ab, aber wenn die Dichte zunimmt, kann ihre Nullpunktsenergie ausreichen, um diesen **Coulomb-Wall** zu überwinden. Auch der quantenmechanische Tunneleffekt gewährleistet eine Überwindung des Walls, auch wenn die Energie klassisch nicht ausreichen würde (analog dem radioaktiven α-Zerfall). Die so genannte WKB-Methode (nach *Wentzel, Kramers, Brillouin*, 1926) liefert dann quantenmechanisch konsistent einen **Transmissionskoeffizienten**, der gerade die Wahrscheinlichkeit für die pyknonukleare Reaktion angibt. Diese Reaktionsrate wird allerdings maßgeblich von **Verunreinigungen im Gitter** (*Defekte*) und von endlichen Temperaturen beeinflusst.

Die neueren Berechnungen von *Van Horn* und *Salpeter* nahmen *realistischere Gitterpotentiale* an und berücksichtigten außerdem *Gitteranisotropien*. Dies korrigierte die kritischen Dichten der einzelnen Spezies nach oben und senkte die Reaktionsraten ab.

18 Lexikon Q

18.1 QPO

Das Akronym für quasi-periodische Oszillationen.

18.2 Quant

Die Quanten sind die die kleinsten, diskreten Einheiten einer physikalischen Größe und gaben der Quantentheorie, einer der großen Theorien der modernen Physik des 20. Jahrhunderts, ihren Namen. Verschiedene physikalische Größen entpuppen sich als *quantisiert*, so beispielsweise die Energie, der Spin, Felder, der magnetische Fluss etc. Alle diese Größen können nur **diskrete Zustände** annehmen, also aus einem Wertebereich von Zahlen schöpfen, der nicht beliebig ist, sondern nur bestimmte Vielfache einer fundamentalen Einheit erlaubt. Diese Einheit ist das **Quant**.

18.2.1 quantisierte Elektronenzustände in Atomhüllen

Ein prominentes Beispiel sind die Zustände, die ein Elektron in einer Atomhülle annehmen kann. Diese Quantenzustände sind *diskretisiert* auf bestimmten Energiestufen. Übergänge, die ein Elektron von einer Energiestufe auf die andere unternehmen kann, sind mit der Absorption (Energiegewinn, Übergang auf eine energetisch höhere Stufe) oder Emission (Energieverlust, Übergang auf eine energetisch niedrigere Stufe) eines **Photons** verbunden. Diese Übergänge sind elektromagnetischer Natur. Deshalb wird auch das Feldquant der elektromagnetischen Wechselwirkung ausgetauscht, das Photon. Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes, also eine Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge durch den Austausch von Feldquanten, bewerkstelligt die so genannte Quantenelektrodynamik (QED).

18.2.2 Apparat der Quantenfeldtheorien

Die Felder anderer Wechselwirkungen können ebenfalls quantisiert werden. Die starke Wechselwirkung findet so ihre adäquate Beschreibung in der Quantenchromodynamik (QCD) mit den Gluonen als Feldquanten, die schwache Wechselwirkung und elektroschwache Theorie haben die W- und Z-Teilchen (Weakonen) als Feldquanten und bei einer Quantengravitation postuliert man die Gravitonen.

Das allgemeine Konzept, das hinter all diesen Ausprägungen von Quantenfeldtheorien (QFT) steht ist die Eichtheorie. Die Feldquanten heißen **Eichbosonen** und sind als 'Boten-' oder Austauschteilchen der jeweiligen Kraft anzusehen.

18.2.3 Quanten sind immer winzig

Quanten haben in gewöhnlichen physikalischen Einheiten der Makrophysik (Kilogramm, Joule etc.) winzige Beträge. Der **Quantencharakter** tritt also in der Regel erst auf den kleinen Skalen der subatomaren Welt (fm, also 10^{-13} cm) in Erscheinung. Dies ist der tief liegende Grund dafür, dass die Quantenphysik erst im 20. Jahrhundert entdeckt wurde. Zum Nachweis der Quanten sind hochpräzise, experimentelle Anordnungen vonnöten.

18.3 Quantenchromodynamik

Die **Quantenchromodynamik (QCD)** ist die Quantenfeldtheorie (QFT) der starken Wechselwirkung. Sie beschreibt und erklärt, den Zusammenhalt der Atomkerne, der Nukleonen (Proton und Neutron) bzw. allgemein gesprochen der Hadronen.

18.3.1 Was Atomkerne zusammenhält

Die Existenz von Atomkernen war bis zum Aufkommen der QCD unverstanden, weil es nicht erklärbar war, wie Protonen, die sich aufgrund ihrer gleichnamigen elektrischen Ladung abstoßen, einen Verbund bilden konnten. Die Erklärung ist, dass die starke Wechselwirkung, die **sehr kurzreichweitig ist**, nämlich gerade auf einige '*Fermi*' (= Femtometer, 10^{-15} Meter, was gerade der Bereich der Kerndurchmesser ist) die elektromagnetische Abstoßung um ein Vielfaches übertrifft! Genau daher rührt ihre **Bezeichnung 'stark'**. Es stellte sich außerdem heraus, dass es eine weitere Substruktur gibt und viele Teilchen aus den Quarks aufgebaut sind. Man kennt sechs solcher Quarks, die sich in der Eigenschaft *Flavor* unterscheiden. Die Terminologie ist u, d, s, c, b, t, als Abkürzungen für *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*. Diese Bezeichnungen sind natürlich willkürlich und im Prinzip irrelevant. Sie dienen nur der Unterscheidung. Es gibt zu diesen sechs Quarks die jeweiligen **Antiquarks**, also weitere sechs Teilchen.

18.3.2 Massen und Ladungen der Quarks

- ◇ u: 5 MeV, $+2/3$ (in Einheiten der Elementarladung e)
- ◇ d: 10 MeV, $-1/3$
- ◇ s: 200 MeV, $-1/3$
- ◇ c: 1.5 GeV, $+2/3$
- ◇ b: 4.7 GeV, $-1/3$
- ◇ t: 180 GeV, $+2/3$

(Quelle: CERN-Homepage, Stand August 2002)

Das top-Quark wurde aufgrund seiner hohen Masse erst 1995 am FERMILAB experimentell nachgewiesen. Ebenfalls am FERMILAB wurde bereits 1977 das bottom-Quark entdeckt.

18.3.3 Hadronen, Mesonen, Baryonen

Es gibt eine Klassifikation der **Hadronen**, das sind alle Teilchen, die aus Quarks bestehen, in **Mesonen**, die aus zwei Quarks bestehen (einem Quark und einem Antiquark) und **Baryonen**, die aus drei Quarks bestehen. So sind Proton (Substruktur uud) und Neutron (udd) Hadronen, aber im Speziellen Baryonen.

18.3.4 Gluonen vermitteln starke Kraft

In der Gruppentheorie bezeichnet man die entsprechende Symmetriegruppe der starken Wechselwirkung als **spezielle, unitäre Transformationsgruppe SU(3)**. Diese Gruppe hat acht reelle, unabhängige Parameter die gerade die **Eichbosonen** repräsentieren. Daher hat die SU(3) **acht Gluonen**, die gerade die starke Wechselwirkung zwischen Trägern der **Farbladung** vermitteln. Die Teilchenphysiker nennen diese Gruppe auch die Farb-SU(3). Die Farbladung ist das Pendant zur *elektrischen Ladung* der Quantenelektrodynamik (QED), nur das hier nicht zwei (analog zu positiv und negativ) Zustände möglich sind, sondern drei, nämlich die Farben rot, grün und blau. Hier rührt die Bezeichnung $\chi\rho\tilde{\omega}\mu\alpha$, *chroma* von QCD her, dem griechischen Wort für *Farbe*. Im Gegensatz zur QED, wo das **Photon keine elektrische Ladung** trägt, liegt eine besondere Eigenschaft der Gluonen darin, dass sie Träger der Farbladung sind. D.h. Gluonen spüren selbst die starke Kraft, die sie übertragen!

18.3.5 Was Atomkerne zusammenhält

Der *Grundzustand* der QCD zeigt, dass die **chirale Symmetrie** gebrochen ist und erklärt außerdem das *Confinement* und die Massen der Quarks ('Farbladungseinschluss'). Mithilfe neuer Untersuchungen im Rahmen der **QCD-Gittertheorie** (*Lattice Quantum Chromodynamics*, LQCD) lässt sich nachweisen, dass ab Temperaturen oberhalb von etwa 150 MeV (vgl. auch *Bag-Konstante*) ein **Phasenübergang** einsetzt, der die chirale Symmetrie wiederherstellt, das *Confinement* aufhebt und so sämtliche Farbladungen freisetzt! Diese **Hochtemperaturphase** kennt man **Quark-Gluon-Plasma (QGP)** und vermutet, dass diese Plasmen tief im Innern von Neutronensternen bzw. Quarksternen realisiert sind. Hochenergiephysiker nehmen auch an, dass das QGP in einer Frühphase des Kosmos existiert habe. 2004 gelang Physikern am Teilchenbeschleuniger RHIC der experimentelle Nachweis des QGPs.

18.3.6 QCD und Stringtheorien

Interessanterweise bieten die Stringtheorien die Möglichkeit das *Regime starker Kopplung* der QCD zu berechnen. Die Störungstheorie der herkömmlichen Feldtheorien versagt hier. Die experimentellen Daten von Gold-Gold-Stößen am Teilchenbeschleuniger RHIC konnten mit den QCD-Strings sehr gut erklärt werden (*E.V. Shuryak*, Proceedings of Continuous Advances in QCD 2006, hep-ph/0608177).

18.4 Quantenelektrodynamik

Die Quantenelektrodynamik (QED) war historisch die erste Quantenfeldtheorie (QFT). Sie beschreibt die (relativistische) **Quantisierung des elektromagnetischen Feldes** und erweitert damit unser Verständnis elektromagnetischer Vorgänge, das bis dahin von der **klassischen Elektrodynamik** von *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879) aus dem 19. Jahrhundert und der **Dirac-Theorie**, einer *relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik* (die u. a. das Positron vorhersagte), bestimmt war.

18.4.1 Ansatz an der Wellengleichung

Zur QED gelangt man, indem man von der Wellengleichung der klassischen Maxwell-Theorie ausgeht, allerdings mit dem Vektorpotential geschrieben in seiner relativistischen Form als Vierervektor. Die Wellengleichung ist dann formal eine **Klein-Gordon-Gleichung** für ein masseloses Teilchen, das Photon. Man zerlegt die allgemeine Lösung der Klein-Gordon-Gleichung in eine Summe aus ebenen Wellen. Schließlich identifiziert man das Vektorpotential mit dem **Feldoperator** und die Gewichte der ebenen Wellen mit den Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren. Anschaulich erzeugen die letztgenannten Operatoren, die typisch sind für den Formalismus der **Zweiten Quantisierung**, Photonen (Emission) oder vernichten sie (Absorption).

18.4.2 Photon hat Spin 1

Die Photonen tragen Spin 1. Es handelt sich also um Bosonen (genauer gesagt intermediäre Vektorboson), die in beliebiger Zahl einen durch Quantenzahlen festgelegten Zustand besetzen dürfen (*kein* Pauli-Prinzip!). Weil das Photon masselos ist, kann der Spinvektor *nur zwei Einstellrichtungen* relativ zum Impulsvektor einnehmen: parallel oder antiparallel, aber nicht senkrecht dazu. Anschaulich entspricht dies den beiden **Polarisationsrichtungen** des Photons, nämlich rechts oder links zirkular polarisiert.

18.4.3 Photonen = Licht

Das Photon nennt man auch das bosonische **Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung** oder vektorielles Eichboson. Das so genannte Feynman-Diagramm 18.1 zeigt die Wechselwirkung zweier elektrischer Ladungen (hier Elektron und Positron) über den Austausch

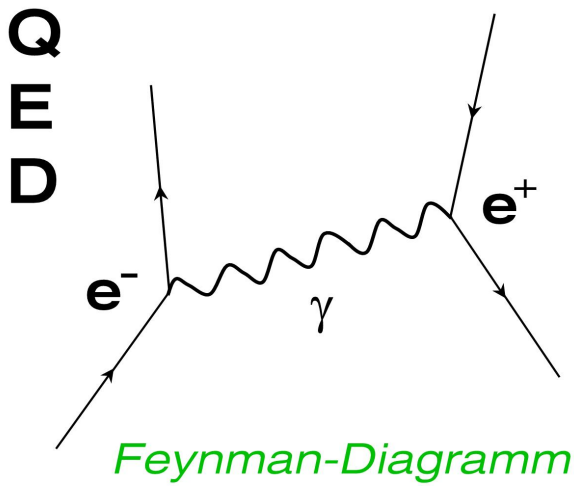

Abbildung 18.1: Typisches Feynman-Diagramm der QED: Elektron und Positron wechselwirken über den Austausch eines Photons.

eines Photons, symbolisiert durch γ. Die elektromagnetische Wechselwirkung lässt sich im quantenfeldtheoretischen Bild auf die Absorption und Emission eines oder mehrerer Photonen reduzieren. In unser alltäglichen Welt identifizieren wir das Photon mit *Licht* bzw. allgemein mit **elektromagnetischer Strahlung**.

18.4.4 Gruppe U(1)

Gruppentheoretisch basiert die QED auf der **unitären Transformationsgruppe U(1)**. Der Übergang von einem Elektron in ein Elektron kann durch Aussendung eines Photons geschehen, allerdings unterscheiden sich Anfangs- und Endzustand nicht. Der Übergang wird gruppentheoretisch mit einer **1 × 1 - Matrix** beschrieben. Die Gruppenstruktur (siehe auch Symmetriegruppe) ist die einfachste unter den Quantenfeldtheorien und lässt nur ein Eichboson mit Spin 1 zu. Dieses Photon ist außerdem masselos, elektrisch neutral und bewegt sich *per definitionem* mit Lichtgeschwindigkeit, wie bereits die Maxwell-Theorie zeigte. Wenn zwei Teilchen, die Träger der **elektrischen Ladung** sind, miteinander wechselwirken, so wird im Quantenbild dieses (virtuelle) Teilchen ausgetauscht. Oder klassisch formuliert: es wirkt die **elektromagnetische Kraft**.

18.4.5 QED im Test

Im Jahr 2005 wurde ein Experiment durchgeführt, um die Quantenelektrodynamik abermals auf den Prüfstand zu bringen. Die Idee: In der QED gibt es so genannte *Zwei-Schleifen-Korrekturen* (engl. *two-loop corrections*). Darunter verstehen die Teilchenphysiker zwei virtuelle Teilchenpaare, die im Quantenvakuum entstehen und die eine elektromagnetische Wechselwirkung auf dem Quantenniveau anders gestalten, als wenn die Teilchenpaare nicht entstehen würden. Im Eintrag Feynman-Diagramme ist als zweites Bild eine *Ein-Schleifen-Korrektur* illustriert. Diese QED-Effekte höherer Ordnung sollten sich auch bei elektromagnetischen Übergängen bemerkbar machen und die Übergangsenergie geringfügig verschieben. Ideale Studienobjekte sind hier schwere Ionen wie z.B Uran, die jedoch extrem ionisiert werden müssen. Hochgeladene Ionen erzeugt man durch Beschuss des gering geladenen Ions mit energiereichen und intensiven Elektronenstrahlen. Am *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) wurde das schwere Ion U^{89+}, 'lithiumähnliches Uran', in einer Ionenfalle untersucht. Dabei wurde mit extremer Präzision ein Übergang des Ions im Ultravioletten mit hochauflösenden Spektrometern dokumentiert. Der Zwei-Schleifen-Beitrag aus Theorie (*Yerokhin & Shabaev*, PRA 2001)

und diesem Experiment (*Beiersdorfer, Chen, Thorn & Träbert*, PRL 2005) stimmen bestens überein und bestätigt damit auch grandios die QED (Quelle: Physik Journal, Februar 2006).

18.5 Quantenfeldtheorie

Die Quantenfeldtheorie (QFT) ist ein modernes Konzept, das darauf abzielt, eine Naturkraft mit einem quantisierten Kraftfeld zu beschreiben.

18.5.1 Mehr als Quantenmechanik

Die Quantenfeldtheorie knüpft damit konsequent an die Quantenmechanik an, die diese Erfolge vorweisen kann

- ◇ Beschreibung der Atome: Wasserstoff-Problem, Periodensystem der Elemente, Orbitalmodell, chemische Bindung
- ◇ relativistischen Theorie des Elektrons und Existenz von Antimaterie gemäß der *Dirac-Theorie*, einer speziell relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik

18.5.2 Feld: Welle & Teilchen

Quantenfeldtheorien liefern einen kompletten, formalen Apparat zur Beschreibung der Wechselwirkungen: Ansatz ist eine **Lagrange-Funktion** (*Lagrangian*) oder - mathematisch äquivalent - eine **Wirkung**. Mit den *Euler-Lagrange-Gleichungen* folgt daraus eine Feldgleichung. Sie ist die **Bewegungsgleichung** des betrachteten jeweiligen Kraftfeldes und enthält alle Informationen über den jeweiligen Wechselwirkungsprozess.

Die Bezeichnungen Teilchen, Feld und Welle werden synonym verwendet. Gemäß des **Welle-Teilchen-Dualismus** ist die Materie mal als Welle (z. B. Spalt-Experimente), mal als Teilchen (z. B. Photo-Effekt) interpretierbar und so zu beschreiben.

Der Begriff des Feldes wurde bereits in der klassischen Gravitationsphysik *Isaac Newtons* (Schwerkraftfeld, Gravitationsfeld) und später in der klassischen Elektrodynamik von *James Clerk Maxwell* verwendet (elektrisches, magnetisches, elektromagnetisches Feld). Ganz allgemein macht sich ein Feld durch seine **Kraftwirkung** auf ein eingebrachtes Probeteilchen bemerkbar. Voraussetzung dafür ist, dass das Teilchen das Feld überhaupt 'spürt', also eine **Wechselwirkung** zwischen Feld und Teilchen möglich ist. Das hängt von den Eigenschaften des Teilchens, nämlich von seinen Ladungen ab. Der Ladungsbegriff muss hier sehr allgemein verstanden werden und meint eine elektrische Ladung, eine Farbladung oder eine Masse ('gravitative Ladung'). In der Teilchenphysik nennt man diese und weitere Teilcheneigenschaften generell Quantenzahlen.

18.5.3 Kraft im Quantenbild

Die Wechselwirkung wird in den Quantenfeldtheorien selbst durch Trägerteilchen vermittelt, die immer ganzzahligen Spin tragen. Die Physiker nennen sie **Eichbosonen**, und es handelt sich um **Bose-Teilchen** (nach dem indischen Physiker *S.N. Bose*) oder **Bosonen**. Diese skalaren (Spin 0), vektoriellen (Spin 1) oder tensoriellen (Spin 2) Bosonen werden bei der Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen ausgetauscht und bewegen sich maximal (aufgrund der Speziellen Relativitätstheorie) mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c.

18.5.4 Beispiele von QFTs

So beschreibt die **Quantenelektrodynamik (QED)**, die historisch die erste relativistische Quantenfeldtheorie war, die Wechselwirkung zwischen Teilchen die Träger der elektrischen Ladung sind. Z.B. tauschen zwei Elektronen, die beide negativ geladen sind, ein **Photon** aus, das ein Vektorboson ist. Das Photon ist im engeren Sinne das **quantisierte Feldteilchen der**

elektromagnetischen Wechselwirkung oder auch das Eichboson der QED. Wir identifizieren es mit Licht bzw. Strahlung.

Die **schwache Wechselwirkung** erklärt den radioaktiven Beta-Zerfall und alle weiteren Prozesse, wo die schwache Naturkraft beteiligt ist. Diese kurzreichweitige Kraft vermittelt zwischen Hyperladungen.

In der Terminologie der QFT nennt man die bosonischen Austauschteilchen auch **Ströme**. So sind die positiv und negativ geladenen W-Teilchen der schwachen Wechselwirkung *geladene Ströme*, das Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung ein *neutraler schwacher Strom*, das Photon der QED ein *neutraler, elektromagnetischer Strom*. Alle drei Eichbosonen der schwachen Theorie fasst man als **Weakonen** zusammen.

Weitere Quantenfeldtheorien sind die **Quantenchromodynamik (QCD)**, eine Theorie der **starken Wechselwirkung**, die die Kernkräfte und den Zusammenhalt der Nukleonen beschreibt. Die starke Kraft wird vermittelt durch die Gluonen.

Am schwierigsten gestaltet sich derzeit die Ausarbeitung einer QFT der Gravitation, einer **Quantengravitation**. Es wurden vor allem zwei Varianten vorgeschlagen das Gravitationsfeld quantisiert zu beschreiben: die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation. Diese Theorien werden intensiv erforscht und bislang ist nicht klar, welche die Gravitation im Regime kurzer Abstände und starker Gravitationskräfte gut beschreibt. Die Stringtheorien fordern als Eichboson der Gravitation ein Tensorboson, nämlich das Graviton. Eine bewährte und bislang bestens bestätigte, allerdings nicht quantisierte Gravitationstheorie ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie.

18.5.5 Mit vereinten Kräften

Die Physiker versuchen nicht nur jede Kraft für sich genommen als QFT zu beschreiben, sie versuchen auch die Kräfte einheitlich zu beschreiben. Dies ist zu erwarten, wenn die Temperaturen höher werden, z. B. wenn wir von unserem lokalen Universum ausgehend uns dem Milieu des heißen Urknalls nähern.

Das erste Beispiel, das zeigte, dass sich Kräfte vereinheitlichen lassen, war die klassische Elektrodynamik: eine Vereinheitlichung von elektrischer und magnetischer Kraft. Mittlerweile ist die Vereinheitlichung auch in den Quantenfeldtheorien gelungen, nämlich bei der elektroschwache Theorie (Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher Kraft) und den Großen Vereinheitlichten Theorien (Vereinheitlichung von elektromagnetischer, schwacher und starker Kraft). Im letzten Fall muss noch mit experimentellen Befunden gezeigt werden, dass diese Theorie die Natur korrekt mit einer X-Kraft beschreibt. Im Fall der elektroschwache Theorie ist das perfekt gelungen, weil sie korrekt die Massen der W- und Z-Teilchen vorhersagte - Teilchen, die auch experimentell bestätigt werden konnten.

18.5.6 Feynman-Diagramme

Eine anschauliche Darstellung sämtlicher Wechselwirkungsszenarien verschiedener Teilchen wird durch die so genannten **Feynman-Diagramme** symbolisiert. Diese Darstellung geht jedoch weit über den illustrativen Aspekt hinaus: mit den Feynman-Diagrammen hat man direkt eine Rechnungsvorschrift zur Berechnung von **Wirkungsquerschnitten** (Ereignisraten), die die Physiker sofort hinschreiben kann, weil sie die Feynman-Regeln kennen. Die analytische und numerische Behandlung ist im Detail meist schwierig und bedarf anspruchsvoller Methoden und Computercodes, damit man ein Ergebnis erhält.

18.6 Quantengravitation

Hinter dieser Bezeichnung (oft abgekürzt mit **QG**) verbirgt sich der Versuch, eine quantisierte Theorie der Gravitation zu formulieren. Die Gravitation ist die letzte der vier fundamentalen Naturkräfte, zu der eine bewährte Quantenfeldtheorie (QFT) fehlt. Aber es gibt aussichtsreiche Anwärter auf eine Quantengravitation: Stringtheorien und Loop-Quantengravitation.

18.6.1 Motivation: Erfolge mit Quantenfeldtheorien

Der Siegeszug des Quantisierungsapparats der Quantenfeldtheorien begann mit der Beschreibung der elektromagnetischen Kraft (**Q**uanten**E**lektro**D**ynamik), starken Kraft (**Q**uanten**C**hromo**D**ynamik) und schließlich der schwachen Kraft und mündete in Vereinigungstheorien, wie elektroschwacher Theorie und **G**rand **U**nified **T**heories. Eine Vereinheitlichung **aller Wechselwirkungen** gelang bisher trotz jahrzehntelanger Anstrengungen nicht: Die Physiker suchen immer noch fieberhaft nach der *Unified Theory* (UT) oder auch *Theory Of Everything* (TOE) genannt.

18.6.2 Einsteins Gravitation

Das beste theoretische Konstrukt für die Gravitation ist bisher Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART). Sie ist jedoch eine klassische Theorie und trägt der Quantennatur der Materie nicht Rechnung. So gibt es keine Unschärfe von Ort und Impuls, keine Wahrscheinlichkeitsinterpretation (siehe auch Kopenhagener Deutung), keine Dekohärenz, keine Wellenfunktion in der Relativitätstheorie. Ihre Welt ist vierdimensional (drei Raum- und eine Zeitdimension) und die zentrale Aussage ist, dass Masse (=Energie) die Raumzeit krümmt. Das 'Wie?' beschreiben die Einsteinschen Feldgleichungen: die linke Seite enthält die gekrümmte Raumzeit in Form des Einstein-Tensors, die rechte Seite die Energieformen in der Raumzeit in Gestalt des Energie-Impuls-Tensors.

18.6.3 Was soll sie haben, die Quantengravitation?

Die Physiker postulieren in einer Quantenfeldtheorie der Gravitation ein **Tensorboson** als Austausch- und Botenteilchen, das **Graviton**. Tensoriell heißt, dass es **Spin 2** aufweist. Immer wenn die Gravitationskraft (in der Sprache der Newtonschen Gravitationsphysik) zwischen massebehafteten Teilchen wirkt, wird das Graviton ausgetauscht. Der Kern des Problems ist die **Renormierbarkeit** einer solchen Theorie. Es tauchen Unendlichkeiten auf, die man nicht ohne weiteres los wird.

18.6.4 Anwärter 1: Stringtheorien

Ein erster guter Ansatz besteht in den **Stringtheorien** bzw. der **M-Theorie**. Die M-Theorie ist ein übergeordnetes Konstrukt, für das es Anzeichen gibt, weil die fünf Stringtheorien mittels mysteriöser, mathematischer Relationen (den *Dualitäten*) verknüpft zu sein scheinen. Die M-Theorie ist bislang nur den Physikern nur ausschnittartig bekannt und hypothetisch. Diese Theorien enthalten 'automatisch' ein Spin-2-Teilchen - also das, was sich die Physiker für eine Quantengravitation gewünscht haben.

Die Stringtheorien haben noch eine weitere, faszinierende Eigenschaft: gegenüber der vierdimensionalen Raumzeit der ART sind weitere Dimensionen implementiert, die man als Extradimensionen bezeichnet. Das haben die Stringtheorien mit der Kaluza-Klein-Theorie gemein. Allerdings gibt es in der Natur bislang keine Evidenzen für weitere Raumdimensionen. Aus diesem Grund glauben die Stringtheoretiker, dass diese zusätzlichen Dimensionen auf kleinen Längenskalen kompaktifiziert sind. So macht sich ihr Einfluss erst bei kleinen Abständen bemerkbar. Z.B. wäre durch die Extradimensionen das klassische Newtonsche Gravitationsgesetz modifiziert und der charakteristische Abfall der Gravitationskraft mit r^{-2} könnte stattdessen einem r^{-4}-Gesetz folgen. Dies versuchen Physiker experimentell mit verschiedenen Methoden (beschrieben unter dem Eintrag Extradimension) zu verifizieren - bislang erfolglos.

Eine noch erstaunlichere Konsequenz der Extradimensionen ist die Reduktion der fundamentalen Planck-Skala von 10^{19} GeV auf den TeV-Bereich. Anschaulich würde die relative Stärke der Gravitation dann schon bei TeV-Energien derjenigen der starken Wechselwirkung entsprechen. In dieser so genannten **TeV-Quantengravitation** (engl. *TeV quantum gravity*), die die Stringtheoretiker mithilfe von Branen beschreiben, wird davon ausgegangen, dass die Gravitation in allen Dimensionen - den klassischen vier **und** den Extradimensionen - wirkt, während die Felder des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen Unterraum, einer **3-Bran**, beschränkt sind. Das hätte zur Folge, dass bereits bei TeV-Experimenten in modernen Teilchenbeschleunigern Gravitonen angeregt werden könnten und diese womöglich in die Extradimensionen entkommen könnten (im Fachjargon: *escape to the bulk*). Der

Experimentator würde einen verletzten Energieerhaltungssatz messen, weil diese Gravitonen Energie fortgetragen hätten. Solche Signaturen werden in den Teilchenbeschleunigern der neusten Generation gesucht. Ihr Nachweis wäre deshalb sensationell, weil die Physiker eine Spur hätten, die sie zum Ziel Quantengravitation leiten würde.

Die Stringtheorien bieten eine Reihe theoretisch betrachtet attraktiver Eigenschaften, aber gibt es eine Reihe von Phänomen, für die die Natur bisher keine oder wenig Anhaltspunkte geliefert hat. Diese Bringschuld der Stringtheorien steht noch aus. Ein viel versprechendes Prinzip, das Gravitation und Stringtheorien verknüpft, ist die **AdS/CFT-Korrespondenz**.

18.6.5 Anwärter 2: Loop-Quantengravitation

Die Stringtheorien haben jedoch einen ernst zu nehmenden Konkurrenten: die **Loop-Quantengravitation (LQG)**. Diese quantisierte Gravitationstheorie folgt allein aus den Konzepten der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Sie wurde seit etwa 1986 (*Ashtekar, Sen, Smolin, Jacobsen, Rovelli, Thiemann* und andere) entwickelt und hat eine radikal neue Sichtweise der Welt. Die Quanten dieser Theorie sind **Wilson-Loops** bzw. Spin-Netzwerke. Mit dieser Basis lassen sich sämtliche physikalische Größen beschreiben. Gemäß dieser Theorie ist die Raumzeit tatsächlich quantisiert in **Volumenquanten**, die Größenordnungen im Bereich der (nicht reduzierten) Planck-Skala haben. Darüber hinaus ist auch die **Zeit quantisiert**, in diskrete Portionen der Planck-Zeit. Die LQG kommt ohne Extradimensionen aus, erfordert auch keine Supersymmetrie (SUSY) und zielt nicht auf eine Vereinheitlichung der Naturkräfte ab, was sie deutlich von den Stringtheorien unterscheidet. Sollten sich weitere Raumdimensionen und SUSY-Teilchen weiterhin als nicht verifizierbar erweisen, so könnte sich die Loop-Quantengravitation als besserer Kandidat für eine Quantengravitation erweisen. Aber auch hier gilt: die LQG bietet attraktive Eigenschaften, hat aber keine experimentellen Stützen.

18.6.6 Strings oder Loops oder...?

Die Physiker verfügen also noch nicht über eine *bewährte* Quantengravitation, aber sie arbeiten daran, dass sich die Konzepte testen, stützen oder widerlegen lassen, um der Natur dieses Geheimnis zu entlocken.

18.7 Quantenkosmologie

Dieser Zweig der modernen Kosmologie verwendet Gesetzmäßigkeiten und Formalismen der Quantentheorie, um das Universum als Ganzes zu beschreiben.

18.7.1 Über den Ursprung der Welt

Vor allem ist sie eine wissenschaftliche Theorie der **Kosmogonie**, die also eine Entstehung des Universums zu erklären sucht. Die Urknall-Theorie ist hingegen streng genommen nur eine Theorie, die die Folgen des Urknalls erklärt und nicht dessen Ursache.

18.7.2 Der Kosmos als Wellenfunktion

Einen möglichen Zugang zur Quantenkosmologie eröffnet der *Hamilton-Formalismus*, den man auf die Einsteinsche Relativitätstheorie anwendet. Man verwendet den ADM-Formalismus, um die Raumzeit aufzubrechen und leitet die kanonischen Variablen aus der *Lagrange-Dichte* ab. Integration liefert die *Hamilton-Dichte*. Nun kann der *kanonische Quantisierungsapparat*, wie er auch exzessiv in den Quantenfeldtheorien angewendet wird, eingesetzt werden. Diesen Vorgang nennt man auch bisweilen **Dritte Quantisierung**. Auf diese Weise erhält man die kanonischen Vertauschungsrelationen und schließlich die Wheeler-DeWitt-Gleichung. Sie ist die relativistische (aber nicht kovariante!) Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung für die **Wellenfunktion des Universums**.

18.7.3 Von Vakuum- und Baby-Universen

Die Quantenkosmologen können nun viele Analogien der mikroskopischen Quantentheorie auf den Kosmos übertragen: so gelangen sie zu einem Formalismus mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren, in dem nun nicht mehr Teilchen, sondern ganze Universen erzeugt bzw. vernichtet werden! Die erzeugten Mehrteilchenzustände (*Fock-Zustände* in der Quantentheorie) können **Voids** (Vakuum-Universen) sein, wenn man eine Quantenfeldtheorie mit freiem Wheeler-DeWitt-Operator aufzieht oder **Baby-Universen** sein, wenn man zum nichtlinearen Wheeler-DeWitt-Operator übergeht. Es sei angemerkt, dass die hier beschriebenen Voids einen Bedeutungsunterschied zu den (beobachteten) Voids der Kosmologie haben.

18.7.4 Mehr Freiheiten

Ein attraktiver Aspekt einer Quantenkosmologie ist, dass Kopplungskonstanten wie die kosmologische Konstante als *dynamischer Parameter* aufgefasst werden können. Diese Eigenschaft wurde zur Lösung des Koinzidenzproblem motiviert und mündete in Quintessenz-Modelle. Aber auch andere Parameter, die wir in unserem Universum als fundamentale Naturkonstanten (G, h, c, Feinstrukturkonstante α etc.) ansehen, könnten in anderen Universen andere Werte annehmen.

18.7.5 Schöne, neue Quantenwelt

Die Implikationen einer Quantenkosmologie sind mehr als erstaunlich. Eine Übertragung des Teilchenbegriffs auf Universen entführt uns in eine phantastische Welt, wie sie vielleicht nicht mal im Science-Fiction-Genre gedacht wurde. Neben einer Vielfalt an Universen, was man oft als **Multiversum** bezeichnet, sollten Vernichtung und Erzeugung von Universen ebenso realisiert sein, wie **virtuelle Universen**, analog zu virtuellen Teilchen (die in der Atomspektroskopie bei der *Lamb-Shift* experimentell verifiziert wurden).

Der Gehalt einer solchen Theorie ist enorm, aber noch nicht völlig verstanden. So bereiten die Randbedingungen, die man an eine kosmische Wellenfunktion knüpfen muss, Probleme. Die Pioniere der Quantenkosmologie sind *Wheeler*, *Vilenkin*, *Linde*, *Hartle* und *Hawking*.

Im Ekpyrotischen Modell von *Steinhardt & Turok* (2001) werden Konzepte der Stringtheorien benutzt (Branenkosmologie), um die Ursache des Big Bang abzuleiten.

18.8 Quantenschaum

Diese etwas saloppe Bezeichnung meint die Illustration des Quantenvakuums aus plötzlich entstehenden Teilchenpaaren, die genauso plötzlich wieder verschwinden.

18.8.1 Das Vakuum blubbert

Die Grundlage dieses Vorgangs ist die **Heisenbergsche Unschärferelation** der Quantentheorie: Dieses Quantengesetz setzt zwei physikalische Größen, Ort und Impuls eines Teilchens oder Energie und Zeit, in Bezug zum Planckschen Wirkungsquantum h, einer Naturkonstante. Für das Folgende betrachte man die Unschärferelation am besten in der Form einer Energie-Zeit-Unschärfe: Die Heisenbergsche Unschärferelation gestattet, dass für kurze Zeit der **Energieerhaltungssatz verletzt** wird. Je größer die benötigte Energie, also je schwerer die Teilchenpaare sind, umso kürzer ist der Zeitraum ihrer Existenz.

18.8.2 So wird Schaum daraus

Die entstehenden und vergehenden Teilchen kann man bereits Quantenschaum (engl. *quantum foam*) nennen. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) krümmen die Teilchenmassen

auch die umgebende Raumzeit. Das Resultat ist ein Durcheinander, das manchmal mit dem Begriff **Raumzeitschaum** bezeichnet wird.

18.8.3 Gibt es Singularitäten?

Eine Spekulation geht in die Richtung, dass die Singularitäten bestimmter Raumzeiten, wie im Innern Schwarzer Löcher, aus Quantenschaum bestehen. Die ART ist eine klassische, unquantisierte Theorie, die Krümmungssingularitäten - gewissermaßen so etwas wie Punktmassen - hervorbringt. Es ist allerdings fragwürdig, ob in der Natur tatsächlich solch idealisierten Objekte existieren. Es gibt im Rahmen der ART zwar die Singularitätentheoreme (von *Penrose* und *Hawking*), die Singularitäten vorhersagen, aber im Gegensatz dazu deutet die Unschärferelation an, dass jedwede idealisierten Gebilde wie Punktmassen oder Ringmassen (siehe auch Ringsingularität) durch Quanteneffekte 'aufgeweicht' werden müssen. Heisenbergs Unschärferelation wurde im Unterschied zu den Singularitätentheoremen tatsächlich mehrfach experimentell bestätigt. Dennoch sind diese Widersprüchlichkeiten bislang nicht gelöst worden. Die Physiker hoffen, dass eine robuste Quantengravitation diese Probleme löst.

18.8.4 lauernde Alternativen

Die Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch, wie nicht-singulärer Gravastern und singulärer Holostern, sind deshalb quantengravitative Szenarien. Gravasterne vermeiden Idealisierungen und Unendlichkeiten. Auf diesem Gebiet ist jedoch noch viel Grundlagenforschung und Verständnis vonnöten.

18.8.5 Schaum in der Kosmologie?

Die sich bildenden 'Blasen' aus Quantenschaum könnten nach einer spekulativen Vorstellung der Quantenkosmologie ganze Mini-Universen sein, die durch die Inflationsära zu großskaligen Makro-Universen aufgebläht wurden. Die meisten dieser Blasen dürften jedoch 'geplatzt' sein: es wird vermutet, dass nicht bei jeder die Inflationsphase starten könne.

18.9 Quantensprung

In der Quantentheorie, einer Theorie der modernen Physik des 20. Jahrhunderts, konnte nachgewiesen werden, dass zahlreiche physikalische Größen, wie Energie, Spin, Felder, magnetischer Fluss etc. nur **diskrete Zustände** annehmen können, d. h. der Wertebereich an Zahlen, den die Größe annehmen kann ist nicht kontinuierlich und beliebig, sondern auf Vielfache einer fundamentalen Einheit, dem **Quant**, beschränkt. Die Physiker sagen, die physikalische Größe sei *quantisiert*.

18.9.1 Grundlagen der Quantentheorie

Eine Zustandsänderung der physikalischen Größe kann im Formalismus der *Zweiten Quantisierung* sehr anschaulich mit **Erzeugung- und Vernichtungsoperatoren** notiert werden. Dabei ändert sich der Quantenzustand einerseits dadurch, dass er durch eine andere Wellenfunktion beschrieben wird und andererseits dieser Zustand (in der Regel, außer bei *Entartung*) durch einen anderen *Eigenwert* beschrieben wird. Der Eigenwert entspricht einer messbaren Größe, der *Observablen* und ist synonym mit dem Begriff Erwartungswert. Verkürzt kann dann ein Quantenzustand durch eine Zahl wiedergegeben werden, der so genannten Quantenzahl. In der Regel charakterisieren viele Quantenzahlen einen Quantenzustand. Als Beispiel möge die Teilchenphysik dienen, wo ein Teilchen durch die Quantenzahlen Spin, Ladung, Isospin, Seltsamkeit etc. eindeutig beschrieben ist. Die Quantenzahlen dienen dann einer Katalogisierung des Teilchenzoos.

18.9.2 Wenn Quanten hops gehen

Der Übergang von einem diskreten Quantenzustand in den anderen kann als 'Sprung' bezeichnet werden. In Operatorschreibweise werden diese Sprünge durch die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren bewerkstelligt: der Erzeugungsoperator fügt dem System ein Quant hinzu und stellt einen 'höheren' Quantenzustand her; der Vernichtungsoperator zieht dem System ein Quant ab und präpariert einen 'niedrigeren' Quantenzustand. Weil man sich diese diskreten Zustandsänderungen wie Schritte auf den Sprossen einer Leiter vorstellen kann, subsumiert man die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren manchmal auch unter dem Begriff 'Leiteroperatoren'. Es können nicht beliebig viele Quanten durch Vernichtungsoperatoren entnommen werden. Irgendwann ist ein Quantenzustand niedrigster Stufe erreicht, den man **Grundzustand** nennt und mit dem Quantenvakuum identifiziert.

18.9.3 'Das war der Quantensprung in der in unserem Unternehmen!'

Quantensprünge sind also nichts anderes als diskrete Zustandsänderungen in Quantensystemen. Dieser Begriff wurde nun der physikalischen Terminologie entlehnt, um in der Alltagssprache, besonders in der Wirtschaftssprache, einen revolutionären Fortschritt zu betiteln. Gerne werden innovative Technologien mit dem Attribut 'Quantensprung' apostrophiert. Streng genommen ist diese Entlehnung (rhetorisch gesprochen eine Analogie) eine semantische Fehlleistung, weil eine winzige Änderung in Quantensystemen, also Bereichen der Mikrophysik, mit einer ganz großen Veränderung in Makrosystemen gleich gesetzt wird.

18.10 Quantentheorie

Die Quantentheorie ist ein Oberbegriff aller physikalischen Theorien, die sich mit *Quantisierung* oder *Quantelung* beschäftigen. Quantelung ist die Eigenschaft, dass ganz verschiedene physikalische Größen (Energie, Drehimpuls, Ladung) Vielfaches eines kleinsten (**diskreten**) Betrages sind, dem **Quant**. Die Quantentheorie kann man in die Quantenmechanik, als Erweiterung der klassischen Mechanik, und die Quantenfeldtheorien einteilen, die die Quantisierung von Kraftfeldern zum Gegenstand haben.

18.10.1 Pioniere der Quantentheorie

Begründet wurde die Quantentheorie von dem deutschen Physiker *Max Planck* (1858 - 1947), der um die Jahrhundertwende die **elektromagnetische Strahlung schwarzer Körper** untersuchte. Ein schwarzer Körper (engl. *black body*) wird auf eine bestimmte Temperatur erhitzt und gibt dann eine charakteristische Strahlung ab (Schwarzkörperstrahlung, Plancksche Strahlung), die eindeutig mit der Temperatur des Körpers zusammenhängt (T^4-Gesetz). Planck fand 1900 heraus, dass die Wärmestrahlung in diskrete Portionen gequantelt ist. Erst *Albert Einstein* (1879 - 1955) war kühn genug, um zu fordern, dass die Strahlungsenergie und elektromagnetische Strahlung **generell quantisiert** sei. Für diese *Lichtquantenhypothese* erhielt Einstein den Nobelpreis 1921. Deshalb gehört auch er zu den 'Vätern der Quantentheorie'.

18.10.2 Heute: Lichthäppchen

Die Strahlungsenergie E kann also nur in Vielfachen des **Planckschen Wirkungsquantums h** gemäß folgender Gleichung emittiert oder absorbiert werden

$$E = \mathrm{h}\nu = \hbar\omega = \frac{\mathrm{hc}}{\lambda}.$$

Das Wirkungsquantum ist eine der **fundamentalen Naturkonstanten** und eine sehr kleine Zahl: $h = 6.62608 \times 10^{-34}$ Js. h hat die Dimension einer *Wirkung* (Energie × Zeit). An der Winzigkeit von h wird sofort einsichtig, dass die Quantennatur gerade in mikroskopischen, atomaren und subatomaren Bereichen wichtig wird. Die Entdeckung der **Energiequanten** wurde 1918 mit dem Nobelpreis für

Planck honoriert. In der Folgezeit sollte viele Nobelpreise für Quantenphysiker vergeben werden, denn diese Theorie trat einen unvergleichlichen Siegeszug an.

18.10.3 Früher war alles besser - und vorhersagbar

Zur Zeit der Jahrhundertwende schien das physikalische Weltbild vollständig zu sein. Die wohl definierten Gesetze der Mechanik prägten eine **deterministische Welt**, die in bestimmten, prognostizierbaren, geordneten und kontinuierlichen Bahnen (*Kontinuitätsprinzip*) ablief. Mit der Quantentheorie musste man von dieser Sichtweise Abschied nehmen! Sie gestaltete das physikalische Weltbild völlig neu und inspirierte die Erkenntnistheorie mit den neuen Auffassungen von Diskretion und Indeterminismus sowie von Messung und Realität.

18.10.4 Das Wasserstoffproblem

Ein weiterer Meilenstein der Quantentheorie war eine erfolgreiche **Beschreibung des Atoms**, im Speziellen des Wasserstoffs. Als einfachstes Atom, wo ein negativ geladenes Elektron den positiv geladenen Atomkern (ein Proton) 'umkreist' (Bohr-Atommodell), konnten die Quantenphysiker das *Wasserstoffproblem* lösen. Wie haben sie das geschafft? Nun, die fundamentale Bewegungsgleichung der nicht-relativistischen Quantenmechanik ist die **Schrödinger-Gleichung**

$$\hat{H}\Psi(\vec{r},t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{r},t).$$

Mit ihr gelang es, die diskreten Energiezustände des Elektrons (Atomschalen) abzuleiten und elektromagnetische Übergänge (Emission und Absorption) im Atom zu verstehen (Spektrallinien). Diese Theorie erklärt folglich die Wechselwirkung von Licht mit Atomen und die Lichtaussendung aus der Atomhülle. Viel Anerkennung auf diesem Gebiet gebührt dem dänischen Quantenphysiker *Niels Henrik David Bohr* (1885 - 1962), der dafür 1922 den Nobelpreis für Physik bekam.

18.10.5 Matrizen- und Wellenmechanik: zwei Seiten einer Medaille

Der deutsche Physiker *Werner Heisenberg* (1901 - 1976) und der österreichische Physiker *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961) entwickelten fast zeitgleich (1925 bzw. 1926) alternative, mathematische Beschreibungsweisen der Quantenmechanik: die **Matrizenmechanik** und die **Wellenmechanik**. Die bis dahin als unterschiedlich wahrgenommenen Phänomene Welle und Teilchen (*Newton*: Korpuskel) stellten sich als Erscheinungsformen ein und desselben quantenmechanischen Objekts heraus. Mal manifestiert sich dieses Objekt als Teilchen (z. B. beim Photoeffekt) und mal als Welle (z. B. bei Streuexperimenten an Spalten), beides sind gleichwertige Zustände eines Quants. Diese Ambivalenz nennt man in der Quantenphysik **Welle-Teilchen-Dualität**.

18.10.6 Operatoren

Die neue Sichtweise geht sogar noch weiter: Die Schrödinger-Gleichung ist eine partielle, nichtlineare Differentialgleichung. In der Quantentheorie spricht man nun von *Operatoren* und meint damit mathematische Objekte, die auf einen Quantenzustand (eine Wellenfunktion Ψ) angewandt werden. Im Allgemeinen kann man die Reihenfolge der auf einen Zustand wirkenden Operatoren *nicht* vertauschen. In der Schrödinger-Gleichung ist der wichtigste Operator der Quantentheorie enthalten: der **Hamilton-Operator** $\boldsymbol{H}$ (*Hamiltonian*), der mit der Energie im Quantensystem zusammenhängt. In einem Zentralpotential, das ein kugelsymmetrisches Kraftfeld erzeugt, setzt sich der Hamilton-Operator aus der kinetischen und der potentiellen Energie zusammen. Gemäß dem Korrespondenzprinzip ist der in der kinetischen Energie enthaltene Impuls ein Operator. Der Impuls-Operator entspricht dem Gradienten (Nabla-Operator ∇), sein Quadrat dem Laplace-Operator $\nabla^2 = \Delta$ (bis auf Vorfaktoren). Die genaue Form der potentiellen Energie hängt vom quantenmechanischen System ab. Simple quantenmechanische Modellsysteme sind der *Potentialtopf* oder der *harmonische*

Oszillator. Für diese Quantensysteme bestimmt man das **Spektrum des Hamilton-Operators** und meint damit die möglichen **Wellenfunktionen** (oder Eigenfunktionen, Ψ, 'Psi') und zugehörige **Energieeigenwerte**. Im Wasserstoffproblem geht als potentielle Energie das **Coulomb-Potential** ein, das wie das Newtonsche Gravitationspotential ein 1/r-Potential (ein Zentralpotential, s. o.) ist. Drehimpuls, Spin und Spin-Bahn-Kopplung (die Wechselwirkung von Drehimpulsen untereinander) müssen auch berücksichtigt werden.

18.10.7 Lösungsansatz für die Schrödinger-Gleichung

Für die Wellenfunktionen wird ein *Separationsansatz* gemacht, also die Koordinatenabhängigkeit zerlegt in Radialanteil (Koordinate r) und Winkelanteil (Poloidal- und Azimutwinkel). Erst dann ist das Wasserstoffproblem quantenmechanisch lösbar!

18.10.8 Teilchen, Wellenfunktion, Wahrscheinlichkeitswelle

Die resultierenden Lösungen in Form von (im Allgemeinen komplexwertigen) Wellenfunktionen werden in ihren *Absolutquadraten* betrachtet. Sie ist ein Maß für die **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** des beschriebenen Teilchens. Der klassische Begriff der Bahn geht damit vollends verloren. Das Teilchen ist eine **Wahrscheinlichkeitswelle**. Im Orbitalmodell der Atome bilden die Orte verschiedener Wahrscheinlichkeit wolkenartige Strukturen oder Keulen, die man *Orbitale* nennt. Das Elektron ist demnach kein klassisch lokalisiertes Punktteilchen, das vergleichbar den Planeten um die Sonne um einen Atomkern kreist, sondern eine *Elektronenwelle*, die um den Atomkern 'verschmiert' ist!

Die physikalische Interpretation der Wellenfunktion und ihr Verhalten im **Messprozess** formt mit der Kopenhagener Deutung ein neues physikalisches Weltbild. Die wesentlichen Protagonisten dieser Deutung waren *Max Born* (1882 - 1970, Nobelpreis 1954), Heisenberg und Bohr.

18.10.9 Quantenstatistik: zwei Teilchengruppen machen eine komplexe Welt

Spätere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Quantentheorie verbanden Statistische Physik und Quantennatur zur **Quantenstatistik**, die alle Teilchen fundamental in Bosonen und Fermionen unterscheidet. Eine wichtige Quanteneigenschaft der Teilchen ist der **Spin**. Anschaulich wird er häufig als *Eigendrehimpuls* aufgefasst. Die Teilchen rotieren um ihre eigene Achse mit diskreten Spins. Diese ist aber nur eine naive Hilfsvorstellung. Das Spin-Statistik-Theorem verknüpft den Teilchenspin mit der Statistik. Der englische Quantenphysiker *Paul Adrien Maurice Dirac* (1902 - 1984) erweiterte die Quantenmechanik um Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie. In dieser **relativistischen Quantenmechanik** (*Dirac-Theorie*) folgt der Spin als natürliche Teilcheneigenschaft. Er ist also eine relativistische Eigenschaft! Ebenso begründete Dirac somit die Existenz von Antimaterie. Er fand zum bis dato bekannten Elektron (e^-) das Antiteilchen Positron (e^+). Die fundamentale Einteilung des Teilchenzoos in Bosonen und Fermionen stellt sich als wesentlich für den Aufbau der Materie heraus. So kann man das **Periodensystem der Elemente** nur mit dem Elektronenspin und dem Pauli-Prinzip erklären. Ohne den fundamentalen Unterschied zwischen Bosonen und Fermionen würden wir nicht in dieser komplexen, vielfältigen Welt leben!

18.10.10 Quantentheorie erklärt Radioaktivität

Die Kernphysik, im Speziellen die **Radioaktivität**, wurde durch die Quantentheorie befruchtet. So beschreibt der **Tunneleffekt** den **Alpha-Zerfall**. Hier können (positiv geladene) α-Teilchen (Heliumatomkerne) den Coulombwall des (ebenfalls positiv geladenen) Atomkerns durchtunneln, weil die Wellenfunktion bzw. Aufenthaltswahrscheinlichkeit des α-Teilchens außerhalb des Kerns zwar einen kleinen, aber *endlichen* Wert hat.

Der **Beta-Zerfall** wird durch die Theorie der schwachen Wechselwirkung erklärt, indem die geladenen Austauschteilchen (W-Teilchen) der schwachen Theorie den Quarkgehalt von Proton bzw. Neutron ändern.

Schließlich wird die Emission hochenergetischer Lichtquanten, die **Gammastrahlung**, im Gamma-Zerfall verständlich, weil hochangeregte Tochterkerne aus radioaktiven (Alpha- oder Beta-) Zerfällen sich in energetisch tiefere Zustände des Atomkerns 'abregen'. Nicht nur die Zustände der Elektronen in den Schalen des Atoms werden quantentheoretisch beschrieben, sondern auch die der Nukleonen (Proton und Neutron) im Atomkern!

18.10.11 berühmte Quantenphysiker

Die Quantentheorie der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts hatte folgende, bedeutende Pioniere (alle bis auf Sommerfeld Nobelpreisträger) inklusive Arbeitsgebiet:

- ◇ der Deutsche *Arnold Sommerfeld* (1868 - 1951), Bohr-Sommerfeldsches Atommodell, Spektrallinien, Feinstrukturkonstante;
- ◇ der Neuseeländer *Ernest Rutherford* (1871 - 1937), Rutherfordsches Atommodell, α-Zerfall, Streuung;
- ◇ der Däne *Niels Bohr* (1885 - 1962), Bohr-Sommerfeldsches Atommodell, Bohrsche Postulate;
- ◇ der Österreicher *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961), Wellenmechanik, Schrödinger-Gleichung als fundamentale Bewegungsgleichung der Quantenmechanik;
- ◇ der Deutsche *Max Born* (1882 - 1970), Kopenhagener Deutung, Quantenstatistik, Streutheorie;
- ◇ der Franzose *Louis de Broglie* (1892 - 1987), Welle-Teilchen-Dualismus, Materiewellen;
- ◇ der Österreicher *Wolfgang Pauli* (1900 - 1958), Pauli-Prinzip, Spin-Statistik-Theorem, Vorhersage des Neutrinos;
- ◇ der Deutsche *Werner Heisenberg* (1901 - 1976), Heisenbergsche Unschärferelation, Matrizenmechanik;
- ◇ der Italiener *Enrico Fermi* (1901 - 1954), Fermi-Statistik (Fermionen, Fermi-Energie), Kernspaltung, Neutronen;
- ◇ der Brite *Paul Dirac* (1902 - 1984), Dirac-Theorie des Elektrons, relativistische Quantenmechanik, Antimaterie;

18.10.12 Von der QM zur QFT

Die Gebiete dieser Protagonisten subsumiert man unter **Quantenmechanik (QM)**. Davon abgrenzen muss man einen weiteren Bereich der Quantentheorie, der einen modernen Zugang darstellt, nämlich die **Quantenfeldtheorie (QFT)**. Die QFT untersucht systematisch jede der vier fundamentalen Naturkräfte (Elektromagnetismus, schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung, Gravitation) und versucht diese zu vereinigen (siehe auch Standardmodell und GUT). Die Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen zu einer **Urkraft** muss bei hohen Temperaturen im Frühen Universum, nur Sekundenbruchteile nach dem Urknall, vorgeherrscht haben. Dieser Zustand hoher Symmetrie zerfiel durch Symmetriebrechungen bis der aktuelle Zustand unserer Welt erreicht war.

18.10.13 verrückte Quantenwelt

Die Quantentheorie offenbart eine Reihe seltsam anmutender Prinzipien (Unschärfe, Wahrscheinlichkeitswelle, Dualität) und Phänomene (Energiequantelung, Quantenvakuum, Tunneleffekt, Superfluide, Casimir-Effekt), die unserer Alltagswelt und der Auffassung, die von klassischer Physik geprägt ist, völlig entrückt scheinen. Dennoch oder gerade deswegen ist sie sehr erfolgreich und im atomaren bzw. subatomaren Bereich die momentan einzige Theorie, die eine adäquate und experimentell verifizierbare Beschreibung liefert. Insofern darf man vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt die Quantentheorie als eine Theorie bezeichnen, die sich

vielfach **bewährt** hat. Die Schwierigkeiten der Quantentheorie stecken in ihrer Unanschaulichkeit, was ein hohes Maß an Abstraktionsvermögen verlangt und darin, dass sie konzeptionell anders ist. Doch dadurch wird unsere Auffassung von dem, was Natur ist, revolutioniert! Ein **objektiver Beobachter** geht mit der Quantentheorie verloren! Die Unschärferelation lehrt uns, dass bereits die Beobachtung das beobachtete System beeinflusst und dessen Zustand ändert. Anschaulich ist es klar, denn *Beobachten* heißt, dass wir andere Testteilchen (z. B. Photonen, also Licht) benötigen, die mit der (subatomaren) Probe wechselwirken, z. B. zurück gestreut werden. Die Testteilchen sagen dem Experimentator durch ihre Eigenschaften, wenn sie beim Beobachter ankommen, in welchem Zustand die Probe ist. Die Crux im atomaren und subatomaren Bereich ist nur, dass die Testteilchen die Probe beeinflussen! Diese Wechselwirkung zwischen 'beobachtenden und beobachteten Teilchen' führt letztlich zur Unschärfe.

18.10.14 Bewegung ist Abfolge von Erzeugung und Vernichtung

Ein anderer Sachverhalt ist, dass die klassische, wohl bestimmte Bahn eines Teilchens **nicht** existiert. Sie *erscheint* uns nur so! Im quantentheoretischen Bild wird das Teilchen, das sich auf einer Trajektorie bewegt, am einen Ort und Zeitpunkt im Raum erzeugt, an einem anderen vernichtet und wieder erzeugt usw. Da dies auf der Quantenebene abläuft, die makroskopisch nicht beobachtbar ist, *erscheint* es uns so, als ob ein Teilchen eine Bahn durchläuft. Doch in Wahrheit gibt es in der Quantenwelt, also auch in der realen Natur, ein ständiges Kommen und Gehen, was mathematisch auch mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren beschrieben wird. Diese Operatoren genügen **kanonischen Vertauschungsrelationen**: **Kommutatoren** bei den Bosonen und **Antikommutatoren** bei den Fermionen. Diese Formulierung ist die Grundlage der *Zweiten Quantisierung*.

18.10.15 Übergang zur Quantenkosmologie

Die Konzepte der Zweiten Quantisierung wurden auch auf die Kosmologie übertragen. Diese Disziplin nennt man Quantenkosmologie. Die Existenz vieler Paralleluniversen ist eine zwingende Folge dieses Ansatzes. In der Quantenkosmologie spricht man daher von einem **Multiversum**. Auch diese Forschung bewegt sich im spekulativen Bereich und ist reine Theorie. Bisher gab es keinen Hinweis aus astronomischen Beobachtungen, die quantenkosmologische Szenarien stützen.

18.10.16 Herausforderung Quantengravitation

Eine große Herausforderung für die Physik ist die **Verknüpfung der Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie**. Die theoretischen Konzepte, die dieses Ziel verfolgen, heißen Quantengravitationen. Die aussichtsreichsten Kandidaten für eine Quantengravitation sind die Stringtheorien und - später hinzugekommen - die Loop-Quantengravitation. Mit diesen Theorien ist wieder ein revolutionäre Sichtweise der Welt der Physik verbunden. Sie unterscheiden sich jedoch in einem wesentlichen Punkt von der Quantentheorie und der Relativitätstheorie: Beide haben sich noch nicht bewährt! Deshalb müssen **Hypothesentests** durchgeführt werden, die Stringtheorien und/oder Loop-Quantengravitation mehr Gewicht verleihen - oder entkräften. Nur auf diese Weise rückt man diese neuen, theoretischen Konzepte aus dem Gebiet der Mathematik in das der Physik. Sie werden Theorien, die die Natur beschreiben.

18.10.17 Webtipp

- ◇ Nobelpreisträger der Physik: viele Eckdaten, Vorstellung des Arbeitsgebiets und Biographien in englischer Sprache

18.11 Quantenvakuum

Unter diesem Begriff versteht man den **Vakuumzustand der Quantenphysik**, den Zustand niedrigster Energie. Diese **Nullpunktsenergie** ist immer größer als null, d. h. selbst wenn sich makroskopisch in einem physikalischen System 'scheinbar nichts tut', so ist es mikroskopisch 'immer in Bewegung'. Somit hat die Quantentheorie das Bild von der Natur auch hinsichtlich des Vakuums revolutioniert.

18.11.1 Nichts

Etwas weltlicher formuliert verbirgt sich hinter dem Quantenvakuum das **Nichts**. Die Quantentheorie entlarvt das Nichts als ein komplexes, strukturreiches Gebilde. Es stellt sich heraus, dass es prinzipiell unmöglich ist, einen Raumbereich völlig von Teilchen zu entleeren. Das widerspricht selbstverständlich jeder klassischen Denkweise - ist jedoch quantenphysikalisch richtig und erklärbar. In (nicht nur) diesem Aspekt bietet die Quantenphysik interessante Anknüpfungspunkte für eine philosophische Debatte.

18.11.2 Lösen der Bewegungsgleichung

Der genaue Zahlenwert für den niedrigsten Energiezustand (**Grundzustand**) hängt vom betrachteten Quantensystem ab. Die möglichen Zustände eines Quantensystems werden durch **Wellenfunktionen** dargestellt, die üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben Ψ (Psi) symbolisiert werden. Die Physiker erhalten die Wellenfunktionen durch Lösung der *Bewegungsgleichung* des Systems. Dies kann eine Schrödinger-Gleichung, eine Klein-Gordon-Gleichung, eine Soliton-Gleichung oder eine andere Differentialgleichung sein. Die Wellenfunktionen konstituieren dann das *Spektrum* des betrachteten Problems, das in **Vakuumzustände** und **angeregte Zustände** eingeteilt wird. Die Vakuumzustände sind Zustände niedrigster Energie und besonders stabil.

18.11.3 Observable & Vakuumerwartungswert

In der Quantentheorie gibt es eine Zuordnung zwischen dem Messwert (*Observable*), und dem *Erwartungswert*. Sie sind wohl definiert und führen auf den hier zentral zu diskutierenden **Vakuumerwartungswert**.

18.11.4 Beispiel: der harmonische Oszillator

Der harmonische Oszillator der Quantenmechanik ist ein einfaches Modellsystem, das diese Eigenschaft zeigt: die Eigenwerte des Hamilton-Operators, der die Energie im System beschreibt, verrät die möglichen energetischen Zustände des Systems. Sie sind **quantisiert**, d. h. es können nur diskrete Werte (Energiestufen) angenommen werden und nicht beliebige Werte eines Kontinuums. Der energetisch tiefstmögliche Zustand besitzt eine von null verschiedene Energie, die gerade $0.5 \times h/(2\pi) \times \omega$ ist (h: Plancksches Wirkungsquantum, ω: Kreisfrequenz). Der harmonische Oszillator vollführt dann eine **Nullpunktsschwingung**.

Die Eigenfunktionen des Hamilton-Operators charakterisieren gerade die Eigenzustände des Systems, die Wellenfunktionen. Im Bild der Quantisierung vermitteln zwischen den unterschiedlichen, diskreten Energieniveaus die Erzeuger- und Vernichteroperatoren. Sie erzeugen oder vernichten beim harmonischen Oszillator ein Schwingungsquant (bosonisches **Vibron**), wenn man von einem Energieniveau zum nächsten wechselt. Dies ähnelt den Sprossen einer Leiter, die man auf- oder hinuntersteigt, weshalb man Erzeuger und Vernichter auch salopp 'Leiteroperatoren' nennt.

18.11.5 Vakuumfluktuationen

Gemäß der **Heisenbergschen Unschärferelation** kann man bei der Interpretation als Energie-Zeit-Unschärfe dem Vakuum für sehr kurze Zeit Energie entziehen. Aus diesen Energieportionen können sich **virtuelle Teilchenpaare** bilden, bestehend aus Teilchen (z. B. Elektron) und zugehörigem

Antiteilchen (z. B. Positron), die nach Verrinnen der kurzen Zeiten wieder verschwinden. Diesen Vorgang nennt man auch **Vakuumpolarisation**. Das Quantenvakuum ist also bildlich gesprochen ein 'ständig brodelnder See aus Teilchen und Antiteilchen', die entstehen und vergehen. Ein anderer, oft bemühter Begriff ist der der **Vakuumfluktuationen**.

18.11.6 Aus virtuell werde real

Unter bestimmten Bedingungen (weitere Energiezufuhr, weitere Partner für Impulsübertrag) können diese virtuellen Teilchen materialisieren. Genau dieser Prozess findet wohl auch bei der Bildung von Hawking-Strahlung am Ereignishorizont Schwarzer Löcher statt. Dieses bisher rein theoretisch abgeleitete Phänomen folgt aus einer semiklassischen Berechnung, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie wird mit Erkenntnissen aus der Quantenphysik verquickt - allerdings **ohne** eine konsistente Quantisierung des Gravitationsfeldes.

18.11.7 Quantenvakuum in der Quantenkosmologie

Für die **Quantenkosmologie** ist das Quantenvakuum von besonderer Relevanz, weil sich daraus ein mikroskopisches Universum gebildet haben könnte, das über den Mechanismus der **Inflation** sehr schnell sehr groß wurde.

18.11.8 experimenteller Nachweis des Quantenvakuums gelungen!

Im Casimir-Effekt ist das Quantenvakuum experimentell nachgewiesen worden. Zwischen zwei Metallplatten ('Kastenproblem') fehlen bestimmte Moden (= Anregungszustände) **virtueller Photonen**, so dass der Quantendruck von außen, wo alle Moden existieren können, überwiegt und die **Casimir-Kraft** die Platten zusammendrückt (mehr Einzelheiten unter Casimir-Effekt).

18.11.9 falsches Vakuum

Unter einem *falschen Vakuum* versteht man in der Diskussion von **Higgs-Mechanismen** Gebiete, die sich nach einer Symmetriebrechung ausbilden und *endlichen Vakuumerwartungswert* für das Higgs-Feld haben. Mit den falschen Vakua sind topologische Defekte verknüpft, in denen Energie 'topologisch eingeschlossen' ist. In vielfältiger Ausprägung (kosmische Strings, kosmische topologische Defekte mit dem Charakter Dunkler Energien) können diese Defekte von hoher Relevanz für die Kosmologie sein.

Auch in den Inflationsmodellen ist das falsche Vakuum bedeutsam, weil es eine exponentielle Expansion des Universums treibt.

18.11.10 Manifestiert sich das Vakuum kosmologisch als Dunkle Energie?

Die Dunkle Energie dominiert die späte Dynamik des Kosmos, wie es in unserem unmittelbaren, d. h. lokalen Universum der Fall ist. Sie macht mehr als zwei Drittel aller Energieformen im Kosmos (neben Dunkler Materie und baryonischer Materie) aus. Aber die Natur der Dunklen Energie ist ungeklärt! Als bislang beste Erklärung bietet sich das Quantenvakuum an, das sich auf der großen, globalen Skala des Kosmos in der Gestalt einer Dunklen Energie beschreiben lassen könnte. An sich eine paradoxe Vorstellung:

Das Nichts soll für eine beschleunigte Expansion des Universums sorgen!

Aber auf der kleinen Skala ist die Dunkle Energie schwach und irrelevant. Die mathematischen Details dieser attraktiven Hypothese sind allerdings unklar, zumal eine erste Berechnung große Unstimmigkeiten zutage gebracht hat.

18.12 Quantenzahlen

Als Quantenzahlen bezeichnen die Physiker sämtliche quantisierte Eigenschaften (*Freiheitsgrade*) eines Teilchens oder quantisierten Systems (Ein-, Zwei-, Mehrteilchensysteme).

18.12.1 So finden wir Quantenzahlen

Der tiefer liegende Zusammenhang, der eine Verwendung von Quantenzahlen rechtfertigt, ist die **Quantisierung** physikalischer Größen, die die Quantentheorie aufdeckte. Kennt man das Quant, also die kleinstmögliche Einheit der betreffenden physikalischen Größe, so genügt die Angabe einer Zahl, nämlich des **Vielfachen dieser Einheit**, die *Quantenzahl*, um den Zustand des Systems eindeutig zu charakterisieren. In der Regel beschreiben erst viele Quantenzahlen, die unterschiedlichen Eigenschaften zugeordnet sind, ein Teilchen oder System eindeutig. Also charakterisieren Quantenzahlen erst ein Teilchen, ein Organisationsprinzip, um Ordnung in den Teilchenzoo zu bringen. Genau diese Methode wenden die Teilchenphysiker dem *Particle Physics Booklet* an. Es handelt sich um eine Art 'Teilchenkatalog', der alle Teilchen namentlich vorstellt und dann ihre Eigenschaften in Form von Quantenzahlen listet.

18.12.2 Beispiele für Quantenzahlen

- Eine sehr anschauliche physikalische Größe und Quantenzahl ist die **elektrische** Ladung Q. Im *Millikan-Versuch* konnte die **Elementarladung** e abgeleitet werden. Man könnte dies als *Ladungsquant* bezeichnen. Ihr Zahlenwert ist $e = 1.602\ 176\ 462 \times 10^{-19}$ C (C steht für die SI-Einheit *Coulomb* der elektrischen Ladung). Entsprechend wird eine beliebige elektrische Ladung Q in Einheiten von e angegeben, also eine (in der Regel) ganze Zahl, die Quantenzahl. Dabei gilt die Vereinbarung, dass negative Ladungen ein negatives Vorzeichen und positive Ladungen ein positives Vorzeichen erhalten. So haben Elektronen Q = -1, Protonen und Positronen haben $Q = +1$ und die Quarks haben sogar drittelzahlige Ladungen, Q = -1/3 oder $Q = +2/3$ (wie man sieht haben Quarks drittelzahlige Ladungen!).
- Das Standardmodell der Teilchenphysik kennt weitere Ladungen: So wie Photonen an die elektrische Ladung koppeln, koppeln die Austauschteilchen (**Eichbosonen**) der schwachen Wechselwirkung, W^-, W^+ und Z^0 an die **schwache Ladung** g (oder *Kopplung*). Offensichtlich tragen Quarks und Leptonen ein g verschieden von null, da sie alle schwach wechselwirken. Zudem besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Elementarladung und schwacher Ladung, nämlich
$$e = g \sin \theta_{\mathcal{W}}.$$
Leider wird der dabei auftretende **Weinbergwinkel** θ_W *nicht vom Standardmodell prognostiziert*, folgt aber aus den Großen Vereinheitlichten Theorien in einer SU(5)-Gruppentheorie. Die Teilchenphysiker ermitteln den Weinbergwinkel experimentell: Er folgt aus dem Massenverhältnis von W- zu Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung:
$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_{\mathcal{W}}.$$
Der Zahlenwert für den *quadrierten Sinus des Weinbergwinkels* ist 0.23143.
- In der elektroschwachen Theorie taucht die schwache Hyperladung Y auf, die mit der unitären Gruppe U(1) beschrieben wird. Das Konzept der Hyperladung wurde unabhängig voneinander von den Physikern *Murray Gell-Mann* und *Kazuhiko Nishijima* 1953 entwickelt. Die Nukleonen, Proton und Neutron, besitzen identische schwache Hyperladung, $Y = 1$ (siehe dazu auch letzte Gleichung unten).
- Der **Bahndrehimpuls** ist ebenfalls quantisiert und wird durch die **Bahndrehimpulsquantenzahl** l angegeben. l gibt die Vielfache von $h/(2\pi) = 1.054$

571 596 $\times$ 10^{-34} Js an (h = 6.626 068 76 $\times$ 10^{-34} Js ist das berühmte Plancksche Wirkungsquantum). Die Angaben sind wichtig, um Zustände von Elektronen in Atomen zu charakterisieren. Die historische Terminologie ist dabei: $l = 0$ heißt S-Zustand, $l = 1$ P, $l = 2$ D, $l = 3$ F, $l = 4$ G, entsprechend weiter im Alphabet.

- ◇ Der **Spin** s, mathematisch ebenfalls ein Drehimpuls, ist ebenfalls quantisiert und nimmt nur Vielfache von $h/(4\pi)$ an. Quarks und Leptonen sind Fermionen und haben $s = 1/2$.
- ◇ Weitere quantisierte Drehimpulse sind der **Gesamtdrehimpuls** J, der **Isospin** I und der **schwache Isospin** T.
- ◇ Wichtige Quantenzahlen in der Teilchenphysik sind außerdem die **Seltsamkeit** S, **Leptonenzahl** L, **Baryonenzahl** B, **Bottomness** B^*, **Charmness** C etc.

18.12.3 Regel für Quantenzahlen

Allgemein gilt immer:

Die Quantenzahl eines zusammengesetzten Teilchens oder Systems ist die Summe der Quantenzahlen seiner Konstituenten.

Ein Beispiel für diese Regel wird bei den Hyperonen anhand der Seltsamkeit vorgestellt.

18.12.4 gute Quantenzahlen

'Gute' Quantenzahlen sind erhalten. Das ist eine wunderbare Eigenschaft, weil sie viele Rechnungen erleichtert. Aber da ist noch mehr: Diese Erhaltung von Quantenzahlen steht in Zusammenhang mit Symmetrien (auch *Noether-Theorem*). Auf der Basis der Gruppentheorie haben die theoretischen Physiker einen sehr eleganten, mathematischen Apparat gefunden. Das legt eine profunde Sicht auf die Natur frei: Gruppenstruktur, Symmetrien und Erhaltungsgrößen sind miteinander verwoben.

18.12.5 Verknüpfungen zwischen Quantenzahlen

Die Quantenfeldtheorien decken wichtige **Relationen zwischen Quantenzahlen** auf. Die *Gell-Mann-Nishijima-Formeln*

$$\begin{aligned} Q &= I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B^*) \\ Q &= T_3 + \frac{Y}{2} \end{aligned}$$

verknüpfen einige Quantenzahlen, wie die letzten beiden Gleichungen zeigen, nämlich entweder elektrische Ladung Q, dritte Komponente des Isospins I_3, Baryonenzahl B, Seltsamkeit S, Charmness C und Bottomness B^* oder elektrische Ladung Q, Hyperladung Y und dritte Komponente des schwachen Isospins T_3: (Quelle für Zahlenwerte: Particle Physics Booklet, Stand Juli 2002)

18.13 Quark-Ära

Die Quark-Ära kennzeichnet eine bestimmte frühe Entwicklungsphase des Universums, als die kosmische Urmaterie dominiert war von Quarks.

18.13.1 Es war heiß, sehr heiß!

Die typische Temperatur der Quark-Ära lag zu Beginn bei etwa 10^{22} Kelvin oder 10^9 GeV. Dieser Zustand herrschte etwa 10^{-23} Sekunden nach dem Urknall. In dieser Phase gab es noch keine Atomkerne, nicht einmal gebundene Zustände aus Quarks, die Hadronen (erst in der Hadronen-Ära). Diese Urmaterie war unstrukturiert und nur aus Elementarteilchen zusammengesetzt. Die **Quarks waren frei** und existierten zusammen mit den Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, den Gluonen, in einem Zustand namens Quark-Gluonen-Plasma (QGP). Bei einer Temperatur von 10^{12} Kelvin oder 100 MeV ist das QGP noch vorhanden.

18.13.2 Quarks & Leptonen

Neben dem primordialen QGP gab es freie Leptonen, wie Elektronen, Positronen, Myonen und Neutrinos. Alle diese Elementarteilchen wurden am Ende der GUT-Ära erzeugt, als die superschweren X-Bosonen und Y-Bosonen zerfallen waren.

18.13.3 Asymmetrie als Voraussetzung für unsere Existenz

Dabei stellte sich ein geringfügiges, aber hochrelevantes Missverhältnis zwischen Teilchen und Antiteilchen ein. Diese Asymmetrie ist wichtig, damit verständlich wird, weshalb es überhaupt baryonische Materie im Universum gibt (siehe Baryogenese).

18.13.4 Es wurde kalt, zu kalt!

Als das Universum etwa 10^{-5} Sekunden alt war und eine Temperatur von 200 MeV erreichte, konnten die Quarks nicht länger als freie Teilchen existieren. Sie schlossen sich zu Zweier- (Mesonen) und Dreiergruppen (Baryonen) zusammen (beide Teilchengruppen als Hadronen subsumiert). Diesen Phasenübergang nennt man **QCD-Phasenübergang** (engl. *QCD freezeout*) oder **Quark-Hadron-Übergang**. Er markiert das Einsetzen des *Quark confinements*, wo also die Quarks in Teilchenverbänden eingeschlossen wurden. Dieser Vorgang war abgeschlossen, als das Universum eine Sekunde alt wurde. Dann konnten die Baryonen in der Epoche der **primordialen Nukleosynthese** schließlich die ersten leichten Atomkerne bilden.

18.14 Quark-Gluonen-Plasma

Das Quark-Gluonen-Plasma (**QGP**) ist eine besondere und exotische Materieform, wie sie unter normalen, irdischen Bedingungen nicht vorkommt. Dieses Plasma besteht aus **quasi-freien Quarks und Gluonen**. Die Existenz des QGPs wurde vom Standardmodell der Teilchenphysik und der Quantenchromodynamik (QCD) vorhergesagt.

18.14.1 extreme Bedingungen

Allerdings bildet sich das Quark-Gluonen-Plasma nur unter extremen Bedingungen: Entweder muss die Materiedichte enorm hoch sein, und etwa fünf- bis zehnfache Kernmateriedichte, entsprechend 1.3 bis 2.5×10^{15} g cm^{-3}, betragen. Oder die Temperatur muss extrem hoch sein, bei etwa 10^{12} Kelvin! Das ist fast 70000mal heißer als im Mittelpunkt der Sonne! Mittlerweile ist das Quark-Gluonen-Plasma 'künstlich' in Teilchenbeschleunigern hergestellt und gesichert experimentell nachgewiesen worden.

18.14.2 Über Quarks und Gluonen

Das erstaunliche am QGP ist, dass die Quarks in **freier Form** existieren können. Unter normalen Bedingungen sind sie als Hadronen gebunden. Gebunden zu Zweiergruppen nennt man sie Mesonen,

in Dreiergruppen Baryonen. Mittlerweile wurden sogar Quarks in Vierergruppen (Tetraquark) und Fünfergruppen (Pentaquark) experimentell nachgewiesen.

Die Bindung der Quarks wird in der Fachsprache *confinement* (engl. für 'Gefangenschaft', 'Einschluss') oder im Deutschen auch 'Farbeinschluss' genannt. Das Confinement wird unter den genannten extremen Bedingungen aufgebrochen und die Quarks sind asymptotisch frei. Sie wechselwirken gemäß der QCD, der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, miteinander über den Austausch von Gluonen. Diese bosonischen Botenteilchen, die die starke Kraft vermitteln, bilden zusammen mit den quasi-freien Quarks ein plasmaartiges Konglomerat, das *Quark-Gluonen-Plasma* genannt wird.

18.14.3 Welche Prognose gibt die Theorie?

Die Gleichungen der Quantenchromodynamik im Regime starker Kopplung lassen sich durch die **Gittereichtheorie** lösen. Dabei wird die Theorie auf einem euklidischen Raum-Zeit-Gitter diskretisiert - ein Verfahren, das übrigens Lösungsverfahren in der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik ähnelt (siehe auch AMR). Die Rechnungen der Gitter-QCD haben ergeben, dass der Phasenübergang bei 173±15 MeV (oder etwa eine Billion Kelvin) stattfindet (z. B. *F. Karsch*, hep-lat/0412038).

18.14.4 Wir heizen auf - was geschieht?

Aufheizen bricht die Atomkerne in Nukleonen auf. Die Hitze stellt auch Energie zur Verfügung, die es gestattet, aus dem Quantenvakuum Teilchen entstehen zu lassen: vor allem Pionen. In diesem Stadium gibt es demnach Nukleonen und dazwischen Pionen. Schließlich überlappen die Pionen mit den Nukleonen, so dass es insgesamt zu einem **Netzwerk aus Quarks, Antiquarks und Gluonen** kommt. Am Ende füllt dieses Netzwerk den ganzen Raum aus - ein Zustand, den man *Perkolation* (lat. *percolo*: 'vollenden') nennt - und man erhält das **heißes QGP**.

18.14.5 Wir pressen zusammen - was geschieht?

Beim Komprimieren von Materie gibt es einen vergleichbaren Überlappungseffekt wie soeben beschrieben, nur dass sich danach ein **kaltes QGP** ausbildet.

18.14.6 natürliches Vorkommen des QGPs

Die Extrembedingungen, mehrfache Kernmateriedichte und ein Billion Kelvin hohe Temperaturen, findet man in der Natur nach aktuellem Kenntnisstand nur in zwei Fällen. Im Universum, etwa eine Mikrosekunde nach dem Urknall, als der Feuerball noch klein und heiß genug war, erwarten die Physiker ein heißes QGP. Hingegen erwarten sie im Innern von kompakten Objekten, nämlich bei den Neutronensternen oder eventuell auch bei Quarksternen, dass ein kaltes QGP im Innern entsteht

18.14.7 So stellen Physiker das QGP künstlich her

Die Physiker versuchten schon seit einiger Zeit das QGP experimentell in Teilchenbeschleunigern herzustellen. In einigen wenigen Aspekten entspricht dieses Experiment einem **Urknall im Labor**. Dazu benutzen die Teilchenphysiker schwere Ionen, wie Gold- oder Bleiionen. Diese Elemente enthalten besonders viele Teilchen im Atomkern, etwa 200 dieser so genannten Nukleonen pro Atomkern. Schwere Elemente eignen sich für diese Experimente, weil sie bereits viele Teilchen für einen Zusammenstoß mitbringen, hohe Bewegungsenergien besitzen, wenn sie beschleunigt werden (kinetische Energie wächst linear mit der Masse) und einen größeren Querschnitt zur Kollision haben. Die schweren Ionen werden aufeinander geschossen und sollen für extrem kurze Zeiten das QGP in einem winzigen Raumpunkt erzeugen: die so genannte **Energiedichte** ist die zentrale Größe in der Teilchenbeschleunigerphysik. Ziel ist es in einem kleinen Volumen viel Energie (in Form von schnellen

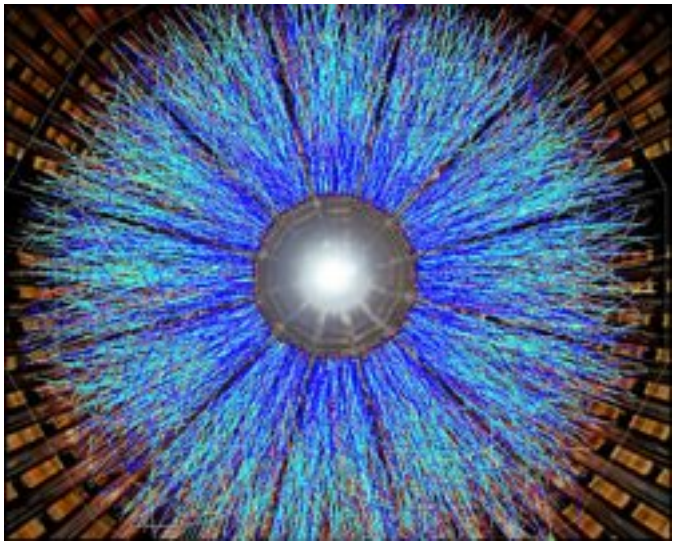

Abbildung 18.2: Feuerball nach Gold-Gold-Kollision.

Teilchen) zu deponieren. Bei einer Kollision von einem Goldion auf ein anderes werden **auf einmal 400 Nukleonen** in einem winzigen Würfel der Kantenlänge von einem Femtometer (10^{-13} cm) vereinigt. Die Temperaturen dabei sind enorm hoch und betragen etwa 1.8×10^{12} Kelvin! Kurzzeitig entsteht ein so genannter **nuklearer Feuerball**. Das klingt dramatisch, aber die *totale Energie* (etwa 200 GeV pro Nukleonenpaar) ist nicht viel größer, als diejenige kinetische Energie, die frei wird, wenn eine Augenwimper aus einer Höhe von 60 Zentimetern auf den Boden fällt!

Die Physiker können das QGP jedoch nicht direkt messen, sondern müssen aus den **hadronischen Schauern** die Existenz des QGP rekonstruieren. Nach einer kurzen Existenz des Plasmas aus Quarks und Gluonen, 'zerplatzt' der Feuerball in eine Vielzahl von Teilchen: neben den Nukleonen (Protonen und Neutronen), entstehen auch Photonen und natürlich auch Pionen sowie Kaonen etc. Mit *hadronischen Schauern* bezeichnen die Kernphysiker die neuen Teilchen, die sich aus den Fragmenten der Kollision bilden. Weil ein Feuerball zu einigen tausend Teilchen 'hadronisiert', ist die Detektion und Datenanalyse außerordentlich anspruchsvoll. Die Abbildung 18.2 vermittelt einen Eindruck davon: sie zeigt tausende Hadronen als bunte Fäden, die nach einer Gold-Gold-Kollision im STAR-Experiment am RHIC entstanden sind (Credit: *Berkeley Lab*, 2005). Die oben genannte Phasenübergangstemperatur von etwa 170 MeV folgt experimentell aus der Analyse der produzierten Hadronenhäufigkeiten mit etwa 10% Unsicherheit - eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

18.14.8 Unfall zweier Pfannkuchen

Erste Hinweise auf die Bildung des Quark-Gluonen-Plasmas gab es schon an der europäischen Teilchenbeschleunigeranlage CERN, wie im Jahr 2000 bekannt gegeben wurde. Der gesicherte Nachweis gelang am US-amerikanischen Teilchenbeschleuniger RHIC, dem *Relativistic Heavy Ion Collider*. Hier nutzen die Physiker zur Herstellung des QGP einen 2.4 Meilen umfassenden Ring, an dem es sechs (magnetisch geführte) Kreuzungspunkte gibt. An den Kreuzungen können sich die Teilchenkollisionen ereignen. Die Atomkerne erreichen relativistische Geschwindigkeiten, also Geschwindigkeiten, die mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit (knapp 300000 km/s) vergleichbar sind. Aufgrund der Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie und der damit verbundenen Lorentz-Kontraktion erscheinen die an sich (im Ruhesystem) kugeligen Kerne im Laborsystem stark abgeflacht in Bewegungsrichtung. Die Kollision findet demnach eher zwischen zwei scheibenartigen Gebilden (Fachausdruck *pancakes*, also 'Pfannkuchen') statt. In der Theorie kann die Kollision schwerer Atomkerne mit den Methoden

der Hydrodynamik beschrieben werden. Damit können die experimentellen Daten gut wiedergegeben werden.

Erste Ergebnisse am RHIC wurden aus Gold-Deuteron-Kollisionen im März 2003 gewonnen. Das viel leichtere Deuteron ist ein Verbund aus einem Proton und einem Neutron, dem Atomkern des *Deuteriums*, schwerem Wasserstoff. Das viel kleinere Deuteron schießt durch den viel größeren Goldatomkern wie eine Gewehrkugel. Dabei werden Quarks herausgerissen, die schließlich **Teilchen-Jets** erzeugen. 'Teilchen-Jet' meint in diesem Zusammenhang die oben angesprochenen 'Teilchenschauer'. (Anmerkung: Die Teilchenjets sind nicht zu verwechseln mit den kosmischen Jets der Astrophysik! Sie sind sich nur morphologisch ähnlich.)

18.14.9 Durchbruch am Teilchenbeschleuniger RHIC

Im Jahr **2004** wurde eine Erfolgsmeldung verbreitet: Am Teilchenbeschleuniger RHIC konnte mit den Detektoren PHENIX und STAR das Quark-Gluonen-Plasma nachgewiesen werden!

In den Spektren der aus dem Feuerball erzeugten Teilchen finden sich auch Hinweise darauf, dass einige schnelle Teilchen in der dichten QGP-Schicht abgebremst werden. Die Dichte der Gluonen kann daraus abgeschätzt werden und führt zu einem Zahlenwert, dass sich in einem Zylinder mit dem Durchmesser eines Goldatomkerns und der Höhe eines Femtometers **etwa tausend Gluonen** befinden!

18.14.10 fundamentales Verständnis der Natur

Aus diesen experimentellen Erfolgen der Teilchenphysik ergeben sich bestimmt vorerst keine industriellen Anwendungen, die den neuen Materiezustand zu nutzen vermögen. Denn dafür sind die Herstellungsbedingungen zu extrem und das QGP zu kurzlebig. Aber es bedeutet einen Durchbruch sowohl für die experimentelle, als auch die theoretische Kernphysik. Die Erforschung der starken Wechselwirkung ist nun unter völlig neuen Voraussetzungen möglich. Es ist insbesondere ein Erfolg der Quantenchromodynamik, deren Prognose bestätigt werden konnte. Die Herstellung und Vermessung des QGPs auf der Erde kommen auch der Astronomie zugute, weil sich aus den Experimenten neue Beschränkungen für das frühe Universum und das Innere von Neutronensternen ergeben. Letztendlich nutzen diese Entdeckungen der ganzen Physik, weil sie in ein neuartiges Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen und dem Aufbau der Materie münden.

18.14.11 Literatur

- ◇ **Extreme Materie** von *Peter Braun-Munzinger* & *Jochen Wambach*, Physik Journal, Oktober 2006
- ◇ **Flüssige Quarkmaterie** von *Johanna Stachel*, Physik Journal, Juni 2005
- ◇ Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma, *STAR Kollaboration*, 2005
- ◇ Formation of dense partonic matter at relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC, *PHENIX Kollaboration*, 2004

18.15 Quarks

Quarks sind neben den Leptonen dem Standardmodell der Teilchenphysik folgend die **fundamentalen Bausteine der Materie**. Die Physiker sind derzeit überzeugt, dass sie nicht mehr teilbar sind und keine weitere Substruktur aufweisen. Im Prinzip ist das ein moderner Atomismus im Sinne *Demokrits*. Diese Eigenschaft umreißt man mit dem Begriff 'Punktförmigkeit' und muss dabei wissen, dass idealisierte Punkte an sich nicht mit der Quantentheorie verträglich sind. Denn das Heisenbergsche Unschärfeprinzip verbietet die Existenz idealisierter Punkte.

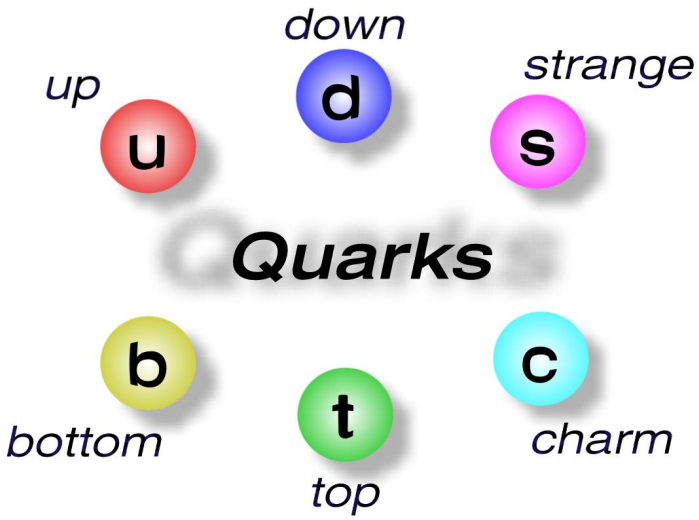

Abbildung 18.3: Quarkfamilie.

18.15.1 Ursprung des Wortes 'Quark'

Die Etymologie des Namens *Quark* geht auf den amerikanischen Elementarteilchenphysiker *Murray Gell-Mann* (*1929) zurück: er entlehnte dem Roman *Finnegans Wake* (1939) des irischen Dichters *James Joyce* diesen Begriff. Dort heißt es gleich zu Anfang eines dreizehnzeiligen Gedichts: '*Three quarks for Muster Mark!* [...]'. Der Begriff *quark* war hier ein onomatopoetisches Kunstwort, dass *Joyce* in Anlehnung an die Laute einer Krähe wählte und das sich auf andere Worte im Vers des Gedichts reimte.

18.15.2 sechs Quarks

Die drei Quarks passten hervorragend zur damals bekannten Zahl subatomarer Partikel, die die Nukleonen konstituieren. Erst später stellte sich heraus, dass es insgesamt **sechs Quarks** gibt, die alle experimentell nachgewiesen werden konnten (zuletzt, 1995, das schwerste Quark, das *top*-Quark).

18.15.3 Eigenschaften der Quarks

Vom physikalischen Standpunkt handelt es sich bei den Quarks um punktförmige Fermionen mit Spin 1/2, die Träger **drittelzahliger elektrischer Elementarladungen** (+2/3 oder −1/3) und der so genannten **Farbladung** sind. Die 'Farbe', zu verstehen als hypothetisches Merkmal (nicht als tatsächliche Färbung!), ist ein weiterer Freiheitsgrad und begründete gerade den Namen der Quantenchromodynamik (QCD) (grch. *chroma*: Farbe). Die Farbladung ist gewissermaßen ein Analogon zur elektrischen Ladung und ein weiteres Unterscheidungsmerkmal für Teilchen.

Man kennt sechs Quarks, die sich in der Eigenschaft *Flavor* (dt. 'Geschmack') unterscheiden (siehe Grafik 18.3). Die Terminologie ist u, d, s, c, b, t, als Abkürzungen für *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*. Diese Bezeichnungen sind natürlich willkürlich und im Prinzip irrelevant. Sie dienen nur der Unterscheidung. Es gibt zu diesen sechs Quarks die jeweiligen **Antiquarks**, also weitere sechs Teilchen.

18.15.4 Massen und Ladungen der Quarks

- u: 5 MeV, +2/3 (in Einheiten der *Elementarladung* e)

- ◇ d: 10 MeV, $-1/3$
- ◇ s: 200 MeV, $-1/3$
- ◇ c: 1.5 GeV, $+2/3$
- ◇ b: 4.7 GeV, $-1/3$
- ◇ t: 180 GeV, $+2/3$

(Quelle: CERN-Homepage, Stand August 2002)

Das **top-Quark** wurde aufgrund seiner hohen Masse erst 1995 am FERMILAB experimentell nachgewiesen. Ebenfalls am FERMILAB wurde bereits 1977 das bottom-Quark entdeckt.

18.15.5 Willkommen im Hadronenzoo

Alle Hadronen bestehen aus Quarks, deren Unterklassen, die Baryonen aus drei und die Mesonen aus zwei Quarks. Neuerdings sind neue Teilchen dazu gekommen, die aus mehreren Quarks bestehen. So kennt man mittlerweile das Tetraquark, das aus vier Quarks besteht und das Pentaquark, das sich sogar aus fünf Quarks zusammensetzt.

18.15.6 freie Quarks

Unter normalen, d. h. irdischen, Bedingungen ist die **chirale Symmetrie** gebrochen und die Quarks sind eingeschlossen (*confinement*) und nur *asymptotisch frei*. Bei hohen Temperaturen ab etwa 170 MeV oder bei hohen Drücken wird jedoch die chirale Symmetrie restauriert: die Quarks (und Gluonen) sind quasi-frei (*deconfinement*), und es entsteht eine neue Materiephase, die **Quark-Gluonen-Plasma (QGP)** heißt. Von diesem Zustand stark wechselwirkender Materie glaubt man, dass er im Innern von Neutronensternen, Magnetaren und Quarksternen realisiert ist. Auch Sekundenbruchteile nach der Entstehung unseres Universums im Urknall war das Milieu in einem geeigneten Zustand in Dichte und Temperatur, um das QGP hervorzubringen. 2004 wurde experimentell das QGP am Teilchenbeschleuniger RHIC nachgewiesen.

18.16 Quarksterne

Bei sehr hohen Massendichten, die vergleichbar sind mit denen im Innern von Neutronensternen, erwarten Physiker, dass sich salopp gesagt 'die Nukleonen überlappen' und ein Übergang in Quarkmaterie stattfindet. Bereits vor vier Jahrzehnten wurde darüber nachgedacht, dass eine solche Materieform im Innern kompakter Sterne vorkommen könnte: in Quarksternen.

18.16.1 ultradichte Materie

Befassen wir uns zunächst mit extrem dicht gepackter Materie: Kern- und Teilchenphysiker sind an **Phasendiagrammen** der Quantenchromodynamik (QCD) interessiert. Wie in der klassischen Thermodynamik von Gasen geben Phasendiagramme darüber Auskunft, unter welchen thermodynamischen Bedingungen, d. h. ab welchen Dichten und Temperaturen, ein Übergang von der einen Phase in die andere stattfindet (**Phasenübergang**). Ein einfaches Beispiel eines Phasenübergangs ist das Gefrieren von Wasser, das dabei von der flüssigen in die feste Phase übergeht.

Um nun auf analoge Weise QCD-Phasendiagramme zu bekommen, müssen die Physiker sie mit geeigneten Methoden berechnen. Ein wesentliches Modell ist das **MIT Bag-Modell**, das entwickelt wurde, um aus den Quarks die Massen der Hadronen abzuleiten (*Chodos et al.*, 1974). Die QCD kann numerisch auf dem Gitter gelöst werden (*Lattice Quantum Chromodynamics*, LQCD). Aus diesen Rechnungen resultieren Vorstellungen über Quarkmaterie und Zustandsgleichungen unter extremen Bedingungen.

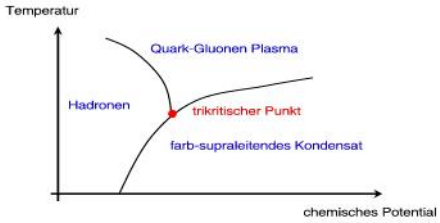

Abbildung 18.4: QCD-Phasendiagramm.

18.16.2 Phasen dichter Materie

Bei hohen Dichten, etwa mehrfacher Kernmateriedichte und tiefen Temperaturen, kondensiert die Materie zu **Quarkpaaren**, was man in Analogie zur BCS-Supraleitung der Festkörperphysik **Farbsupraleitung** nennt. Die Quarks befinden sich in einem *Fermi-See* und solche an der *Fermi-Oberfläche* sind quasi frei.

Die drei Phasen in der QCD sind die **hadronische Phase**, die **Quark-Gluonen-Phase** und die **farbsupraleitende Phase**. Am **trikritischen Punkt** sind diese Phasen koexistent und stehen miteinander im Gleichgewicht, wie das QCD-Phasendiagramm 18.4 zeigt.

Daneben soll es aber noch eine im wörtlichen Sinne 'fremdartige Phase' geben: die **Strange-Materie** (siehe dazu Seltsamkeit). Diese Materie kommt *in natürlicher Form nicht auf der Erde* vor. Die Nukleonen bestehen aus den vertrauten up- und down-Quarks. Der US-amerikanische Physiker *Edward Witten* (* 1951) postulierte, dass nicht etwa die hadronische Phase, also Quarks eingeschlossen in einem Verbund, dem **Grundzustand der QCD** gleichkommen, sondern quasi-freie Quarkmaterie, die zu gleichen Teilen aus u-, d- und s-Quarks bestehe (*strange matter hypothesis*). Das MIT Bag-Modell wurde zum *Effektivmassen-Bag-Modell* erweitert, um diese **Quarkphasen** zu beschreiben (*Schertler et al.*, 1998). Dabei gelang es, eine einfache Zustandsgleichung der Strange-Materie abzuleiten:

$$P = \frac{1}{3}\left(\rho c^2 - 4B\right).$$

Neben der Materiedichte ρ und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c enthält sie die so genannte **Bag-Konstante** B, die anschaulich der Energie entspricht, die nötig ist, um aus dem Vakuum ein Hadron zu erzeugen. Sie wird in der Theorie häufig als freier Parameter angenommen, der zwischen 96 und 208 MeV fm^{-3} variiert.

Nimmt man einen Wert von $B = (145\ \text{MeV})^4$ an, so zeigt sich mithilfe der Zustandsgleichung, dass ab einer besonders hohen Dichte, etwa ab 4×10^{14} g cm^{-3}, die gerade oberhalb der **Kernmateriedichte** liegt, die Strange-Materie frei existieren kann - der Druck P verschwindet dann.

18.16.3 kompakte Sterne

Neben irdischen Experimenten in Teilchenbeschleunigern bieten kompakte Objekte ein wichtiges 'Fenster' in das Verständnis des Aufbaus **ultradichter Materie**. Daten aus Teilchenbeschleunigern und astronomische Beobachtungsdaten können mit den Rechnungen verglichen werden.

Das Innere von Neutronensterne ist ein natürlicher Ort, an dem solch extremen Materiedichten erreicht werden (unter dem Eintrag Neutronenstern befindet sich eine Darstellung der Neutronensternschalen mit entsprechender Dichte).

Allerdings werden verschiedene kompakte Sterne unterschieden, je nachdem aus welchem Materiegemisch sie bestehen:

- ◇ **Neutronensterne** sind im strengen Sinne rein hadronisch, d. h. sie bestehen nur aus der hadronischen Phase, z. B. einer Neutronenflüssigkeit (siehe dazu auch Fermionensterne).

- ◇ **Hybridsterne** bestehen aus einer hadronischen Phase und einer Quarkphase.
- ◇ **Quarksterne** (auch Q-Sterne genannt) bestehen an sich nur aus einer Quarkphase.
- ◇ **Diquark-Sterne** sind hier noch ein Spezielfall, die aus einer farbsupraleitenden Phase bestehen.
- ◇ **seltsame Sterne** (oder Strange Stars) bestehen aus Strange-Materie.

Außerdem unterscheidet man zwei Typen von Strange Stars, solche mit Kruste (engl. *crust strange stars*) und solche ohne Kruste (engl. *bare strange stars*). Im letzten Fall grenzt die Quarkmaterie direkt an die Umgebung des Sterns, was zu seltsamen Effekten führt.

18.16.4 Unterscheidungskriterium Sternmasse

Wie bei den Weißen Zwergen die Chandrasekhar-Grenze, lässt sich auch bei Sternen aus Strange-Materie eine **maximale Masse** ableiten, bevor auch der Quarkstern im dominanten Gravitationskollaps in sich zusammenfällt:

- ◇ Eine **perturbative QCD-Rechnung** (pQCD) liefert 1.32 Sonnenmassen bei einem Radius von nur 7.2 km.
- ◇ Eine **nichtperturbative QCD-Rechnung** führt auf den viel größeren Wert von 3.2 Sonnenmassen.
- ◇ Das **Bag-Modell** liefert einen intermediären Wert von 1.98 Sonnenmassen bei 10.78 km Radius.

Eine astronomische Messung der Sternmasse sollte daher Aufschluss geben über den Typen des kompakten Sterns.

18.16.5 Unterscheidungskriterium Sternradius

Eine Beimischung von Quarkmaterie 'weicht' die Zustandsgleichung auf, so dass Quarksterne (bei gleicher Masse) kompakter sein können als Neutronensterne, die aus einer reinen Hadronenphase bestehen (*Schertler et al.* 2000). Eine genaue Messung des Sternradius sollte deshalb Klarheit darüber verschaffen können, um welchen kompakten Stern es sich handelt.

18.16.6 Masse-Radius-Beziehungen

Zur Unterscheidung von Neutronensternen und Quarksternen kann man die beiden Unterscheidungskriterien Sternmasse und Sternradius auch in der **Masse-Radius-Beziehung** zusammenfassen. Zum Glück sind diese Relationen für beide Klassen sehr unterschiedlich:

- ◇ $M \sim R^{-3}$ für Neutronensterne,
- ◇ $M \sim R^{+3}$ bei den kompakteren Quarksternen aus Strange-Materie.

18.16.7 astronomische Tests

Die Messung der Sternradien ist das erste Hindernis in der Astronomie: die kompakte Sterne sind so klein und so weit weg, dass Astronomen sie nicht mit Teleskopen auflösen können (siehe dazu auch Auflösungsvermögen). Aus der Stellarphysik ist aber bekannt, dass die Leuchtkraft (siehe dort für die entsprechende Gleichung) mit dem Quadrat des Sternradius anwächst. Die scheinbare Helligkeit kann mühelos astronomisch beobachtet werden; die Leuchtkraft folgt dann erst mit bekannter Entfernung mittels des Distanzmoduls und der Effektivtemperatur, die ihrerseits aus dem beobachteten Spektraltyp folgt.

Auf diese Weise wurden einige Kandidaten für kompakte Sterne beobachtet, die noch kleiner, noch kompakter zu sein schienen, als typische Neutronensterne. Die Hypothese war daher, dass es sich dabei um Quarksterne oder seltsame Sterne handeln müsse. Diese Gebilde können noch kleinere Radien erreichen, weil sie besonders hohe Dichten haben.

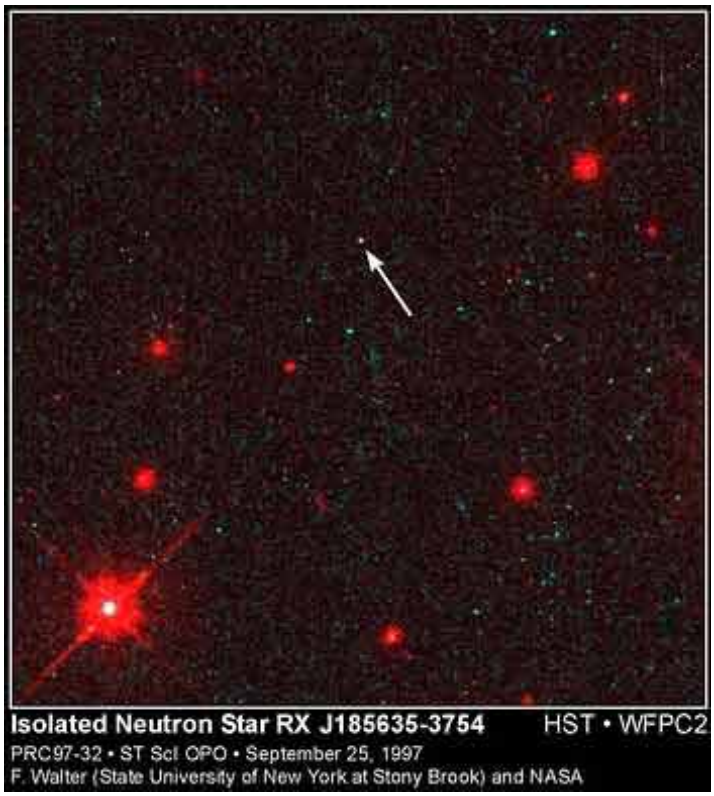

Abbildung 18.5: Quarkstern: HST-Bild des Quarkstern-Kandidaten RX J185635-3754.

18.16.8 Der Fall RX J185635-3754

Der Röntgenstern **RX J185635-3754** wurde 1992 mit dem erfolgreichen, deutschen Röntgensatelliten ROSAT am Südhimmel im Sternbild *Corona Australis* (dt. *Südliche Krone*) entdeckt. Im Jahr 1997 enstand die optische Aufnahme 18.5 von RX J185635-3754 (siehe Pfeilmarkierung) mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: *Fred Walter*, State University of New York at Stony Brook und NASA, 1997).

Im Jahr 2002 wurde RX J185635-3754 mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra beobachtet. Mit einer Entfernung von nur 200 Lichtjahren und einer Effektivtemperatur von etwa 700000 Grad (hundertfach heißer als die Sonne!) folgte ein Radius von nur etwa 4 bis 8 Kilometern (*Drake et al.* 2002, astro-ph/0204159). Dieser sehr kleine Radius sorgte seinerzeit für Wirbel, legte er doch einen sehr guten Quarksternkandidaten nahe.

Die optischen Nachbeobachtungen ließen jedoch bald Zweifel an der Quarksterninterpretation aufkommen: zum einen musste die Entfernung zu 450 Lichtjahren nach oben korrigiert werden; zum anderen wurde vermutlich ein so genannter *Hot Spot* mit hoher Röntgenhelligkeit auf der Neutronensternoberfläche mit Chandra beobachtet. Aktuell wird daher von den Neutronensternforschern favorisiert, dass RX J185635-3754 ein ganz normaler, isolierter Neutronenstern mit deutlich größeren 34 km Durchmesser sei.

Das legen auch neue Beobachtungen nahe, die italienische Astronomen mit den europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton durchgeführt haben (*Tiengo & Mereghetti*, ApJ 657, L101, 2007): sie entdeckten erstmals, dass RX J185635-3754 variiert wie ein **Pulsar** mit einer Periode von sieben Sekunden! Das schmälert die Quarksternhypothese, weil ein solches Pulsieren charakteristisch für Neutronensterne ist.

18.16.9 Fazit

Zurzeit gibt es keinerlei gute Kandidaten für Quarksterne oder seltsame Sterne in der Astronomie. Doch die astronomische Forschung wird durch immer bessere Satellitenprojekte (wie z. B. die geplanten, europäischen Missionen eROSITA und XEUS) auf experimenteller Seite vorangebracht, ebenso wie die theoretische Erforschung, die zu einem immer besseren Verständnis von ultradichter Materie führt.

18.16.10 Literatur

◇ **Gibt es Quarksterne?** von *Markus Thoma* (MPE), in *Astronomie heute*, September 2006

18.17 Quasare

Quasare sind die wohl bekanntesten Vertreter unter den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), vermutlich auch dadurch bedingt, dass sie immer wieder in den Medien auftauchen. Sie haben eine extreme Leuchtkraft: die leuchtkräftigsten Quasare erreichen 10^{47} erg/s - das entspricht hundert Billionen Sonnenleuchtkräften und übertrifft normale Galaxien bei weitem! Im Prinzip zeigen Quasare diese Aktivität bei allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Quasare sind einem breitem Publikum bekannt für ihre unglaublich hohen Entfernungen im Bereich von Millionen bis Milliarden Lichtjahren. Das bedeutet gleichermaßen, dass sie sich sehr früh im Universum gebildet haben müssen. Die Modelle für Galaxienentstehung sind daher für Kosmologen eine Herausforderung.

18.17.1 Quasar vs. QSO

Klären wir zunächst die Namen: Quasar ist ein Kunstwort aus *quasi-stellare Radioquelle*, d. h. Quasare sind **radio-laut** (hohe Radioleuchtkraft). Die Abkürzung QSO steht für *quasi-stellares Objekt*, die **radio-leise** sind (geringe Radioleuchtkraft). Die Begriffe Quasar und QSO werden oft gleichbedeutend in der Literatur verwendet, bezeichnen aber eigentlich verschiedene, kosmische Objekte! Oft wird Quasar als Oberbegriff für beide verwendet.

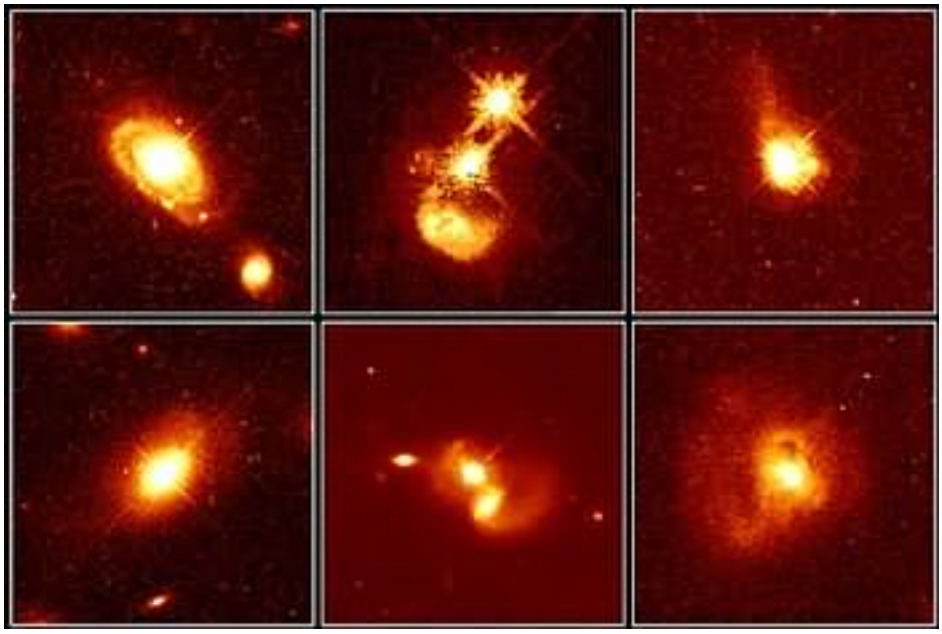

Abbildung 18.6: Quasar-Sample mit Wirtsgalaxien, beobachtet mit dem HST.

18.17.2 Entdeckungsgeschichte

Quasare wurden 1960 radioastronomisch entdeckt (3C 48, $16.^{\mathrm{mag}}$). Optisch erschienen sie zunächst sternartig: Sie sahen aus wie ein Lichtpunkt, der nicht mit Teleskopen aufgelöst werden konnte. Das Weltraumteleskop Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) photographierte 1996 schließlich erstmals die **Wirtsgalaxien der Quasare** (Abbildung 18.6, Credit: *Bahcall et al.*, STScI/NASA, 1996). Somit war klar, dass Quasare die hellen Kerne von Galaxien sind: Quasare sind eingebettet in Wirtsgalaxien (engl. *host galaxies*). Im Falle der Quasare können die Wirtsgalaxien jeden Hubble-Typ haben. Eine besondere Häufung stellt man allerdings bei den elliptischen Galaxien, also sehr entwickelten Sternsystemen, fest.

18.17.3 Der Quasar-Motor

Vom Standpunkt der theoretischen Astrophysik sind die Quasare hochinteressante Studienobjekte. Das größte Rätsel: Woher kommt diese unglaubliche Leuchtkraft? Schnell war klar, dass die Beobachtung nicht mit thermonuklearer Fusion, wie sie im Innern von Sternen abläuft, zu erklären ist.

Die Theoretiker stellten bereits Mitte bis Ende der 1960er Jahre, also bald nach der Entdeckung der Quasare, ein physikalisches Modell vor. Zu den Pionieren dieser Idee zählen die russischen Astrophysiker *Yakov B. Zel'dovich* & *Igor D. Novikov* (1964), der österreichische Kernphysiker *Edwin E. Salpeter* (1964) und der britische Astrophysiker *Donald Lynden-Bell* (1969). Sie erklärten die enorme Helligkeit durch die **Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch**. Genau das ist das heute fest verwurzelte **Paradigma für alle AGN**. Akkretion ist der effizienteste Mechanismus, um aus durch Gravitation gebundene Materie Strahlungsenergie herzustellen. Wie das im Detail funktioniert, wird im Eintrag Eddington-Leuchtkraft vorgerechnet. Quasare sind dabei nahe am Eddington-Limit.

Das Schicksal der Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt, wird mit modernen Hochleistungsrechnern simuliert. Bei diesen Supercomputer-Simulationen kommen Methoden der Magnetohydrodynamik und der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Einsatz. In der Nähe des Lochs wird es sehr heiß, so dass die einfallende Materie zu einem Plasma wird, das aus Elektronen und Ionen besteht. Dieses Plasma bewegt sich unter dem Einfluss von elektrischen Feldern und Magnetfeldern auf dem Hintergrund der

gekrümmten Raumzeit in ein Schwarzes Loch. In der Astrophysik ist mittlerweile klar, dass dabei die Rotation des Loches eine wesentliche Rolle spielt (siehe Kerr-Lösung). Die Akkretion ist assoziiert mit wichtigen magnetischen Effekten im Akkretionsfluss, z. B. mit der magnetischen Rotationsinstabilität und mit dem magnetischen Herauskatapultieren von Materie, die dann zu relativistischen AGN-Jets gebündelt wird. Das Szenario ist detailliert unter dem Eintrag zu supermassereichen Schwarzen Löchern beschrieben.

Die Spektren dieser einfallenden Materie folgen in der Theorie mit einem zweiten Schritt: die nun bekannte Dynamik des Plasmas wird genutzt, um Strahlungsprozesse (Comptonisierung, Synchrotronstrahlung, Bremsstrahlung; allgemein Strahlungstransport) auszurechnen. Besser, aber numerisch deutlich aufwendiger, ist die direkte Kopplung von kovariantem Strahlungstransport an hydrodynamische oder magnetohydrodynamische Gleichungen. Aktuell arbeiten die theoretischen Astrophysiker weltweit daran, dieses Problem konsistent zu lösen. Die ersten Arbeiten auf dem Gebiet der allgemein relativistischen Magnetohydrodynamik (**GRMHD**) sind von *Koide et al.* 1999, *De Villiers & Hawley* 2002, *Gammie et al.* 2003, *Semenov et al.* 2004.

18.17.4 Quasare und Radiogalaxien sind verwandt

Astronomen zählen bei der Gruppe der radioleisen QSOs deutlich mehr Vertreter als bei den radiolauten Quasaren. Die Aktivität im Radiobereich lässt sich auch auf die intrinsische Helligkeit in allen Spektralbereichen, die so genannte **bolometrische Leuchtkraft**, übertragen. Die radioleisen QSOs scheinen mit den schwächeren AGN-Typen, wie den Seyfertgalaxien, verwandt zu sein. Hingegen sind die radiolauten Quasare, wie der **Prototyp 3C 273**, verwandt mit den radioleuchtkräftigen Radiogalaxien, wie Cyg A.

Sogar die **Morphologie** von Quasaren und Radiogalaxien ist auffallend ähnlich und nutzt dieselbe Nomenklatur für beobachtbare Radiostrukturen: *Core*, *Hot Spot*, *Lobe* und *Jet* (Begriffe erläutert unter FR-Klassifikation). Die verblüffende Ähnlichkeit unterscheidet sich nur durch die Längenskala. Auf der Homepage des *Very Large Arrays* (VLA), einer Anordnung von 27 Radioteleskopen in New Mexico (USA), die interferometrisch hochaufgelöste Radiobilder erzeugen können, kann man farbenprächtige Bilder betrachten, die klar die verwandte Morphologie belegen

18.17.5 AGN Typ-1 und Typ-2

Betrachtet man die Spektren der Seyfertgalaxien und der Quasare, so kann man sie im Wesentlichen in zwei Klassen einteilen. Bald wurde vorgeschlagen, dass diese **Zweiteilung** (*Dichotomie*) das Resultat eines Orientierungseffektes ist (*Antonucci & Miller*, ApJ 1985; *Antonucci*, ARA& A 1993): in einem Abstand von einigen pc vom Zentrum des AGN befinde sich ein ausgedehnter, molekularer Staubtorus. Dieser 'kalte Materieschlauch' ist schwer zu durchdringen für optische Strahlung und weiche Röntgenstrahlung. Ist der AGN nun zufällig so orientiert, dass der irdische Beobachter von oben in die Kernregion blicken kann, so versperrt der Staubtorus nicht die Sicht. Der Neigungswinkel (*Inklination*) zwischen Symmetrieachse des Torus und der Blickrichtung ist klein. In diesem Fall sprechen die Astronomen von einem **AGN Typ-1**.

Bei hoher Inklination jedoch, also Winkeln zwischen etwa 60 und 90°, blickt der Beobachter mehr oder weniger auf die Kante des Staubtorus: der Blick in das Zentrum des AGN ist versperrt. Somit sagen die Astronomen zu dieser aktiven Galaxie **AGN Typ-2**.

Genau dieser Effekt ist auch in den Spektren zu sehen, so dass Astronomen mit optischer Strahlung und weicher Röntgenstrahlung die AGN klassifizieren können. Bei Röntgenspektren von AGN Typ-2 fehlt der Anteil an niederenergetischer Röntgenstrahlung, weil er durch Streuung im Staubtorus verloren ging. Astronomen stellen insgesamt fest, dass Typ-1-Quasare (kleine Inklination) etwa 90% aller Quasare ausmachen; die restlichen 10% sind Typ-2-Quasare (hohe Inklination). Die Typ-1-Typ-2-Nomenklatur hat sich vor allem bei Seyfertgalaxien und Quasaren durchgesetzt.

Die Astronomen haben festgestellt, dass die Klassifizierung unterschiedlich ausfallen kann, je nachdem ob der AGN optisch oder per Röntgenstrahlung klassifiziert wurde. Das ist natürlich nicht erwünscht. Ursache dafür sind Störeffekte, beispielsweise durch die Wirtsgalaxie. Eine gute Wahl ist

eine Kombination: nahe AGN werden mit Röntgenstrahlung klassifiziert und weit entfernte AGN optisch (*Szokoly et al.* 2004).

Die aktuelle Forschung zeigt, dass ein rein geometrischer Effekt **nicht** ausreicht, um die beiden AGN-Typen zu erklären: Mit dem japanischen Röntgensatelliten ASCA wurden etwa 230 helle AGN beobachtet (*Ueda et al.* 2003). Besonderes Interesse galt für AGN, die harte Röntgenstrahlung emittieren. Nun stellte sich der Trend heraus, dass der Anteil der AGN Typ-2 abnimmt, wenn die Leuchtkraft des AGN zunimmt! Dieser Leuchtkrafteffekt ist nicht geometrisch erklärbar. Eine mögliche Erklärung bestünde darin, dass ein sehr leuchtkräftiger Quasar seine Umgebung mit dem heftigen Strahlungsdruck 'leer fegt'. Auf diese Weise würde auch der blockierende Staubtorus verschwinden und damit der Typ-2.

18.17.6 spektrale Eigenschaften

Die visuellen Helligkeiten der Quasare sind enorm und gehen bis -23. Magnitude bei den hellsten Vertretern. Weitere spektrale Eigenschaften sind starkes blaues Kontinuum, Infrarot- und UV-Exzesse, hohe zeitliche Variabilitäten der Quellen, *keine* Absorptionslinien, aber sehr breite Emissionslinien. Inzwischen entdeckten Röntgenastronomen sogar die heiße Emissionslinie von Eisen in den Spektren bei 6.4 bis 6.7 keV Ruheenergie. Die Linie gibt Aufschluss über den inneren Akkretionsfluss in unmittelbarer Nähe zum zentralen, superschweren Schwarzen Loch. Sie wird in der Diagnostik der AGN genutzt, um die Neigung der Standardscheibe, die Plasmakinematik, die Lochrotation etc. abzuleiten.

18.17.7 Quasare sind extrem weit entfernt

Die Anordnung der Emissionslinien im Spektrum der Quasare war bei ihrer Entdeckung zunächst sehr rätselhaft. Der Astronom *Maarten Schmidt* erkannte 1963, dass es sich um an sich bekannte Emissionslinien handelt, die allerdings im Spektrum **hochrotverschoben** wurden. Der Grund für diese seltsame spektrale Eigenschaft liegt in der Expansion des Universums selbst. Die Quasare sind so weit von der Erde entfernt, dass sich die kosmologische Rotverschiebung bemerkbar macht. Die Photonen, die der Quasar aussendet, bewegen sich durch eine expandierende Raumzeit, der Robertson-Walker-Metrik. Deshalb bewegen sich alle kosmologisch entfernten Quellen von der Erde weg: sie 'schwimmen' mit der expandierenden Raumzeit. Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt dann, dass die Spektren stark rotverschoben sind. Die elektronischen Übergänge der strahlenden Atome im Quasar liegen aufgrund der hohen Distanz dieser Objekte in ganz anderen Spektralbereichen, wenn sie beim irdischen Beobachter ankommen: so kann die *Lyman-Alpha-Kante* (Lyα), die üblicherweise (d. h. im Ruhesystem) im Ultravioletten liegt, bei einem Quasar mit $z = 5.0$ bis in den optischen Bereich verschoben werden! Damit war klar, dass Quasare **extragalaktische Objekte** sind. 1963 wurde ein weiterer Quasar, 3C 273, von *Hazard*, *Mackey* und *Shimmins* entdeckt, die ihn mithilfe der *Mondbedeckungsmethode* auf bis zu einer Bogensekunde genau am Himmel lokalisierten - damals eine Sensation. 3C 273 im Sternbild *Jungfrau* (*Virgo*) gehört zu den hellsten und nächsten Quasaren und ist etwa 2.1 Milliarden Lichtjahre (640 Mpc) entfernt. In seiner Nachbarschaft zeigt er einen etwa zwei Bogensekunden langen, relativistischen Jet.

18.17.8 Entfernungsrekorde

Der aktuell **am weitesten entfernte AGN** ist ein Quasar mit der Bezeichnung SDSS J1148+5251 und liegt bei einer Rotverschiebung von $z = 6.41$ (*Fan et al.* 2003, *Willott et al.* 2003). Diese Entfernung wird nur noch von einer nicht aktiven, sehr jungen Galaxie bei $z = 10$ geschlagen, dem aktuellen Rekordhalter mit der größten Entfernung zur Erde (*Pello et al.* 2004). Die Lyα-Linie des Wasserstoffs, die sonst im UV liegt, fand man bei einer ebenfalls sehr weit entfernten Galaxie, SDSS 1030+0524, im nahen Infrarot (NIR) bei 885 nm. SDSS J1148 weist eine noch stärker rotverschobene Linie auf. *Fan et al.* von der Universität *Princeton* konnten 2001 im *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) mit einem digitalen, automatischen Teleskop in New Mexico drei unglaublich weit entfernte Objekte beobachten, bei denen es sich allesamt um Quasare handelt. Sie haben die Katalogbezeichnungen SDSS 1030+0524,

SDSS 1306+0356 und SDSS 0836+0054 und in dieser Reihenfolge die Rotverschiebungen $z = 6.28$; 5.99 und 5.82. Diese Objekte sind soweit entfernt, dass wir in eine Zeit zurückschauen, wo das Universum erst 700 Millionen Jahre alt (6% des heutigen Alters) war und noch dichter war und sogar noch **neutrales Wasserstoffgas** in der Umgebung der Quasare vorlag!

18.17.9 Als die Welt noch neutral war

Die **Epoche der Reionisation** war also zu diesem Zeitpunkt ($z \sim 6$) noch nicht abgeschlossen: die intensive Strahlung der Quasare ionisierte nach und nach das umgebende, intergalaktische Medium, bis schließlich durch eine signifikante Anzahl ionisierender Objekte das ganze Universum reionisiert war. Die **erste Ionisation** war kurz nach dem Urknall, als das Universum noch sehr klein, dicht und heiß war. Bei $z \sim 1100$, entsprechend nur etwa 400000 Jahre nach dem Urknall, war die **Epoche der Rekombination**, wo das Universum genug abgekühlt war, dass sich Elektronen und Protonen zu den ersten (neutralen) Atomen zusammenschließen (*rekombinieren*) konnten. Bei diesem Prozess entstanden **primordiale Elemente**, wie Wasserstoff, Helium und Lithium (siehe primordiale Nukleosynthese).

Im Spektrum der Quasare erkennt der Astronom das neutrale, intergalaktische Umgebung unzweifelhaft daran, dass hier die so genannten **Gunn-Peterson-Tröge** (engl. *Gunn-Peterson troughs*) auftreten. Im Spektrum haben diese Features eine Trog-Form: unterhalb der Lyα-Kante wird die Kontinuumsstrahlung stark unterdrückt. Der physikalische Grund besteht darin, dass die optische Tiefe des umgebenden neutralen Mediums besonders groß ist und deshalb dieser Bereich im Spektrum verschwindet.

18.17.10 Quasare im Doppelpack

1979 wurde das **Quasar-Paar QSO 0957+561** entdeckt. Beide Quasare zeigen erstaunlicherweise sehr ähnliche Spektren. Dies konnte man darauf zurückführen, dass es sich in Wirklichkeit um Abbilder ein und desselben Objekts handelt! Durch den Gravitationslinseneffekt gelangt das Licht des Quasars auf zwei verschiedenen Lichtwegen zum Beobachter. Eine Gravitationslinse ist ein massereiches Objekt, z. B. ein Galaxienhaufen, der zwischen Quasar und der Erde lokalisiert ist und nach der Allgemeinen Relativitätstheorie Licht abzulenken vermag: Licht folgt gekrümmten Nullgeodäten. Die leichten spektralen Unterschiede erklären sich dadurch, dass auf den beiden Lichtwegen unterschiedliche Bedingungen herrschen können, wie beispielsweise unterschiedliche Dichte des intergalaktischen Mediums (IGM) und somit unterschiedliche Extinktion.

18.17.11 .. oder lieber vier!

Die Abbildung 18.7 zeigt im linken Feld eine Infrarotbeobachtung mit dem Weltraumteleskop *Hubble*, ein besonders schönes Exemplar eines *gelinsten Quasars*: Ein **Vierfachbild eines Quasars**! Die Gravitationslinse ist eine schwere, elliptische Galaxie. Der Quasar hat die Katalogbezeichnung PG 1115+080. Im rechten Feld wurden die vier Quasarbilder und die linsende Galaxie abgezogen. Die **ringförmige Helligkeitsverteilung** ist das gravitativ beeinflusste Licht der Wirtsgalaxie des Quasars. Die Strahlung wird durch die Krümmung der Raumzeit verbogen (Fachausdruck: *Lichtaberration*) und bildet den berühmten Einstein-Ring, hier im Infraroten bei einer Wellenlänge von 1.6 Mikrometern (Credit: *Impey et al.*, STScI/NASA 1998).

18.17.12 echte Doppelquasare

Es gibt allerdings auch tatsächlich ein intrinsisches **Paar von Quasaren**, QQ 1145-071, der 1987 entdeckt wurde. Ebenso besteht das Objekt LBQS 0103-2753 in einer Entfernung von $z = 0.848$ aus einem **Binär-Quasar**, die sich in einem Abstand von nur 0.3 Bogensekunden bzw. 2.3 kpc umkreisen (*Shields et al.* 2001, astro-ph/0104236). Dies ist eines der wenigen Beispiele, wo sich

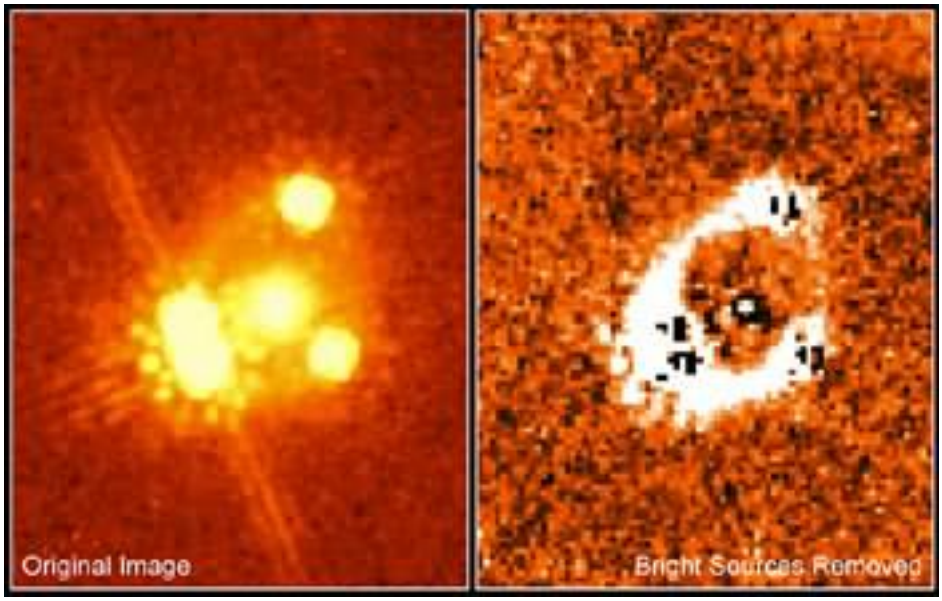

Abbildung 18.7: Quasar QSO-PG1115+080 als Vierfachbild, beobachtet mit dem HST.

zwei supermassereiche Schwarze Löcher unmittelbar umkreisen und vielleicht in einem katastrophalen Ereignis verschmelzen können.

18.17.13 weitere bekannte Quasare und QSOs

3C 273, 3C 48, QSO 1229+204, QSO 0046-293, QSO 0910+564, QSO 0101-304, QSO 0000-263, QSO 2203+292, QSO 0051-279, QSO 0957+561 und QQ 1145-071.

18.18 quasi-periodisch

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

18.18.1 Definition von quasi-periodisch

Das Attribut *quasi-periodisch* kann nicht so klar definiert werden; wörtlich würde man damit eine Helligkeitsvariation betiteln, die **zeitlich in etwa regelmäßig wiederkehrt**. Es ist zwar kein strenger Zyklus über lange Zeiten beobachtbar, aber es gibt dennoch Perioden über ein kurzes Zeitintervall.

18.18.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. Typische Perioden liegen im Bereich von Minuten bis Stunden.

18.18.3 Beispiele

Die Bezeichnungsweise ist in der Astronomie an sich nur bei den Quasi-periodischen Oszillationen gebräuchlich, die in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, oft jedoch bei Röntgendoppelsternen beobachtet werden.

18.18.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, persistent und transient.

18.19 Quasi-periodische Oszillationen

Die Quasi-periodischen Oszillationen (engl. *quasi-periodic oscillations*, **QPOs**) sind zeitlich wiederkehrende Phänomene, die Astronomen in Lichtkurven, z. B. bei Röntgendoppelsternen, beobachten.

18.19.1 Die Fourier-Analyse

Es bietet sich an, diese Lichtkurven (Intensität über Zeit) mit einem mathematischen Verfahren zu studieren, der so genannten **Fourier-Transformation**. Nach einer Fourier-Transformation sind die Lichtkurven nicht mehr in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, sondern von der Frequenz. Mathematiker sagen das so: Die Fourier-Transformierte befindet sich im Frequenzraum. Die resultierenden Spektren nennen die Astronomen **Power Density Spektren** (PDS) oder kurz *Power Spektren*.

18.19.2 Was bringt die Prozedur?

Charakteristische Variabilitäten in der Lichtkurve (Periodizitäten, Quasi-Periodizitäten), die immer wieder etwa dieselbe Frequenz haben, können in den PDS als Spitzen ('Peaks') mit bestimmter Frequenz entlarvt werden. Das ist eine sehr bequeme und exakte Identifikation, die sich im Zeitraum (vor der Fourier-Transformation) deutlich schwieriger und ungenauer gestalten würde.

18.19.3 charakteristische Frequenzen der Akkretionstheorie

Die QPOs spiegeln sich in den Spektren als Variabilitäten wider, deren Verhalten nicht ganz, aber etwa periodisch ist. Sie können mit der Theorie der Akkretion beschrieben werden, weil man Effekte im **Akkretionsfluss** (eventuell einer Standardscheibe) um ein kompaktes Objekt mit den QPOs assoziiert. Die Interpretation ist schwierig. Es gibt *drei charakteristische Frequenzen*, die mit QPOs verknüpft werden können:

- ◇ die **Keplerfrequenz**, also diejenige Frequenz, die der Umlaufzeit um das kompakte Objekt zugeordnet ist (siehe Kepler-Gesetze);
- ◇ die **radiale Epizykelfrequenz**, eine charakteristische Frequenz, die resultiert, wenn man einen Kreisorbit geringfügig in radialer Richtung stört (siehe auch Epizykel);
- ◇ und die **vertikale Frequenz**. Sie resultiert aus vertikalen Störungen der Bahn.

Weiterhin wird seit wenigen Jahren die **Lense-Thirring-Frequenz** (als vierte, mögliche Frequenz) diskutiert. Die Astronomen vermuten, dass sie eine gewichtige Rolle in den QPOs von Mikroquasaren spielt. Der Drehimpuls eines rotierenden, stellaren Schwarzen Lochs erzeugt ein so genanntes *gravitomagnetisches Feld*. Dies ist ein Effekt von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, der mit dem Oberbegriff **Gravitomagnetismus** bezeichnet wird. Das gravitomagnetische Feld wirkt sich auf umlaufende Testteilchen oder auch den Akkretionsfluss aus und führt zur **Lense-Thirring-Präzession**.

18.19.4 Was zappelt denn da?

QPOs sind sicherlich mit einer variablen Akkretionslösung assoziiert. Die Astrophysiker favorisieren Instabilitäten im Akkretionsstrom (siehe z. B. magnetische Rotationsinstabilität), die zur Anregung von **lokalen Störungen im Akkretionsstrom** - so genannte *Blobs* - führen. Diese Störungen können eine Zeit lang mit einer der charakteristischen Frequenzen schwingen und wieder verschwinden.

Alternativ ist es denkbar, dass die Übergangsregion zwischen kalter, optisch dicker, aber geometrisch dünner Standardscheibe (SSD) zu einem heißen, optisch dicken und geometrisch ausgedehntem Objekt wie beispielsweise dem ADAF ein räumlich (präzise gesagt radial) oszillierendes Gebilde formt. Die Zeitskala ist typischerweise so groß, wie die Umlaufzeiten der Materie um das Zentrum am betreffenden Radius (*Kepler-Zeitskala*). Diese Akkretionslösungen sind **bimodal** und oszillieren zwischen ADAF und SSD (*José Gracia* 2003).

Typische Frequenzen liegen im kHz-Bereich bei den Mikroquasaren oder anderen stellaren Quellen. Bei den deutlich größeren Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sind sie nicht zu beobachten, weil die Frequenzen zu klein werden. Salopp und stark vereinfacht gesagt: der innere Akkretionsstrom um stellare Löcher piepst, aber derjenige um superschwere Löcher brummt.

18.20 Quelle

Quelle (engl. *source*) ist ein typischer Fachbegriff der **Astronomie** und meint ein beliebiges, kosmisches Objekt, dass elektromagnetische Strahlung, Teilchen und/oder Gravitationswellen abgibt. Der Astronom kann diese Quelle mit einem geeigneten, empfindlichen Detektor oder Teleskop beobachten. Entsprechend gibt es Bezeichnungen wie Radioquelle, Röntgenquelle, Gammaquelle, Neutrinoquelle, Protonenquelle etc.

Der Begriff *Quelle* ist auch in der **Feldtheorie** gebräuchlich und meint hier den Erzeuger des Feldes. So sind Massen die Quellen der Gravitation, und elektrische Ladungen sind die Quellen des elektromagnetischen Feldes.

In beiden Bedeutungen wird der Begriff Quelle in diesem Lexikon verwendet.

18.21 Quintessenz

Die Etymologie dieses Begriffs meint eigentlich das 'fünfte Seiende' (lat. *quinta essentia*). Das bezieht sich auf ein fünftes Element neben den vier bekannten Erde, Wasser, Feuer und Luft, die die frühe griechische Naturwissenschaft kannte. Das neue, fünfte Element **Äther** wurde von *Aristoteles* eingeführt. Die Alchemie kannte diese Substanz als **Spiritus**, den Stoff des Lebens. Der Äther erlangte zur Jahrhundertwende ins 20. Jahrhundert noch einmal Berühmtheit, weil seine Existenz als Trägermedium der elektromagnetischen Wellen - analog zu Luft als Medium bei akustischen Wellen - gefordert wurde. Im **Michelson-Morley-Experiment** suchten die Physiker vergeblich nach diesem Weltäther - *Albert Einstein* klärte dieses Problem ganz einfach dadurch, dass es gar keine Notwendigkeit für einen Weltäther gebe. Das Resultat des Michelson-Morley-Experiments ist in völliger Übereinstimmung mit Einsteins Relativitätstheorie, einer bis heute mehrfach bestätigten und bewährten, physikalischen Theorie.

18.21.1 Quintessenz in der Kosmologie

In der Kosmologie erlebte der Begriff Quintessenz eine Renaissance: Der Kosmologe *Paul Steinhardt* und Kollegen belebten dieses Wort neu, weil sie eine zeitlich veränderliche Dunkle Energie augenzwinkernd als fünftes Element neben den vier anderen wesentlichen Ingredienzen der Kosmologie, nämlich Materie ('Erde'), Strahlung ('Feuer'), Neutrinos ('Luft') und kalte Dunkle Materie ('Wasser') einordnen wollten. Unter Quintessenz versteht man eine Alternative zum Konzept einer kosmologischen Konstante: die kosmologische Konstante wird als *fester, konstanter Wert* einer Vakuumenergiedichte interpretiert, die das Universum homogen ausfüllt (siehe dazu auch Quantenvakuum). Die Quintessenz

hingegen ist eine **zeitlich veränderliche** Dunkle Energie, die *inhomogen* den Raum ausfüllt. Mit der Ausdehnung des Universums nimmt die Energiedichte in Quintessenz-Modellen ab. Die Zustandsgleichung der Dunklen Energie zeigt einen **hohen negativen Druck**, was ihre Interpretation als Antigravitation nahe legt. Diese Antigravitation treibt das Universum auseinander und resultiert in der **beobachtbaren, kosmischen Expansion** (Supernova- und WMAP-Daten).

18.21.2 Motivation zur Quintessenz

Motiviert war dieser neue, zeitabhängige Ansatz der Dunklen Energie im Quintessenz-Modell im Wesentlichen durch zwei Probleme:

- ◇ Das **Problem der kosmologischen Konstante** besteht in der Kleinheit ihres Wertes. Die korrespondierende Energiedichte liegt im Bereich von Millielektronenvolt (meV) und ist damit von der Masse her vergleichbar mit dem hypothetischen Axion. In der Physik ist es schwierig zu erklären, weshalb diese Dunkle Energie fast null, aber eben nicht exakt null ist.
- ◇ Das **Koinzidenzproblem** besteht darin, dass die Größenordnungen von der Energiedichte der Dunklen Energie gerade mit derjenigen der übrigen Dunklen Materie und baryonischen Materie in der aktuellen Epoche (zufällig?) übereinstimmt.

18.21.3 Die Lösung der Probleme: Quintessenzen

Beide Probleme können durch eine zeitliche Entwicklung der Energiedichte der Dunklen Energie gelöst werden! Die neuen Schwierigkeiten, die man sich damit einhandelt, stecken in der genauen Wahl des Ansatzes für die Quintessenz. Mathematisch stellt sich die Quintessenz als Energiedichte eines sich *zeitlich langsam entwickelnden Skalarfeldes* dar. Dieses Skalarfeld ist Bestandteil einer Lagrangefunktion, die die komplette Dynamik des Universums für alle Zeiten festlegt.

Ein möglicher Ansatz für ein solches Skalarfeld heißt **Cosmon**, das als extrem leichtes Teilchen interpretiert wird (*C. Wetterich* 1987). Seine Masse läge bei nur 10^{-33} eV! Dieser winzige Wert erklärt, weshalb das Cosmon noch nicht in hochpräzisen irdischen Experimenten wie den Teilchenbeschleunigern aufgetreten ist: es versinkt sozusagen im Rauschen unterhalb der Empfindlichkeit. Auf kosmischen Skalen macht sich diese fein verteilte Energie jedoch bemerkbar. Das Cosmon als Skalarfeld koppelt im einfachsten Falle *nur* an die Gravitation und *nicht* an Baryonen und Leptonen. Mit diesem Ansatz formulieren die Kosmologen einen Satz gekoppelter Feldgleichungen für Hubble-Parameter, Skalarfeld und Energiedichte. Dann vergleichen sie die sich ergebende Dynamik des Modell-Universums mit der tatsächlich beobachteten Dynamik des Universums, um zu entscheiden, wie gut der Skalarfeldansatz ist.

Gegenstand der Erforschung von Quintessenz-Modellen ist, ob der Ansatz eines *exponentiellen Potentials* für das Skalarfeld richtig ist, ob auch die Kopplung des Feldes an Dunkle Materie berücksichtigt werden muss oder ob so genannte *kinetische Terme* in der Lagrangefunktion enthalten sind.

In einem Modell, das man **Spintessenz** nennt, nimmt man sogar an, dass das Skalarfeld komplexwertig ist und rotiert (engl. *spinning field*). Die Rotation nimmt dabei mit der Expansion des Universums ab (*L.A. Boyle, R.R. Caldwell & M. Kamionkowski*, 2001, astro-ph/0105318).

Außerdem existieren Modelle mit so genannter **erweiterter Quintessenz** (engl. *extended quintessence*). Hier koppelt das Skalarfeld auch an den *Ricci-Skalar* (Krümmungsskalar, siehe auch Krümmungs- oder Riemann-Tensor). Kosmologen nennen das auch **NMC-Quintessenz** (für ***N**on-**M**inimal **C**oupling*), weil die Kopplung des Skalarfelds an die skalare Krümmung nicht klein ist. Eine Folge dieses Ansatzes ist, dass nicht nur die Dunkle Energie zeitlich und räumlich variiert, sondern auch eine der fundamentalen Naturkonstanten, nämlich die **Gravitationskonstante** G (*Perrotta et al.*)!

Von so genannten **Tracking-Lösungen** (engl. *tracking solutions*) spricht man bei Quintessenz-Modellen, die sehr unempfindlich gegenüber Anfangsbedingungen sind, um den Wert der aktuellen, 'gemessenen' Dunklen Energie zu erreichen.

18.21.4 Entscheidung durch die Astronomie

Die Kosmologen hoffen, dass die Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Verteilung der so genannten akustischen Peaks in *Power-Spektren*) und von weit entfernten Supernovae vom Typ Ia (gute Standardkerzen, die eine Veränderung der absoluten Helligkeit aufgrund einer variablen Dunklen Energie verraten würden) Beschränkungen auf Modelle mit kosmologischer Konstante oder eines bestimmten Quintessenz-Modells bringen.

Die **aktuellen Messungen** an weit entfernten Supernovae und die Daten des Mikrowellen-Satelliten WMAP sprechen eher für die kosmologische Konstante Λ als für die Quintessenz, allerdings kann letztere nicht ausgeschlossen werden. Die Permanenzmessungen an weit entfernten Supernovae Typ Ia ergaben bisher nämlich keine zeitliche Variabilität der kosmologischen Konstante (*Wang & Tegmark* 2004, astro-ph/0403292, *Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512, *Riess et al.* STScI/NASA 2006).

Die Phantom-Energie (*Caldwell et al.*, 2003) ist eines der drastischsten Modelle mit zeitlich veränderlicher Dunkler Energie: es unterscheidet sich wesentlich von den Lambda- und Quintessenz-Kosmologien darin, dass die Expansionsrate des Universums nicht konstant bleibt oder stetig abnimmt, sondern zunimmt! Das hat fatale Folgen: den Big Rip des Universums. Die Beschränkung aus aktuellen Daten ist, dass sich der Big Rip frühestens in 50 Mrd. Jahren ereignen könnte, aber die Phantom-Energie wird aufgrund der aktuellen Beobachtungsdaten nicht favorisiert.

In der **experimentellen Kosmologie** wird weiterhin auf der Grundlage immer besserer Daten geprüft werden, inwiefern kosmologische Konstante, Quintessenz-Modelle, Phantom-Energie oder andere Formen Dunkler Energie in Frage kommen. Ab dem Jahr 2008 wird der ESA-Mikrowellen-Satellit PLANCK neue und noch präzisere Daten liefern - vielleicht mit einem neuen Favoriten unter den Dunklen Energien?

19 Lexikon R

19.1 Radioaktivität

Die Radioaktivität ist eine physikalische Erscheinung, die ausschließlich auf **Umwandlungen des Atomkerns** beruht. Der Atomkern ist positiv geladen und besteht aus Nukleonen. Diese Ansammlung von Teilchen kann sich durch die Wirkungen physikalischer Kräfte verändern und so ihrerseits Teilchen aussenden. Dabei unterscheiden die Kernphysiker **drei Formen des radioaktiven Zerfalls**:

- ◇ Alpha-Zerfall,
- ◇ Beta-Zerfall und
- ◇ Gamma-Zerfall.

Insbesondere wird unterschieden zwischen *natürlicher Radioaktivität*, die in der Natur ohne Zutun des Menschen vorkommt und *künstlicher Radioaktivität*, die vom Menschen durch gezielte Kernreaktionen herbeigeführt wird.

Radioaktivität ist im Allgemeinen gefährlich für Leben. Jede Lebensform verträgt nur eine bestimmte Menge (*Dosis*) von Radioaktivität; wird diese überschritten, stirbt die lebende Zelle und ggf. der gesamte Organismus.

Physikalische Einzelheiten werden bei den einzelnen Zerfallsarten erläutert.

19.2 Radiogalaxie

Radiogalaxien sind Vertreter Aktiver Galaktischer Kerne (AGN), die sich durch eine **hohe** Radioleuchtkraft auszeichnen. Im Jargon der Astronomie sind Radiogalaxien *radiolaute* Quellen.

19.2.1 Eigenschaften von Radiogalaxien

Die visuelle Leuchtkraft ist mit -24. Magnitude eher gering. *Bolton* entdeckte die erste Radiogalaxie mit der *Messier*-Bezeichnung M87 im Jahre 1949. Am gleichen Objekt wurde der Begriff Jet geprägt. Radiogalaxien **haben immer** Jets. Radioastronomen teilen sie gemäß der Fanaroff-Riley-Klassifikation (1974) ein.

Meist sind die Radiogalaxien elliptischen Typs, es handelt sich also um entwickelte Galaxien. Ihr Emissionslinienspektrum ähnelt sehr den Seyfert-Galaxien. Morphologisch ähneln die Radiogalaxien sehr den radiolauten Quasaren: Beide AGN-Typen zeigen im Radiowellenlängenbereich neben den Jets weitere, ausgedehnte Strukturen wie *Lobes*, *Hot Spots* und einen *Core* (Begriffe erläutert unter FR-Klassifikation). Sie unterscheiden sich nur auf der Längenskala, zeigen aber **gleiche Gestalt** (*Morphologie*), wie z. B. Beobachtungen mit dem *Very Large Array* (VLA) belegen.

19.2.2 Typen unter den Radiogalaxien

- ◇ *Broad Line Radio Galaxies* (BLRGs), mit breiten Emissionslinien und blauem Kontinuum,
- ◇ *Narrow Line Radio Galaxies* (NLRGs) mit schmalen Emissionslinien
- ◇ und *High-z Radio Galaxies* (HZRGs), bei denen es sich um **hochrotverschobene Radiogalaxien** handelt.

19.2.3 Was weit entfernte Radiogalaxien verraten

Gerade die hochrotverschobenen Radiogalaxien sind von besonderem Interesse in der Kosmologie, weil diese HZRGs hohe kosmologische Rotverschiebungen z aufweisen und damit ein Studium früherer Phasen im Universum gestatten. Diese Objekte sind so weit entfernt, dass sie sich eignen, um **Jets im frühen Universum** zu untersuchen. Hier war das intergalaktische Medium (IGM) noch dichter, als es im lokalen Universums (bei $z = 0$) ist. Befindet sich die Radiogalaxie in der Nähe der Reionisationsära, war das IGM sogar teilweise noch neutral.

Es ist äußerst interessant, die Propagation von Jets unter diesem Dichtekontrast (Verhältnis von Jetmateriedichte zu IGM-Umgebungsdichte) zu studieren, weil sich hier völlig neue Jetstrukturen ausbilden können. Jets im frühen Universum sehen anders aus, als Jets im lokalen Universum. Diese Untersuchungen werden mithilfe von leistungsfähigen Computern in der theoretischen Astrophysik durchgeführt. Das Computerlabor trägt hier sehr zum Verständnis der beobachteten Quellen und der Entwicklung der Strukturen im Kosmos bei.

19.2.4 Entfernungsrekord bei Radiogalaxien

Der Entfernungsrekord für die Radiogalaxien liegt bei $z = 5.19$ und wird vom Objekt TN J0924-2201 gehalten (*Breugel et al.*, 2000; astro-ph/0006238). Die so genannte Lyman-Alpha-Kante, eine charakteristische Spektrallinie von Wasserstoff, die im Ruhesystem im UV zu finden ist, liegt bei diesem Objekt bei 753 nm, also im Bereich sichtbaren, roten Lichts! Diese Radiogalaxie ist also so weit entfernt, dass die kosmische Expansion die 'vor Ort' ultraviolette Strahlung ins rote Licht verschoben wird - allein durch die Ausdehnung des Kosmos!

19.3 Radion

Hypothetisches Kraftfeld, das von dem Kosmologen *Paul Steinhardt* eingeführt. Das Radion durchsetze die ganze Raumzeit im Kosmos. Als Folge dieses Feldes manifestiere sich das, was in der Kosmologie als Dunkle Energie bezeichnet wird. Das fluktuierende, zeitlich variable Radionfeld solle dafür verantwortlich sein, dass unser Vorläuferuniversum mit einem Paralleluniversum kollidiert sei. Aus dieser Weltenkollision, der so genannten Ekpyrosis, sei schließlich - so das sehr spekulative Modell - unser heutiges Universum hervorgegangen!

Natürlich gibt es für diese Idee keinerlei Stützen auf der Grundlage astronomischer Beobachtungen. Allerdings ist eine attraktive Eigenschaft dieser Hypothese, dass sie **erstmals eine Erklärung für den Urknall** anbietet - das vermag die Urknalltheorie nicht.

19.4 Randall-Sundrum-Modelle

Die Randall-Sundrum-Modelle (RS-Modelle) wenden die Branen der Stringtheorien im Rahmen einer relativistischen Kosmologie an. Es handelt sich also um eine Variante in der **Branenkosmologie**.

19.4.1 mehr Raum

Wesentliche Voraussetzung für diese Modelle ist demnach die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen, so genannten Extradimensionen. In diesen 'Extraraum' kann gemäß des Modells *nur* die Gravitation eindringen, **nicht** aber Teilchen und Felder des Standardmodells der Teilchenphysik. Den übergeordneten, höherdimensionalen Raum nennen die Physiker **Bulk**. In den Randall-Sundrum-Modellen ist dieser 'leer' in dem Sinne, dass er **kein Skalarfeld** (wie das Cosmon oder Radion) enthalte. Die Metrik des Bulks ist im RS-Modell eine **gekrümmte, fünfdimensionale Anti-de-Sitter**-Raumzeit, abgekürzt mit $\mathbf{AdS}_5$. 'Anti' bedeutet, dass die (fünfdimensionale!) kosmologische Konstante dieser Bulk-Geometrie *negativ* ist, was im Gegensatz zur klassischen, vierdimensionalen de-Sitter-Raumzeit mit positiver kosmologischer Konstante steht.

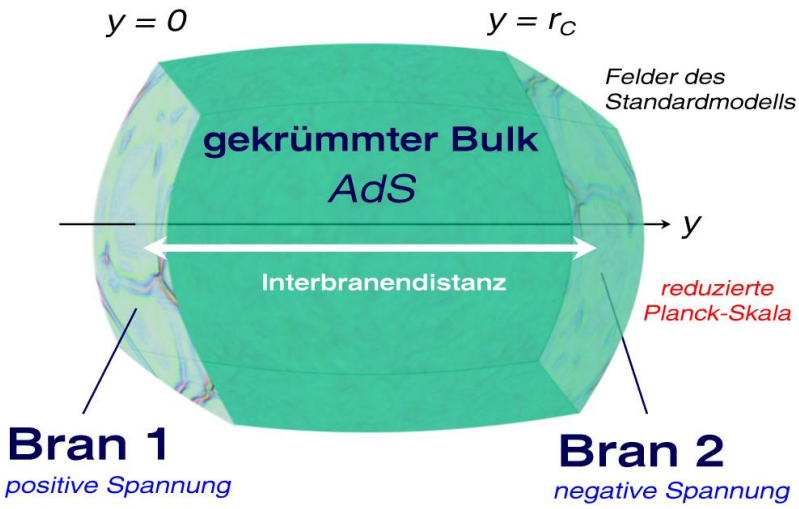

Abbildung 19.1: Illustration des RSI-Modells.

19.4.2 zwei Randall-Sundrum-Modelle: RSI und RSII

Im **RSI-Modell** (*Randall & Sundrum* 1999, hep-ph/9905221) werden neben dem gekrümmten Bulk zwei Branen betrachtet. Präzise gesagt sind es **3-Branen**, die also mit drei Raumdimensionen ausgestattet sind) betrachtet. Die 3-Branen sind *Hyperflächen* der Bulk-Raumzeit, d. h. sie haben gerade eine Raumdimension weniger als der Bulk. Außerdem sei angenommen, dass die 3-Branen eine flache Minkowski-Metrik aufweisen. Eine Bran kann man gerade mit unserem vierdimensionalen (drei Raum- plus eine Zeitdimension) Universum identifizieren. Dieses System aus Bulk und zwei Branen ist **statisch**, weil der Bulk 'leer' ist. Die beiden Branen sind über eine räumliche Extradimension getrennt. Ihren Abstand nennt man *Interbranendistanz*; im RS-Modell sei diese konstant. Die starke Krümmung im fünfdimensionalen Anti-de-Sitter-Raum sorgt für eine starke Gravitationsrotverschiebung zwischen den auf Distanz gehaltenen Branen: die Energieskala ist deshalb sehr unterschiedlich, wenn man die eine Bran mit der anderen vergleicht. Das Bulk-Bran-System ist in Abbildung 19.1 illustriert. Diese Branen-Konfiguration löst das so genannte **Hierarchieproblem**, nach dem elektroschwache Energieskala (100 GeV) um etwa 17 Größenordnungen von der Energieskala der Planck-Skala (10^{19} GeV) abweicht. Für diesen gigantischen Skalenunterschied sind die gekrümmte Bulk-Geometrie und der Abstand der Branen in einer höheren Dimension verantwortlich.

Im **RSII-Modell** (*Randall & Sundrum* 1999, hep-th/9906064) hat man ebenfalls eine gekrümmte, fünfdimensionale Anti-de-Sitter-Raumzeit, nur lässt man nun die **Interbranendistanz gegen unendlich** gehen, so dass man effektiv ein **nicht-kompaktes Ein-Bran-Modell** betrachtet. Unter diesen Voraussetzungen stellt man fest, dass das Newtonsche Gravitationsgesetz auf einer Bran modifiziert werden kann. Dies hängt im Speziellen von der kosmologischen Konstante und der Kopplungskonstante im $\mathbf{AdS}_5$-Raum ab. Die Newtonsche Gravitationskraft enthält neben dem klassischen Term, der mit $1/r^2$ abfällt, einen weiteren der stärker mit $1/r^4$ abfällt. Bisher gab es keine experimentellen Hinweise in Cavendish-Experimenten oder anderen Experimenten, dass das Gravitationsgesetz auf Längenskalen größer als einige zehn Mikrometer modifiziert werden müsste. Anderes gesagt, falls es Extradimensionen gibt, sind sie eingerollt oder kompaktifiziert und zwar auf kleinere Raumdimensionen als etwa 50 μm.

19.4.3 Machen wir doch mal Branenkosmologie

Mit dem RSII-Modell kann man nun den üblichen Weg der Kosmologie beschreiten und die **Friedmann-Gleichungen** nun aber in 5D formulieren (vergleiche Friedmann-Weltmodell). Vergleicht

man diese modifizierte Version mit der klassischen 4D-Version wie man sie nur mit den Mitteln der Allgemeinen Relativitätstheorie gewinnt, so identifiziert man **neue Terme in den Friedmann-Gleichungen**. Diese hängen von der **Spannung der Bran** (engl. *tension*) ab (die man sich wie eine Oberflächenspannung einer Seifenblase vorstellen kann) und einem gänzlich neuen Term, den man **Dunkle Strahlung** (engl. *dark radiation*) nennt. Weiterhin lassen sich Beziehungen zwischen fünfdimensionaler kosmologischer Konstante Λ_5 (im Bulk), vierdimensionaler kosmologischer Konstante Λ_4 (auf der Bran), Gravitationskonstante und Branenspannung auffinden.

19.4.4 Der Clou: Lösung des Hierarchie-Problems

Es stellt sich heraus, dass bei geeigneter Branenspannung und fünfdimensionaler kosmologischer Konstante die vierdimensionale kosmologische Konstante verschwinden kann. Die beobachtenden Kosmologen messen derzeit einen Wert der kosmologischen Konstante nahe null, nämlich ausgedrückt als relativistische Energiedichte $(10^{-3}\ \mathrm{eV})^4$! Die Beobachtung gibt weitere Beschränkungen für die Branenspannung, die fünfdimensionale Kopplungskonstante und die Dunkle Strahlung (letztere höchstens 10% der Energiedichte der Photonen).

19.4.5 Erweiterung: Branendynamik in Extradimension

Die Randall-Sundrum-Modelle mit leerem Bulk erfahren eine Erweiterung in **Modellen mit Skalarfeld im Bulk**, z. B. dem Ekpyrotischen Szenario und dem Zyklisches Universum. Hier werden die Branen in Wechselwirkung mit dem Skalarfeld **dynamisch** und können gegeneinander schwingen und sich sogar durchdringen.

19.4.6 Test im Teilchenbeschleuniger

Die Physiker haben genau untersucht, welche experimentellen Signaturen die Randall-Sundrum-Modelle im Teilchenbeschleuniger hinterlassen würden. So wurde gezeigt, dass der Teilchenbeschleuniger LHC, der bald in Betrieb gehen wird, die RS-Modelle verifizieren oder falsifizieren wird, falls das Standardmodell auf der TeV-Bran (derjenigen mit der reduzierten Planck-Skala) beschränkt ist (*Davoudiasl et al.* 2001, hep-ph/0006041).

19.4.7 Vortrag

- ◇ Mehr Details zu Randall-Sundrum-Modellen und der Branenkosmologie: *An introduction to Brane World Cosmology* (Stand März 2004).

19.5 Randverdunklung

Randverdunklung ist ein Phänomen, das bei leuchtenden Kugeln beobachtbar ist. Dieser Effekt ist bedeutsam in der Astronomie bei den Photosphären der Sterne und insbesondere bei der **Sonne**.

19.5.1 Wie sieht sowas aus?

Auf dem Sonnenfoto 19.2 (Credit: SOHO, ESA/NASA 2003) fällt auf, dass der Rand der Sonnenscheibe immer etwas dunkler erscheint, als die Sonnenmitte. (**Vorsicht!** Niemals direkt in die Sonne blicken, um das zu überprüfen: Sonnenfilter, Sonnenprojektionsschirm oder SoFi-Brille verwenden!). Dieser Effekt heißt *Randverdunklung* (engl. *limb darkening*).

19.5.2 Die Erklärungen

Wir nehmen zunächst an, dass das Licht die Sonnenkugel nur in *radialer* Richtung verlasse. Die Photosphäre ist eine *gekrümmte*, strahlende Oberfläche. Nun ist die beobachtete Strahlungsintensität

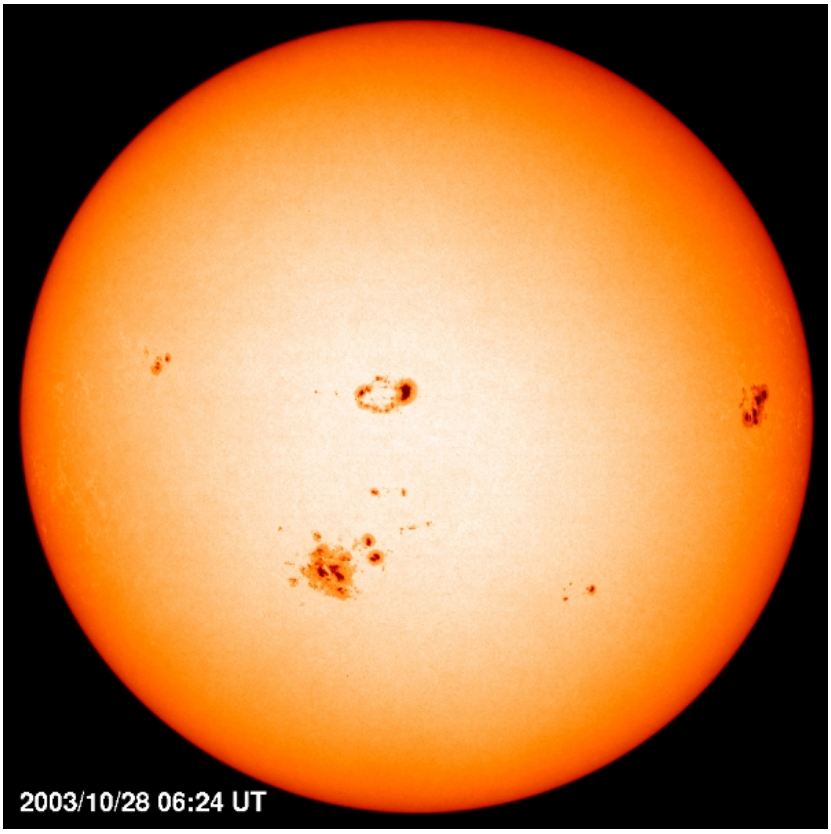

Abbildung 19.2: SOHO-Bild der Sonne mit Sonnenflecken und Randverdunklung 2003.

Abbildung 19.3: Das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum.

allerdings eine **winkelabhängige** Größe und skaliert mit dem Kosinus des Blickwinkels. Wir nehmen als Beobachter die Sonnenstrahlen unterschiedlich wahr: wir schauen direkt in Sonnenstrahlen hinein, die von der Mitte der Sternscheibe ausgehen; aber bei Strahlen, die vom Rand kommen, blicken wir schräg zum Strahl. Anders formuliert bedeutet das, dass der Blickwinkel klein und nahe 0° ist für Strahlen aus der Scheibenmitte; doch er ist hoch, bis zu 90° im Extremfall, für Strahlen vom Scheibenrand. Der Kosinus dieser Winkel ergibt entsprechend etwa 1 (Mitte) bzw. etwa 0 (Rand) und geht als geometrischer Faktor in die Intensität ein. Die winkelabhängige Intensität wird deshalb zum Rand hin unterdrückt. Das erklärt die Randverdunklung **geometrisch**.

In dieser geometrischen Erklärung wurden radiale Sonnenstrahlen angenommen. Es gibt jedoch in der Natur auch Strahlen vom Rand, die unter kleinem Winkel aus der Photosphäre (etwa parallel zur Sonnenoberfläche) austreten. Das schaffen allerdings nur solche, die besonders nahe an der Sonnenoberfläche sind. Denn je tiefer in der Sonne die Strahlung startet, umso wahrscheinlicher ist ein Absorptions- oder Streuprozess, der die Strahlung schluckt bzw. ablenkt. Wenn es also Strahlung vom Rand noch zum Beobachter schafft, dann nur aus höheren und damit kälteren Schichten der Photosphäre. Die Wärmestrahlung einer kälteren Quelle ist jedoch zum einen 'röter' (hier orange) und zum anderen auch dunkler, weil das Maximum der Planck-Strahlungsverteilung sich mit fallender Temperatur auch nach unten, nämlich zu kleineren Intensitäten, verschiebt. Das erklärt die Randverdunklung zudem **physikalisch**.

19.5.3 Ein Monsterfleck

Es sei am Rande bemerkt, dass das Beobachtungsfoto oben den größten Sonnenfleck zeigt, der mit SOHO beobachtet wurde: Der Fleck im unteren Bereich ist **15mal größer als die Erde**!

19.6 Raumzeit

Raumzeit (engl. *space-time*) ist ein Kunstwort, dass angemessen ein wesentliches Resultat der Relativitätstheorie ausdrückt: Raum und Zeit sind keine Dimensionen mehr, die unabhängig voneinander sind. Wie die Lorentz-Transformation der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) zeigt, bilden Raum und Zeit ein Kontinuum! Die Zeit- und die drei Raumkoordinaten sind eng miteinander verwoben und bilden eine **vierdimensionale Raumzeit** (siehe Grafik 19.3).

19.6.1 Erfinder des Begriffs Raumzeit

Der Begriff *Raumzeit* wurde 1908 vom Mathematiker *Hermann Minkowski* (1864 - 1909) ersonnen, der eine neue Darstellung der Relativitätstheorie durch 4er-Vektoren erfand. Diese elegante Formulierung ist bis heute gebräuchlich. Eine witzige Anekdote ist, dass Minkowski *Albert Einsteins* Mathematiklehrer am Polytechnikum Zürich war. Trotz Begabung hatte Einstein nicht unbedingt mit vortrefflichen Leistungen in Minkowskis Unterricht geglänzt. Umso erstaunter war Minkowski, als er erfuhr, dass dieser Einstein die Relativitätstheorie erfunden hatte. So reagierte er mit folgendem Kommentar:

Das hätte ich dem Einstein eigentlich nicht zugetraut.

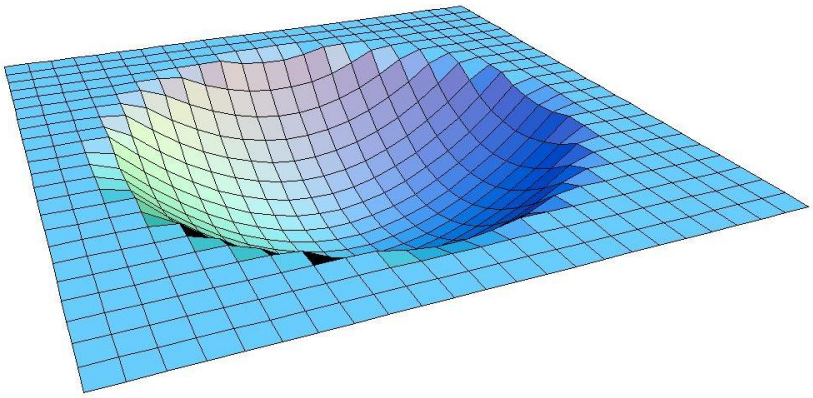

Abbildung 19.4: gekrümmte Raumzeit.

(Quelle: Biographie **Albert Einstein** von *Thomas Bührke*, dtv 2004)

19.6.2 dynamische und gekrümmte Raumzeit

Raum und Zeit existieren nicht weiter als absolute Größen wie in der klassischen Physik, sondern sind selbst **dynamisches Objekt**, physikalische Größe, ein komplexes **Tensorfeld**, eine Metrik. Diese Raumzeit kann in Abwesenheit von Materie und Energie *flach* sein, dann handelt es sich um die Minkowski-Metrik. Die Raumzeit ist jedoch im Allgemeinen durch Massen oder allgemein gesagt Energieformen gekrümmt. Dann muss die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) zur Beschreibung bemüht werden. Besonders ausgeprägt ist die Krümmung der Raumzeit bei Schwarzen Löchern, die durch die Schwarzschild-Metrik (statisch) oder Kerr-Metrik (rotierend) beschrieben werden. Die Krümmung wird erst nahe am Schwarzen Loch besonders hoch und verschwindet bei großen Abständen. Die Relativisten sagen: Dort ist die Metrik asymptotisch flach. Es ist durchaus eine nicht triviale Aufgabe, wie man sich Raumzeit vorzustellen hat. An sich sind wir an eine vierdimensionale Welt gewöhnt: In einem Zimmer füllen wir - der eine mehr, der andere weniger - drei Raumdimensionen, nämlich Länge, Breite und Höhe, aus. Zu einem späteren Zeitpunkt befinden wir uns womöglich an einem anderen Ort im Zimmer: wir haben uns durch die Zeit bewegt. Aber wie bilden diese vier Dimensionen ein Kontinuum? Um das zu veranschaulichen, muss man sich einiger Tricks bedienen und z. B. eine Raumdimension und die Zeitdimensionen unterdrücken. Eine recht einfache Vorstellung von Raumzeit ist dann eine Analogie zu einer dehnbaren **Gummihaut**. In diesem simplen 2D-Modell geht die Information über die Zeitdimension und eine Raumdimension verloren. Eine in einen Rahmen gespannte Gummihaut bildet eine flache Oberfläche (= flache Raumzeit ohne Anwesenheit von Massen). Legt man eine Masse, z. B. eine schwere Metallkugel auf die Gummihaut, so wird sie gekrümmt. Man erhält eine 'Delle' in der Raumzeit, eine gekrümmte Raumzeit – siehe Abbildung 19.4. Dabei ist die Tiefe der Delle ein Maß für die Krümmung der Raumzeit.

Die Delle ist ein Resultat einer ausgedehnten Masse. Man kann dieses Spiel noch weiter treiben und die Masse im Gravitationskollaps in sich zusammenfallen lassen. Das Ergebnis ist ein Schwarzes Loch. Anschauliche Darstellungen davon sind Diagramme von **Gravitationstrichtern**, wie im Eintrag Lapse-Funktion präsentiert. Der Trichter schließt sich nicht, weil hier eine Krümmungssingularität vorliegt.

19.6.3 mathematische Darstellung der Raumzeit

Mathematisch wird die Raumzeit eindeutig durch den **metrischen Tensor** (Metrik) oder alternativ das **Linienelement** $\mathbf{ds^2}$ beschrieben. Im Linienelement stehen die Komponenten des metrischen Tensors als Koeffizienten. Weil der metrische Tensor ein Tensor zweiter Stufe ist, handelt es sich

um $4 \times 4 = 16$ Koeffizienten. Einen solchen Tensor kann man als Matrix mit vier Spalten und vier Zeilen aufschreiben. Die Symmetrie des Tensors reduziert die 16 auf nur 4+3+2+1 = 10 unabhängige Komponenten. Nun hängt es von der Komplexität und den Symmetrieeigenschaften (siehe auch Isometrien) der jeweiligen Raumzeit ab, wie viele der zehn unabhängigen Koeffizienten verschieden von null sind. Bei hohen Symmetrien wie in der Minkowski-Geometrie oder der Schwarzschild-Geometrie ist der metrische Tensor diagonal: dann gibt es nur vier unabhängige Koeffizienten verschieden von null auf der Matrixdiagonalen - die restlichen Einträge sind null.

19.6.4 Zeit in Einsteins Theorie

Der Zeitbegriff wird in der Relativitätstheorie zur relativen Zeit verallgemeinert: Zeit hängt vom Beobachter ab. Im Studium dynamischer, relativistischer Phänomene in der numerischen ART begegnet man deshalb der Frage, welchen Beobachter man wählen soll, um den zeitlichen Ablauf von Prozessen zu untersuchen. Es hat sich bewährt dann die Symmetrie von Raum und Zeit wieder aufzuspalten. Die Methode nennt man **3+1 Split** oder ADM-Formalismus. Die Raumzeit blättert dann in raumartige, dreidimensionale Hyperflächen, auf denen jeweils die Zeit konstant ist. Das ermöglicht im Rahmen der **numerischen Relativitätstheorie** die Simulation dynamischer Prozesse aus der Sicht eines speziellen Beobachters, beispielsweise des ZAMOs.

19.6.5 Beben der Raumzeit

Raumzeiten sind sehr **steife Gebilde** und lassen sich nur schwer um große Amplituden deformieren. Bei beschleunigten Massen werden *im Prinzip immer* **Gravitationswellen** emittiert, die die dynamische Krümmung der Raumzeit vermitteln. Gravitationswellen sind nichts anderes als Erschütterungen der Raumzeit, die sich mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit von knapp 300000 km/s ausbreiten.

Bewegen Sie mal Ihre Hand. Haben Sie's gemerkt? Sie haben gerade eine Gravitationswelle emittiert und die Raumzeit deformiert!

Eine Hand ist natürlich viel zu leicht, als dass hier ein großer - geschweige denn messbarer - Effekt zu erwarten wäre. Nur stark beschleunigte und kompakte, schwere Massen können eine deutliche Deformation der Raumzeit mittels Gravitationswellen herbeiführen, z. B. bei der Umkreisung von Neutronensternen oder stellaren Schwarzen Löchern in Binärsystemen (engl. *compact binaries*), in Binären aus supermassereichen Schwarzen Löchern, in Supernova-Explosionen oder in Gammastrahlenausbrüche.

Die sukzessive Annäherung der Komponenten im Binärpulsar *PSR1913+16* **beweist indirekt**, dass er Gravitationswellen abstrahlt. Diese Entdeckung war von großer Bedeutung für die Untermauerung der ART und wurde mit dem Nobelpreis 1993 prämiert.

Die Steifheit der Raumzeit ist ein Glücksfall für die Menschheit, weil sie die Entwicklung und den Erhalt von Leben begünstigt, indem eine relativ stabile Umgebung gewährleistet wird. Wäre die Raumzeit dehnbarer als beobachtet, so wären wir sicherlich nicht hier. Dieser Aspekt darf gerne im anthropischen Prinzip Berücksichtigung finden.

19.7 Rayleigh-Jeans-Strahlungsformel

Siehe im Zusammenhang unter Planckscher Strahler.

19.8 Ray Tracing

Ray Tracing, dt. 'Strahlenverfolgung', ist eine Methode, um Objekte in 2D oder 3D zu visualisieren. Dabei wird die Ausbreitung von Licht simuliert und - im Idealfall - alle Wechselwirkungen der Strahlung (Reflexion, Brechung, Streuung) mit den Objekten im betrachteten Gebiet berücksichtigt.

19.8.1 Licht auf Geraden

Kommerzielle Ray-Tracer-Software, z. B. 3D-Computerspiele oder CAD-Software, arbeitet in der flachen Raumzeit, wie es Relativisten ausdrücken würden. D.h. es liegt der gewöhnliche Grenzfall der *geometrischen Optik* vor: Licht bewegt sich entlang von **Geraden**. Eigentlich ist das jedoch ein Spezialfall.

19.8.2 Licht geht in die Kurve

Ganz allgemein besagt die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) von *Albert Einstein*, dass Masse und Energie die Raumzeit krümmen. Um nun die Ausbreitung von Licht zu verfolgen, müssen die Geodäten der Lichtteilchen berechnet werden. Diese 'Lichtbahnen' heißen in der ART Nullgeodäten. Im Allgemeinen sind die **Lichtbahnen gebogen**, weil auch der 'Raum krumm ist'. Etwas schicker formuliert: Nullgeodäten folgen der gekrümmten Raumzeit.

19.8.3 Wie kommt man auf die Lichtbahnen in der ART?

Zunächst muss man wissen, in welcher Raumzeit sich das Licht ausbreitet. Ist es das Gravitationsfeld der Sonne oder die Umgebung eines Neutronensterns oder soll sogar gezeigt werden, wie ein Schwarzes Loch Licht verschluckt? Sobald das geklärt ist, formuliert man mit der nun bekannten Metrik der Gravitationsquelle die so genannte **Nullgeodätengleichung**: das ist nichts anderes als die voll relativistische Bewegungsgleichung für Lichtteilchen (die Ruhemasse null haben). In Gestalt einer *Geodätengleichung* verraten sich auch die Teilchenbahnen für Teilchen mit Ruhemasse. In jedem Fall ist die Geodätengleichung mathematisch gesprochen eine *Differentialgleichung zweiter Ordnung*.

19.8.4 Ein Lichtteilchen macht noch kein Bild...

...zumindest kein aufregendes. Die Nullgeodätengleichung muss daher für viele Lichtteilchen, die unterschiedliche Startbedingungen (Startposition, Strahlrichtung) haben, gelöst werden. 'Von Hand' wäre das eine mühevolle Prozedur, weil erst etwa eine Million Lichtteilchen (ein Bild mit 1000×1000 Pixel) ein aussagekräftiges und aufregendes Bild macht. Deshalb benutzt man natürlich **Computer** zur Berechnung des Bildes - Fachleute nennen das (sowohl in flachen, als auch gekrümmten Raumzeiten) auch *Rendern*.

Bei dieser Rechnung muss auch klar sein, wo der Beobachter der Szenerie ist. Denn die Geodätengleichung verknüpft ja einen Lichtstrahl von seiner Startposition mit einem Auftreffpunkt. Wo der Auftreffpunkt liegt diktiert einerseits der Lichtstrahl durch seine Startbedingungen und andererseits die Metrik mit ihrer Krümmung.

Das ganze Verfahren von der Berechnung der Lichtausbreitung in gekrümmten Raumzeiten wird nun **allgemein relativistisches Ray Tracing** (engl. *general relativistic ray tracing*) genannt. Es gibt auch *speziell relativistisches Ray Tracing*, das ausrechnet, wie die Umwelt ausschaut, wenn man sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch eine Szenerie bewegt.

19.8.5 Lichtausbreitung nahe eines Schwarzen Loches

Betrachten wir doch gleich einen Extremfall und zwar die Bewegung von Lichtteilchen in der Umgebung eines Schwarzen Loches. Die Raumzeit, die benutzt werden muss, ist entweder die Schwarzschild-Metrik (Loch rotiert nicht) oder die etwas kompliziertere Kerr-Metrik (Loch rotiert). Grafik 19.5 skizziert, was berechnet werden soll: ein Lichtstrahl (engl. *ray*) startet von einer dünnen Scheibe (engl. *thin disk*), die um ein Schwarzes Loch (engl. *black hole*) rotiere (z. B. eine Standardscheibe) und bewege sich durch die gekrümmte Raumzeit (engl. *curved space-time*). Der Beobachter möge weit entfernt vom Loch sitzen, wo die Raumzeitkrümmung des Loches vernachlässigbar ist (asymptotisch flache Raumzeit). Der Beobachter betrachtet in diesem Fall ein Bildschirm (engl. *camera screen*), auf dem das Bild abgebildet werden soll. Für jedes Pixel des Bildes muss die Geodätengleichung gelöst werden. Hier bedient man sich aus numerischen Gründen einer nützlichen Eigenschaft von Licht: Lichtwege

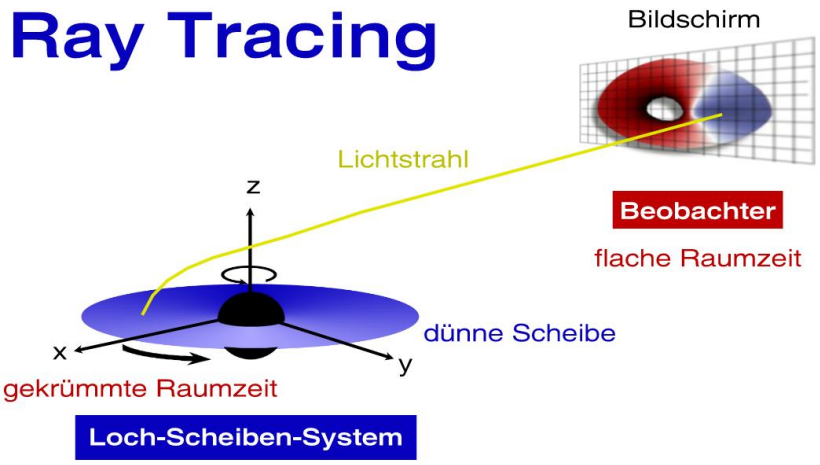

Abbildung 19.5: Illustration der Ray-Tracing-Methode.

sind umkehrbar. Es wäre unnötig die Bahnen sämtlicher Lichtteilchen zu rechnen, die von der Scheibe starten, weil nur ein Bruchteil von ihnen am Bildschirm ankommt. Wir sind doch nur an dem Bild auf dem Bildschirm interessiert. Also machen wir es lieber umgekehrt und '**rechnen rückwärts**' (*back tracking*): die Berechnung startet am Bildschirm und je nachdem, ob das Teilchen die Scheibe, das Loch oder nichts trifft, wird es eingefärbt. Schwups, fertig ist das Bild.

19.8.6 zwei Rechenverfahren

- ◇ Die Geodätengleichung kann erstens durch **direkte Integration** gelöst werden, was numerisch aufwendiger ist und höhere Rechnerleistungen erfordert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es für beliebige Raumzeiten funktioniert.
- ◇ Die Geodätengleichung kann zweitens durch **Integrale der Bewegung** (*Erhaltungsgrößen*) gelöst werden, was numerisch effizient und schnell ist. Der Vorteil ist hier, dass deutlich weniger Computerleistung nötig ist.

19.8.7 Lösung der Geodätengleichung mit Erhaltungsgrößen

Im Falle eines Schwarzschild- oder Kerr-Loches nutzt man die Kenntnis von vier Erhaltungsgrößen des Systems aus. Neben Masse, Energie und Drehimpuls ist die wesentliche Größe in der Kerr-Geometrie (die ja Schwarzschild als Spezialfall enthält) die **Carter-Konstante**. *Brandon Carter* leitete 1968 diese neue Bewegungskonstante aus der Separabilität der Hamilton-Jacobi-Gleichung ab. Diese vierte Erhaltungsgröße ist ein **exklusives Merkmal der Kerr-Metrik** und fehlt bei anderen achsensymmetrischen Raumzeiten, wie beispielsweise bei Neutronensternen.

19.8.8 Einsteins verzerrte Welt

Der berechnete Verlauf der Nullgeodäten dient also der Herstellung **voll relativistischer Bilder**: Auf dem Bildschirm sieht der Betrachter Bilder, die mit Einsteins Theorie als Methode und einem Pinsel aus Licht gemalt wurden. Und was man da sieht ist ganz erstaunlich! Die relativistische Welt sieht vollkommen anders, asymmetrisch und verzerrt aus:

- ◇ Das Objekt, das leuchtet, stellt sich im Allgemeinen verzerrt und verbogen, manchmal sogar mehrfach dar. Das ist ein Resultat des **Gravitationslinseneffekts**.

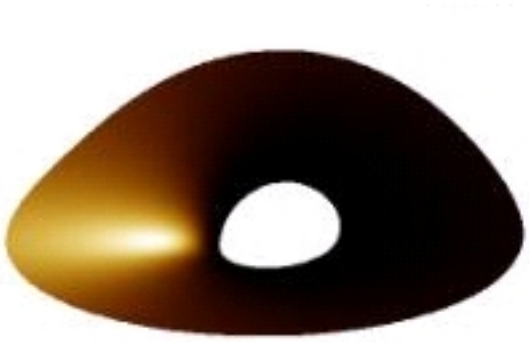

Abbildung 19.6: Ray Tracing Ergebnis einer Scheibe um ein Schwarzes Loch.

- ◇ Falls sich die Lichtquelle auf den Beobachter bewegt, gibt es Blauverschiebungseffekte; falls sich die Lichtquelle vom Beobachter entfernt, so ist es eine Rotverschiebung. Beides wird zusammengefasst im **Doppler-Effekt**.
- ◇ Natürlich tritt auch das Loch selbst in Erscheinung: schwarz, wie es sich gehört. Der physikalische Grund ist, dass Lichtteilchen, die am Ereignishorizont starten oder ihm zu nahe kommen, vom Loch verschluckt werden. 'Verschlucktes Licht' ist schwarz. Dieser Effekt heißt **Gravitationsrotverschiebung**.

Das Resultat eines relativistischen Ray Tracing zeigt die Abbildung 19.6. Es handelt sich im Prinzip um ein Falschfarbenbild, bei dem die Helligkeit einer Gasscheibe farbkodiert wurde: geringe Helligkeit ist schwarz und hohe Helligkeit weiß dargestellt; Zwischenwerte sind gelb. So sieht demnach eine dünne, gegen den Uhrzeigersinn rotierende Scheibe aus, die sich um ein ebenfalls rotierendes Schwarzes Loch dreht. Bei der Scheibe wurde angenommen, dass man fast auf ihre Kante blickt: die Neigung beträgt 70°. Die Scheibe sieht verzerrt aus, als ob sie von hinten nach oben gebogen wurde. Das ist gerade der Gravitationslinseneffekt. Wie man sieht, ist die Strahlung, die vom linken Teil der Scheibe kommt heller, als der recht Teil. Das ist der oben angesprochene Doppler-Effekt, der sich ja nicht nur in der Lichtfarbe (=Strahlungsenergie), sondern auch in der Helligkeit (=Strahlungsfluss) bemerkbar macht. Das Loch selbst ist hier zum besseren Erkennen weiß dargestellt worden: aus diesem Bereich kommt jedoch kein einziges Lichtteilchen. Das ist der Ereignishorizont des Schwarzen Loches.

19.8.9 Nutzen für die Astrophysik

Die gerenderten Bilder haben einen enormen Informationsgehalt und bieten viel Anlass zur wissenschaftlichen Diskussion. In der Natur ist die Umgebung eines Schwarzen Loches leider noch nicht so fotografiert worden. Das liegt daran, weil die Auflösung der Teleskope dazu (noch!) nicht ausreicht. Die kosmischen Schwarzen Löcher sind zu kompakt und zu weit entfernt, als dass diese Fotos zurzeit gemacht werden könnten - vermutlich schaffen das die Radioastronomen in etwa fünf Jahren mittels *Interferometrie*.

Dennoch sind diese Rechnungen schon seit Jahren nützlich für die Astronomen: In einem weiteren numerischen Schritt kann man aus dem Bild ein **Spektrum** ausrechnen. Die sind sehr wohl beobachtbar! Da die Materie so nah an einem Schwarzen Loch sehr heiß ist, liegt hier ein Gemisch aus Ionen und Elektronen vor, ein **Plasma**. Es ist so heiß, dass es typischerweise im Röntgenbereich strahlt. Entsprechend wird relativistisches Ray Tracing genutzt, um **Röntgenspektren** zu simulieren, insbesondere Wärmestrahlung der Scheibe (engl. *relativistic multi-color black body*) und Eisenfluoreszenzlinien ($Fe\ K\alpha$). Auch der Vergleich mit Radiospektren ist möglich, wenn

man annimmt, dass Synchrotronstrahlung in der Nähe des Loches von relativistischen Elektronen abgestrahlt wird.

Der Vergleich aus Simulation und Beobachtung erlaubt Rückschüsse auf Eigenschaften des inneren Akkretionsflusses und sogar auf das Schwarze Loch, z. B. ob es rotiert.

19.8.10 Mehr dazu im Wissensportal

- ◇ Web-Artikel: Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing
- ◇ Vortrag: Relativistic Emission Lines of Accreting Black Holes (Stand Mai 2003)
- ◇ Diplomarbeit von Andreas Müller (2000): *Emissionslinienprofile relativistischer Scheiben um rotierende Schwarze Löcher*, pdf (3.9 MB)
- ◇ Doktorarbeit von Andreas Müller (2004): *Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry*, pdf (9.9 MB)
- ◇ *Müller, A. & Camenzind, M.*: Relativistic emission lines from accreting black holes - The effect of disk truncation on line profiles, , A& A 413, 861, 2004; Preprint: astro-ph/0309832

19.9 Reichweite

Die Reichweite ist ein zentraler Parameter bei der Betrachtung der **vier fundamentalen Naturkräfte in der Teilchenphysik**:

- ◇ Elektromagnetismus,
- ◇ schwache Wechselwirkung,
- ◇ starke Wechselwirkung
- ◇ und Gravitation.

19.9.1 Die Schweren kommen nicht so weit

Die Botenteilchen, die diese Wechselwirkungen übertragen, heißen **Eichbosonen**, die im Rahmen einer Eichtheorie (engl. *gauge theory*) beschrieben werden. In den Quantenfeldtheorien zeigt sich, dass die **Ruhemassen der Eichbosonen** über die Reichweiten entscheiden: Je schwerer das Eichboson ist, umso kurzreichweitiger ist die assoziierte Kraft.

19.9.2 vier Eichbosonen

Das Eichboson des Elektromagnetismus bzw. der Quantenelektrodynamik ist das Photon, diejenigen der schwachen Wechselwirkung heißen W- und Z-Teilchen (Weakonen), die der starken Wechselwirkung oder Quantenchromodynamik heißen Gluonen und das (noch nicht nachgewiesene und daher hypothetische) Eichboson einer quantisierten Gravitationstheorie oder Quantengravitation ist das Graviton.

19.9.3 Und so weit kommen sie

Weil Photon und Graviton keine Ruhemasse aufweisen, sind die damit verbundenen Wechselwirkungen, also Gravitation und Elektromagnetismus, im Prinzip von **unendlicher Reichweite**. Die beiden verbleibenden Kräfte des subatomaren Bereichs sind hingegen **extrem kurzreichweitig**. Die starke Wechselwirkung hat eine geringfügig höhere Reichweite als die schwache Wechselwirkung. Die Gluonen sind zwar ebenfalls masselos (bezogen auf die Ruhemasse), tragen aber eine Farbladung. Damit wechselwirken die starken Trägerteilchen selbst mit den Quarks und hadronischer Materie, was ihre Reichweite verkürzt (detaillierte Erklärung beim Eintrag Gluonen). Die Reichweite der schwachen Kraft ist deshalb so kurz, weil die Weakonen so massereich sind: 81 bzw. 91 GeV!

19.9.4 Reichweite ausrechnen

Rechnerisch folgt die Reichweite aus dieser Gleichung

$$R_{\text{force}} = \frac{\hbar}{m_{\text{carrier}}\text{c}},$$

indem man rechts die Masse des Austauschteilchens einsetzt (h: Plancksches Wirkungsquantum, c: Vakuumlichtgeschwindigkeit). Die Gleichung kann man schnell anhand der *Heisenbergschen Unschärferelation* abschätzen oder exakt aus der **Klein-Gordon-Gleichung** im Rahmen der Quantenfeldtheorien ableiten.

19.10 Reionisation

Ganz allgemein versteht man in der Physik unter *Reionisation* eine erneute Ionisierung eines Materials, z. B. durch elektromagnetische Strahlung. Ionisierung bezeichnet den Prozess, der Ladungen von einem neutralen Gebilde (z. B. Atom) entzieht.

19.10.1 Kosmologie: erste Quellen ionisieren

In der Kosmologie bezieht sich der Begriff Reionisation auf eine ganze Epoche, nämlich diejenige, als die ersten entstandenen Strahlungsquellen im Universum das durch die Rekombinationsära ($z \sim 1100$) neutral gewordene intergalaktische Medium (IGM) erneut ionisierten. Als erste Strahlungsquellen kommen die ersten, entstandenen Sterne und die erste Generation der Aktiven Galaxienkerne, im Wesentlichen Quasare, in Betracht. Der Prozess der Reionisation vollzog sich über mehrere Phasen mit folgenden Bezeichnungen: Prä-Überlapp (engl. *pre-overlap*), Überlapp (engl. *overlap*), Reionisation (engl. *reionization*), Post-Überlapp (engl. *post-overlap*). Jede Phase ist mit einer bestimmten Ausdehnung der Ionisationsfronten um die ionisierenden Quellen assoziiert. Dies illustriert Abbildung 19.7 (auch als Animation, 2.2 MB, ca. 900 × 700 Pixel).

19.10.2 He-Ionisation bei kleinerem z als H-Ionisation

Die wesentlichen chemischen Elemente im IGM, die sich bereits primordial bildeten (siehe primordiale Nukleosynthese) sind Wasserstoff (Elementsymbol *H*) und Helium (Elementsymbol *He*). Vor der Reionisationsära lagen sie zwischen den ersten kosmischen Objekten im Wesentlichen in **neutraler Form** vor.

Sobald aber eine Strahlungsquelle ihre neutrale Umgebung ionisiert bilden sich **Strömgren-Sphären** aus, kugelige Gebilde ionisierten Materials. Der Schwellwert zur Ionisation von neutralem Wasserstoff liegt bei 13.6 eV. Diese Energie muss der Ionisator aufbringen, um '*HII*-Blasen' (Strömgren-Sphären einfach ionisierten Wasserstoffs) zu bilden.

Die Ionisation neutralen Heliums findet erst bei höheren Schwellwerten statt: die Ionisation neutralen Heliums (*HeI*) zu einfach ionisiertem Helium (*HeII*) erfolgt ab einer Energie von 24.6 eV, die zweifache Ionisation zu *HeIII* erst bei 54.4 eV. Das bedeutet, dass die **Helium-Reionisationsepoche** zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung des Universums erfolgte und damit leichter beobachtbar sein muss für Astronomen, weil sie bei *kleineren* Rotverschiebungen z liegen muss. Helium kündigt gewissermaßen die **Wasserstoff-Reionisationsepoche** an (*H-Preview*).

19.10.3 neutrales Material vor Reionisation beobachtet!

Auf der Rotverschiebungsskala liegt das Zeitalter der Reionisation bei $z \sim 10$. $z \sim 7$ kennzeichnet die Wasserstoff-Reionisation und entsprechend z kleiner als 7 die Helium-Reionisation. Beobachtungen (*Fan et al. 2000*), nämlich die beim Quasar SDSS 1044-0125, beweisen, dass die Reionisationsepoche bei $z = 5.8$ bereits vollständig abgeschlossen war: im Spektrum finden sich keine so genannten **Gunn-Peterson-Tröge** vor der Lyman-Alpha-Kante, die ein Indiz für neutrales, stark absorbierendes

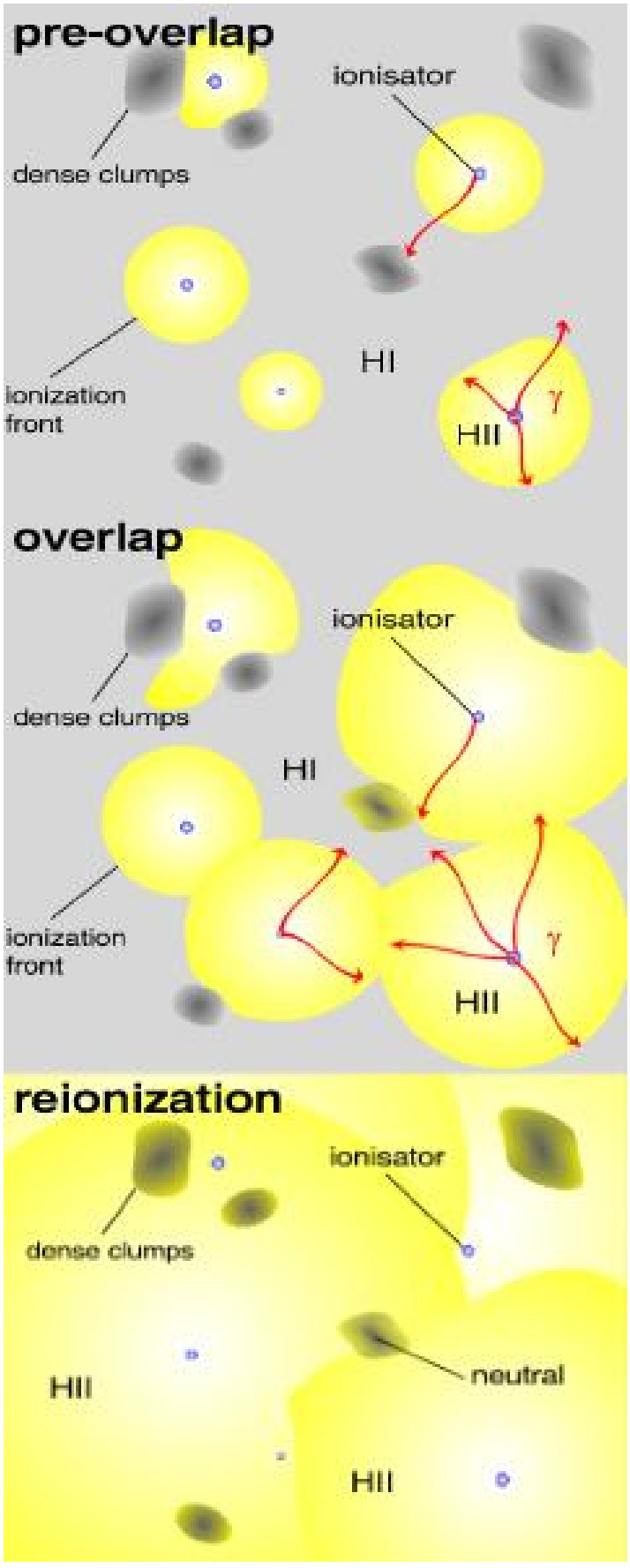

Abbildung 19.7: Sequenz der Reionisationsphasen.

Material sind. Die Reionisationsepoche kann bereits bei vielen weit entfernten Quellen (*HZ sources*, HZ für high-redshift) überprüft werden und gilt als erwiesen.

19.10.4 21cm-Tomographie

Als Indikatoren (im Fachjargon so genannte *Tracer*) für die Prä-Reionisationsepoche, also der Phase mit neutralem IGM, dient die **21cm-Linie** neutralen Wasserstoffs (*HI*). Es handelt sich dabei um einen Hyperfeinstrukturübergang, einem Spin-Flip vom Triplett- zum Singulettzustand im Wasserstoffatom. Radiobeobachtungen dienen so einer 21cm-Tomographie, um das Weltall nach neutralem Wasserstoff zu durchforsten.

19.10.5 Am Ende des Dunklen Zeitalters

Die ersten Strahlungsquellen bzw. die ersten elementaren Bausteine, gasförmige Objekte, die sich natürlich **vor** der Reionisation gebildet haben müssen, siedelt man bei Rotverschiebungen von $z = 15$ bis 30 an. Mit ihrer Entstehung endete das **Dunkle Zeitalter** (engl. *dark ages*) der Kosmologie. Die ersten, entstandenen Sterne rechnet man der **Population III** zu. Sie könnten durch Paarinstabilitäts-Supernovae das ISM und IGM mit Metallen angereichert haben.

19.10.6 Vortrag

- ◇ The first sources of light in the Early Universe and the highest plausible redshift of luminous Quasars (Stand Mai 2001)

19.11 Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung

Die Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** Λ-Term (siehe kosmologische Konstante) und **mit** Maxwell-Tensor auf der rechten Seite der Feldgleichung. Physikalisch motiviert ist diese Raumzeit, wenn man eine elektrisch geladene Punktmasse oder ein nicht rotierendes, elektrisch geladenes Schwarzes Loch beschreiben will, das sich in einer Umgebung befindet, die mit dem Λ-Fluidum angefüllt ist.

19.11.1 zum Namen

Der Name Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung kommt daher, weil diese Metrik beides beinhaltet: die statische und kugelsymmetrische Eigenschaft von der Reissner-Nordstrøm-Lösung und die kosmologische Konstante wie in der de-Sitter-Lösung.

19.11.2 Eigenschaften: Masse, Ladung und Λ

Die Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Raumzeit ist eine **Drei-Parameter-Lösung**, weil Massenparameter M, elektrische Ladung Q und die kosmologische Konstante Λ die Eigenschaften der Metrik eindeutig festlegen.

19.11.3 Unterscheidung nach Vorzeichen von Λ

Wie bei der de-Sitter-Raumzeit auch, sprechen Theoretiker von der Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung (RNdS-Metrik), falls $\Lambda > 0$ (repulsive kosmologische Konstante; Antigravitation) und von der Reissner-Nordstrøm-Anti-de-Sitter-Lösung (RNAdS-Metrik), falls $\Lambda < 0$ (attraktive kosmologische Konstante). Im Grenzfall $\Lambda = 0$ ist gerade die Reissner-Nordstrøm-Metrik mit verschwindender kosmologischer Konstante realisiert.

Interessanterweise hat die RNAdS-Metrik (wie alle Raumzeiten mit negativem Λ) **keinen Ereignishorizont**.

19.11.4 Linienelement

Das Linienelement der Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung aus demjenigen der Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung abgeleitet werden, wenn man dort $a = 0$ setzt.

19.11.5 Weitere Raumzeiten

Falls die kosmologische Konstante und elektrische Ladung des Loches null sind, so liegt gerade die Schwarzschild-Lösung vor.

19.12 Reissner-Nordstrøm-Lösung

Diese Raumzeit ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART).

19.12.1 geladene Punkmasse

Sie beschreibt die Metrik einer **elektrischen Punkladung** und besitzt damit 'ein Haar mehr' (vergleiche Keine-Haare-Theorem) als die Schwarzschild-Lösung. Beide Raumzeiten sind kugelsymmetrisch, und es gilt das Birkhoff-Theorem.

19.12.2 keine Vakuumraumzeit

Die Reissner-Nordstrøm-Lösung ist etwas komplizierter, weil sie **keine** Vakuumraumzeit ist, d. h. der Energie-Impuls-Tensor in den Feldgleichungen verschwindet nicht. Er entspricht bei dieser Raumzeit einer Punktladung gerade dem Maxwell-Tensor. Die Einsteinschen Feldgleichungen haben dann einen besonderen Namen und heißen *Einstein-Maxwell-Gleichungen*.

19.12.3 geladene Löcher irrelevant in Astrophysik

In der Astronomie spielen elektrisch geladene Schwarze Löcher (also neben der Reissner-Nordstrøm-Lösung auch die Kerr-Newman-Lösung) eine untergeordnete Rolle, weil Astrophysiker annehmen, dass jede Ladung des Loches recht schnell durch elektrische Ströme, nämlich die Akkretionsflüsse, **neutralisiert** würde.

19.13 Rekombination

Der entgegengesetzte Prozess zur Ionisation: elektrische Ladungen unterschiedlicher Polarität ziehen sich an und können einen nach außen hin neutralen Verbund erzeugen. So rekombiniert ein Elektron mit einem Proton und bildet ein neutrales Atom: neutralen Wasserstoff (in der Astronomie mit **HI** bezeichnet). Eine Ansammlung vieler Protonen, die in der Regel mit Neutronen einen positiv geladenen Atomkern bilden, können mit passender Anzahl Elektronen zu schwereren, neutralen Atomen rekombinieren.

Während bei der Ionisation Energiezufuhr nötig ist, wird bei der Rekombination Energie frei. Diese wird z. B. als Strahlungsenergie in Form von *Rekombinationsleuchten* emittiert.

19.13.1 Als der Kosmos durchsichtig wurde

In der Kosmologie kennzeichnet die **Rekombinationsära** eine Epoche nach der primordialen Nukleosynthese. Die Rekombination ist gerade derjenige Moment, als die zuvor im Universum entstandenen Ladungen (Elektronen, Protonen, Atomkerne) sich zu Atomen verbanden. Infolge dieser Bindung änderten sich plötzlich die Transparenzeigenschaften des Universums: Die Photonen wurden nicht mehr an den freien Elektronen (und Protonen) gestreut (*Thomson-Streuung*) und konnten

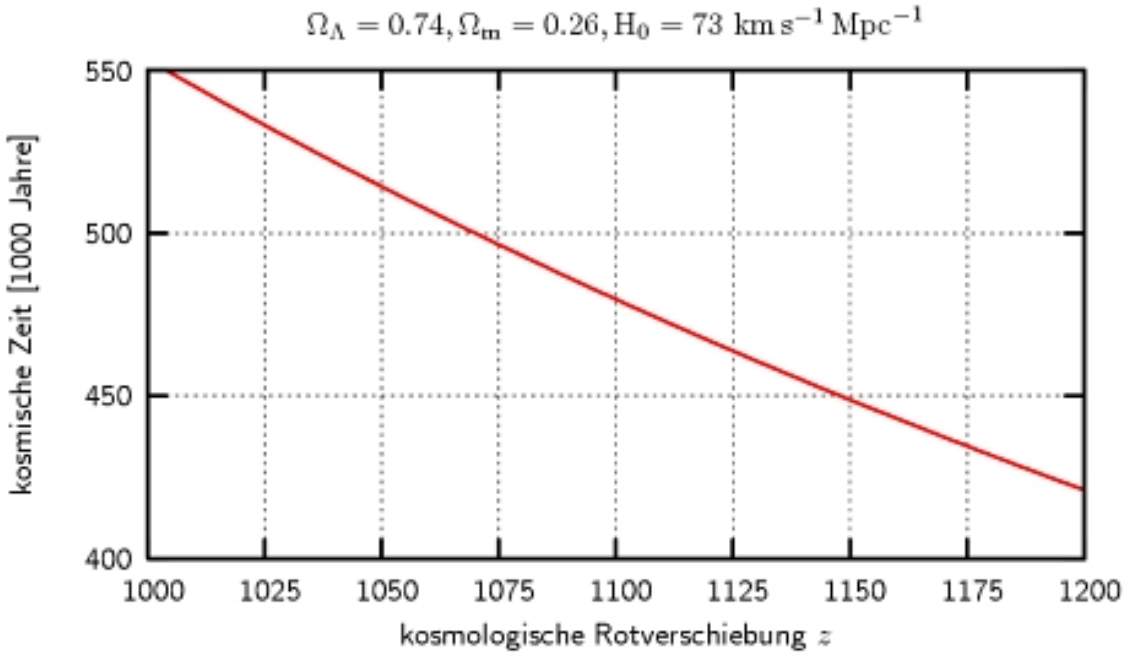

Abbildung 19.8: Kosmische Zeit und Rotverschiebung in der Rekombinationsepoche.

ungestört das frühe Universum passieren. Kosmologen sagen, dass die Strahlung von der Materie **entkoppelte** und deshalb das Universum (elektromagnetisch) durchsichtig wurde. Dieser Prozess wird bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ angesiedelt. Das entspricht einer Zeitspanne von etwa 400000 Jahren nach dem Urknall. Das Diagramm 19.8 zeigt den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Alter des Universums auf der Grundlage aktueller kosmologischer Parameter (Dunkle Energie 74%, Dunkle Materie 22%, baryonische Materie 4%, Hubble-Parameter und Krümmungsparameter).

19.13.2 elektromagnetische Wand bei z $\sim$ 1100

Da erst zu diesem Zeitpunkt eine elektromagnetische Transparenz gegeben war, ist es *prinzipiell unmöglich* mit elektromagnetischen Teleskopen (seien sie im IR, optisch, UV oder im Röntgen-/Gammabereich) darüber hinaus tiefer ins Universum zu schauen, also zu Rotverschiebungen größer als etwa 1100. Vermutlich ist das - wenn überhaupt - nur mit schwach wechselwirkenden Teilchen wie den Neutrinos, den WIMPs oder mit den Gravitationswellen möglich.

19.13.3 Das Älteste, was Menschen jemals sahen

Die **kosmische Hintergrundstrahlung** (engl. *cosmic microwave background*, CMB; *cosmic background radiation*, CBR) oder alternativ Drei-Kelvin-Strahlung genannt besteht gerade aus diesen ersten 'Ur-Photonen', die sich von der Materie entkoppelten. Sie wurden ausgesendet, als es noch keine Galaxien gab, nicht einmal Sterne! Die beobachtete Hintergrundstrahlung entstand also gerade bei $z \sim 1100$ und hat ihren Ursprung im heißen Urplasma. Physikalisch gesprochen ist es Plancksche Strahlung, also Wärmestrahlung. Die Photonen sind aus der Vernichtung von erzeugten Teilchen und Antiteilchen hervorgegangen. Dieses Teilchenkonglomerat bildete sich seinerseits am Ende der GUT-Ära aus dem Zerfall von X-Bosonen und Y-Bosonen.

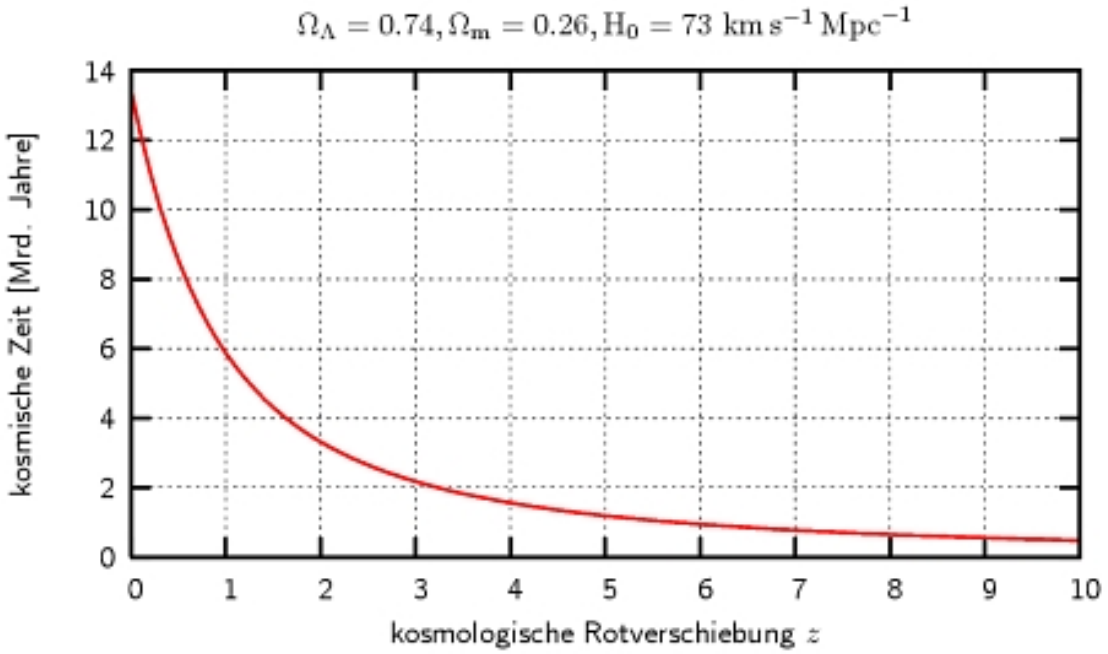

Abbildung 19.9: Kosmische Zeit und Rotverschiebung von $z = 0$ bis 10.

19.13.4 Warum hat das Urplasma eine Temperatur?

Das Plasma kurz vor der Rekombinationsära, das aus Photonen, Elektronen und Atomkernen bestand, hatte genügend Zeit, um durch thermischen Kontakt ins **thermische Gleichgewicht** zu streben. Daher hatte das Plasma 'vor Ort' dieselbe Temperatur von nur etwa 3000 Kelvin. Durch die **Expansion des Universums** kühlte sich die heiße Urstrahlung des Feuerballs auf den heute beobachtbaren Wert von 2.72 Kelvin ab. Dies ist leicht nachzurechnen, weil die Temperatur linear mit $1 + z$ abnimmt.

19.13.5 Von der Rekombination in die Reionisation

Vor der Rekombinationsepoche lag also ein **ionisiertes Universum** vor, in der Rekombinationsepoche hingegen ein neutrales. Im Anschluss, erst bei $z \sim 30$, bildeten sich die ersten Sterne (Population III), Galaxien und Quasare. Sie ionisierten mit ihrer hochenergetischen Strahlung *erneut* ihre kosmische, neutrale, primordiale Umgebung und leiteten die Epoche der **Reionisation** ein. Sie endete erst dann, als im Prinzip das ganze Universum ionisiert war, bei $z \sim 6$. Bei diesem Rotverschiebungswert war das Universum etwa eine Milliarde Jahre alt (vergleiche Abbildung 19.19). Dieser Rotverschiebungsbereich ist den astronomischen Beobachtern heute zugänglich. Sie beobachteten sogar das durch eine Gravitationslinse (häufig schwere Galaxienhaufen) verstärkte Licht einer Galaxie bei $z = 10$!

19.14 relativistisch

Das entsprechende Eigenschaftswort zur Relativitätstheorie. Es wird sowohl auf die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), als auch auf die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) bezogen. So meint z. B.

19.14.1 Beispiele

- ◇ eine *relativistische Geschwindigkeit* eine Geschwindigkeit die der des Lichts im Vakuum vergleichbar ist;
- ◇ eine *relativistische Mechanik* eine Mechanik, die so verallgemeinert wurde, dass die (Spezielle) Relativitätstheorie findet;
- ◇ eine *relativistische Kosmologie* eine Kosmologie, in der die ART voll berücksichtigt wird;
- ◇ eine *allgemein relativistische Magnetohydrodynamik* ein Regime, in dem die Magnetohydrodynamik ebenfalls die Effekte der gekrümmten Raumzeit miteinbezieht;
- ◇ etc.

19.15 Relativitätsprinzip

Ein fundamentales Prinzip der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) von *Albert Einstein*. Es besagt, dass in allen zueinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssystemen physikalische Gesetze gleiche Form und identische Messanordnungen gleiche Ergebnisse haben. Insbesondere lässt sich ein gleichförmig geradlinig bewegtes System nicht von einem relativ in Ruhe befindlichen System unterscheiden. Sie sind absolut gleichberechtigt. Diese Systeme heißen **Inertialsysteme**.

19.15.1 Beispiel

Als einfach Beispiel möge die Fahrt in einem Zug dienen: Solange der Zug weder abbremst, noch beschleunigt oder eine Kurve fährt (das bedeutet gerade *gleichförmig geradlinig*), kann man ohne weiteres eine Tasse Kaffee eingießen. Die Verhältnisse sind wie am Kaffeetisch zuhause, der sich relativ in Ruhe befindet. Aber bei **Beschleunigungen** wirken Trägheitskräfte, die das Eingießen einer Tasse Kaffee im fahrenden, beschleunigten Zug schon deutlich schwieriger gestalten.

19.15.2 Übergang zum Äquivalenzprinzip

Das Relativitätsprinzip wird beim Übergang von der SRT zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) auf das **Äquivalenzprinzip** verallgemeinert. Demzufolge sind dann gleichmäßig beschleunigte Systeme ohne Gravitationsfeld nicht von im Gravitationsfeld frei fallenden Systemen (FFO) zu unterscheiden. Träge und schwere Masse sind identisch. Einen Zusatz zum Äquivalenzprinzip stellt die **lokale Lorentzinvarianz** dar: Sie besagt, dass die lokale Physik in einem frei fallenden System in gekrümmter Raumzeit nicht zu unterscheiden sei von einem kräftefreien, gleichförmig geradlinig bewegten System in flacher Raumzeit.

19.16 Relativitätstheorie

Was ist die Relativitätstheorie? Es folgt ein Erklärungsversuch in zehn Sätzen:

Die Relativitätstheorie ist eine physikalische Theorie der hohen Geschwindigkeiten und der Anziehung von Massen. Einerseits besagt sie, dass das fundamentale Tempolimit in der Physik die Lichtgeschwindigkeit ist. Andererseits wird die Gravitation als geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit erklärt. Jede Energieform, zu der auch die Masse gehört, krümmt Raum und Zeit. Es bildet sich so eine 'Delle', die ihre Umgebung beeinflusst. So werden Teilchenbahnen und sogar Licht in der Nähe der Delle abgelenkt. Im Spezialfall verschwindender Energien gibt es keine Dellen, so dass Raum und Zeit geglättet bzw. flach sind. Teilchenbahnen sind dann gerade Linien. Die Relativitätstheorie definiert vertraute Größen völlig neu: Das Relative sind die Begriffe von räumlicher Länge, von der Zeit, vom Beobachter und so auch von der Wirklichkeit.

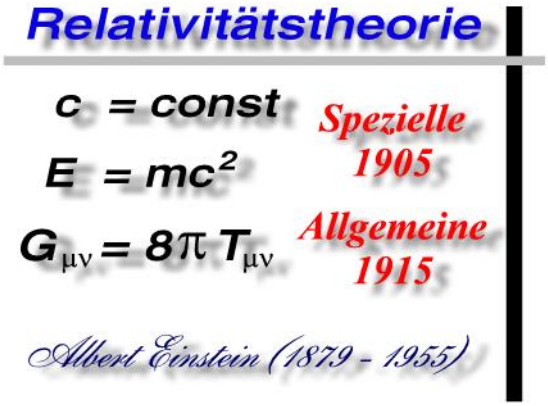

Abbildung 19.10: Zentrale Gleichungen der Relativitätstheorie Albert Einsteins.

19.16.1 Der Begründer der Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie ist eine der großen physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts neben der Quantentheorie. Wir verdanken sie **Albert Einstein** (1879 - 1955), einem Physiker, Erfinder, Patentbeamten und späteren Professor für theoretische Physik, der durch diese physikalische Theorie Weltruhm erlangte. Erstaunlicherweise erhielt er nicht für diese (sicher ungleich größere) Leistung den Nobelpreis für Physik, sondern für die Erklärung des Photoeffekts mit der *Lichtquantenhypothese* und zwar im Jahr 1921. Einstein griff dabei *Max Plancks* Strahlungsformel (für Schwarze Körper; siehe Planckscher Strahler) auf und forderte diskrete Einheiten der Energie für die elektromagnetische Strahlung. So waren die **Strahlungsquanten** geboren, die ersten Quanten, die in der Physik entdeckt wurden (Details unter Photon). Von diesem Standpunkt aus, hat Einstein die Quantentheorie mitbegründet. Womit er sich nie anfreunden konnte, war ein später folgender Aspekt der Quantentheorie: die Wahrscheinlichkeitsinterpretation in Form der Kopenhagener Deutung.

Die Zurückhaltung des Nobelpreiskomitees mag zeigen, wie unkonventionell und revolutionär Einsteins Vorschlag war. Dabei lagen Anfang der Zwanziger Jahre längst Belege für die Richtigkeit seiner Theorie vor: 1919 wurde bei einer Sonnenfinsternis seine Allgemeine Relativitätstheorie erstmals bestätigt. Einstein war seiner Zeit weit voraus: ein **Pionier der modernen Physik**. Er besaß den Mut den Max Planck nicht hatte, nämlich nicht nur die Wärmestrahlung zu quantisieren, sondern das *gesamte* elektromagnetische Spektrum von Licht. Er war kühn genug, eine Veränderung der *wirklichen* Zeit zu sehen und nicht nur in einer mathematischen Hilfsgröße wie Lorentz und Fitzgerald mutmaßten. Dieser Mut wurde mit Erfolg belohnt, ein Triumph, der bis über Albert Einsteins Tod hinaus andauert und junge Wissenschaftlergenerationen beschäftigt und für Jahrhunderte beschäftigen wird.

19.16.2 Die zwei Relativitätstheorien

In der Physik werden zwei Relativitätstheorien unterschieden: die Spezielle Relativitätstheorie (engl. *Special Relativity*, SR) oder kurz SRT im Deutschen abgekürzt (ab 1905) und die Allgemeine Relativitätstheorie (engl. *General Relativity*, GR), kurz ART, die Einstein 1916 veröffentlichte.

SRT

Die Relativitätstheorie ist ganz allgemein gesprochen eine Theorie der Bezugssysteme und beschreibt die Transformation physikalischer Größen, wenn man den Bezugsrahmen (das Koordinatensystem) wechselt. Die SRT ist dabei beschränkt auf Bezugssysteme, die sich gegeneinander *gleichförmig und geradlinig* bewegen. Wesentliche Postulate dieser Theorie waren die **Konstanz**

der Lichtgeschwindigkeit c in allen Bezugssystemen (erste Gleichung in Abb. 19.10), das **Relativitätsprinzip** und der Verzicht auf einen **Weltäther**, der bis dato als Trägermedium für Licht angesehen wurde. Wesentliche Folgen dieser Postulate sind die **Relativität von Länge und Zeit** und das berühmte **Masse-Energie-Äquivalent $\mathbf{E = mc^2}$** (zweite Gleichung in Abb. 19.10). Durch Einstein wurde unser Verständnis von Raum und Zeit radikal neu gestaltet: Phänomene wie Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion und die Verschmelzung von Raum und Zeit im **Raum-Zeit-Kontinuum** sind eine natürliche Konsequenz der Speziellen Relativitätstheorie.

ART

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wurde die Relativbewegung der Bezugssysteme zueinander auf *beschleunigte* Bewegungen verallgemeinert. Das Relativitätsprinzip wurde zum Äquivalenzprinzip erweitert. Der freie Fall in einem Gravitationsfeld ist auch eine beschleunigte Bewegung. Deshalb ist die ART eine **Theorie der Gravitation**, die die Newtonsche Physik als einen Spezialfall schwacher Gravitationsfelder entlarvt. Das Newtonsche Gravitationsfeld wird in Einsteins Theorie zur **gekrümmten Raumzeit**. Anders gesagt:

Gravitation wird geometrisch gedeutet.

Der Begriff der **Energie** konnte mit dem der **Raumkrümmung** in Verbindung gebracht werden: Energie und Masse sind äquivalent (siehe SRT) und beide krümmen die Raumzeit. Die im Allgemeinen gekrümmte Raumzeit kann mathematisch als metrischer Tensor (siehe auch Metrik) oder als Linienelement dargestellt werden. Die geeignete Mathematik, um Gravitationseffekte zu berechnen, ist die *Riemannsche Differentialgeometrie*. Die gegenseitige, nicht-lineare Einflussnahme von Energie und Krümmung der Raumzeit spiegelt sich kompakt notiert in tensorieller Form in den **Einsteinschen Feldgleichungen** (dritte Gleichung in Abb. 19.10) wider. Das ist die zentrale Gleichung von Einsteins ART.

19.16.3 Regimes der Relativitätstheorien

Die Relativitätstheorie ist ein wesentlicher Pfeiler der modernen Physik. So kommt die Spezielle Relativitätstheorie dort zum Einsatz, wo schnelle Bewegungen stattfinden, und zwar vergleichbar schnell wie das Licht im Vakuum, kanpp 300000 km/s. Makroskopische Gegenstände wie ein Auto, ein Flugzeug oder der Mensch können sich kaum so schnell bewegen. Man muss schon in den mikroskopischen Bereich zu leichten Teilchen wie Elektronen, Neutrinos, Protonen oder Atomkernen vordringen, um in das Regime der SRT zu kommen. Die **Teilchenphysik** ist also ein typischer Bereich der Physik, wo mit *speziell relativistischen Effekten* gerechnet werden muss, z. B. bei Experimenten in Teilchenbeschleunigern oder bei der kosmischen Strahlung.

Die Allgemeine Relativitätstheorie macht besonders dann bei der Gravitation bessere Vorhersagen, wenn **Effekte höherer Ordnung** eine Rolle spielen, also wenn die Gravitation besonders exakt vermessen wird. So ist Einsteins Theorie die bessere Wahl bei der Berechnung der *Periheldrehung des Merkurs*, der *Lichtaberration an der Sonne* und bei Gravitationslinseneffekten. Die ART sagt aber auch Effekte voraus, die es in der Newtonschen Gravitation **gar nicht gibt**, wie Frame-Dragging (bzw. Lense-Thirring-Effekt) und Gravitationswellen - beides wurde experimentell bestätigt! Das Paradebeispiel für die Domäne der ART ist natürlich die **starke Gravitation**. Damit ist gemeint, dass Einsteins Theorie sehr starke Gravitationsfelder bestens beschreibt, z. B. die Gravitation von kompakten Objekten wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Das sind demnach alles *allgemein relativistische Effekte*.

19.16.4 Gravitation im ganz großen Stil

Mit Einsteins ART war erstmals eine **relativistische Kosmologie** möglich, d. h. eine adäquate physikalische Beschreibung des Universums als Ganzes. Mit geeigneten Annahmen kann man die Einsteinsche Feldgleichung in einen Satz anderer Gleichungen, die *Friedmann-Gleichungen*,

umwandeln. Sie beschreiben viele verschiedene *Modell-Universen* - sogar dynamische Universen. Diese Universen sind Lösungen der Friedmann-Gleichungen und werden Friedmann-Weltmodelle genannt. Eines davon beschreibt gerade unser dynamisches, sich beschleunigt ausdehnendes Universum, das dominiert wird von der kosmologischen Konstante Λ, die ebenfalls 1917 von Einstein erfunden wurde.

19.16.5 Grenzen der Relativitätstheorie

Jede Theorie hat ihre Grenzen - auch Einsteins Theorie. Sie ist eine klassische Theorie, in dem Sinne, dass *Quantisierung* und Heisenbergsche Unschärfe keinen Platz in der Relativitätstheorie haben. So ist die Raumzeit in der ART **unquantisiert**. Deshalb tauchen im Grenzfall starker Gravitationsfelder und kleiner Raumskalen Probleme auf, die signalisieren, dass die Relativitätstheorie alleine keine adäquate Beschreibung mehr liefern könnte. Bei Schwarzen Löchern, die Lösungen der Feldgleichungen der ART sind, gibt es solche Grenzen der Beschreibbarkeit in Gestalt der intrinsischen Singularitäten (*Krümmungssingularitäten*) und auch am Ereignishorizont Schwarzer Löcher. Der bekannte Relativitätstheoretiker *John A. Wheeler* sieht im Auftreten dieser Krümmungssingularitäten einen Zusammenbruch von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie! Diese Meinung teilen jedoch nicht alle Physiker.

In den 1970er Jahren gelang es einem Theoretiker wesentliche Disziplinen der Physik zu verknüpfen: Allgemeine Relativitätstheorie, Quantentheorie und Thermodynamik. Die Rede ist von *Stephen W. Hawking*, der damals die heute nach ihm benannte Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher ausgerechnet hat. Bislang wurde diese Strahlungsform zwar noch nicht experimentell bestätigt, aber die physikalischen Eigenschaften des Effekts sind viel versprechend, umwälzend und von theoretischer Konsistenz und Schönheit. Es ist wichtig dabei zu betonen, dass Hawking einen semi-klassischen Zugang gefunden hat. Er hat in der quantentheoretischen Rechnung aber **nicht die Raumzeit quantisiert**.

Die Physiker sind gerade auf der Suche nach einer solchen Quantengravitation. Aktuell gibt es zwei Alternativen, die auf der Bewährungsprobe stehen: die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation (LQG). Letztgenannte Theorie ist deutlich näher an den Konzepten, die die ART diktiert, z. B. der Diffeomorphismusinvarianz. Die LQG zielt 'nur' auf einer Quantisierung der Raumzeit in so genannte Wilson-Loops ab. Die Stringtheorien hingegen zielen auf eine Vereinheitlichung aller vier Naturkräfte ab und fordert eine Quantisierung der Gravitation in Gestalt des Gravitons.

19.16.6 Relativitätstheorie hat sich vielfach bewährt

Trotz dieser gerade beschriebenen Einschränkungen, die Einsteins Theorie hat, gehört sie mit der Quantentheorie zu den mächtigsten und erfolgreichsten Theorien der modernen Physik. In zahlreichen Experimenten haben die Relativitätstheorien die Natur glänzend vorhergesagt und erklärt. Diese beiden Theorien des 20. Jahrhunderts sind im Sinne der Popperschen Wissenschaftstheorie *bewährte* Theorien. Davon zeugen auch zahlreiche wissenschaftliche sowie technologische Anwendungen und kommerzielle Produkte.

19.16.7 $E = mc^2$ im Test

Eine aktuelle, experimentelle Überprüfung der Relativitätstheorie sei herausgegriffen (im Wissensportal befinden sich viele weitere Beispiele), und zwar der Test des Masse-Energie-Äquivalents: eine Gruppe internationaler Forscher hat dazu kernphysikalische Prozesse bei den Atomkernen der Elemente Silizium (Si) und Schwefel (S) untersucht. Die Isotope Si-28 und S-32 werden mit Neutronen (die mit den Protonen zu den Nukleonen gehören) beschossen. Die Atomkerne fangen jeweils ein Neutron ein und wandeln sich entsprechend zu Si-29 und S-33 um. Diese angeregten Atomkerne zerfallen wiederum über den Gamma-Zerfall, d. h. sie senden Gammaquanten einer bestimmten Energie aus. Diese Strahlungsenergie wurde exakt in Streuprozessen in Kristallen vermessen. Dabei stellte sich heraus, dass die Energie der Gammaquanten gerade der Massendifferenz entspricht, die die zugehörigen

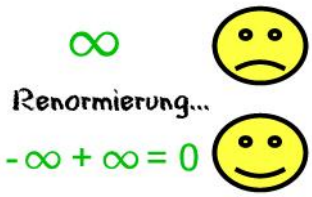

Abbildung 19.11: Renormierung: Die Beseitigung von Unendlichkeiten macht Physiker glücklich!

Atomkerne vor bzw. nach der Aussendung der Strahlung haben. Die Massen der Atomkerne lassen sich durch ein Massenspektrometer sehr genau bestimmen - hier wurde die Zyklotronfrequenz in einer Ionenfalle gemessen, aus der die jeweilige Masse folgte. Ergebnis: Der Unterschied von linker zu rechter Seite in der Gleichung $E = mc^2$ ist **maximal 0.00004%** - also im Prinzip sind beide Seiten fast identisch (*Rainville et al.*, Nature 2005)!

19.16.8 Weiteres im Wissensportal

- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ Vortrag: Einsteins Universum - Das Geheimnis der Dunklen Energie
- ◇ Web-Essay: Brauchen wir Grundlagenforschung?
- ◇ Web-Essay: Alles graue Theorie?

19.17 Renormierung

Die Renormierung oder *Renormalisierung* ist eine Prozedur in den Quantenfeldtheorien, die auftretende **Unendlichkeiten** beim Lösen quantenfeldtheoretischer Gleichungen beseitigt.

19.17.1 Welche Unendlichkeiten?

In den Gründerjahren der Quantentheorie und den darauf aufbauenden Quantenfeldtheorien, in den Dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts, tauchten erstmals diese Unendlichkeiten auf: innerhalb eines einzelnen Elektrons tritt eine elektrostatische Abstoßung auf, die in einer **unendlichen Selbstenergie** resultiert. Typischerweise geschieht das, wenn ein Teilchen ein Photon oder ein anderes Eichboson emittiert und wieder absorbiert. In den Feynman-Diagrammen treten dann **Schleifen** (engl. *loops*) auf, und es handelt sich um Feynman-Graphen höherer Ordnung. Der physikalische Grund für die Unendlichkeiten besteht darin, dass es unendlich viele Möglichkeiten gibt, um Energie oder Impuls von einem Teilchen auf ein anderes zu transferieren.

19.17.2 Wolke virtueller Teilchen

Auch bei anderen Größen begegneten die Quantenphysiker Unendlichkeiten, zum Beispiel den **Wirkungsquerschnitten**, also der Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer Teilchenwechselwirkung. Es gibt noch eine weitere, anschauliche Erklärung für die Unendlichkeiten: ein Teilchen wie das Elektron ist in eine 'Wolke' **virtueller Teilchen** gehüllt. Dies sind Teilchen, die im Rahmen der *Heisenbergschen Unschärfe* (formuliert als Energie-Zeit-Unschärfe) kurzzeitig Energie vom Quantenvakuum erhalten und so virtuell - das heißt nicht messbar - existieren. Eine Messung kann nun nicht zwischen Elektron und virtuellen Teilchen unterscheiden und liefert als Messwert

deren zusammen genommene Werte für Masse oder Ladung beispielsweise. Das 'nackte Elektron' hat der Theorie zufolge keine definierte Masse und Ladung!

19.17.3 Die Rettung: Renormierung

Das hört sich nun nach einer Sackgasse für die Quantenfeldtheorien an, war es historisch gesehen zunächst auch, bis Ende der Vierziger Jahre *Richard P. Feynman* (1918 - 1988), *Julian Schwinger* (1918 - 1994), *Sin-Itiro Tomonaga* (1906 - 1979) und *Freeman J. Dyson* (* 1923) unabhängig voneinander einen Ausweg fanden: **die Renormierung**.

Dabei werden fundamentale Parameter neu definiert, also renormiert. Zum Beispiel wird die Masse oder Elementarladung korrigiert und beseitigt dadurch die auftretende Unendlichkeit. Was sich abenteuerlich anhört, erwies sich als mächtiger Apparat in den Quantenfeldtheorien. Die ersten drei genannten 'Renormalisten' erhielten für diese Leistung den **Nobelpreis für Physik 1965**. Die Renormierung wurde historisch erstmals bei der Quantenelektrodynamik angewandt, funktioniert aber konzeptionell bei allen Quantenfeldtheorien.

Für die Renormierungen gibt es **Renormierungstransformationen**, die die Eigenschaften einer Gruppe erfüllen. Diese *Renormierungsgruppe* versucht man auf die Quantenchromodynamik anzuwenden.

19.18 Reverberation Mapping

Reverberation Mapping gehört zu den vielen Begriffen, die sich nicht treffend ins Deutsche übersetzen lassen: **Lichtlaufzeit-Kartierung** trifft vielleicht das Wesen der Methode, aber die Fachwelt spricht nur von *Reverberation Mapping*.

19.18.1 breite Emissionslinien von Galaxien

Es handelt sich dabei um ein Verfahren, um die Massen und den Drehimpuls von Schwarzen Löchern zu ermitteln. Dies funktioniert folgendermaßen: Schwarze Löcher sammeln Material aus der Umgebung mittels Akkretion auf. In Galaxien und besonders in aktiven Galaxien mit Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) beobachten Astronomen die so genannte *Broad Line Region* (BLR), ein Gebiet mit breiten Emissionslinien. Die BLR sind nichts anderes als leuchtende, bewegte Materiewolken, die charakteristische Emissionslinien im Bereich der optischen und ultravioletten Strahlung aussenden. Die Verbreiterung rührt daher, weil die Wolken sich bewegen: aufgrund des **Doppler-Effekts** wird eine (im Ruhesystem der Wolke) scharfe Spektrallinie verschmiert, weil sich die Bewegung in einer Blauverschiebung (Bewegung in Richtung Beobachter) und einer Rotverschiebung (Bewegung vom Beobachter weg) im entfernten Beobachtersystem niederschlägt. Die **Linienbreite** kann demnach als Maß für die Geschwindigkeit der BLR herangezogen werden.

19.18.2 entfernte Primärquelle beleuchtet Wolken

Der zweite Parameter ist der Abstand der Materiewolke vom zentralen Schwarzen Loch. Es wird vorausgesetzt, dass die Bewegung der Wolke durch die gravitative Bindung an die dunkle Zentralmasse bewerkstelligt wird. Im bewährten astrophysikalischen Modell nimmt man nun an, dass die BLR deshalb Emissionslinien aussendet, weil die hochenergetische, elektromagnetische Strahlung in der Umgebung sie dazu anregt. Die Primärquelle dieser Strahlung ist das Zentrum des AGN. Es beleuchtet die BLR, die sich typischerweise in einem Abstand von bis zu zehn Lichttagen von der Zentralmasse befindet. Reverberation Mapping nutzt nun im Wesentlichen die Messung von **Lichtlaufzeiten** aus: Der beobachtende Astronom misst einerseits *direkt* die Strahlung der Primärquelle und andererseits *zeitversetzt* aufgrund endlicher Lichtlaufzeiten zwischen Primärquelle und BLR *indirekt* die Strahlung der Linie. In diesem zeitlichen Versatz steckt die Information über die **Geometrie der BLR**. Primärstrahlung (AGN bzw. Galaxiezentrum) und Antwortstrahlung (Linie) dienen zur Kartographie der Materiewolken, insbesondere zur Abschätzung ihrer Größe und ihres Abstands zur Zentralmasse.

19.18.3 Masse aus Geschwindigkeit und Abstand

Astronomen nehmen deshalb Kontinuumsspektren und variable Emissionslinien auf und extrahieren daraus mittels Reverberation Mapping die Zentralmassen. Die Dopplergeschwindigkeit v (oder auch mit σ bezeichnet) aus der Breite der Linie und die Größenabschätzung r gehen in die Berechnung der Masse Schwarzer Löcher mithilfe des **Virial-Theorems** ein:

$$M \approx r\sigma^2/\mathrm{G}.$$

Man kann also dieses Verfahren zu den **kinematischen Methoden** zählen, um eine Evidenz für Schwarze Löcher abzuleiten.

Eine gewichtige Rolle spielt Reverberation Mapping (neben der **M-σ-Relation**) bei der Bestimmung von Massen der supermassereichen Schwarzen Löcher in AGN.

19.18.4 auch Anwendung in der Röntgenastronomie

In der Röntgenastronomie kann die Reverberation-Mapping-Technik dazu verwendet werden, um die Geometrie der Korona abzuleiten. Hier geht man gewissermaßen umgekehrt vor, als bei den BLR beschrieben wurde: Allgemeiner gesprochen kann man die BLR als **Reflektor** auffassen, der die Primärstrahlung aufnimmt und als 'Antwort' die Linie emittiert. Die Geometrie der BLR ist eine Unbekannte, die ermittelt werden soll. Umgekehrt wird nun in der Röntgenastronomie die Geometrie des Reflektors als bekannt vorausgesetzt. Hier ist es nämlich die Geometrie des Akkretionsflusses in der Nähe des Loches. Typischerweise wird hier die flache Standardscheibe angenommen. Sie übernimmt die Rolle der BLR und reflektiert die Primärstrahlung (hier von der Korona) und gibt sie reprozessiert in Form der relativistischen Eisenlinie wieder ab. Die Röntgenastronomen sind an der **Geometrie der Korona** interessiert. Sie versuchen Gestalt und Größe mittels Reverberation Mapping der variablen Eisenlinie und des gemessenen koronalen Kontinuums zu ermitteln. In die Variabilität der Fluoreszenzlinie geht nicht nur eine unterschiedliche Beleuchtung durch die Korona ein. Es ist sinnvoll anzunehmen, dass auch die Standardscheibe die Linie nicht immer auf die gleiche Weise reflektiert. Denn die Standardscheibe hat unterschiedliche Temperaturen - je nachdem, ob man mehr den heißen Innenrand oder den kühleren Außenrand betrachtet. Entsprechend ist die Scheibe auch unterschiedlich ionisiert. Astrophysiker sagen dann, dass die *Standardscheibe ein variables Ionisierungsprofil* habe. Diese zusätzliche Physik erschwert die Reverberation-Mapping-Analyse - sowohl in der Röntgenastronomie, als auch in der optischen Astronomie.

19.19 Reynolds-Zahl

Dies ist eine der charakteristischen, dimensionslosen Zahlen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik, benannt nach dem englischen Physiker *Osborne Reynolds* (1842-1912), einem der Pioniere der Hydrodynamik.

19.19.1 laminare vs. turbulente Strömung

Die Reynolds-Zahl *Re* ist ein Maß für den Strömungswiderstand in viskosen (zähen) Flüssigkeiten. Bei der **kritischen Reynolds-Zahl** geht eine **laminare Strömung** in eine **turbulente Strömung** über. Der Übergangsbereich ist durch Instabilitäten in der Strömung gekennzeichnet. Die kritische Reynolds-Zahl markiert also den Gültigkeitsbereich des **Gesetzes von Hagen-Poiseuille**, das nur für laminare Strömungen gilt.

19.19.2 Berechnung der Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl in einer Strömung durch eine Röhre berechnet sich als Produkt aus Rohrdurchmesser, Dichte des Fluidums und mittlerer Geschwindigkeit der Strömung, geteilt durch die Viskosität.

Je höher die Viskosität (Zähigkeit) des Fluidums (Flüssigkeit, Gas), desto kleiner ist demnach die Reynolds-Zahl. Andererseits wächst die Reynolds-Zahl linear mit der charakteristischen Geschwindigkeit der Strömung.

19.20 RGB-Bild

Siehe dazu unter dem Eintrag Falschfarbenbild.

19.21 Ricci-Tensor

Der Ricci-Tensor ist ein Tensor 2. Stufe und wird gebildet, indem man den Riemann-Tensor (4. Stufe) über den metrischen Tensor verjüngt:

$$R_{\kappa\lambda} = R^{\mu}{}_{\lambda\mu\kappa} = g^{\mu\nu} R_{\nu\kappa\mu\lambda}.$$

Eine weitere Verjüngung nach dieser Prozedur macht aus dem Ricci-Tensor den **Ricci-Skalar** oder die **skalare Krümmung**

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}.$$

Aus Ricci-Tensor und Ricci-Skalar besteht ein anderer, wichtiger Tensor der Allgemeinen Relativitätstheorie: der Einstein-Tensor. Dieser wiederum macht die rechte, die *geometrische* Seite der Einsteinschen Feldgleichungen aus.

19.22 Riemann-Tensor

Der Riemann-Tensor oder Riemann-Christoffel-Tensor ist einer der wichtigsten Tensoren in *Albert Einsteins* Allgemeiner Relativitätstheorie (ART). Die alternative Bezeichnung **Krümmungstensor** offenbart seine physikalische Interpretation: er ist ein Maß für die **Krümmung** der Raumzeit.

19.22.1 Krümmung der Raumzeit

Die Krümmung verändert sich im Allgemeinen in der Raumzeit von Raumzeitpunkt zu Raumzeitpunkt. Die Physiker nennen das eine **gekrümmte Raumzeit**. Anschaulich mag man sich diese Raumzeit vorstellen, wie ein Gebirge mit Bergen und Tälern. Die Krümmungen werden - und das ist die Kernaussage der ART - durch eine Form von Energie, z. B. Masse, hervorgerufen. Die Information über die Energieform steckt in einem zweiten wichtigen Tensor der ART, dem Energie-Impuls-Tensor. Objekte, Testmassen oder auch Licht, die sich nun durch die gekrümmte Raumzeit (kräftefrei) bewegen, bleibt nichts anderes übrig, als den Krümmungen zu folgen. Die sich ergebenden, gewundenen Wege heißen Geodäten. Der gerade beschriebene Sachverhalt wird mathematisch mit den Einsteinschen Feldgleichungen ausgedrückt. Diese Gleichungen koppeln Energie-Impuls-Tensor und Riemann-Tensor. Prosaisch formuliert besagt dieser Satz gekoppelter, nichtlinearer, partieller Differentialgleichungen:

Masse und Energie sagen der Raumzeit wie sie sich zu krümmen hat, und die Raumzeit sagt der Energieform, wie sie sich zu bewegen hat.

19.22.2 Der Krümmungstensor - der komplizierteste Tensor der ART

Dringt man tiefer in die Tensorrechnung der ART ein, so stellt man fest dass der Riemannsche Krümmungstensor ein Tensor 4. Stufe ist. Diese Gebilde sind recht komplex und nicht leicht in der Handhabung: Denn der Krümmungstensor der ART hat $4^4 = 256$ Komponenten! Zum Glück weist der Riemann-Tensor einige Symmetrien auf, so dass er in den vier Dimensionen der klassischen ART (Länge, Breite, Höhe, Zeit) **20 voneinander unabhängige Komponenten** hat.

19.22.3 Definition

Wie die Definitionsgleichung zeigt, besteht der Riemann-Tensor **R** aus partiellen Ableitungen der Christoffel-Symbole ('Gammas, Γ, auch *Levi-Civita-Zusammenhänge* genannt)

$$R^{\kappa}_{\lambda\mu\nu} = \partial_\mu \Gamma^{\kappa}_{\lambda\nu} - \partial_\nu \Gamma^{\kappa}_{\lambda\mu} + \Gamma^{\sigma}_{\lambda\nu}\Gamma^{\kappa}_{\sigma\mu} - \Gamma^{\sigma}_{\lambda\mu}\Gamma^{\kappa}_{\sigma\nu}.$$

Diese wiederum sind partielle Ableitungen der Metrik. Im Krümmungstensor stecken demnach zweite Ableitungen der Metrik $\mathbf{g}_{\mu\nu}$, oder man könnte auch sagen zweite Ableitungen der Mannigfaltigkeit. Auf diese Weise ist der Riemann-Tensor ein Maß für Krümmungen.

19.22.4 Teamarbeit von Einstein & Grossmann

Albert Einstein entdeckte die physikalische Relevanz des Krümmungstensors für seine Gravitationstheorie. Er griff dabei die Arbeiten des Mathematikers *Georg Friedrich Bernhard Riemann* (1826 - 1866) auf, der die fundamentalen Arbeiten seines Doktorvaters *Carl Friedrich Gauß* (1777 - 1855) weiterentwickelte. Der Mathematiker und Kommilitone Einsteins, *Marcel Grossmann*, gab den entscheidenden Hinweis auf die damals neuen Aspekte der Riemannschen Differentialgeometrie. Berühmt wurde die Bemerkung in Einsteins Züricher Notizbuch 'Grossmann Tensor vierter Mannigfaltigkeit', wo Einstein 1912 den Riemannschen Krümmungstensor identifizierte.

19.22.5 flach: R = 0

Verschwindet der Riemann-Tensor, so heißt die Metrik **flach** und weist daher keine Krümmungen auf.

19.22.6 Symmetrien des Riemann-Tensors

Der Riemann-Tensor besitzt eine Reihe von Symmetrien unter Vertauschung seiner vier Indizes, die teilweise auf die Symmetrie des metrischen Zusammenhangs (also der Christoffel-Symbole) zurückgehen. Daneben gibt es noch eine Reihe von *Differentialidentitäten*, die so genannten **Bianchi-Identitäten**, die der Riemann-Tensor erfüllt. Die Gültigkeit und Existenz von Bianchi-Identitäten ist tief verwurzelt in der Natur der Gravitation. Eine unglaublich interessante Diskussion, die diesen Sachverhalt beleuchtet, findet sich unter dem Eintrag Bianchi-Identitäten.

19.22.7 Verjüngungen des Riemann-Tensors und Invarianten

Die Verjüngungen des Riemann-Tensors heißen Ricci-Tensor und Ricci-Skalar (oder skalare Krümmung). Die innere Krümmung kann man als Skalar berechnen, indem man den Riemann-Tensor mit sich selbst kontrahiert, also ein Produkt bildet von kovarianten und kontravarianten Riemann-Tensor 4. Stufe. Dieses Produkt heißt **Riemannsche Invariante** (engl. *Riemann invariant*, *Riemannian invariant*, auch *Kretschmann scalar*, dt. Kretschmann-Skalar). Sie hat die nützliche Eigenschaft, dass sie unabhängig (invariant) vom zur Berechnung gewählten Koordinatensystem ist! Es ist also egal, welche Koordinaten man zur Berechnung auswählt: die Invariante hat immer denselben Wert.

19.22.8 Wo sind Krümmungssingularitäten?

Die Riemannsche Invariante einer Raumzeit eignet sich zum Auffinden ihrer echten, nicht behebbaren Singularitäten. Denn dort, wo die Riemannsche Invariante nicht definiert ist, wo 'durch eine Null geteilt wird', liegt eine unendliche Krümmung vor. Die Relativisten bezeichnen das als Krümmungssingularität. Dort versagt eine physikalische Beschreibung. Es zeichnet sich aktuell ab, dass eine Quantengravitation wie die Loop-Quantengravitation (Quantengeometrie) das Auftreten dieser Unendlichkeiten zu beheben vermag. Eine Quantisierung der Raumzeit scheint Krümmungssingularitäten zu verhindern!

Doch bleiben wir bei der klassischen, unquantisierten ART: Als Beispiel zum Auffinden von Singularitäten kann man die Raumzeit einer Punktmasse betrachten. Sie wird durch die Schwarzschild-Lösung beschrieben. Nicht rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher werden im Rahmen der ART auch durch die Schwarzschild-Lösung repräsentiert. Möchte man sich die Riemannsche Invariante der Schwarzschild-Metrik beschaffen, muss man die metrischen Koeffizienten, die Komponenten des metrischen Tensors, ableiten. Daraus folgen in einem ersten Schritt die Christoffel-Symbole. Gemäß der Gleichung oben folgen aus den berechneten Christoffel-Symbolen die Komponenten des Riemann-Tensors. Die Rechenarbeit ist im Falle der Schwarzschild-Lösung noch gut zu bewältigen, weil sie eine hohe Symmetrie (Kugelsymmetrie) aufweist. Hat man sich einen Riemann-Tensor beschafft, so folgt der entsprechend dazu duale Tensor durch 'Überschieben' des metrischen Tensors (Kontraktion). Schließlich liegt der Riemann-Tensor in kontra- und kovarianter Form vor und kann miteinander multipliziert werden, um die Riemannsche Invariante zu erhalten.

19.22.9 Die echte Schwarzschild-Singularität

Die Riemannsche Invariante der Schwarzschild-Geometrie hat den Wert $48\,M^2/r^6$, wobei M die Masse der Punktmasse oder auch des Schwarzen Loches ist. Diese Größe divergiert im Ursprung bei $r = 0$, so dass hier die echte Singularität der Schwarzschild-Lösung ist. Es handelt sich um eine **Punktsingularität**. Im Unendlichen, bei sehr großen Werten von r, verschwindet die Riemannsche Invariante, d. h. die Krümmung geht gegen null und die Raumzeit wird asymptotisch flach.

19.22.10 Die echte Kerr-Singularität

Die gleiche Rechenprozedur kann man für eine weniger symmetrische Raumzeit durchführen, z. B. für rotierende Schwarze Löcher, die durch die Kerr-Lösung dargestellt werden. Hier liegt eine Axialsymmetrie vor, die die Berechnung der Riemannschen Invarianten zu einem deutlich längeren Unterfangen macht. Die Riemannsche Invariante der Kerr-Geometrie ist entsprechend komplizierter und lautet (*Glass & Krisch*, Class. Quantum Grav. 21, 5543, 2004):

$$R_{\kappa\lambda\mu\nu}\,R^{\kappa\lambda\mu\nu} = 48\,\frac{M^2}{r^6}\,\frac{1-(a/r)^2\cos^2\theta}{\Big(1+(a/r)^2\cos^2\theta\Big)^6}\,\Big(1-14\,(a/r)^2\cos^2\theta+(a/r)^4\cos^4\theta\Big)$$

Wie man sofort sieht, geht diese Invariante für $a = 0$ in die der Schwarzschild-Lösung über. Um das Wesen der echten Singularität der Kerr-Lösung herauszufinden, ist nun zu diskutieren, wann der Nenner der Riemannschen Invarianten verschwindet. Denn der Grenzwert von etwas Konstantem durch null geht gegen unendlich und markiert die Krümmungssingularität. Umschreiben liefert eine Bedingung, die besagt, dass die Boyer-Lindquist-Funktion ρ verschwinden muss. Das ist gegeben, wenn gleichzeitig die Bedingungen $r = 0$ und $\theta = \pi/2$ (bzw. 90°) erfüllt sind. Besser ist dieses Ergebnis mit Kerrs ursprünglichem, kartesischen Koordinatensystem zu interpretieren: Es liefert $x^2 + y^2 = a^2$ und $z = 0$, also eine Ringsingularität, die genau in der Äquatorialebene liegt.

19.22.11 Gravitationstrichter

In Abbildung 19.12 ist die gekrümmte Schwarzschild-Geometrie auf einem Computer visualisiert worden sind (*Müller* 2005). Das Bild enthält zweierlei Informationen: die Krümmung der Raumzeit (blaue 'Gummihaut') und die gravitativ bedingte Zeitdilatation (farbige Isokonturlinien). Es handelt sich also um einen so genannten **Gravitationstrichter**. Der tiefe blaue Schlund im Zentrum besagt gerade, dass die Krümmung im Zentrum des Loches unendlich wird. Der Schlund schließt sich unten nicht! Das markiert den Ort der zentralen Punktsingularität. Die Uhren ticken aus der Sicht eines Außenbeobachters immer langsamer und bleiben schließlich am Ereignishorizont (hier identisch mit dem Schwarzschild-Radius, der innerste blaue Ring) stehen. Die Farbskala am Bildrand zeigt den Wertebereich der Lapse-Funktion (auch Rotverschiebungsfaktor genannt), die zwischen 1 (asymptotisch flache Raumzeit) und 0 (stark gekrümmte Raumzeit am Horizont) variiert.

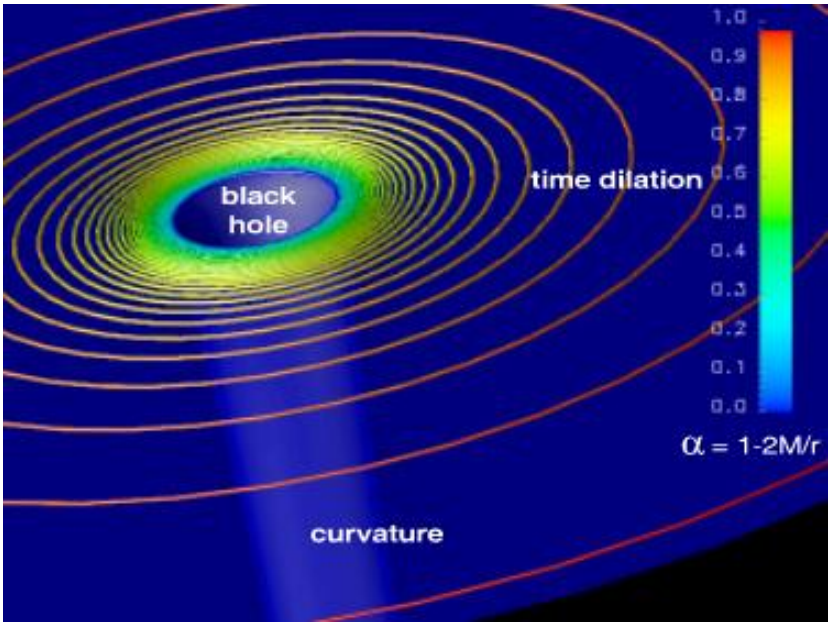

Abbildung 19.12: Gravitationstrichter: Krümmung und gravitative Zeitdilatation.

Ein einfallendes Objekt würde also immer langsamer werden und bei Erreichen des Horizonts (von außen gesehen) stehen bleiben. Das Abstoppen ist allerdings nicht mehr sichtbar, weil jede Strahlung unendlich stark rotverschoben wird, die vom Horizont kommt. Die Ursache dafür ist die Gravitationsrotverschiebung. Es sei angemerkt, dass aus der Sicht des einfallenden Objekts, die zentrale Punktsingularität in endlicher Zeit erreicht wird. Das ist eben der gewichtige Unterschied der Bezugssysteme und das Wesen der Relativitätstheorie.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Bild nicht um eine Visualisierung handelt, die einem realen Foto eines Schwarzen Loches gleichkommt - es ist nur eine Darstellung mathematischer Größen in Falschfarben. Einem echten Foto kommt die relativistische Ray-Tracing-Simulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Loch im Eintrag Schwarzes Loch nahe, das ebenfalls als Falschfarbenbild dargestellt wird.

19.23 Ringsingularität

Die Ringsingularität ist ein exklusives Merkmal rotierender Schwarzer Löcher, also Schwarzer Löcher der Kerr-Familie. Das, was bei der Schwarzschild-Lösung eine Punktsingularität ist, die nicht durch eine Wahl anderer Koordinaten zu beheben ist, wird bei rotierenden Löchern zu einer Ringsingularität 'aufgeblasen'. In diesen echten Singularitäten wird die Krümmung unendlich.

19.23.1 Singularitäten erzeugen die Gravitation

Mathematisch leitet man die Ringsingularität am besten mit pseudo-kartesischen Koordinaten ab.

$$\begin{aligned} ds^2 &= dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \\ &\quad -\frac{2Mr^3}{r^4 + a^2 z^2}\left(dt - \frac{1}{r^2 + a^2}\left[r(x\,dx + y\,dy) + a(x\,dy - y\,dx)\right] - \frac{z}{r}\,dz\right)^2 \end{aligned}$$

In dieser Form leitete *Roy P. Kerr* historisch die Lösung rotierender Massen 1963 ab. Die echten oder intrinsischen Singularitäten sind die **Quellen des Gravitationsfeldes** Schwarzer Löcher. Man

darf nicht vergessen, dass es sonst nur ein Vakuum gibt, weil Schwarzschild- und Kerr-Lösung Vakuumlösungen der Einsteinschen Feldgleichungen sind.

19.23.2 Wie findet man die Singularitäten?

Im Allgemeinen findet man Krümmungssingularitäten, indem man die **Riemannschen Invarianten** ausrechnet. Dabei handelt es sich um ein Produkt aus kontravariantem und kovariantem Riemann-Tensor. Unter diesem Lexikoneintrag findet man eine genaue Beschreibung der mathematischen Prozedur. Die durch Koordinaten festgelegten Orte, wo die Invarianten divergieren ('Division durch null'), sind gerade die Krümmungssingularitäten. So ist dieses Produkt für die Schwarzschild-Lösung proportional zu r^{-6}, so dass als intrinsische Singularität die Punktsingularität in $r = 0$ resultiert.

In der Kerr-Geometrie läuft diese Behandlung darauf hinaus, die Nullstellen einer bestimmten Boyer-Lindquist-Funktion (ρ) zu diskutieren. Sie wird genau dann null, wenn *gleichzeitig* die Bedingungen $r = 0$ **und** $\theta = \pi/2$ (bzw. 90°) erfüllt sind. Die Interpretation dieses erstaunlichen Ergebnisses wird erst klar, wenn man Kerrs Originalkoordinaten ($\{t, x, y, z\}$) wieder einführt. Dann resultieren die beiden Bedingungen $x^2 + y^2 = a^2$ **und** $z = 0$ für die intrinsische Singularität der Kerr-Lösung. Das beschreibt gerade einen **unendlich dünnen Ring** mit Radius a (Vorsicht! Siehe nächster Abschnitt.), der in der Äquatorebene liegt! Man kann sich dieses Gebilde als **Massenstrom** vorstellen, der in seiner Umgebung ein rotierendes Gravitationsfeld erzeugt: die Kerr-Metrik. Der Ringradius a entspricht gerade dem **Kerr-Parameter**. Dieser parametrisiert den spezifischen Drehimpuls eines rotierenden Loches, $a = J/Mc$ (J: Drehimpuls des Loches, M: Lochmasse).

19.23.3 Ein Ring ohne Ausdehnung!

Bei der Interpretation des Ringradius muss man aufpassen: bei einer Visualisierung der Krümmungsinvarianten wird klar, dass der Ring keine Ausdehnung hat. Die Ringsingularität befindet sich **immer innerhalb des inneren Horizonts**, des so genannten Cauchy-Horizonts. Die Ringsingularität sitzt wie bei Schwarzschild bei $r = 0$, hat aber dennoch einen anderen Charakter. Diese Eigenschaft ist am schwierigsten zu verstehen und erfordert eine genaue Analyse der Singularitätenstrukturen in den richtigen Koordinaten (*B. Carter*, 1968; aufgegriffen im Buch von *Hawking* & *Ellis*: *The Large Scale Structure of Space-Time*, 1973). Obwohl die Riemannschen Invarianten unabhängig vom Koordinatensystem sind, kann ein falsches Koordinatensystem eine adäquate Interpretation gehörig erschweren. So erlauben pseudo-sphärische Koordinaten *keine* angemessene Interpretation des Satzes an Bedingungen $r = 0$ **und** $\theta = \pi/2$. Offensichtlich lässt sich nur erahnen, dass die intrinsische Kerr-Singularität vollkommen wesensverschieden von der intrinsischen Schwarzschild-Singularität ist.

19.23.4 Bedeutung für die Astrophysik

Vom Standpunkt des Astronomen ist nur wesentlich, dass die Singularität hinter dem Ereignishorizont verborgen ist. Dieses Prinzip heißt *kosmische Zensur* (engl. *cosmic censorship*) und wurde von dem englischen Mathematiker *Roger Penrose* entdeckt. Es besagt, dass 'nackte', also sichtbare Singularitäten verboten sind. Eine intrinsische Singularität ist deshalb auch auf astronomischem Wege nicht sichtbar. Bislang gab es auch keinerlei astronomische Beobachtung, die der kosmischen Zensur zu widersprechen schien.

Bei der Schwarzschild-Lösung gilt $a = 0$. Das Loch rotiert nicht und ist kugelsymmetrisch und statisch. Also schrumpft hier die Ringsingularität gewissermaßen auf die zentrale Punktsingularität zusammen und die entartete Bedingung wird zu einer einzigen, nämlich $r = 0$.

19.24 Robertson-Walker-Metrik

Die Robertson-Walker-Metrik (eigentlich FLRW-Metrik) beschreibt in der relativistischen Kosmologie das Universum als Ganzes. Gemäß des kosmologischen Prinzips muss das Universum eine Raumzeit mit

konstanter Krümmung sein. Genau dieser Forderung wird die Robertson-Walker-Metrik gerecht. Die Robertson-Walker-Geometrie bildet den raumzeitlichen Hintergrund der Friedmann-Weltmodelle, die Gegenstand der Kosmodynamik sind. Die Metrik vermag sowohl statische als auch dynamische Universen zu beschreiben.

19.24.1 Evidenz von der Beobachtung

Wie sich in den 1920er Jahren durch die Beobachtungen von entfernten Galaxie durch die amerikanischen Astronomen *Slipher* und *Hubble* erwies (und später bestätigte), leben wir in einem dynamischen Kosmos: er dehnt sich aus.

19.24.2 Eigenschaften der FLRW-Universen

Das Linienelement besitzt eine hohe Symmetrie, denn Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Räume (benannt nach den vier Pionieren dieser Kosmologie) sind kugelsymmetrisch. Die Gleichung des Linienelements in der Signatur (+ - - -) der Metrik lautet

$$ds^2 = c^2dt^2 - R^2(t)\left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\phi^2)\right).$$

19.24.3 Drei Universen unterschiedlicher Krümmung

Eine wesentliche Größe im Robertson-Walker-Linienelement ist die **Krümmung**, auch **Krümmungsparameter** genannt, und mit k bezeichnet. Der Krümmungsparameter kann nur die Werte -1, 0 oder +1 annehmen.

- $k = -1$ beschreibt ein **hyperbolisches Universum**,
- $k = 0$ entspricht dem flachen **Euklidischen Universum**,
- $k = +1$ entspricht einem **elliptischen Universum** oder **sphärischen Universum**.

Mit dem Vorzeichen von k liegt also die **Geometrie des Universums** fest, nicht jedoch die **Topologie des Universums**! Die Topologie kann im Allgemeinen **offen** oder **geschlossen** sein, nur für positive Krümmung, $k = +1$, sind sie alle Universen geschlossen.

19.24.4 Welches ist unser Universum?

Welche Krümmung das existierende Universum hat, ist immer eine Frage der Beobachtung des Materieinhalts bzw. Energieinhalts. Momentan spricht die Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Ballonexperimente: u. a. BOOMERANG, *Tegmark et al.*, MAXIMA; Satelliten: COBE seit 1992, WMAP seit 2003, ab 2008 PLANCK) für eine **ΛCDM Kosmologie** mit einem flachen, offenen Universum ($k = 0$), also gerade dem kritischen Grenzfall entsprechend. Die Daten vieler unterschiedlicher Experimente wurden in eine Temperaturkarte des kosmischen Mikrowellenhintergrunds gepackt. Noch genauer ist es, die Temperaturverteilung am Himmel in geeignete Basisfunktionen zu entwickeln (Kugelflächenfunktionen, engl. *spherical harmonics*). Aus der Gewichtung der einzelnen Funktionen kann sehr genau die thermische Vergangenheit des Universums rekonstruiert werden. Diese präzisen Daten werden mit einem kosmologischen Modell abgeglichen werden. Hier wird die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik wichtig, geht sie doch in die Friedmann-Gleichung ein, die die Dynamik des Kosmos beschreibt.

19.24.5 Der Konsens ist flach

Das flache ΛCDM Universum nennt man auch das Konsens-Modell (engl. *concordance model*). Es ist die (topologisch) einfachste Lösung ist, die zu den Daten passt.

Die bisher hochwertigsten Daten von WMAP schließen jedoch auch ein **sphärisches Universum** mit $k = +1$ nicht ganz aus. Deshalb wurde als Alternativen zum flachen Konsens-Modell das Dodekaeder-Universum (*Luminet et al.* 2003, Nature Artikel) und das Horn-Universum (*Aurich et al.* 2004) vorgeschlagen.

19.24.6 späte Dominanz von Λ

Die tragende Rolle in der späten Evolutionsgeschichte des Universums spielt offensichtlich die kosmologischen Konstante Λ, allgemeiner **Dunkle Energie** genannt. Sie macht etwa 74% aller Energieformen im Universum aus und treibt durch ihre antigravitative Wirkung das Universum auseinander.

19.24.7 Schicksal des Universums

Falls aber mehr Masse im Universum vorhanden ist, könnte die kosmische Expansion gestoppt werden und in ferner Zukunft einen Big Crunch auslösen. Dieses Szenario könnte wiederum in einem erneuten Urknall enden (**pulsierendes Universum**). Aus philosophisch-ästhetischer Sicht klingt das sehr attraktiv, denn die Natur würde selbst bei der Entstehung und Vernichtung des Universums einen Zyklus offenbaren. Zyklen in der Natur sind in vielen anderen Bereichen (Jahreszeiten, Sonnenflecken etc.) bekannt - warum nicht auch beim Kosmos? Ein Beleg oder die Widerlegung dieser spekulativen Idee wird erforscht. Aber die aktuellen Beobachtungsdaten schließen Big Crunch und einen kosmischen Zyklus aus. Das Universum wird sich sehr wahrscheinlich ewig ausdehnen, dabei immer mehr auskühlen und ein dunkler, kalter Ort werden, der von Schwarzen Zwergen und Schwarzen Löchern dominiert wird.

19.25 Robinson-Theorem

Das Robinson-Theorem ist ein mathematischer Satz, der für Raumzeiten mit bestimmter Symmetrie gilt. Die Raumzeiten sind in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) von *Albert Einstein* eine Weiterentwicklung der Gravitationsfeldersfelder in der klassischen Gravitationsphysik *Isaac Newtons*. Gravitation wird in Einsteins Theorie völlig neu verstanden, nicht als Kraft, sondern als *geometrische* Eigenschaft der Raumzeit.

19.25.1 Raumzeit muss Achsensymmetrie haben

Das Robinson-Theorem ist ein Eindeutigkeitssatz (engl. *uniqueness theorem*) und gilt für **stationäre und axialsymmetrische Raumzeiten**. Die Raumzeiten haben also salopp gesagt die Symmetrie eines Zylinders, eine Achsensymmetrie. Das ist jedoch nicht alles, was für die Gültigkeit des Theorems vorausgesetzt werden muss.

19.25.2 weitere Voraussetzungen des Theorems

- ◇ Diese Raumzeit muss darüber hinaus **asymptotisch flach** sein, d. h. die Krümmung soll bei großen Abständen ('im Unendlichen) verschwinden. Die stationäre und axialsymmetrische Raumzeit geht hier in die Minkowski-Metrik über.
- ◇ Außerdem soll die Raumzeit einen **glatten, konvexen Ereignishorizont** enthalten.
- ◇ **Außerhalb des Ereignishorizonts** soll die stationäre und axialsymmetrische Raumzeit **regulär** (= nicht singulär) sein, d. h. dort dürfen keine Krümmungssingularitäten vorkommen.

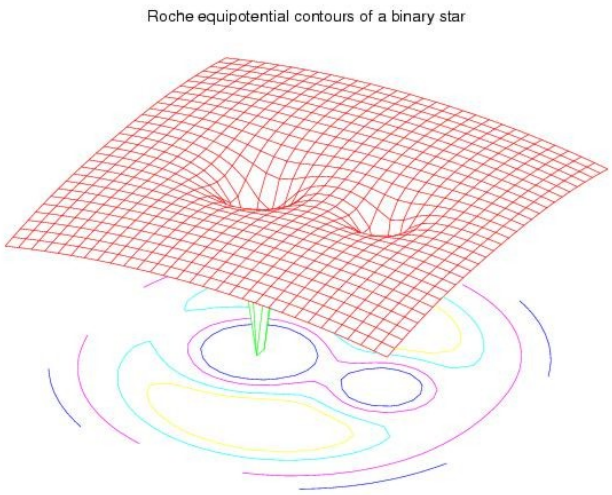

Abbildung 19.13: Roche-Volumen: Potentialgebirge, Lagrange-Punkte und Roche-Volumen eines Doppelsternsystems.

19.25.3 Was besagt das Theorem?

Unter diesen vier Voraussetzungen (Achsensymmetrie, asymptotische Flachheit, konvexer Horizont, Regularität) besagt nun das Robinson-Theorem, dass die Raumzeit **eindeutig durch nur *zwei* Parameter** bestimmt ist: durch **Masse und Drehimpuls**. Mit anderen Worten: die betrachtete Raumzeit ist identisch mit der **Kerr-Lösung**. Rotierende, elektrisch neutrale Schwarze Löcher werden gerade durch die Kerr-Lösung mathematisch beschreiben und sind von großer Bedeutung für die Astronomie.

Ein weiteres, wesentliches Theorem der ART ist das Birkhoff-Theorem.

19.25.4 Originalveröffentlichung

◇ Robinson, D.C. 1975, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 901

19.26 Roche-Volumen

Das Roche-Volumen (auch Roche-Fläche) ist eine charakteristische Größe in der Diskussion von **Doppelsternsystemen** (*Binären*, engl. *binaries*). Benannt wurde sie nach dem französischen Astronomen *Edouard Albert Roche* (1820 - 1883), der sich in seinen Forschungen vornehmlich mit den Saturnringen beschäftigte.

19.26.1 Schwer- und Zentrifugalkräfte

Das Roche-Volumen gibt das maximale Volumen eines Sterns an, bevor seine Masse auf den Begleiter überfließen kann. Genauer gesagt gibt es **zwei Roche-Volumina** in einem Binärsystem - für jeden Stern eines. Normalerweise hält ein Stern seine Masse durch die Gravitationskraft fest. Ist nun ein vergleichbar schwerer Begleiter in der Nähe, wird das Gravitationsfeld gestört: In der Umgebung der Sternmassen gibt es Punkte, wo sich die Gravitationskräfte gegenseitig aufheben. Diese Punkte heißen Lagrange-Punkte benannt nach dem französischen Mathematiker *Joseph-Louis Lagrange* (1736 - 1813).

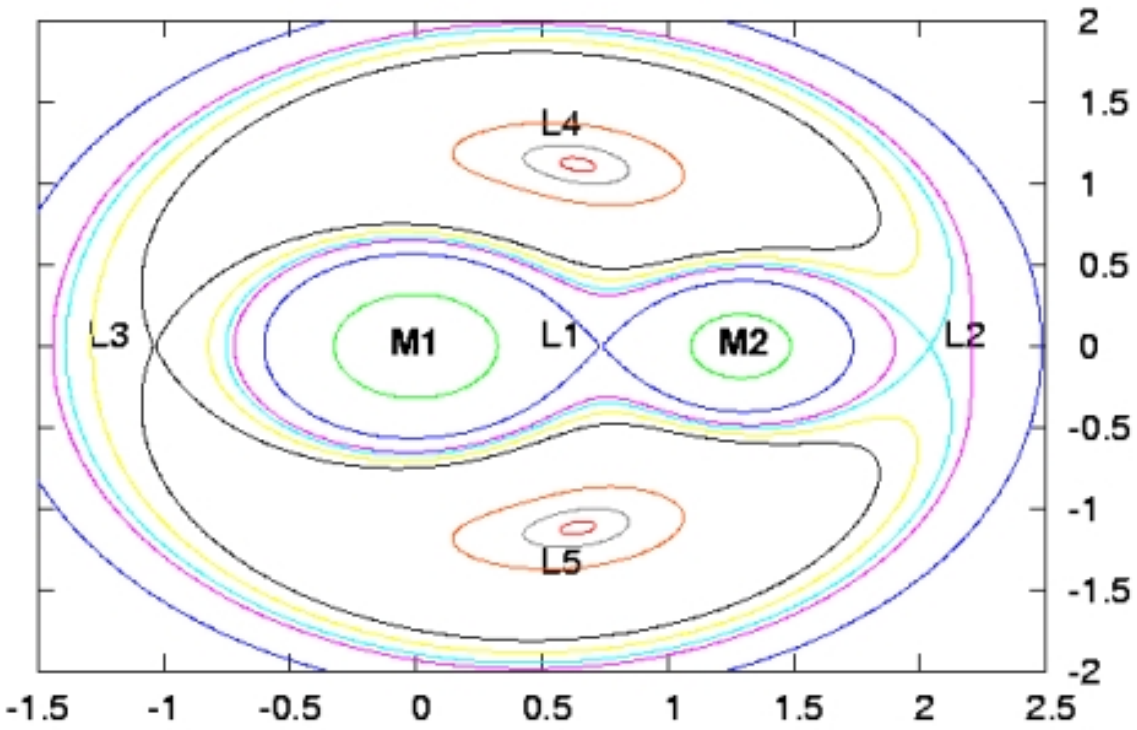

Abbildung 19.14: Äquipotentiallinienstruktur, Lagrange-Punkte und Roche-Volumina eines Binärs.

Die klassische Mechanik behandelt diese Aufgabe als **Zwei-Körper-Problem**. Es muss dazu gesagt werden, dass die beiden Sterne nicht statisch im Raum liegen, sondern umeinander kreisen. Bei der Betrachtung darf man deshalb **Zentrifugalkräfte** nicht vergessen. In der Theorie spricht man deshalb von *effektiven Gravitationskräften*, die um Zentrifugalterme korrigiert sind.

19.26.2 Berechnung im Schwerpunktsystem

Zur Bestimmung der Roche-Volumina muss man sich das effektive Gravitationspotential dieser zwei Sternmassen beschaffen. Historisch ist diese Rechnung schon lange bekannt und kann beispielsweise bei *Zdenek Kopal* in den Annalen der Astrophysik nachgelesen werden (An. Ap. 18, 379, 1955). Es ist sinnvoll, die Verhältnisse im **Schwerpunktsystem** zu beschreiben. Man führt also eine Schwerpunktkoordinate und eine Relativkoordinate ein. Das resultierende Gesamtpotential ist als **Potentialgebirge** in Abbildung 19.13 dargestellt.

19.26.3 Orte gleichen effektiven Potentials

Man diskutiert das Potential, indem man Linien konstanten Potentials betrachtet. Einige dieser Isokonturlinien des Potentials sind unter das Gebirge projiziert worden. Die Abbildung 19.14 zeigt die Visualisierung der Isokonturlinien als zweidimensionales Diagramm. Diese so genannte **Äquipotentiallinienstruktur** zeigt charakteristische Punkte. Es handelt sich dabei um **genau fünf Lagrange-Punkte** in einem System von zwei Massen, M1 und M2. Sie sind im Diagramm von L1 bis L5 durchnummeriert. Die dreidimensionalen Roche-Volumina der Sterne entsprechen in

der Isokonturliniendarstellung der blauen liegenden Acht. In dieser Berechnung wurde angenommen, dass die Masse M1 der Sonnenmasse und die Masse M2 nur einer halben Sonnenmasse entsprechen. Der Abstand der beiden Schwerpunkte M1 und M2 sei gerade so groß wie 1.3 Sonnenradien. Die beiden Raumachsen sind gerade in Einheiten des Sonnenradius beschriftet. Der interessante Punkt in der Ableitung der Roche-Flächen ist nun der **innere Lagrange-Punkt L1**. Er liegt genau auf der Verbindungslinie der beiden Massenschwerpunkte, zwischen den beiden Massen, am Kreuzungspunkt der Acht. Bei diesen Parametern liegt L1 näher bei der kleineren Masse M2. Das ist plausibel, muss ein Testteilchen doch viel näher an den leichteren Stern kommen, damit ein Gleichgewicht der Kräfte herrscht. Die Lagrangepunkte L2 und L3 liegen hinter den Sternen, jedoch ebenfalls auf der Verbindungslinien der beiden Massenschwerpunkte. Es gilt: *L1, L2 und L3 sind kollinear.* L4 und L5 sind hingegen außerhalb, bei diesen speziellen Parametern mehr als ein Sonnenradius von L1 entfernt.

Die Roche-Volumina sind nun gerade diejenigen (nicht kugelsymmetrischen!) Volumen, die die blaue Äquipotentialfläche im Dreidimensionalen umschließt und die durch den inneren Lagrange-Punkt verläuft. Im Prinzip ähnelt sie zweien an der Spitze zusammen geklebten Tropfen.

Anhand des Potentialgebirges ist anschaulich klar, dass die Lagrange-Punkte **labile Gleichgewichtslagen** darstellen. Die Tangenten verlaufen hier horizontal. Tangenten entsprechen gerade der effektiven Kraft, denn der negative Gradient des Potentials ist die Kraft!

19.26.4 Strom kreuzt Roche-Volumen

Sterne sind dynamische Objekte und können sich im Verlauf ihres Sternlebens stark verändern. Die Pulsationsveränderliche sind Sterne, die ihren Sternradius periodisch ändern. Übersteigt nun bei einer Pulsation ein Stern im Binärsystem sein Roche-Volumen, so kann Materie dieses Sterns durch L1 zum Begleiter überfließen. Die Fachwelt nennt dieses Phänomen *Roche lobe overflow*. *Lobe*, dt. 'Einhüllende', ist an sich die bessere Begriffswahl anstelle von 'Volumen' oder 'Fläche'. Das Sternplasma strömt dabei nicht auf direktem Wege über, weil der Stern rotiert und deshalb auch das Sternplasma Drehimpuls besitzt. Es kommt zur Ausbildung eines Akkretionsflusses um den Begleiter, z. B. einer Standardscheibe.

Es kann auch vorkommen, dass *beide Sterne* des Systems ihr Roche-Volumen ausfüllen. Das System hat dann eine hantelförmige Gestalt. In diesem Fall sprechen die Astronomen von **Kontaktsystemen**. Das Roche-Volumen ist besonders relevant im Verständnis einiger enger Röntgendoppelsterne.

19.26.5 Anmerkung zum Erde-Mond-System

Die hier dargestellten Verhältnisse sind sehr allgemein und auch auf das Erde-Mond-System übertragbar. Würde die Erde den inneren Lagrange-Punkt dieses Systems überschreiten, so würde wahrscheinlich das Wasser der Ozeane zu unserem Trabanten überfließen. Glücklicherweise ist die Erdoberfläche weit genug von L1 entfernt.

Die Lagrange-Punkte des Erde-Mond-Systems haben allerdings eine wichtige praktische Anwendung in der Raumfahrt: Weil diese ausgezeichneten Punkte aufgrund verschwindender effektiver Kräfte relativ stabil sind, positioniert man dort Satelliten, die z. B. astronomische Observatorien tragen. Lagrange-Punkte sind geeignete **Satelliten-Parkplätze**.

19.27 Röntgendoppelstern

Röntgendoppelsterne (*X-ray binaries*, **XRBs**) sind **Doppelsternsysteme** (**Binärsysteme**, engl. *binary system*) mit deutlich ausgeprägter Röntgenleuchtkraft. Typischerweise ist die kompakte Komponente die dominante und entscheidende Röntgenquelle.

19.27.1 Ein Stern zu Gast beim Wirt

Nach einem gängigen Modell wird die Röntgenemission dadurch erklärt, dass Materie von einem 'Wirtsstern' oder *Donatorstern* zum 'Parasiten', der kompakten Komponente, gelangt. Die Materie

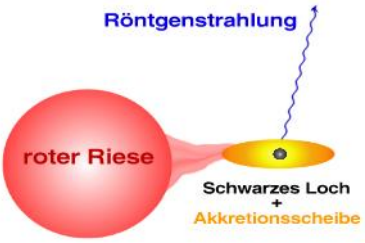

Abbildung 19.15: Röntgendoppelstern aus Riesenstern und Schwarzem Loch.

wird vom tiefen Gravitationspotential der kompakten Komponente angezogen und aufgesammelt. Dieser Prozess heißt Akkretion. Dabei entsteht ein charakteristisches Leuchten im hochenergetischen Bereich der elektromagnetischen Strahlung: Röntgenstrahlung wird ausgesendet (siehe Grafik 19.15).

19.27.2 zwei Szenarien

1) Für den Materieübertritt gibt es zwei Szenarien: Entweder es kommt zum Massenüberfluss durch den inneren Lagrange-Punkt des Doppelsternsystem. An diesem charakteristischen Punkt zwischen zwei Massen heben sich die Gravitationskräfte beider Komponenten gerade gegenseitig auf. Dieses Phänomen heißt in der Fachwelt **Roche lobe overflow**, weil hier der Donatorstern sein Roche-Volumen überschreitet.

2) Oder es kommt im zweiten Szenario zur **Wind-Akkretion**. Hier wird der Teilchenwind des Begleitsterns zum Teil eingefangen und findet auf diese Weise den Weg zum kompakten Objekt. Als kompaktes Objekt kommen sämtliche Typen in Frage: Weißer Zwerg, Neutronenstern, Quarkstern, stellares Schwarzes Loch - oder vielleicht sogar die Alternativen zum klassischen Loch, nämlich Gravastern oder Holostern.

19.27.3 Unterteilung der Röntgendoppelsterne

- Die Low-Mass X-ray Binaries (**LMXBs**) bestehen aus stellarem Schwarzem Loch oder Neutronenstern plus leichtem Stern, der eine Masse von zwei Sonnenmassen nicht überschreitet. Entsprechend sind die Donatorsterne in LMXBs kühler und besitzen keine starken Winde. Ihre Sternwinde sind eher schwach ausgeprägt und vergleichbar dem Sonnenwind.

- Ist der Donatorstern schwer und wiegt mehr als zwei Sonnenmassen, so spricht man von High-Mass X-ray Binaries (**HMXBs**). HMXBs zeigen deshalb starke Sternenwinde der massereichen Begleiter, die oft junge Sterne vom Spektraltyp O oder B sind und oftmals den Wolf-Rayet Typus entsprechen. Sie beherbergen auch ein stellares Schwarzes Loch oder Neutronenstern als kompakte Komponente.

- Handelt es sich bei der kompakten Komponente definitiv um ein Schwarzes Loch, so verwendet man meist in der Terminologie den Begriff Mikroquasar oder auch *Black Hole X-ray Binary* (**BHXB**). Manchmal sprechen Astronomen dennoch von Mikroquasaren, auch wenn die kompakte Komponente ein Neutronenstern sein könnte. Das erklärt sich dadurch, dass sie häufig nicht genau wissen, um welches Objekt es sich bei der kompakten Komponente handelt. So wird schon seit geraumer Zeit SS 433 als Mikroquasar bezeichnet, obwohl man erst seit kurzem relativ sicher weiß, dass sich hier ein stellares Schwarzes Loch befindet. Die Differenzierung ob Neutronenstern oder Loch gelingt dann, wenn Astronomen die Masse der kompakten Komponente ableiten können (z. B. aus den Kepler-Gesetzen): Liegt sie oberhalb von etwa drei Sonnenmassen, kann man sich ziemlich sicher sein, ein stellares Schwarzes Loch entdeckt zu haben. Andere Objekte passen einfach nicht in die Beobachtungen und Modellvorstellungen.

Der genaue Massenwert ist noch unbekannt, weil man die exakte Massenobergrenze der Neutronensterne - infolge Unsicherheiten bei der Zustandsgleichung - noch nicht genau kennt. Aktuell besteht ein Spielraum bei der Obergrenze für Neutronensterne von 1.8 bis 3.2 Sonnenmassen.

- ◇ Handelt es sich um einen akkretierenden Pulsar, also ebenfalls ein Neutronenstern, so hat sich für den Röntgendoppelstern die Bezeichnung **AXP** eingebürgert. Dies steht für Accreting X-ray Pulsar, also übersetzt akkretierenden Röntgenpulsar.
- ◇ Ist die kompakte Komponente ein Weißer Zwerg, so nennt man diese Röntgendoppelsterne kataklysmische Veränderliche (engl. *cataclysmic variables*, **CVs**). Da die Strahlungsemission mit der gravitativen Energie des kompakten Objekts skaliert und Weiße Zwerge weniger kompakt sind als Neutronensterne und diese wiederum weniger kompakt als Schwarze Löcher, ist die kontinuierliche Röntgenemission kataklysmischer Veränderlicher eher unterdrückt. Es kann allerdings heftige Ausbrüche geben, also intensive Röntgenstrahlung auf kurzen Zeitskalen (Röntgenbursts). Sie ereignen sich dann, wenn akkretierte Materie auf der Oberfläche des Zwergs 'niederregnet'. Wenn der Weiße Zwerg eine kritische Masse angesammelt hat, die so genannte Chandrasekhar-Masse von etwa 1.46 Sonnenmassen, explodiert das System in einer charakteristischen Supernova vom Typ Ia. Diese besonders hellen Ausbrüche nutzen Astronomen als Standardkerzen zur **Eichung** von Helligkeiten, zur **Entfernungsbestimmung** und zur **Messung kosmologischer Parameter**, die Zustand und Dynamik des Universums festlegen.

19.27.4 Wer pustet da?

Die HMXBs haben also einen massereichen Donatorstern der starke Winde auf das kompakte Objekt bläst. Aus diesem Grund kann der Abstand der Doppelsternkomponenten größer sein, als bei den LMXBs (vergleiche Wind-Akkretion). Der Teilchenwind kann durch die Absorption von UV-Photonen getrieben werden, die von der kompakten Quelle, beispielsweise der Akkretionsscheibe, stammen (engl. *line driven wind*). Dies funktioniert nur, wenn der Wind nicht allzu hoch ionisiert ist. Andernfalls ist der Wind nämlich transparent für UV-Photonen und Röntgenstrahlung könnte den Wind heizen. Die hochenergetische Röntgenstrahlung kann z. B. von einer 'Blase' sehr heißen Plasmas, der Korona, emittiert werden. Koronen bilden sich in Verbindung mit dem Akkretionsfluss aus und fluktuieren sowohl zeitlich, als auch räumlich.

19.27.5 HMXBs magnetischer als LMXBs

Die Magnetfelder der HMXBs scheinen stärker ausgeprägt zu sein, als bei den LMXBs. Dieser Sachverhalt könnte auf effizientere Dynamos schnell rotierender kompakter Objekte zurückgeführt werden. Durch gravitomagnetische Prozesse wie dem Lense-Thirring-Effekt kann eine rotierende Raumzeit Magnetfeldlinien, die im Akkretionsfluss 'eingefroren' sind, mitschleppen. Dadurch werden die Feldlinien verdrillt, 'aufgezogen' und damit verstärkt. Besonders effizient ist solch ein Dynamo bei schnell rotierenden Schwarzen Löchern, die durch die Kerr-Lösung mathematisch beschrieben werden.

Der Lense-Thirring-Effekt hat noch einen anderen interessanten Aspekt, der für Röntgendoppelsterne eine Rolle spielt: Die gravitomagnetischen Kräfte können auf die Akkretionsscheibe einwirken. Dies führt zu einer kreiselartigen Torkelbewegung (*Lense-Thirring-Präzession*), die mit einer charakteristischen Frequenz assoziiert ist. Sie heißt **Lense-Thirring-Frequenz** und wird mit einer der beobachteten Frequenzen von Quasi-periodische Oszillationen (QPOs) in Verbindung gebracht.

19.27.6 wunderbare Mira

Kürzlich, Ende April 2005, gelang den Röntgenastronomen eine wunderbares Foto, das die Vorstellung des Materialüberflusses in engen Röntgendoppelsternen beeindruckend untermauerte. Die Abbildung 19.16 zeigt die Beobachtung des veränderlichen Sterns Mira, die mit dem Röntgensatellit Chandra

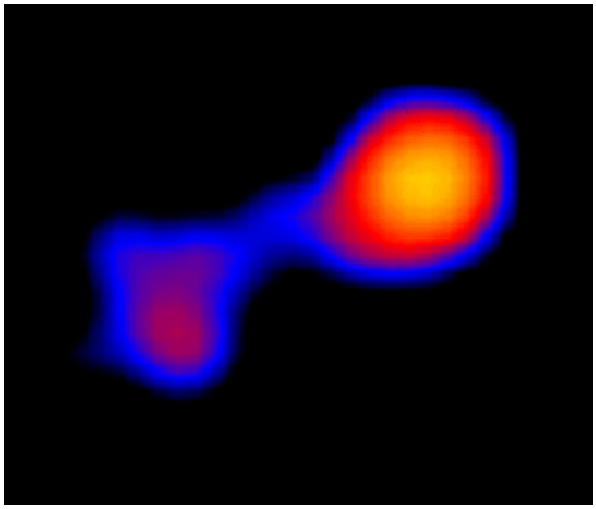

Abbildung 19.16: Röntgendoppelstern Mira A und Mira B im Röntgenlicht.

gemacht wurde (Credit: NASA/CXC/SAO/M. *Karovska et al.*, 2005; ePrint Publikation unter astro-ph/0503050). Die Astronomen beobachteten in diesem Doppelsternsystem im Sternbild *Cetus* (dt. *Walfisch*) einen Röntgenausbruch, der in der Fachwelt *soft X-ray transient*, also ein vorübergehender Ausbruch im Bereich weicher Röntgenstrahlung, genannt wird. Man sieht hier den klassischen Fall, wie ein Riese einen Zwerg füttert: Rechts im Bild sieht man den Roten Riesen *Mira A*, präzise gesagt handelt es sich um einen AGB-Stern. Dieser Sternengigant hat den 600fachen Sonnenradius; säße er anstelle der Sonne in unserem Sonnensystem, würde seine Oberfläche zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter liegen. Links befindet sich - versteckt in einer heißen 'Gaswolke' - die kompakte Komponente, *Mira B* (*VZ Ceti*), die ein Weißer Zwerg ist. Der Abstand der beiden Sterne beträgt nur rund 70 Astronomische Einheiten (entsprechend 0.6 Bogensekunden), so dass auf den Zwerg Materie des Riesen überfließen kann. Im 420 Lichtjahre entfernten Doppelsternsystem Mira AB findet der Materieüberfluss durch **Windakkretion** statt und ähnelt damit eher den symbiotischen Sternen. Zwar entsteht der Eindruck, dass hier rechts das deformierte Roche-Volumen abgebildet wäre, doch ist das nur die durch den Sternenwind nicht kugelförmige Helligkeitsverteilung des Riesen. Mira A verliert durch den Sternenwind 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr (*Bowers & Knapp*, 1988). Das Verblüffende an diesem Bild ist neben der hohen räumlichen Auflösung des Systems, dass erstmal ein einzelner AGB-Stern als starke Röntgenquelle in Erscheinung getreten ist. Der Röntgenausbruch wird nun damit erklärt, dass eine große Materiemenge aus der Sternoberfläche geschossen wurde. Dieser Vorgang ist durchaus mit den magnetohydrodynamisch getriebenen Sonnenflares vergleichbar: Die Magnetfeldlinien in der Umgebung der Sternoberfläche vernichten sich gegenseitig durch magnetische **Rekonnexion**. Somit wird magnetische Energie in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt und treibt einen Materieauswurf aus der Sternoberfläche an.

Durch Massenauswurf-Ereignisse (engl. *mass ejection events*) erhöht sich auch kurzzeitig die Akkretionsrate auf den Weißen Zwerg. So trägt auch der Akkretionsfluss zum Ausbruch bei, falls die plötzliche 'Überfütterung des Zwergs' für Strahlungsausbrüche in der Gasscheibe sorgt oder ein jet-artiger Auswurf beim Zwerg angeregt wird. Doch Zwerge vertragen nicht soviel Futter: Sollte Mira B zuviel Material anhäufen und die Chandrasekhar-Masse überschritten werden, könnte dem Riesen Mira A die gut gemeinte Fütterung die Existenz kosten. Denn dann explodiert der Weiße Zwerg in einer Supernova Typ Ia und zerstört das Doppelsternsystem. Merke: Unterschätze nie David, Goliath!

19.27.7 Anmerkung: Mira-Veränderliche

Mira A ist der Prototyp der so genannten **Mira-Veränderlichen** (Mira-Sterne, kurz *Miras*). Sie sind regelmäßige Pulsationsveränderliche mit langen Perioden von hundert bis zu tausend Tagen. Miras Periode beträgt etwa 330 Tage und kann mit dem bloßen Auge verfolgt werden. Die periodisch Helligkeitsschwankung ist das 'Wunderbare' an Mira und gab ihm im 17. Jahrhundert seinen lateinischen Namen.

19.27.8 Weitere Informationen

- ◇ Web-Artikel: Akkretionsflüsse um rotierende Schwarze Löcher
- ◇ externer Web-Artikel: Aktive Schwarze Löcher: Ultraheiße Leuchtfeuer im All von *Andreas Müller*, auf Einstein online (AEI Golm)

19.28 Roter Riese

Rote Riesen sind große, leuchtkräftige, aber relativ kühle Sterne.

19.28.1 Ort im HRD

Als Konsequenz dieser Eigenschaften findet man Rote Riesen im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne rechts oben. Die Rote-Riesen-Phase setzt bei einem Stern dann ein, wenn die thermonuklearen Fusionsprozesse so weit fortgeschritten sind, dass das **Wasserstoff-Schalenbrennen** einsetzt. D.h. die Wasserstofffusion findet nicht mehr im heißen Zentrum des Sterns, sondern in seinen Randzonen, nahe der Sternoberfläche statt. Das Umschalten auf Schalenbrennen bläht den Stern auf ein Vielfaches seines ursprünglichen Volumens auf - das erklärt den Begriffsbestandteil 'Riese'. Weil die Leuchtkraft dabei aber nahezu konstant bleibt, kühlt sich seine Oberfläche ab (siehe erste Gleichung unter Effektivtemperatur): Gemäß den Gesetzen der thermischen Strahler (*Planck-Gesetz*, Plancksche Strahlungsformel) erscheint der Stern somit röter - das erklärt ersten Begriffsbestandteil 'Rot'.

19.28.2 windige Typen!

Das Stadium des Roten Riesen ist verbunden mit kräftigen **stellaren Winden**, also Teilchen, die von der Sternoberfläche abgeblasen werden. Im 'Zwiebelschalenmodell' der Sterne findet man im Außenbereich massereicher Sterne die Massenschalen der leichtesten Elemente, also Wasserstoff und Helium. Besonders diese Elemente werden vom Sternenwind in den interstellaren Raum gepustet.

19.28.3 Ende des Roten Riesen: Weißer Zwerg und Planetarischer Nebel

Die Innenbereiche des Sterns können am Ende der Rote-Riesen-Phase dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten (vergleiche hydrostatisches Gleichgewicht). Deshalb fällt das Sterninnere im Gravitationskollaps in sich zusammen, bis der Entartungsdruck der Elektronen den Kollapsar wieder stabilisieren kann: ein **Weißer Zwerg** ist entstanden. Diese erdgroßen, etwa sonnenschweren Sterne sind stabil bis zur so genannten Chandrasekhar-Grenze. Während das Innere zum Zwerg kollabiert, erscheinen die abgeblasenen Sternhüllen nun als farbenprächtiger **Planetarischer Nebel**.

Zum Vergleich: Ganz anders verläuft die Entwicklung massereicher Sterne mit mehr als etwa acht Sonnenmassen. Sie durchlaufen *keine* Rote-Riesen-Phase, sondern sind Blaue oder Blauweiße Riesen, die am Ende ihres vergleichsweise kurzen Sternenlebens in einer gigantischen Sternenexplosion, einer Supernova (Typ II) oder sogar einer Hypernova, enden. Was dann vom Riesenstern bleibt ist ein Supernovaremnant, in dem ein kompaktes Sternrelikt sein Dasein fristet. Diese Relikte sind je nach kollabierender Masse Neutronensterne oder stellare Schwarze Löcher. Die Brennprozesse des Sterns

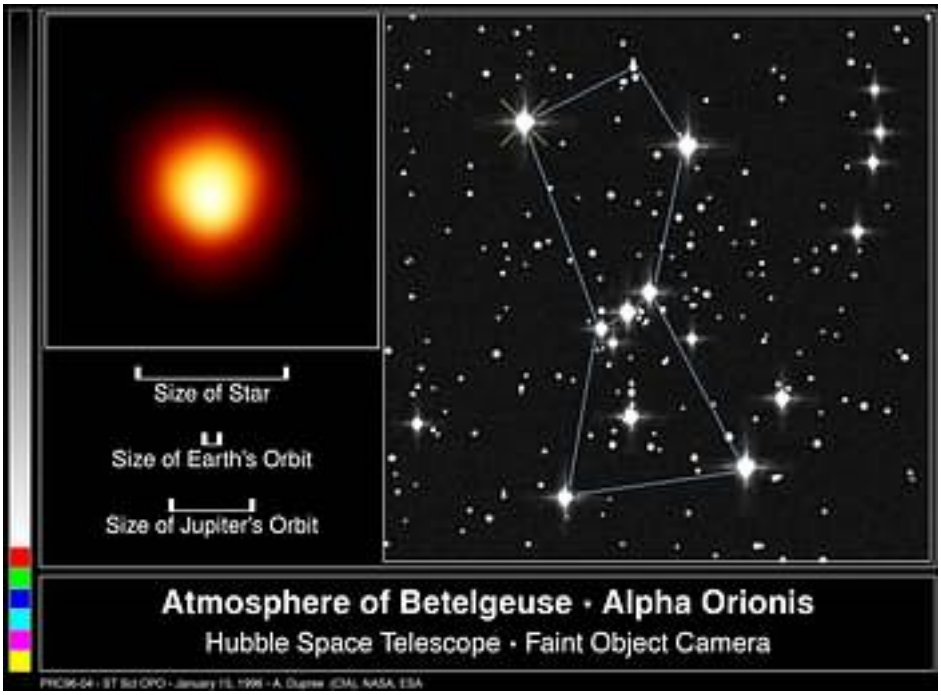

Abbildung 19.17: Beteigeuze - Orions rote Schulter.

sind dann zum Erliegen gekommen. Neutronensterne oder Schwarze Löcher stehen also *nicht* am Ende der Entwicklung von Roten Riesen.

19.28.4 Beispiel: Beteigeuze

Noch heller und größer als die Riesen sind die Überriesen, wie bei den Yerkes-Leuchtkraftklassen näher ausgeführt wird. Die Abbildung 19.17 zeigt ein bekanntes Musterbeispiel für einen Roten Überriesen: *Beteigeuze* (auch: Betelgeuse) der Hauptstern (*Alpha Orionis*) im Wintersternbild *Orion*. Schon mit bloßem Auge erkennt man deutlich den hellen, roten Stern, der sich in einem Abstand von 427 Lichtjahren zur Erde befindet. Die Abbildung zeigt eine Beobachtung im ultravioletten Licht des Weltraumteleskops Hubble (Credit: STScI/NASA/ESA, *Dupree & Gilliland*, März 1995). Beteigeuze ähnelt durchaus in Entfernung und Sterngröße Mira A, der im Eintrag Röntgendoppelstern genau beschrieben wird. Beide Riesen sind Pulsationsveränderliche, d. h. ihre Sternoberflächen schwingen um einen mittleren Sternenradius und sorgen so für eine periodische Helligkeitsvariation.

19.28.5 Beispiel: Sonne

Auch die Sonne wird in etwa 6.5 Mrd. Jahren zum Roten Riesen werden. Diese Verwandlung geschieht, weil der Wasserstoffvorrat im Zentrum der Sonne nach Ablauf dieser Zeit zur Neige gehen wird. Die Sonne hat dann einen Heliumkern und geht schließlich über zum Wasserstoffbrennen in den Sternschalen (*Schalenbrennen*). Betrachtet man das im HRD, so verlässt die Sonne in dieser Phase die Hauptreihe: Sie macht sich auf in das Gebiet der Riesen. Der Übergang zum Riesen dauert vom Zünden des Schalenbrennens an einige hundert Millionen Jahre. Weil der Sternkern sich weiter verdichtet hat, steigt die Zentraltemperatur auf 100 Mio. Kelvin: Dann setzt zentrales Heliumbrennen (Triple-Alpha-Prozess) ein. Die nächste, neue Brennphase setzt ein, sobald auch das Helium im Kern aufgebraucht ist: dann verlagert sich das Heliumbrennen ebenfalls in die Sternschalen und im Kern brennt Kohlenstoff.

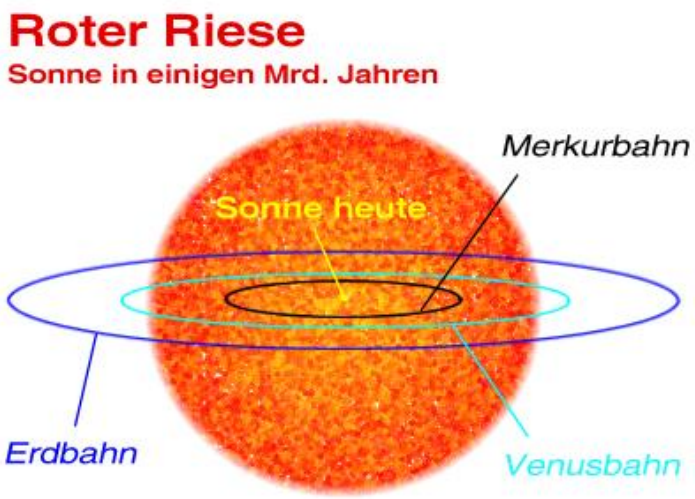

Abbildung 19.18: Sonne wird zum Roten Riesen und innere Planeten verschlingen.

Die Sonne bläht sich infolge des Schalenbrennens um etwa das Hundertfache auf. Sie verändert dabei auch ihr Erscheinungsbild: als Riesenstern wird die Sonne das 10000fache ihrer jetzigen Leuchtkraft aufweisen und sie wird rot erscheinen, weil sich ihre Effektivtemperatur absenkt - das wird auch ihren Spektraltyp ändern. Durch den kräftigen Sonnenwind wird die Sonne **fast die Hälfte ihrer Masse** an die Umgebung abgeben. Aufgrund des enormen Aufblähens kühlen sich die Sternhüllen des Riesen ab und werden ausgedünnt - das stoppt schließlich das Schalenbrennen wieder. Die Ausdehnung der Sonne zum Riesen hat auch entscheidende Konsequenzen für das innere Sonnensystem, weil dann die inneren Planeten Merkur und Venus von der Sonne verschlungen werden (siehe maßstabsgerechte Abbildung 19.18). Auf der Erde wird die Temperatur lebensfeindlich anschwellen: das Ende des irdischen Lebens ist in diesem Szenario der **Wärmetod**! Danach wird der innere Teil der Sonne zu einem etwa erdgroßen Weißen Zwerg in sich zusammenfallen. Das Schicksal der Sonne teilen mehr als **90% der Sterne** - nämlich alle Sterne mit **Anfangsmassen von weniger als 8 Sonnenmassen**.

19.28.6 Neue Erkenntnisse über das Innere Roter Riesen

Die Bezeichnung Zwei-Schalen-Brennen kann zu Missverständnissen führen, denn das Brennen in den Schalen findet *nicht* zur gleichen Zeit, sondern abwechselnd statt. In einem Zyklus von etwa 10000 Jahren zündet das Heliumbrennen in der inneren Schale. In der Zone zwischen den Schalen kommt es durch die Konvektionsströme zu Durchmischungen des Sternplasmas - die Durchmischung an der Grenzschichten geschieht auch durch Instabilitäten der Hydrodynamik, z. B. der *Kelvin-Helmholtz-Instabilität* (die jeder Kaffeetrinker schon gesehen hat, der seinen Kaffee mit Milch genießt). Durch die Mischungsprozesse gelangt Material aus dem Sterninnern an die Oberfläche des Roten Riesen und ist damit spektroskopisch beobachtbar, weil es dann aus der Photosphäre kommt.

Im Sterninnern läuft der s-Prozess ab, der durch nachfolgende Beta-Zerfälle die schweren Elemente im Roten Riesen erzeugt. Wenn Wasserstoff- und Heliumbrennen (durch die oben beschriebene Ausdünnung des Riesen) aufhören, verliert der Riese einerseits seine äußeren Hüllen und kollabiert andererseits zum Weißen Zwerg. Das hätte das Ende gewesen sein können, doch etwa **10% der Weißen Zwerge gelingt die Rückkehr** ins pralle Sternenleben: Sie werfen das Heliumschalenbrennen im so genannten *späten Helium-Schalen-Flash* an. Im HRD bewegt sich der Weiße Zwerg von unten wieder zurück ins Riesengebiet. Der späte Helium-Flash hat im wahrsten Sinne umwälzende Folgen für den Stern, denn die neue Energiequelle durchmischt die Schalen durch Konvektion. Wenn auch diese

Brennphase des Heliums endet, bewegt sich der wiedergeborene Rote Riese im HRD wieder zurück zu den Weißen Zwergen. In dieser Übergangsphase sprechen Astronomen von **PG1159-Sternen**. Das sind die Nachfolger der AGB-Phase und gewissermaßen 'umgestülpte, ehemalige Rote Riesen'. Diese gut durchmischten Sterne erlauben den Sternforschern einen nachträglichen Blick in das Innere von Rote Riesen. Die Astronomen müssen nur die Spektren der PG1159-Sterne betrachten und die Zusammensetzung und Elementhäufigkeiten analysieren. Das ist tatsächlich möglich und erlaubt die verborgenen, inneren Prozessen in Roten Riesen *im Nachhinein* - wenn der Riese gar nicht mehr existiert - zu verstehen. Daraus erhalten die Astronomen Kenntnisse über den Ursprung der schweren Elemente und ihre genaue Häufigkeitsverteilung.

PG1159-Sterne sind seltene, sehr heiße, wasserstoffarme Post-AGB-Sterne ('Prä-Weiße-Zwerge'). Die Effektivtemperaturen der PG1159-Sterne sind mit 75000 bis 200000 Kelvin extrem hoch (typisch 140000 K). Die Sternatmosphäre ist so stark ionisiert, dass die Spektrallinien typischerweise im Ultravioletten liegen. Eine astronomische Beobachtung erfordert deshalb weltraumgestützte UV-Astronomie, die mit den US-amerikanischen Weltraumteleskopen Hubble und FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*) möglich ist (*Jahn et al.* 2007). Die Spektroskopierung der PG1159-Sterne verrät die Häufigkeiten der schweren Elemente, die der Rote Riese zuvor im Innern produziert hat. Dabei haben die Astronomen eine Überraschung erlebt: Das Sternplasma der ehemals Roten Riesen, das an die Oberfläche des PG1159-Sterns 'gespült' wurde, weist einen unerwartet **hohen Kohlenstoffanteil** auf. Das ist nur dadurch erklärbar, dass die Konvektionsströme deutlich effektiver sind, als bislang angenommen. Das sorgt für fast gleiche Häufigkeiten von Helium und Kohlenstoff. Die Vielzahl der Kohlenstoffkerne gehen kernphysikalische Reaktionen mit den Protonen ein und produzieren dabei viele Neutronen. Die Neutronen wiederum gehen in den s-Prozess ein. Im Innern des Sterns finden auch Reaktionen statt, in denen sich Heliumatomkerne an verschiedene andere Atomkerne anlagern. Dabei synthetisieren neue, schwerere Elemente. Z.B. entsteht so Stickstoff (N-14) Fluor (F-18) und aus Sauerstoff (O-18) wird Neon (Ne-22). So resultieren auch höhere Häufigkeiten der Elemente Fluor und Neon (*Werner et al.* 2005). Der astronomische Nachweis von Neon hat das Wiedergeburtsszenario Roter Riesen bestätigt.

19.28.7 Literaturhinweis

◇ *Werner, K. & Rauch, T.*: Die Wiedergeburt der Roten Riesen; Sterne und Weltraum, Februar 2007

19.29 Roter Zwerg

Rote Zwerge sind leuchtschwache Sterne der Spektralklasse K und M, die sehr zahlreich im Universum sind. Die Sonne ist an sich ein **Gelber Zwerg**. Rote Zwerge haben noch kleinere Oberflächentemperaturen (siehe auch Effektivtemperatur) und eine noch geringere Leuchtkraft. In der Sonnenumgebung sind etwa 80% aller Sterne Rote Zwerge.

19.30 Rotverschiebung

Generell meint dieser Begriff eine Verschiebung von Spektrallinien (oder spektralen Komponenten) zum roten Ende des Spektrums hin.

19.30.1 kosmologische Rotverschiebung

Im Speziellen meint dieser Begriff eine wichtige astrophysikalische Größe der Kosmologie: die **kosmologische Rotverschiebung** z (engl. *redshift*). Sie ersetzt oft die **Angabe von Entfernungen**, weil z einfacher zu bestimmen ist, als die tatsächliche Entfernung des kosmologischen Objekts (in der Regel eine Galaxie). Die Entfernung folgt erst mit dem Hubble-Gesetz oder (bei größeren Distanzen)

mit einem kosmologischen Modell, wie beispielsweise den Friedmann-Weltmodellen. Je größer die Rotverschiebung, umso größer die Entfernung des Objekts.

Die kosmologische Rotverschiebung ist auch ein Maß für das **Alter** eines kosmischen Objekts: Je größer die Rotverschiebung, umso früher war das Objekt bereits im Kosmos vorhanden. Das liegt daran, weil der Blick an den Himmel im Prinzip ein Blick in die Vergangenheit ist: Das Licht, oder allgemeiner gesprochen die Strahlung, der Himmelsobjekte benötigt eine gewisse Zeit, bis sie auf der Erde ankommt, weil die Vakuumlichtgeschwindigkeit *endlich* ist.

19.30.2 Definition

Beobachtet man die Emission einer Quelle bei einer bestimmten Wellenlänge, so definiert man ganz allgemein die Rotverschiebung als Quotient der Differenz zwischen der Wellenlänge im Beobachtersystem (Index *obs*) und derjenigen im Emittersystem (Index *em*) über der Wellenlänge im Emittersystem

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}}.$$

19.30.3 Hubble-Gesetz

Edwin Hubble konnte 1929 nachweisen, dass viele entfernte Galaxien eine Fluchtbewegung ausführen: Sie bewegen sich von uns weg. Es waren zwar nur 18 Galaxien, die Hubble untersuchte, doch mit wachsender Zahl hat sich dieses Ergebnis bestätigt. Dieser Zusammenhang ging als Hubble-Effekt in die Kosmographie ein. Das Hubble-Gesetz zeigt einen *linearen Zusammenhang* zwischen Rotverschiebung z und Distanz D mit einer Proportionalitätskonstante, der Hubble-Konstanten H_0. Die Linearität hat jedoch nur im nahen Universum ihre Gültigkeit, nämlich bis zu einem maximalen Abstand von gut 400 Mpc oder z kleiner als 0.1. Für weiter entfernte Objekte bricht die Linearität zusammen. Allgemeiner handelt es sich bei $H(z)$ (ohne Index 0!) um den **Hubble-Parameter**, der *zeitabhängig* ist.

19.30.4 Beispiel: Quasar 3C 273

Der hellste Quasar mit der Bezeichnung 3C 273 hat beispielsweise eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 0.158$. Er ist zwar knapp oberhalb des Gültigkeitsrahmens des Hubble-Gesetzes, bemüht man es dennoch, so resultiert eine Entfernung von 658 Mpc oder 2.14 Mrd. Lichtjahren. Das ist nicht nur für den irdischen Laien, sondern auch für kosmologische Maßstäbe eine enorme Distanz. Die Strahlung, die uns heute von 3C 273 erreicht, wurde dort ausgesandt, als die Erde etwa halb so alt war, als heute.

19.30.5 Der Grund: der Kosmos dehnt sich aus!

Ursache für die kosmologische Rotverschiebung ist die **kosmische Expansion des Universums**. Der Kosmos als Ganzes lässt sich in der relativistischen Kosmologie als eine Raumzeit beschreiben. Die Dynamik dieser vierdimensionalen Mannigfaltigkeit unterliegt den Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie, den tensoriellen Einsteinschen Feldgleichungen.

In den Anfängen der relativistischen Kosmologie wurden materiefreie Universen gefunden, die **de-Sitter-Räume**. Natürlich ist dieses Universum *nicht* in der Natur realisiert, weil das beobachtete Universum mit Materie oder allgemein gesprochen Energie angefüllt ist. Die materiegefüllten Universen wurden später entwickelt. Vor allem die **Robertson-Walker Räume** (*H.P. Robertson* 1935, *A.G. Walker* 1936) sind bis heute von außerordentlicher Wichtigkeit. Sie bilden die raumzeitliche Basis (das Linienelement) für die Friedmann-Weltmodelle, die aus der Anwendung dieser Robertson-Walker-Metrik auf die Feldgleichungen resultieren.

19.30.6 Es gibt viele Rotverschiebungen!

Die beobachtete Rotverschiebung einer Quelle setzt sich aus verschiedenen Effekten zusammen. Der kosmologische Beitrag ist der bereits diskutierte aufgrund der Expansion der Raumzeit des

Universums. Daneben gibt es Beiträge, die auf **lokalen Effekten** beruhen, wie beispielsweise einer Bewegung. Erklärt wird diese Verschiebung im Spektrum durch den **Doppler-Effekt**, der vor allem bei akustischen Wellen bekannt ist. Bei elektromagnetischen Wellen verhält es sich genauso: Dadurch dass sich der Emitter in Bezug zum Beobachter entlang der Sichtlinie bewegt, kommt es im Falle eine Bewegung vom Beobachter weg zu einer 'Dehnung' der elektromagnetischen Wellen, dies entspricht der Rotverschiebung. Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter zu, werden die Wellenzüge 'gestaucht' und es gibt eine Blauverschiebung. Das Ausmaß der Verschiebung hängt von der Größe der **Radialgeschwindigkeit** ab, also der entlang der Sichtlinie projizierten Geschwindigkeitskomponente. Es handelt sich um einen rein kinematischen, klassischen Effekt. Die nahe Andromedagalaxie (M31, NGC 224), die sich mit der Milchstraße in der Lokalen Gruppe befindet, bewegt sich auf die Milchstraße zu und ist blauverschoben.

Vorsicht Interpretationsfalle: Es ist ganz wichtig, dass der kinematische Doppler-Effekt nicht mit der kosmologischen Rotverschiebung durcheinander gebracht wird! In vielen Büchern findet man, dass die kosmologische Rotverschiebung z in die Doppler-Formel eingesetzt wird. Die Resultate sind jedoch von fragwürdigem Wert: eine Galaxie mit $z = 2$ bewegte sich dann mit 80% der Lichtgeschwindigkeit von uns weg! Der Entfernungsrekordhalter Abell 1835 IR 1916 mit $z = 10$ hätte eine Geschwindigkeit von etwa 97% der Lichtgeschwindigkeit. Diese Berechnungen machen keinen Sinn. Vielmehr muss man die kosmologische Rotverschiebung als dynamische, expandierende Raumzeit deuten: Die entfernten Galaxien 'schwimmen' mit der sich ausdehnenden Raumzeit mit. Man spricht manchmal auch vom *Hubblefluss* (engl. *Hubble flow*). Es ist eine **dynamische Raumzeit des Kosmos**, die expandiert, und alles im Kosmos muss dieser Dynamik folgen.

Ein weiterer Beitrag zur beobachteten Rotverschiebung ist die **Gravitationsrotverschiebung**. Hier müssen die Lichtteilchen gegen ein Gravitationsfeld Arbeit verrichten, um ihm zu entkommen und verlieren dabei Energie. Deshalb werden sie zum roten Ende des Spektrums verschoben. So werden beispielsweise aus Röntgenphotonen optische Photonen oder aus ultravioletten Photonen werden Radiophotonen. Vor allem bei den starken Gravitationsfeldern Schwarzer Löcher oder bei Strahlung in der Nähe von schweren Gravitationslinsen ist dieser Prozess relevant. Dieser Effekt ist mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu begründen. Der Emissionsort muss allerdings recht nahe am schweren, gravitierenden Objekt sein.

Die Rotverschiebung einer Quelle zerfällt demnach allgemein in die drei oben geschilderten Anteile: kosmologische, Doppler- und gravitative Rotverschiebung

$$z_{\mathrm{tot}} = z_{\mathrm{cosmo}} + z_{\mathrm{Doppler}} + z_{\mathrm{grav}}.$$

Den größten Anteil bei **weit entfernten**, kosmischen Quellen macht die kosmologische Rotverschiebung: die Strahlung wird fast ausschließlich durch den ausdehnenden Kosmos zum roten Ende des Spektrums hin verschoben. Die anderen Beiträge - Dopplerbewegung oder Gravitationsrotverschiebung - kann man in der Regel vergessen: Die Gravitationsrotverschiebung ist so klein, dass sie meist vernachlässigt wird. Der Anteil durch den Doppler-Effekt, der letztendlich auf eine **Pekuliarbewegung** (Eigenbewegung) zurückzuführen ist, macht bei einer (recht hohen) Radialgeschwindigkeit von 1500 km/s nur einen Anteil von $z_{\mathrm{Doppler}} = 0.005$ aus. Deshalb vernachlässigt man diese geringeren Beiträge und den Index *cosmo* und schreibt in der Regel nur z.

Diese Verschiebung ist umso höher, je weiter die Quelle entfernt ist (vgl. Hubble-Gesetz). In Ermangelung zuverlässiger Methoden zur Bestimmung der Entfernung, löst daher die Rotverschiebung den Entfernungsparameter ab, weil diese Größe durch gemessene Spektren den Astronomen leichter zugänglich ist. Die Entfernung folgt dann erst aus einem kosmologischen Modell, die in den letzten Jahrzehnten häufigen 'Modetrends' unterlagen. Mittlerweile ist der Satz an kosmologischen Parametern (Hubble-Konstante und Dichteparameter 'Omegas', Ω etc.) gut bekannt. Wie in der Teilchenphysik spricht man nun von einem **Standardmodell der Kosmologie**.

19.30.7 Blauverschiebung & Rotverschiebungsfaktor

Wenn man von Rotverschiebung spricht, darf man den komplementären Begriff der Blauverschiebung nicht verschweigen: Hier findet eine Verschiebung zum anderen, kurzwelligen oder hochenergetischen

Ende des Spektrums hin statt. Die oben dargestellte Gleichung der Rotverschiebung z zeigt, dass sie gerade der Kehrwert des Rotverschiebungsfaktors (g-Faktor) g minus 1 ist. Der Faktor $z+1$ ist (falls z die kosmologische Rotverschiebung meint) gerade ein **Maß für die Ausdehnung des Universums**: ein Objekt bei $z = 1$ befindet sich in einem Universum, das gerade halb so groß war, wie das heutige, lokale Universum bei $z = 0$; ein Objekt bei $z = 2$ ist in einem Universum, das nur ein Drittel so groß ist, wie unser lokales Universum etc.

19.30.8 Problem mit Energieerhaltung? Nein!

Rot- und Blauverschiebungen bergen ein weiteres Verständnisproblem: Wo bleibt die Strahlungsenergie, wenn z. B. das stark rotverschobene Photon einer entfernten Galaxie auf der Erde ankommt? Keine Sorge, der **Energieerhaltungssatz** wird *nicht* verletzt. Man darf eben nur die Energie im Bezugssystem Galaxie mit derjenigen im Bezugssystem Erde vergleichen, wenn man auch berücksichtigt, dass das Universum zum Zeitpunkt der Emission des Photons in der Galaxie ein *anderes* Universum war, als zum Zeitpunkt der Ankunft des Photons auf der Erde! Präzise gesagt unterscheiden sich beide Bezugssysteme im Skalenfaktor $R(t)$, auch *Weltradius* genannt. 'Rotverschobene, kosmologische Photonen' sind ähnlich zu den 'gravitationsrotverschobenen Photonen' in einem Schwerefeld zu sehen. Denn die Strahlungsenergie geht in beiden Fällen an die (dynamische bzw. gekrümmte) Raumzeit verloren. Kosmologische Rotverschiebung und Gravitationsrotverschiebung sind rein geometrische Effekte.

Es spiegelt sich jedoch auch die **Relativität des** Beobachters darin wider, denn es spielt eine Rolle, in welchem Bezugssystem dieser sitzt.

19.30.9 Die kosmische Zeit

Die kosmologische Rotverschiebung z kann sehr einfach aus Beobachtungen von Spektren abgeleitet werden. Ist man daran interessiert, wie alt das betreffende Objekt gegebener Rotverschiebung ist, benötigt man ein kosmologisches Modell. Aus der Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung wird ein Satz kosmologischer Parameter abgeleitet, der unser Universum sehr gut beschreibt. Zu diesen Parametern gehört der Anteil Dunkler Energie, der Anteil der Dunklen und der baryonischen Materie, der Hubble-Parameter und der Krümmungsparameter. Kennt man sie, so kann man einer Rotverschiebung ein Alter zuordnen, das man **kosmische Zeit** (engl. *cosmic time*) nennt. Die kosmische Zeit entspricht dem Alter des Universums seit dem Urknall. Sie kann aus den Friedmann-Gleichungen extrahiert werden und zeigt eine Abhängigkeit von den kosmologischen Parametern. Das Diagramm 19.19 zeigt die Beziehung zwischen Rotverschiebung und Alter des Universums als Graphen. Bei $z = 0$ befindet sich das lokale Universum, also unsere unmittelbare Umgebung. Eine Rotverschiebung $z = 1100$ (hier nicht zu sehen) markiert die Grenze des elektromagnetisch beobachtbaren Universums. Denn bei dieser Rotverschiebung ereignete sich die **Rekombination**. Für größere Rotverschiebungen als etwa tausend ist das Universum nicht durchsichtig (*optisch dick*), weil Strahlung das Urplasma aus Elektronen und Protonen nicht durchdringen kann. Bei der Rekombination war das Plasma kühl genug, so dass ein Elektron von je einem Proton eingefangen werden konnte. Es bildete sich neutraler Wasserstoff (HI), und das Universum wurde transparent für Strahlung (*optisch dünn*). Wie man im Diagramm unter dem Eintrag Rekombination erkennen kann, war das Universum gerade etwa 400000 Jahre alt, als es transparent wurde. Unser lokales Universum ist bereits 13.7 Milliarden Jahre alt (linker Rand des Diagramms 19.19).

19.30.10 Meilensteine der Kosmologie

Die **Entfernungsangaben** von weit entfernten, astronomischen Objekten enthalten große Unsicherheiten. Deshalb greifen die Astronomen auf die kosmologische Rotverschiebung z zurück. Sie ist viel einfacher zu bestimmen und weniger fehleranfällig als die Entfernung. Die Astronomen messen Rotverschiebungen spektroskopisch (*spectro-z*) oder photometrisch (*photo-z*). Hier ein paar Meilensteine der Kosmologie:

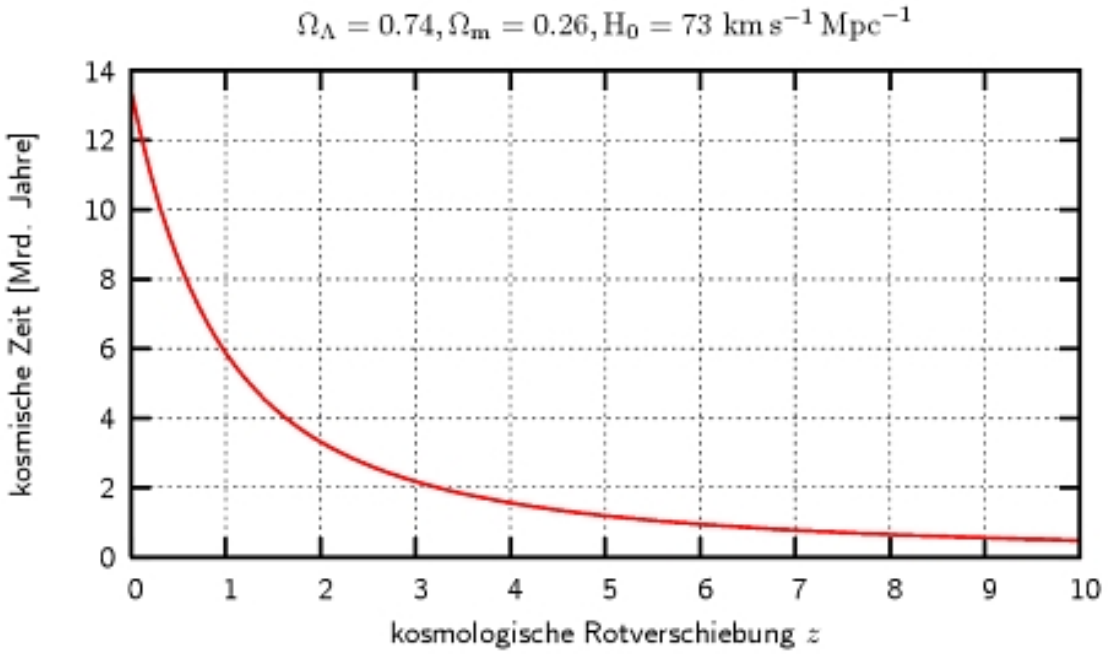

Abbildung 19.19: Beziehung zwischen kosmischer Zeit und kosmologischer Rotverschiebung bis $z = 10$.

- ◇ Bei $\boldsymbol{z = 0}$ ist die unmittelbare kosmologische Nachbarschaft, das **lokale Universum**. Erst in dieser Spätphase des Kosmos bildete sich **Leben**.
- ◇ Bei $\boldsymbol{z = 1.0}$ beginnt *per definitionem* die Domäne der **hochrotverschobenen** Objekte.
- ◇ Bei $\boldsymbol{z = 2.0}$ **bis 3.0** beobachten wir das Maximum der Häufigkeit der Quasare. Die Quasardichte war zu diesen Zeiten etwa 1000 höher, weil das Universum kleiner war und sich mehr Quasare gebildet haben.
- ◇ Bei $\boldsymbol{z = 5.0}$ war das Zeitalter der **Reionisation** von Helium. Diese Epoche ist die 'Vorschau' der Reionisation von Wasserstoff (engl. '*H preview*'), weil Astronomen sie bei kleineren Distanzen beobachten.
- ◇ Bei $\boldsymbol{z = 6.0}$ war das Zeitalter der Reionisation von Wasserstoff, durch intensive, hochenergetische Strahlungsquellen, die ersten Sterne (Population III). In diesem Bereich liegen sehr weit entfernte Objekte, die beobachtet wurden: *Hu et al. (2002)* fanden mit dem Keck II 10m-Teleskop hinter dem Cluster *Abell 370* eine Galaxie mit der Bezeichnung *HCM 6A*. Für sie konnte eine Rotverschiebung von $z = 6.56$ abgeleitet werden (Papier: astro-ph/0203091).

  Auch die am weitesten entfernten Gammastrahlenausbrüche liegen bei $z \sim 6$.

  Im Februar 2004 wurde auf ähnliche Weise eine noch weiter entfernte Galaxie mit dem Keck-Teleskop entdeckt: Die betreffende Galaxie hat eine Entfernung von $6.6 < z < 7.1$. Die schwache Strahlung wird durch eine Gravitationslinse ungefähr um einen Faktor 25 verstärkt: der räumlich vorgelagerte Galaxienhaufen Abell 2218 ($z = 0.175$) erzeugt ein Dreifachbild von der Galaxie. Zum Zeitpunkt als die Galaxie ihre Strahlung aussandte, war das Universum gemäß aktueller kosmologischer Parameter gerade mal 750 Millionen Jahre alt! Die Galaxie ist deutlich kleiner als beispielsweise die Milchstraße (Durchmesser etwa 100 000 Lichtjahre), denn sie durchmisst maximal 1.2 kpc, entsprechend etwa 4000 Lj. Die Sternbildungsrate (engl. *star formation rate*,

SFR) kann aus dem (rotverschobenen) UV-Kontinuum abgeschätzt werden. Sie ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, aber 2.6 Sonnenmassen pro Jahr recht hoch (Quelle: *Kneib et al.*, astro-ph/0402319).

- ◇ Bei $z = 10.0$ befindet sich der **aktuelle Entfernungsrekordhalter**, der nur zwei Wochen nach der Galaxie mit $z = 7$ entdeckt wurde. Eine Kollaboration von Astronomen aus der Schweiz, Frankreich und Kalifornien beobachtete mit der Infrarot-Kamera ISAAC (*Infrared Spectrometer And Array Camera*) des *Very Large Telescope* (VLT) in Chile eine Infrarotquelle im Galaxienhaufen Abell 1835. Diese Galaxie mit der Bezeichnung **Abell 1835 IR 1916** hat eine gigantische Rotverschiebung von $z = 10$! Die Strahlung dieser Galaxie erreicht uns aus einer Zeit, als das Universum nur etwa 480 Millionen Jahre alt war. Auch bei dieser Beobachtung half eine Gravitationslinse im Vordergrund, die zu einer Helligkeitsverstärkung um den Faktor 25 bis 100 führte. Die Gesamtmasse dieser sehr jungen Galaxie wurde zu 500 Mio. Sonnenmassen (inklusive Dunkle Materie im Halo) abgeschätzt. Mit dieser Beobachtung rückt die Profi-Astronomie immer näher an das Dunkle Zeitalter, das durch die ersten Strahlungsquellen im Universum beendet wurde (Papier: *Pello et al.* 2004, astro-ph/0403025).
- ◇ Die ersten kosmischen Strahlungsquellen bzw. die ersten elementaren Bausteine, die sich vor der Reionisationsära gebildet haben müssen, siedelt man bei Rotverschiebungen von $15 < z < 30$ an. Diese ersten Lichtquellen beendeten das **Dunkle Zeitalter** (engl. *dark ages*) der Kosmologie. Die ersten Sterne rechnet man der Population III zu. Sie waren noch relativ metallarm und setzten sich großteils aus Wasserstoff und Helium zusammen.
- ◇ Bei $z = 1100$ war die Epoche der **Rekombination**, wo sich die Strahlung von der Materie entkoppelte und das Universum durchsichtig wurde. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich die Atome bildeten (Protonen mit Elektronen rekombinierten) und damit der Streuquerschnitt für Photonen schlagartig abnahm. Eine Beobachtung des Universums mit elektromagnetischen Wellen führt daher maximal bis in diese Epoche zurück. Die **kosmische Hintergrundstrahlung** im Bereich der Mikrowellen, wie sie die Satelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*) und WMAP (*Wilkinson Microwave Anisoptropy Probe*) messen konnten, ist gerade das Relikt, das uns aus dieser Ära des jungen Universums erreicht. Mit aktuellen kosmologischen Parametern (flaches Universum, Anteile der Dunklen Energie und Materie, Wert der Hubble-Konstanten) kann einer Rotverschiebung von 1100 ein Alter des Universums von etwa 400000 Jahren zugeordnet werden. Tiefer ins All, zu noch früheren Entwicklungsphasen des Universums könnten Astronomen nur mit Gravitationswellen blicken. Bisher konnten diese Verzerrungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten nicht nachgewiesen werden. Die Physiker sind jedoch davon überzeugt, dass es sie geben muss.

19.30.11 Großräumige Struktur

Mit diesen Informationen lässt sich **Kosmographie** betreiben: man erhält eine Karte von der großäumigen Struktur des Universums. Das haben Astronomen beispielsweise in dem Survey **2dF** getan. Sie nutzten das Anglo-Australien-Observatory (AAO) in Australien und bestimmten die Spektren von knapp 250000 Objekten. Zum Großteil waren das Galaxien, die alle zusammen etwa 1500 Quadratgrad Himmelsausschnitt abdecken. Das Bild 19.20 zeigt ein Resultat von 2dF, das sehr schön die großräumige Struktur im Komos zeigt. Es ist die räumliche Verteilung von Galaxien in einem fächerförmigen Ausschnitt des Himmels (Credit: 2dF Galaxy Redshift Survey, 2003). Jeder blaue Punkt ist eine Galaxie! Insgesamt zeigt dieser Ausschnitt knapp 63000 Galaxien. Im Kreuzungspunkt in der Bildmitte sitzt der irdische Beobachter. Je weiter man sich an den Fächerrand bewegt, umso höher sind Rotverschiebung und Entfernung - maximal $z \sim 0.2$. Beide Daten wurden rechts an den Achsen angegeben. Die Uhrzeit ist eine Winkelangabe der Position am Himmel. Wie man sieht, ist die Verteilung der Galaxien nicht gleichmäßig und homogen, sondern sehr unregelmäßig. Dieses Foto offenbart eine **wabenartige Struktur**, die aus einzelnen Galaxien, Galaxienhaufen und Supergalaxienhaufen an den Knotenpunkten der Waben besteht. Im Wabeninnern sind riesige

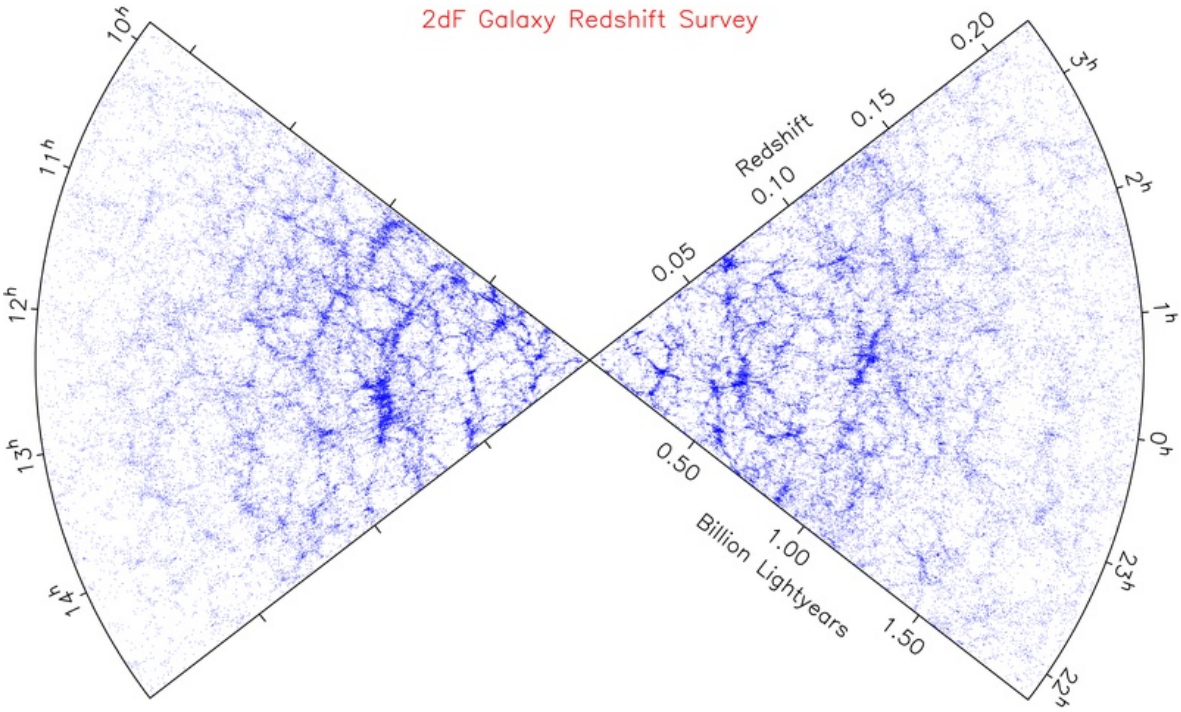

Abbildung 19.20: Galaxienverteilung beobachtet im Survey 2dF, 2003.

'Leerräume', die **Voids**. Die unregelmäßige Verteilung ist hauptsächlich ein Resultat der Gravitation, weil sie dafür sorgt, dass sich Massen anziehen und mit der Zeit verklumpen. Wie im Eintrag Dunkle Materie gezeigt wird, konnte kürzlich auch die (zu kleinen Rotverschiebungen hin zunehmende) Verklumpung der Dunklen Materie direkt beobachtet werden.

Das Bild zeigt auch, dass mit zunehmender Rotverschiebung immer weniger blaue Punkte zu sehen sind. Das ist im Wesentlichen ein instrumenteller Effekt und kein kosmologischer: Je weiter die Galaxie entfernt ist, umso mehr nimmt die Helligkeit ab, so dass viele Galaxien im Survey einfach nicht beobachtet werden können. Das Ziel solcher Studien ist daher, die Beobachtungstechnik so weit zu verbessern, dass die Astronomen noch tiefer in das Weltall blicken können (zu noch höheren z), so dass auch dort die großräumige Struktur studiert werden kann.

19.30.12 astronomische Messung der Rotverschiebung

Experimentell kann man sich Zugang zur wichtigen astronomischen Größe *Rotverschiebung* verschaffen, indem man Spektren detektiert (**Spektrographie**) und dort bekannte Spektrallinien identifiziert. Der Astronom *Maarten Schmidt* deutete 1963 auf diese Weise die Emissionslinien der **Quasare** als Linien besonders hoher Rotverschiebung, so dass Quasare (damals wie heute) zu den am weitesten entfernten Objekten gehören. Aufgrund der großen Entfernung sind gerade die Spektren von Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) relevant, weil sie aufgrund ihrer enormen Leuchtkraft überhaupt noch detektierbar sind. Besonders charakteristisch und leicht zu erkennen ist in diesen Objekten die **Lyman-Kante des Wasserstoffs** (*Lyman-α, Lyα*). Aufgrund der kosmischen Expansion ist diese Kante zum roten Ende hin verschoben. Vergleicht man diese beobachtete Wellenlänge mit der Laborwellenlänge, also der Wellenlänge im irdischen Labor bei $z = 0$, so liefert der Quotient gerade den Rotverschiebungsfaktor g und damit auch die Rotverschiebung z.

19.31 Rotverschiebungsfaktor

Der Rotverschiebungsfaktor g ist so definiert, dass man den Quotienten der Frequenz von Photonen im Beobachtersystem zu der im Emittersystem bildet. Im Prinzip entspricht das dem Verhältnis von der zeitlichen Komponente des Photonenimpulses im Beobachter- zu dem im Emittersystem. Der Rotverschiebungsfaktor g ist ein alternativer Parameter zur Rotverschiebung z. Wie man von einer Größe auf die andere transformiert, zeigt diese Gleichung

$$g \equiv \frac{\nu_{\mathrm{obs}}}{\nu_{\mathrm{em}}} = \frac{\lambda_{\mathrm{em}}}{\lambda_{\mathrm{obs}}} = \frac{1}{1+z}.$$

In der Analyse von Spektren hat sich eingebürgert, den Rotverschiebungsfaktor zu verwenden, während man in der Kosmologie die Rotverschiebung verwendet, vor allem, um die Entfernung zu parametrisieren.

19.31.1 Doppler-Effekt vs. Expansion der Raumzeit

Die Rotverschiebung in einem Spektrum zwischen Ruhewellenlänge und beobachteter oder Laborwellenlänge (siehe auch Laborsystem) kann verschiedene physikalische Ursachen haben. Führt man sie auf eine Relativbewegung zurück, die den Abstand zwischen Emitter und Beobachter vergrößert, so spricht man vom **Doppler-Effekt**. Die **kosmologische Rotverschiebung** wird so interpretiert, dass sich entfernte kosmische Quellen von der Erde weg bewegen, weil sie von der expandierenden Raumzeit des Universums mitgezogen werden (vergleiche Friedmann-Weltmodell). Dennoch sollte man die Doppler-Bewegung qualitativ von einer eingebetteten Bewegung in einer expandierenden Raumzeit unterscheiden. Denn im Unterschied zu einer Bewegung im Sinne der klassischen Mechanik (mit statischem Hintergrund) ist der expandierende Kosmos ein dynamischer Bezugsrahmen. Lokal ($z \sim 0$) wird dieser kosmische, großskalige Prozess von Blauverschiebungen überlagert, weil sich nahe Galaxien, wie der Andromedanebel auf die Milchstraße zu bewegen.

19.31.2 Gravitationsrotverschiebung: Schwerkraft zieht am Licht

Die Rotverschiebung kann auch von einzelnen starken Gravitationsquellen bewirkt werden, weil sie die Raumzeit in ihrer Umgebung stark krümmen und Strahlung am Entkommen zu hindern suchen. Diese **gravitative Rotverschiebung** heißt im Allgemeinen Gravitationsrotverschiebung. Solche Effekte sind besonders interessant bei Kompakten Objekten, wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Was die Gattung der letztgenannten Objekte betrifft, so hat *Brandon Carter* 1968 mithilfe des Hamilton-Jacobi Formalismus Ausdrücke für die Photonenimpulse im ZAMO-System für die Kerr-Metrik rotierender Schwarzer Löcher hergeleitet. Transformiert man diese ZAMO-Impulse über eine Lorentz-Transformation ins Ruhesystem der Materie, so liefert der Quotient gerade den Rotverschiebungsfaktor (g-Faktor).

19.31.3 relativistisch verallgemeinerter Dopplerfaktor g

Der so *relativistisch verallgemeinerte Dopplerfaktor* (alternativ auch **verallgemeinerter Rotverschiebungsfaktor** genannt) beinhaltet dann sämtliche relativistischen Effekte, die in der Umgebung Schwarzer Löcher eine Rolle spielen. Zu diesen Effekten zählen der **Doppler-Effekt**, (Forward- und Back-) **Beaming** sowie **Gravitationsrotverschiebung**. Sie beeinflussen die Strahlung, die nahe Schwarzer Löcher emittiert wird besonders stark. Auch das **Geschwindigkeitsfeld des emittierenden Plasmas** (Rotation, Drift, Akkretion, Ejektion, Wind) hinterlässt Spuren in der Strahlung. All das ist im relativistisch verallgemeinerten Dopplerfaktor der Kerr-Geometrie enthalten – eine Diskussion dieses speziellen Themas gibt es im Wissensportal in dem Webartikel Schwarze Löcher – Das dunkelste Geheimnis der Gravitation, Kapitel *Die Kerr-Lösung*, Abschnitt *Der g-Faktor – all inclusive* und in dem Papier *Relativistic emission lines from accreting black holes – The effect of disk truncation on line profiles* von *A. Müller & M. Camenzind*, erschienen in A&A 413, 861, 2004.

19.31.4 Kosmologie

Die **kosmologische Rotverschiebung *z*** kann aus Spektren astrophysikalischer Objekte bestimmt werden, indem man die beobachtete Wellenlänge oder Frequenz mit der des Ruhesystems ins Verhältnis setzt. In der Analyse vergleicht man charakteristische Spektrallinien oder spektrale Komponenten (z. B. Lyman-Alpha-Kante) im Ruhesystem und im Beobachtungssystem. Die Rotverschiebung z ist aufgrund des Hubble-Effekts ein **Maß für die Entfernung** der Objekte: je weiter sie entfernt sind, umso höher ist z. Dies ist das Hubble-Gesetz mit einer Proportionalitätskonstante, der **Hubble-Konstante** (sprachlich besser: **Hubble-Parameter**, da sie *nicht zeitlich konstant* ist über große Zeiträume). Bei bekannten kosmologischen Parametern (Hubble-Parameter, Materieinhalt des Universums, Dunkle Materie, Dunkle Energie bzw. kosmologische Konstante) erhält man einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Rotverschiebung z und Entfernung. Da diese Parameter einer 'gewissen Mode' bzw. Streuungsbreite unterlagen und mit vielen Publikationen und Beobachtungen über die Jahre wechselten, gibt man mittlerweile oft nur z als Entfernungsindikator an. Den **Entfernungsrekord** hält zurzeit eine Galaxie bei $z \sim 10$. Bei diesen Entfernungen schaut man so weit in die Vergangenheit des Universums, dass man neutrale Bereiche im intergalaktischen Medium erkennt, also vor die **Epoche der Reionisation**.

Die räumliche Verteilung von z im Universum belegt bis auf lokale Blauverschiebungseffekte die **Fluchtbewegung der Galaxien**. Sie 'schwimmen' mit dem expandierenden 'Raumzeit-Strom'. Dies ist neben der kosmischen Hintergrundstrahlung (auch Drei-Kelvin-Strahlung) das schwerwiegendste Argument für den Urknall und falsifiziert alle Modelle von Statischen Universen.

19.32 r-Prozess

Der r-Prozess ist einer derjenigen Mechanismen, denen wir die Vielfalt an Elementen im Universum verdanken. Zur Klärung werden wir etwas weiter ausholen: Üblicherweise werden Elemente in der thermonuklearen Fusion im Innern von Sternen fusioniert. In der Frühphase des Universums, war es einmal so klein und so heiß, dass es selbst wie ein riesiger Fusionsreaktor funktionierte. In dieser Phase, die man primordiale Nukleosynthese ('urzeitliche Verschmelzung von Kernen') nennt, entstanden die *primordialen Häufigkeiten* der leichten Elemente. Sie waren nicht besonders schwer: einfacher Wasserstoff (H-1), Deuterium (ein Wasserstoffisotop: schwerer Wasserstoff, H-2, manchmal auch mit D symbolisiert), Helium (die zwei Isotope He-3 und He-4) und Lithium (Li-7).

19.32.1 Bei Eisen ist Schluss!

Aus diesen anfangs nur leichten Elementen gewinnt man mit den ersten entstandenen Sternen in der stellaren Nukleosynthese dann nach und nach die schweren Elemente. Aber dies funktioniert nur **bis zum Element Eisen** (Fe), weil bei der Fusion schwererer Elemente keine Energie mehr frei wird, was ungünstig für die Stabilität des Fusionsobjektes ist.

19.32.2 Dann übernimmt der r-Prozess u. a.

Phänomenologisch gleicht der r-Prozess dem **s-Prozess**, dem zweiten Prozess, dem wir die sehr schweren Elemente verdanken. Atomkerne fangen also Neutronen aus der Umgebung ein. Aber die Neutronendichten sind deutlich höher als im s-Prozess, typisch bei 10^{20} cm^{-3}, also 100 Trillionen Neutronen in einem Kubikzentimeterwürfel! Die Kerne werden mit Neutronen übersättigt. Stoppt der Neutronenfluss, so zerfallen einige der Neutronen im übersättigten Kern über den β^--Zerfall, d. h. es werden Protonen im Kern erzeugt. Als Folge dessen ist die Ordnungszahl (Kernladungszahl Z) angestiegen: ein **neues, schwereres Element** ist entstanden.

19.32.3 r wie richtig schnell

Die Wahrscheinlichkeit für den Einfang von Neutronen durch die Kerne ist deutlich größer, so dass die Zeitskala des r-Prozesses bei wenigen Zehntel Millisekunden liegt. Dieser Schnelligkeit (engl. ***r****apidness*) verdankt der r-Prozess seinen Namen. Die Schnelligkeit bewirkt auch, dass der r-Prozess sogar noch bei sehr schweren Kernen funktioniert, obwohl diese relativ schnell zerfallen. Auf der Nuklidkarte schließt sich deshalb der r-Prozess an den s-Prozess an und bewegt sich nahe am Stabilitätstal, aber im oberen Bereich.

19.32.4 r-Prozess braucht Sternexplosionen!

In der Astrophysik können nun die auslaufenden Schockwellen von Supernovae (klassischer Kernkollaps, Typ II) das interstellare Medium so sehr verdichten, dass die relevanten, hohen Neutronendichten erzeugt werden. Die schwersten Elemente (schwersten Metalle) stammen also aus r-Prozessen in Sternexplosionen. Ordnet man die nuklearen Prozesse nach der Schwere der Elemente, die sie erzeugen, von leicht nach schwer, so ergibt sich: thermonukleare Fusion, s-Prozess, r-Prozess.

Daneben spielt der p-Prozess, eine Protoneneinfangreaktion, eine untergeordnete Rolle. Er führt zur Erzeugung weiterer 32 stabiler, schwerer Metalle, allerdings mit geringer Isotopenhäufigkeit.

19.32.5 Empfohlene Quelle

Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Arbeitsgruppe Nukleare Astrophysik

19.33 RRAT

Das Akronym RRAT steht für ***R****otating* ***RA****dio* ***T****ransients*, also rotierende Radiotransienten. Das sind neue entdeckte stellare, transiente Radioquellen, die als **neue Population** von Neutronensternen entdeckt wurden. Weitere Erklärungen gibt es im Eintrag Pulsar.

19.34 RR Lyrae-Sterne

Es handelt sich um einen Typus **veränderlicher Sterne**, der sehr verwandt ist mit den Cepheiden. RR Lyrae Sterne wurden nach ihrem Prototyp im Sternbild *Lyra* (dt. *Leier*) benannt. Die Astronomen nennen sie auch *Haufenveränderliche*, weil sie besonders häufig in Kugelsternhaufen zu finden sind.

19.34.1 Eigenschaften

RR Lyrae-Sterne sind besonders alte Sterne der Population II, die regelmäßig variable Lichtkurven aufweisen. Physikalisch gesehen, handelt es sich um schnell pulsierende Riesensterne (Spektralklasse **A**), in denen Helium im Sternkern brennt. Sie haben typische Perioden kleiner als ein Tag, so dass man als Hobby- oder Amateurastronom einen oder zwei Zyklen in nur *einer* Nacht beobachten kann. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm besetzen die RR Lyrae-Sterne den Instabilitätsast, weil sie pulsieren und so instabile Sternphasen durchlaufen.

19.34.2 praktische Perioden-Leuchtkraft-Relation

Wie die *Cepheiden* weisen die RR Lyrae-Sterne eine **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung** auf, die es gestattet aus der beobachteten Periode der Lichtkurve auf die **absolute Leuchtkraft** M zu schließen. Mit der ebenfalls beobachteten **scheinbaren Helligkeit** m folgt über das Entfernungsmodul die Distanz d des Sterns gemäß $d = 10^{1+0.2(m-M)}$. Daher sind die Haufenveränderliche - ebenso wie die *Cepheiden* - gute Standardkerzen, allerdings nur brauchbar bis Distanzen von etwa 0.5 Mpc, während *Cepheiden* noch viel weiter verwendbar sind, bis 20 Mpc.

19.34.3 zum Prototypen

Der Prototyp RR Lyrae hat eine Periode von 13 Stunden und 36 Minuten, in der die Helligkeit von 7.1 auf 8.1 Magnituden variiert. Diese **Helligkeitsschwankungen** bis maximal 2 Magnituden sind typisch für alle RR Lyrae-Sterne.

19.35 Ruhesystem

Siehe dazu Eintrag Lorentz-Faktor.

20 Lexikon S

20.1 Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit c_s ist die Geschwindigkeit einer akustischen Welle, die davon abhängt, in welchem Medium sich der Schall ausbreitet. Eine Schallwelle ist im Prinzip ein Druckunterschied, der sich wellenförmig, z. B. in Luft oder in Wasser, ausbreitet. Schallwellen sind *longitudinale* Wellen, d. h. die Schwingung der Welle findet in die Richtung wie die Ausbreitung der Welle statt.

20.1.1 Wie schnell ist der Schall in Luft?

Die Schallgeschwindigkeit c_s besitzt in Luft nur eine Temperaturabhängigkeit und lässt sich gut unter der Annahme eines **idealen Gases** (siehe auch Zustandsgleichung) berechnen: $c_s^2 = c_p RT/(c_v M)$, hierin sind c_p die spezifische Wärme bei konstantem Druck und c_v die spezifische Wärme bei konstantem Volumen, R ist die spezifische Gaskonstante, M die Molmasse des Gases und T die Temperatur in Kelvin. $\gamma = c_p/c_v$ beträgt im Gasgemisch Luft etwa 1.4 (Stickstoff und Sauerstoff sind zweiatomige Moleküle). Die Gaskonstante R ist das Produkt aus Avogadro-Zahl $\mathrm{N_A} = 6.0221 \times 10^{23}$ Teilchen und Boltzmann-Konstante k = 1.380658 $\times 10^{-23}$ J/K und beträgt 8.31451 J mol_{-1} K_{-1}. Die Molmasse von Luft lässt sich schnell berechnen: Luft ist ein Gasgemisch aus Stickstoff (N, 78%), Sauerstoff (O, 21%) und Edelgasen (Ar, 1%). Die Molmassen dieser einzelnen Spezies sind:

- M_N = 28 g/mol, zweiatomig,
- M_O = 32 g/mol, zweiatomig,
- M_{Ar} = 40 g/mol, einatomig,

wobei unter den Edelgasen vor allem Argon dominiert. Die Molmasse gibt an, wie viel ein Mol (Zähleinheit!), also etwa 6×10^{23} Teilchen der betreffenden Spezies wiegen. Geeicht wurde die Skala am Kohlenstoffisotop C-12. Ein Mol dieses Kohlenstoffs wiegt gerade 12 g. Ein Mol des einatomigen Edelgases Argon wiegt daher 40 g. Ein Mol Sauerstoff, was ein zweiatomiges Gas ist, wiegt 2×16 g = 32 g. Ein Mol des Gasgemischs Luft wiegt unter obiger Prämisse gerade (0.78×28 + 0.21×32 + 0.01×40) g = 28.96 g. Setzt man also in die Gleichung für die Schallgeschwindigkeit in Luft diese Werte (Temperatur sei 293 K, also Raumtemperatur) und Konstanten ein, so erhält man eine **Schallgeschwindigkeit in Luft von 343 m/s**.

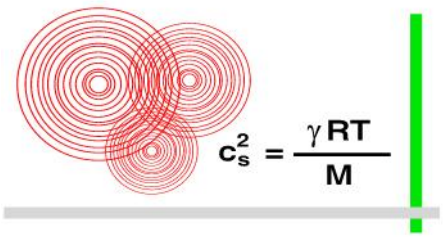

Abbildung 20.1: Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.

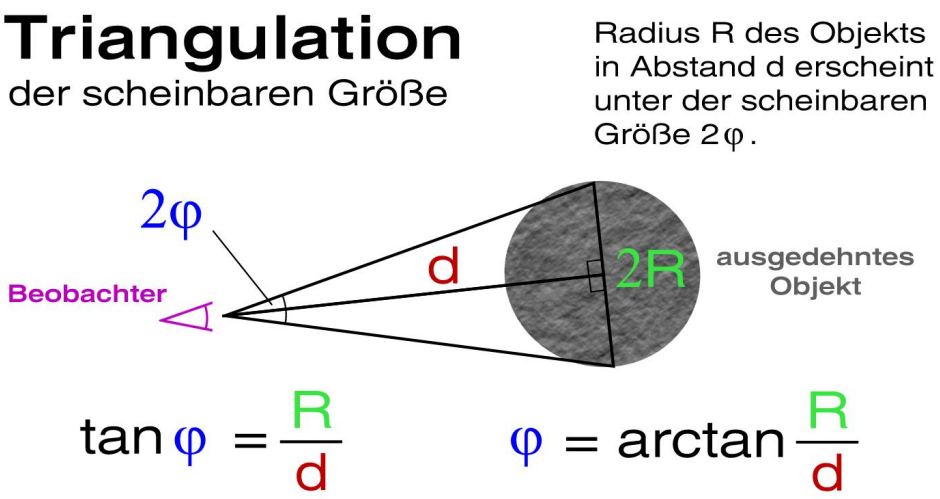

Abbildung 20.2: Triangulation der scheinbaren Größe aus Distanz und Radius.

20.1.2 Wie schnell ist der Schall in Wasser?

Prinzipiell funktioniert diese Methode auch bei der Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Wasser, nur besitzt sie hier eine kompliziertere Abhängigkeit als in einem idealen Gas, nämlich von Temperatur, Druck, gelösten Gasen etc. Schall, was ja nichts anders ist, als eine sich im Raum ausbreitende Dichtefluktuation, propagiert in Wasser viel schneller, als in der Luft, weil die Kopplung der Schwinger (Wasser- gegenüber Luftmolekülen) viel effizienter ist. Die **Schallgeschwindigkeit beträgt in Wasser 1450 m/s**.

20.1.3 Überschallgeschwindigkeit

Bei Objekten, die sich schneller als der Schall im jeweiligen Medium fortpflanzen, wird die Machzahl größer als 1, und es bildet sich ein Machscher Kegel aus.

20.1.4 Geschwindigkeitsrekord in Luft

Der irdische **Geschwindigkeitsrekord eines künstlichen Flugkörpers** wurde mit einem *Hyperschall-Fluggerät* der NASA aufgestellt (März 2004). Der unbemannte Prototyp x-43A erreichte über dem Pazifik eine Geschwindigkeit von 7700 km/h! Der Technologiesprung wurde durch eine revolutionäre Raketenantriebstechnik erreicht, die direkt den Sauerstoff der Umgebungsluft nutzt. So muss diese Komponente des Treibstoffs nicht aufwendig im Flugkörper mitgeführt werden.

20.2 scheinbare Größe

Objekte am Himmel haben eine bestimmte Entfernung zum Beobachter auf der Erde. Himmelskörper erscheinen umso kleiner, je weiter sie entfernt sind. Die von der Entfernung abhängige Ausdehnung nennt man in der Astronomie scheinbare Größe. Sie wird im Gradmaß in Einheiten von Grad, Bogenminute und Bogensekunde angegeben.

20.2.1 Größe am Himmel

Die Abbildung 20.2 illustriert, wie man die scheinbare Größe eines Objekts aus dessen tatsächlichen Radius R und der Objektdistanz d mittels der trigonometrischen Tangensfunktion berechnet.

Grad, Bogenminute und Bogensekunde sind gewissermaßen die natürlichen Längeneinheiten von Beobachtern, während Theoretiker spezielle Längeneinheiten haben, die dem Problem bzw. der Skala angepasst sind. Theoretiker haben so vielfältige Längeneinheiten wie beispielsweise Gigalichtjahr, Mpc, kpc, Parsec, Lichtjahr, Lichttag, Gravitationsradius, Schwarzschild-Radius, Lichtstunde, Astronomische Einheit, Sonnenradius, Lichtsekunde, cm, Fermi, Planck-Länge etc.

20.2.2 Wie scharf darf's sein?

Die hochauflösende, moderne Astronomie erfordert eine weitere Unterteilung der Bogensekunde: So gibt die **Millibogensekunde** (Abkürzung mas für *milliarcsecond*) den tausendsten Teil einer Bogensekunde an, und **Mikrobogensekunde** (Abkürzung μas, μ ist das kleine grch. m, für *microarcsecond*) entspricht einer Millionstel Bogensekunde.

20.2.3 Zahlenbeispiele

Der **Vollmond** hat im Gradmaß einen (mittleren scheinbaren) Durchmesser von 31 Bogenminuten und 6 Bogensekunden oder 1866", also etwas mehr als ein halbes Grad. Die **Sonne** hat einen scheinbaren Durchmesser von etwa 1914 Bogensekunden oder 31'54". Beim Vergleich der scheinbaren Größen von Sonne und Mond fällt auf, dass sie recht nahe beieinander liegen. Dieser Zufall ermöglicht gerade *Sonnenfinsternisse* (Eklipsen), wo die Mondscheibe die Sonne abdeckt. Je nach aktuellem Abstand des Mondes zur Erde variiert die scheinbare Größe des Mondes geringfügig. Daher kann es totale oder ringförmige Sonnenfinsternisse geben (partielle Sonnenfinsternisse sind dort beobachtbar, wo sich der Halbschatten des Mondes befindet).

Jupiter, der größte Planet im Sonnensystem, erscheint je nach Abstand zur Erde und relativer Stellung (Opposition etc.) etwa bei einer Bogenminute.

Im Zentrum der Milchstraße, das mit der kompakten Radioquelle Sgr A* identifiziert wird, gibt es ein **supermassereiches Schwarzes Loch** von etwa drei Millionen Sonnenmassen. Der Abstand des Loches zur Erde beträgt etwa 8 kpc oder 26000 Lichtjahre. Es wird in unmittelbarer Nähe von einem Stern namens *S2* in einem Abstand von 17 Lichtstunden umkreist. Entsprechend folgt nach einer kurzen trigonometrischen Berechnung, dass die Bahnellipse von *S2* unter einem Durchmesser von etwa 30 Millibogensekunden oder 0.03" am Firmament erscheint. Das ist bereits nahe an der aktuellen Auflösungsgrenze. Möchte man die scheinbare Größe des völlig schwarzen Ereignishorizonts des maximal rotierenden Schwarzen Loches im Zentrum der Milchstraße bestimmen, so wird es noch anspruchvoller für die Beobachter: Bei angenommenen Kerr-Parameter von eins, liegt der Ereignishorizont bei exakt einem Gravitationsradius oder bezogen auf eine vermutete Masse des Loches von 3 Millionen Sonnenmassen bei 4.4 Millionen Kilometern. In einer Entfernung von 8 kpc sieht man deshalb den kugelförmigen Horizont unter 7.4 Mikrobogensekunden. Diese scheinbare Größe ist geradezu winzig. Dennoch haben die Beobachter die Hoffnung, in naher Zukunft diese Schwärze des Schwarzen Loches vor dem hell strahlenden Hintergrund beobachten zu können. Dies käme einem **direkten Nachweis eines Schwarzen Loches** gleich!

20.3 Schleifen-Quantengravitation

Die Schleifen-Quantengravitation oder Schleifenquantengravitation ist der deutsche Begriff, der gelegentlich für die Loop-Quantengravitation (LQG) zu lesen ist.

20.3.1 Welche Schleifen sind gemeint?

Die LQG ist eine Quantengravitation, in der die Forscher direkt versucht haben, die Konzepte der Quantentheorie (genauer: der Quantenmechanik) und der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) zu verknüpfen. Ziel: Die Quantisierung der Raumzeit. Die resultierenden Raumzeitquanten werden Wilson-Loops oder kurz *Loops* (dt. *Schleifen*) genannt.

20.3.2 Quanten der Raumzeit: Loops

Die Loops sind schleifenförmige Gebilde, die den Hilbert-Raum der LQG aufbauen. Ihr Zusammenwirken und ihre Anregungen erzeugen gerade die Raumzeit. Diese Raumzeit ist nun nicht mehr glatt und kontinuierlich, wie in Einsteins ART, sondern sie ist quantisiert auf der Planck-Skala. Anstelle von Loops wurden später die **Spin-Netzwerke** als alternative und mathematisch günstigere Orthonormalbasis gefunden.

20.3.3 Quanten der Raumzeit: Loops

Die Loops sind allerdings **hypothetische Quanten**, die bislang nicht in der Natur beobachtet wurden oder für die es indirekte Hinweise gibt. Die Schleifen-Quantengravitation bietet allerdings einige interessante Aspekte, die derzeit sowohl experimentell getestet, als auch in der Theorie weiter entwickelt werden.

Nach einer Quantisierung der Raumzeit strebt auch eine andere Theorie: die Stringtheorien bzw. die M-Theorie. Hier sind die Quanten der Gravitation die Gravitonen. Die physikalischen Experimente werden in Zukunft hoffentlich eine von beiden Theorien zum Favoriten küren oder völlig neue Erkenntnisse zutage bringen, um die Sicht auf die Natur zu erneuern.

20.3.4 Weitere Informationen

Eine umfangreiche Vorstellung der Theorie der Schleifen-Quantengravitation gibt es unter dem Eintrag Loop-Quantengravitation .

20.4 Schwache Wechselwirkung

Die **schwache Wechselwirkung** ist eine Theorie, die bestimmte Formen des **radioaktiven Zerfalls** erklärt, nämlich die beiden Formen des Beta-Zerfalls. Den Terminus 'schwach' verdankt die Wechselwirkung ihrer äußerst kurzen Reichweite von nur 10^{-15} cm (etwa einem Hundertstel des klassischen Protonendurchmessers!). 'Schwach' heißt sie auch deshalb, weil sie - verglichen mit den anderen drei fundamentalen Wechselwirkungen (gravitative, elektromagnetische und starke) - keine besonders hohe relative Stärke besitzt.

20.4.1 Schwächste Naturkraft, aber wichtig

Da sich schwach wechselwirkende Teilchen erst einmal bis auf diese kurze Distanz nähern müssen und dies recht selten vorkommt, ist diese schwache Wechselwirkung ein relativ rar auftretendes Ereignis - jedenfalls verglichen mit den andern Naturkräften. Zum Glück ist das so, sonst würde alles, was uns umgibt und aus dem wir bestehen - im Wesentlichen baryonische Materie - zerfallen! Bei gleichnamig geladenen Teilchenspezies müssen die beteiligten Partner soviel kinetische Energie aufbringen, um die elektromagnetische Abstoßung (den so genannten *Coulomb-Wall*) zu überwinden: erst dann kommen sie sich überhaupt so nahe, dass sie 'schwache Kräfte spüren'.

20.4.2 alle Teilchen haben eine Schwäche für die schwache Kraft

Alle Leptonen sind per definitionem schwach wechselwirkende Teilchen, die von der starken Wechselwirkung ausgeschlossen sind. Der Grund dafür ist, dass Leptonen keine Farbladung tragen. Zu den Leptonen zählen u. a. die Elektronen, die Positronen (ihre Antiteilchen), die Myonen und Tauonen ('schwere Elektronen') und die Neutrinos. **Alle Teilchen** hingegen tragen eine schwache Hyperladung, so dass alle Teilchen schwach wechselwirken können.

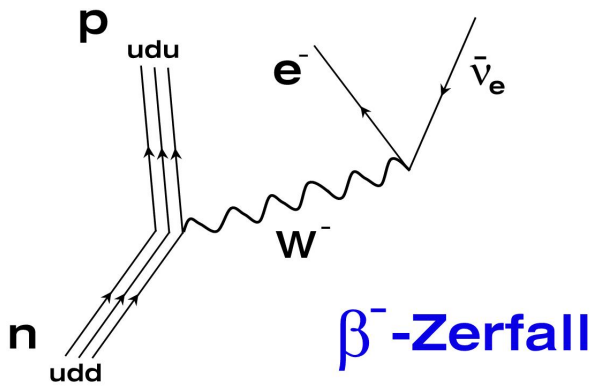

Abbildung 20.3: Feynman-Diagramm des Beta-Zerfalls.

20.4.3 Beta-Zerfall und Erhaltungssätze

Beim β^--Zerfall wandelt sich ein im Atomkern des Radionuklids gebundenes Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Anti-Neutrino um. Es handelt sich um einen *Dalitz-Zerfall*, der ein kontinuierliches Energiespektrum der drei Zerfallsprodukte nach sich zieht, weil die (kinetischen) Energien auf drei Teilchen verteilt werden können. Die **Erhaltungssätze** von Quantenzahlen (Energie, Impuls, Ladung und Leptonenzahl) sind bei der Zerfallsgleichung immer zu beachten! So ist es wesentlich, dass ein Anti-Neutrino entsteht (Leptonenzahl -1), weil ebenfalls ein Elektron (Leptonenzahl +1) frei wird, während auf der linken Seite der Reaktionsgleichung ein Zerfallskern steht (Leptonenzahl 0). Sollte sich das Neutrino als *Majorana-Teilchen* (sein eigenes Antiteilchen) herausstellen, so ist diese Unterscheidung hinfällig. Mehr noch: die Leptonenzahlerhaltung wäre verletzt und würde als Erhaltungssatz nicht mehr gelten! Die freiwerdenden Elektronen bzw. Positronen im Beta-Zerfall nennt man auch **Betastrahlung**.

20.4.4 Beta-Zerfälle auf dem Quarkniveau

Die Abbildung 20.3 zeigt das Feynman-Diagramm des β^--Zerfalls auf der Ebene der Quarks: bei diesem β-Zerfall wandelt sich also ein Down-Quark (d) in ein Up-Quark (u) um, während ein negativ geladenes W-Teilchen ausgetauscht wird. Das W-Teilchen muss genau diese Ladung wegen des Erhaltungssatzes der elektrischen Ladung haben. Man liest das Feynman-Diagramm von unten nach oben und stellt fest, dass sich durch diese Quarkverwandlung das Neutron (n) in ein Proton (p) verwandelt hat. Leptonenzahl- und Ladungserhaltung erfordern schließlich auch die Entstehung eines Elektrons (e^-) und eines Anti-Elektronneutrinos (ganz rechts im Diagramm).

Beim β^+-Zerfall hingegen zerfällt ein gebundenes Proton (uud) in ein Neutron (udd), ein Positron und ein Neutrino. Auf der Quarkebene hat sich demnach ein Up-Quark in ein Down-Quark verwandelt. Wichtig sei an dieser Stelle erwähnt, dass nur ein *gebundenes* Proton zerfällt.

20.4.5 Anmerkung: Zerfall des freien Protons

Der Zerfall eines *freien* Protons ist erst eine zwingende Folge der Großen Vereinheitlichten Theorien (**GUT**) - das wurde jedoch noch nicht experimentell beobachtet! Nach dem Protonenzerfall wird mit großen Wassertanks mithilfe von Cerenkov-Zählern gesucht. Wasser enthält extrem viele Protonen in Form von Wasserstoffkernen ($\mathbf{H}_2\mathrm{O}$). Die Cerenkov-Zähler detektieren die elektromagnetische Szintillationsstrahlung, die frei wird, wenn ein Proton in kleinere Bestandteile zerfällt. Das Problem bei dieser Suche ist, dass die Zerfallszeit des freien Protons mit 10^{32} Jahren enorm groß ist. Durch eine große Wassermenge erwartet man wenigstens einige Ereignisse pro Monat.

20.4.6 W^-, W^+, Z^0 - Boten der schwachen Kraft

Das **negativ geladene W^--Teilchen** (Masse 81 GeV) ist nun eines der drei schweren Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung. Daneben gibt es noch ein **positiv geladenes W^+-Teilchen** (ebenfalls 81 GeV Masse) und ein **neutrales Z^0-Teilchen**, das das schwerste (Masse 91 GeV) unter den schwachen Vektorbosonen ist. Diese drei Eichbosonen der schwachen Wechselwirkung nennt man gelegentlich auch Weakonen. Die W-Teilchen sind die einzigen Eichbosonen des Standardmodells, die eine elektrische Ladung tragen. Teilchenphysiker bezeichnen sie auch im Fachjargon als 'geladene Ströme', wohingegen die Z-Teilchen 'neutrale Ströme' sind. Wegen der Gültigkeit der Ladungszahlerhaltung, vermögen die W-Teilchen die Ladung beteiligter Teilchen im schwachen Prozess zu ändern (*ladungsändernde Prozesse*, *Prozesse geladener Ströme*). Das positiv geladene W-Teilchen wird entsprechend beim β^+-Zerfall ausgetauscht.

20.4.7 Pioniere & Spin-Algebren

Ein erster Zugang zur Quantenfeldtheorie der schwachen Wechselwirkung war die **Glashow-Weinberg-Salam-Theorie** (GWS-Modell). Diese Physiker versuchten die Erfolge der renormierten **Yang-Mills-Theorie** in der starken Wechselwirkung auch auf die schwache Wechselwirkung zu übertragen. Eine entscheidende Rolle spielt bei diesen Betrachtungen der **schwache Isospin**. Genauso wie der **Spin** gehorchen Isospin und schwacher Isospin der *Drehimpulsalgebra* der Quantenmechanik. Die Physiker unterscheiden bei einem Spin S entsprechend 2S+1 verschiedenen Spinzustände (für ein Teilchen mit Masse). Ist S = 0, so gibt es nur einen (2×0+1 = 1) Spinzustand. Die Teilchenphysiker sagen dazu *Spinsingulett*. Ist hingegen S = 1/2, so gibt es 2×1/2+1 = 2 Zustände; dies ist das *Spindublett*. S = 1 generiert 2×1+1 = 3 Zustände, das *Spintriplett*. Mit diesen unterschiedlichen 'Zuständen' sind bei Isospin und schwachem Isospin *unterschiedliche Teilchen* assoziiert. Die Teilcheneigenschaft Spin ordnet mit dieser Systematik den Teilchenzoo.

20.4.8 Heisenberg: Erfinder des Isospins

Isospin-Symmetrie bedeutet in diesem Zusammenhang, dass man alle Protonen durch Neutronen ersetzen kann, ohne dass sich die Verhältnisse ändern. Diese Idee geht auf *Werner Heisenberg* zurück, der die Nukleonen als Isospindublett (Isospin 1/2) auffasste. Neutron und Proton unterscheiden sich nur in der dritten Komponente des Isospins, der so genannten *Isospinprojektion*.

20.4.9 linkshändige und rechtshändige Welt

Der schwache Isospin wiederum differenziert zwischen den verschiedenen Leptonen. Die **linkshändigen** Leptonen sind **schwache Isospindubletts**, während die **rechtshändigen** Leptonen **schwache Isospinsinguletts** sind (siehe zur Händigkeit auch Helizität und Chiralität). Der entscheidende Unterschied zwischen links- und rechtshändigen Teilchen ist, dass nur die linkshändigen an der schwachen Wechselwirkung teilhaben. Hinzu kommt, dass es linkshändige Neutrinos nur gibt, wenn sie eine Ruhemasse haben. Dies wurde im Experiment Superkamiokande 1998 in Japan nachgewiesen!

20.4.10 Auf dem Weg zur Weltformel

In der **elektroschwachen Theorie** (*Weinberg-Salam-Modell*) ist es gelungen, die Quantenelektrodynamik (QED) mit der schwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Dies war der Wegbereiter der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) und der Vereinheitlichten Theorie (Unified Theory, **UT**). Die relativen Stärken der schwachen, starken und elektromagnetischen Wechselwirkung gleichen sich auf der GUT-Energieskala von etwa 2×10^{16} GeV einander an und können als eine Kraft, als **X-Kraft**, beschrieben werden. Experimentelle Evidenz für die Unifikation der Kräfte sind die *laufenden Kopplungskonstanten*: Die drei Kopplungskonstanten, die mit elektromagnetischer, schwacher und starker Kraft assoziiert sind, nähern sich zu hohen Energien

des betrachteten Prozesses hin an. Ist der Konvergenzpunkt bei einer bestimmten kritischen, hohen Energie erreicht, macht es keinen Sinn mehr, die Kräfte voneinander zu unterscheiden. Allerdings ist die Supersymmetrie erforderlich, damit sich die Kopplungskonstanten wirklich in genau einem Konvergenzpunkt treffen.

Nur die Gravitation spielt eine Sonderrolle und widerstrebt bisher der Vereinigung aller Kräfte. Sollte das Szenario einer TeV-Quantengravitation tatsächlich in der Natur realisiert sein (Voraussetzung: Existenz von Extradimensionen), so könnten bereits auf der Skala der elektroschwachen Theorie (1 TeV) Signaturen von Gravitonen messbar sein. An dieser Schwelle stehen derzeit moderne Teilchenbeschleuniger wie der LHC am CERN.

20.5 Schwarzer Körper

Ein Schwarzer Körper (engl. *black body*) ist ein idealer Wärmestrahler - siehe dazu Planckscher Strahler.

20.6 Schwarzer Zwerg

Schwarze Zwerge bezeichnet im Prinzip ausgekühlte Weiße Zwerge, also kompakte Objekte, die über einen so langen Zeitraum abgekühlt sind, dass sie nicht einmal mehr thermisch signifikant strahlen. Jedoch ist zu beachten, dass die Thermodynamik das Erreichen des absoluten Nullpunkts (0 Kelvin) in der Formulierung des Dritten Hauptsatzes der Thermodynamik verbietet.

20.6.1 Gibt es Schwarze Zwerge?

Astrophysiker haben die Kühlzeitskala Weißer Zwerge theoretisch abgeleitet und finden Zeitskalen im Bereich von **Milliarden Jahren**! Das ist gerade eine Zeitskala, auf der sich das Universum entwickelt hat (Weltalter knapp 14 Milliarden Jahre, Hubble-Zeit). Es ist daher nicht zu erwarten, dass besonders viele Schwarze Zwerge (in dieser engen Definition als Nachfolger Weißer Zwerge) existieren.

20.6.2 Unterschied zu Braunen Zwergen

Schwarze Zwerge sind von Braunen Zwergen abzugrenzen, weil letztere nicht die thermonuklearen Fusionsprozesse zu zünden vermögen und eher planetenartig sind. Während Schwarze Zwerge das 'normale Leben' eines Sterns hinter sich haben, hat es bei Braunen Zwergen gar nicht begonnen.

20.6.3 Bedeutung für Kosmologie?

Schwarze Zwerge sind eine Form baryonischer Dunkler Materie. Die aktuellen Daten der experimentellen Kosmologie sehen in der baryonischen Materie eine Energieform, die nicht von großer Bedeutung für die Dynamik des Universums ist. Die Schwarzen Zwerge können nicht allein das Missing-Mass-Problem der Kosmologie lösen.

20.7 Schwarzes Loch

20.7.1 Einführung

Schwarze Löcher sind vielleicht die unglaublichsten Objekte der Astronomie: Es handelt sich um eine Masse, die so dicht gepackt ist, dass sie sogar das Licht am Entkommen hindert. Als Konsequenz ist ein Schwarzes Loch schwarz und damit schwer am Himmel zu entdecken. Die Astronomen haben allerdings trickreiche Methoden entwickelt, um Massen am Himmel aufzufinden, auch wenn sie nicht leuchten. Auf der Basis dieser *indirekten Verfahren* ist es gelungen, eine ganze Menge von Kandidaten für Schwarze Löcher am Himmel zu beobachten.

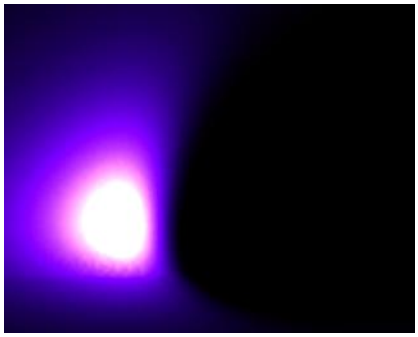

Abbildung 20.4: Schwarzes Loch: Computersimulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Schwarzes Loch.

20.7.2 Objekte der Allgemeinen Relativitätstheorie

Das war im Prinzip die Definition eines Schwarzen Loches, wie sie ein astronomischer Beobachter formulieren würde. Es gibt jedoch auch eine strengere, mathematische Definition. Sie beruht auf der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), einer Gravitationstheorie, die Albert Einstein vor fast hundert Jahren entwickelt hat. Nach dieser Theorie ist die Gravitation eine geometrische Eigenschaft des Raumes und der Zeit. Einstein zeigte, dass Raum und Zeit sogar nicht unabhängig voneinander existieren können. So entstand der Begriff der Raumzeit. Diese Raumzeit kann man sich vorstellen wie ein Gebirge mit Bergen und Tälern, Höhen und Tiefen, oder wie man in der ART sagt: mit **Krümmungen**. Ein Schwarzes Loch ist nun eine ganz spezielle Raumzeit, eine, deren Krümmung von außen nach innen immer mehr zunimmt und die schließlich im Zentrum des Loches unendlich wird. Dieser Ort heißt in der ART Singularität. Ein klassisches Schwarzes Loch ist in diesem Sinne eine singuläre Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der ART.

Da nun Licht in einer gekrümmten Raumzeit auch gekrümmten Bahnen folgt, den so genannten (Null-)Geodäten, bewegt sich das Licht auch in Richtung der unendlichen Krümmung. Leider kommt das Licht dort nicht mehr heraus. Als Folge dieser Eigenschaft sind Schwarze Löcher schwarz.

Es gibt unterschiedliche Typen Schwarzer Löcher, solche die rotieren und solche die nicht rotieren. Es wurden sogar in der Theorie Löcher gefunden, die eine elektrische Ladung haben. All das ist mit den Methoden der mathematischen Physik möglich. Man benötigt 'nur' Einsteins fundamentale Gleichung der ART: die Einsteinschen Feldgleichungen. Alle Schwarzen Löcher sind Lösungen dieser Feldgleichungen. Es ist eine tensorielle Gleichung, die kaum mit den Mitteln der Schulmathematik zu verstehen ist. Tensoren sind geometrische Objekte, die in der ART einen physikalischen Bezug haben. In den Feldgleichungen wird die Krümmung der Raumzeit durch den Riemann-Tensor repräsentiert, während die Masse und Energie im Energie-Impuls-Tensor stecken.

Schwarze Löcher sind mathematisch als metrischer Tensor oder Linienelement darstellbar. Setzt man diese Darstellung - diese Raumzeit - in die Einstein-Gleichungen ein, werden die Gleichungen gelöst. Mit den Worten der klassischen, Newtonschen Gravitationstheorie des 17. Jahrhunderts, einer Theorie der Gravitationsfelder und Gravitationskräfte, sind Schwarze Löcher eine bestimmte Form eines Gravitationsfelds, nämlich eines solchen, das das Licht einzufangen vermag. Newton hätte diese Formulierung sicher nicht verstanden, denn er wusste nicht, dass Licht Masse hat. Das aber besagt gerade Einsteins berühmte Gleichung $E = mc^2$, die er im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) 1905 abgeleitet hat. (Anmerkung: Licht hat Masse, weil es Energie hat - Licht hat jedoch eine *Ruhe*masse null, d. h. im Bezugssystem, das sich mit dem Licht bewegt, hat Licht keine Masse.)

20.7.3 Singularität

Die Singularität Schwarzer Löcher kann man sich sehr anschaulich vorstellen: Rotiert das Loch nicht, ist es eine **Punktmasse**. Komplizierter wird es, wenn das Loch rotiert: dann handelt es sich um eine

Ringmasse, oder wie es in der ART heißt, um eine Ringsingularität.

Im Rahmen der ART haben diese unterschiedlichen Schwarzen Löcher Namen bekommen:

Die rotierende, elektrisch neutrale Form eines Schwarzen Loches heißt Kerr-Lösung. Der nicht rotierende, also **statische** und elektrisch neutrale Typ heißt Schwarzschild-Lösung. Historisch wurde die strukturell einfachere, kugelsymmetrische und statische Schwarzschild-Lösung zuerst gefunden (*Karl Schwarzschild*, 1916). Ein Schwarzschild-Loch hat nur eine Eigenschaft: Masse M. Die rotierende, achsensymmetrische, stationäre Verallgemeinerung wurde viel später entdeckt (*Roy P. Kerr*, 1963). Kerr-Löcher haben zwei Eigenschaften: Masse M und Drehimpuls J. Die Rotation lässt sich mithilfe des **Kerr-Parameters** a parametrisieren. $a = J/M\mathrm{c}$ ist ein spezifischer Drehimpuls (Drehimpuls/Masse) und kann bei Verwendung geometrisierter Einheiten (G = c = 1) an sich beliebige Werte aus dem Zahlenbereich zwischen $-M$ und $+M$ annehmen. Setzt man zur weiteren Vereinfachung $M = 1$, so wird der Zahlenbereich, der den Drehimpuls eines rotierenden Loches festlegt, zum Intervall [-1;+1]. Der ausgezeichnete Fall $a = 0$ charakterisiert gerade die Schwarzschild-Lösung, bei $a < 0$ liegen retrograde (gegenläufige) Rotationen vor, sonst ($a > 0$) prograde (der Umlaufsinn ist von Bedeutung, sobald Teilchen oder Sterne um ein Loch kreisen).

20.7.4 Höchstens drei Eigenschaften!

Die genannten Metriken, Kerr- und Schwarzschild-Geometrie, sind **Lösungen der Feldgleichungen im Vakuum**. Vakuum bedeutet, dass der Energie-Impuls-Tensor verschwindet. Dies kann man ein relativistisches Vakuum nennen, das strikt vom Quantenvakuum zu unterscheiden ist.

Die elektrisch neutralen Schwarzen Löcher sind Raumzeiten (vierdimensionale Mannigfaltigkeiten: eine Zeitdimension, drei Raumdimensionen), die sich demnach komplett im Vakuum befinden.

Wie angedeutet, gibt es aber auch die **elektrisch geladene** Verallgemeinerung eines Schwarzen Loches. Das elektrisch geladene, statische Pendant zur Schwarzschild-Lösung heißt Reissner-Nordstrøm-Lösung (1918). Ein Reissner-Nordstrøm-Loch hat die Eigenschaften Masse M und Ladung Q.

Die allgemeinste Form Schwarzer Löcher repräsentiert die Kerr-Newman-Lösung (1965). Diese Löcher haben drei Eigenschaften, nämlich Masse M, Drehimpuls J und elektrische Ladung Q. Kerr-Newman-Löcher haben die 'meisten Haare' (siehe Keine-Haare-Theorem).

Im Gegensatz zur Schwarzschild- und Kerr-Geometrie sind Reissner-Nordstrøm- und Kerr-Newman-Raumzeit **keine Vakuumlösungen** der Einsteinschen Feldgleichungen: der Energie-Impuls-Tensor ist hier der Maxwell-Tensor, weil eine Ladung in ihrer Umgebung ein elektromagnetisches Feld erzeugt. Die Feldgleichungen der ART, die diese geladenen Schwarzen Löcher lösen, heißen **Einstein-Maxwell-Gleichungen**. Alle Formen elektrisch geladener Löcher scheinen jedoch in der Astrophysik irrelevant zu sein, weil Plasmaflüsse in der Umgebung diese Ladung neutralisieren würden. Das Gros der Astrophysiker diskutiert daher nur die Existenz der Kerr- und Schwarzschild-Löcher. Es wurde bisher noch kein Schwarzes Loch mit elektrischer Ladung beobachtet - sehr wohl allerdings einige Kandidaten, die rotieren; z. B. das superschwere Loch im Zentrum unserer Heimatgalaxie.

20.7.5 Zum Begriff Schwarzes Loch

Allen Schwarzen Löchern gemein ist die eingangs besprochene Eigenschaft, dass Teilchen und Strahlung, die ihnen zu nahe kommen, unwiederbringlich (wie man annimmt) verloren ist: sie wird 'verschluckt'. Das ist in dem Sinne zu verstehen, dass sich das Loch nur Masse und Drehimpuls der einfallenden Objekte einverleibt: Es wächst. Allerdings passiert das nur, wenn die Probekörper wirklich nahe an den Ereignishorizont (den äußeren Horizont) herankommen. Aus diesem Grund nennt man sie '***schwarz***', weil jede Art von Strahlung (also auch Licht), die diese kritische (Null-)Fläche passiert, ins Innere Schwarzer Löcher gelangt. Von außen betrachtet wirken sie schwarz, weil kein Strahlungsfluss aus der Region kleiner des Horizontradius den Beobachter erreicht und absorbiert wird. Der Ereignishorizont ist jedoch *keine feste Oberfläche* wie bei Sternen oder Planeten, sondern eine eher mathematisch definierte Grenzfläche: die Entweichgeschwindigkeit wird hier gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit c, und da sich Strahlung oder Teilchen gemäß der Speziellen

Relativitätstheorie nicht schneller bewegen können als das Licht, bleibt ihnen nichts anderes übrig, als im Schwarzen Loch zu verschwinden. Die Definition des äußeren Horizonts ist gerade $r_H = M + (M^2 - a^2)^{1/2}$, mit der Masse des Schwarzen Loches M und dem Rotationsparameter a (Extrem-Kerr: $a = M$, Thornes Limit: $a = 0.998\,M$, Schwarzschild: $a = 0$.

Der Terminus '***Loch***' rührt wiederum von einer anderen speziellen Eigenschaft her: Im Symmetriezentrum der Raumzeit bei $r = 0$ wird die Krümmung unendlich! Sämtliche physikalische Größen wachsen in diesem Punkt über alle Grenzen und eine physikalische Beschreibung bricht zusammen. Es handelt sich um eine *intrinsische Singularität* (Raumzeitsingularität). Wenn Schwarze Löcher rotieren, bläht sich diese Punktsingularität zu einer Ringsingularität auf. In jedem Fall bleibt jedoch die Singularität im Zentrum des Lochs, bei $r = 0$. Durch die Rotation ändert sich gewissermaßen nur der Singularitätstyp, nicht der Ort. Die gesamte Masse Schwarzer Löcher steckt in dieser Singularität! Dabei ist es absolut unklar, in welcher Form die Materie in der Singularität vorliegt. Insbesondere kennt man nicht die Zustandsgleichung dieser 'singulären Materie'. Wie später in diesem Eintrag diskutiert wird, gibt es Anhaltspunkte, dass es vielleicht im Innern Schwarzer Löcher gar keine Singularitäten gibt!

20.7.6 Rotierendes Schwarzes Loch

Würde man sich einem rotierenden Loch aus einiger Entfernung nähern, so würde man die Rotation der Raumzeit lokal gar nicht spüren, weil man Teil der Rotation ist. Der ganze Raum rotiert ja! Erst wenn man einen Blick an den Fixsternhimmel werfen würde, würde man sehen, dass dieser rotiert. Rotation ist demnach nur relativ zwischen entferntem und lokalem Beobachter festzustellen. Das 'Raumzeit-Karussell' dreht sich immer schneller, je näher man der Ringsingularität kommt. Eine wichtige Zone, mit der nur rotierende Schwarze Löcher ausgestattet sind, ist die Ergosphäre. In diesem Bereich wird die Rotation der Raumzeit besonders heftig.

Mit der Ergosphäre sind auch wichtige physikalische Prozesse verbunden, weil die Rotation der Raumzeit heftig an Teilchen und Magnetfeldern zieht. Dieser so genannte Frame-Dragging-Effekt hat Penrose-Prozesse oder Blandford-Znajek-Mechanismen zur Folge. Sie sind wichtig für die Dynamik von Material, das sich so nahe ans Loch heranwagt. Die Astrophysiker nehmen an, dass gigantische Materiestrahlen - die Jets - von der rotierenden Raumzeit in die Weiten des Weltraums katapultiert werden.

Aus dem bisher Gesagten kann man sich ein Bild von nicht rotierenden und rotierenden Schwarzen Löchern machen, das aussehen könnte, wie dasjenige in Grafik 20.5:

Soclhe Bilder sind jedoch mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren, wie die Diskussion unter dem Eintrag Kerr-Lösung erläutert, denn eine solche Darstellung beruht nicht auf Invarianten. Betrachten Sie dieses Bild als Information, welche 'strukturellen Zutaten' ein Schwarzschild- bzw. ein Kerr-Loch hat.

20.7.7 Effekte auf Raum und Zeit

Schwarze Löcher sind interessante Studienobjekte, die uns viel Neues über die tatsächliche Natur von Raum und Zeit lehren können. Insbesondere sind sie gute mathematische Objekte, um Theorien wie die ART zu testen. Während auf der Erde (einer sehr flachen Raumzeit) Raum und Zeit bei kleinen Geschwindigkeiten gegenüber der Lichtgeschwindigkeit separat in Erscheinung treten, zeigen Schwarze Löcher, dass sie auf komplizierte Art miteinander im vierdimensionalen **Raum-Zeit-Kontinuum** verwoben sind. Die Relativitätstheorie belegt, dass bei sehr hohen Geschwindigkeiten (Spezielle Relativitätstheorie) bzw. starken Gravitationsfeldern (Allgemeine Relativitätstheorie) ein geometrisches Objekt, die Raumzeit, die tragende Rolle spielt.

Ein besonders instruktives, aber dem irdisch geprägten Blick paradox erscheinendes Gedankenexperiment, ist das zweier Beobachter: einer schaut dem anderen zu, wie er sich einem Schwarzen Loch nähert. Zunächst sieht alles aus wie gewohnt: der eine Beobachter kommt dem Bereich des Schwarzen Loches immer näher, was der Beobachter im 'Unendlichen', in der asymptotisch flachen Raumzeit, bestätigen kann. Doch gelangt der sich nähernde Beobachter in den signifikant

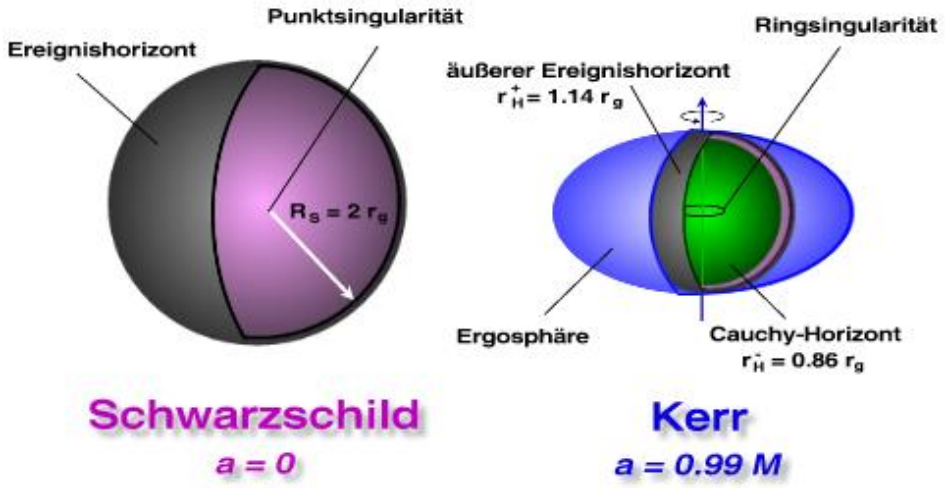

Abbildung 20.5: Schwarze Löcher: Schwarzschild vs. Kerr.

gekrümmten Bereich der Raumzeit um das Schwarze Loch, geschieht Sonderbares: der äußere Beobachter sieht eine **Verlangsamung der Bewegung** des frei fallenden Beobachters aufgrund der Zeitdilatation. Dieser Effekt macht sich bei Licht (im *Frequenzraum*) als Gravitationsrotverschiebung bemerkbar: Licht verliert Energie durch den mächtigen Zug der Raumzeit des Loches. Der frei fallende Beobachter (FFO) wird sich hingegen aus seiner Perspektive dem Loch immer mehr nähern und einen normalen Ablauf seiner Zeit, der **Eigenzeit**, messen. Kurz vor Erreichen des Ereignishorizonts wird der Beobachter im Unendlichen keine Bewegung mehr feststellen können: die Zeitdilatation wird unendlich groß und endliche Zeitintervalle werden zu unendlich langen gedehnt!

Der frei fallende Beobachter vor Ort wird jedoch in endlicher Zeit den Horizont erreichen. Wenn ihn dann Gezeitenkräfte nicht zerreißen ('spaghettisieren, spaghettifizieren', engl. *spaghettify*), kann er sogar die Singularität (sollte sie tatsächlich in der Natur realisiert sein) in *endlicher* Zeit erreichen. Spätestens die unendliche Krümmung in der Singularität wird den einfallenden Beobachter zerreißen.

Diese Bewegung wird man aus dem Unendlichen jedoch nie beobachten können! Aus großer Entfernung stellen sich die Verhältnisse immer so dar, dass leuchtende, einfallende Objekte immer schwächer sowie röter leuchten und ihre Bewegung nach und nach verlangsamen. Schließlich verschwindet das Objekt in der Schwärze des Lochs und aus dem Blick des Außenbeobachters.

Letztendlich ist dieses Phänomen ein Ausdruck der **Relativität**: Beide Beobachter haben Recht in dem, was sie sehen, auch wenn sie Unterschiedliches sehen! In der Relativitätstheorie gibt es viele Beispiele in denen sich diese Relativität offenbart: die räumliche Länge ist ebenso relativ und kann, z. B. bei hohen (relativistischen) Geschwindigkeiten, verkürzt erscheinen. Dies nennen Physiker Lorentz-Kontraktion. Der Teilchenbegriff verliert ebenso seinen **absoluten Status** wie Zeit und Länge, wie es sich im Unruh-Effekt oder der Hawking-Strahlung manifestiert. Die Hawking-Strahlung belegt übrigens, dass Schwarze Löcher doch nicht absolut schwarz sind: dem Horizont kann eine Temperatur, die so genannte Hawking-Temperatur, zugeordnet werden, die vermutlich in einer **thermischen Emission** in der Art eines Planckschen Strahlers mündet. Die noch hypothetische Hawking-Strahlung ist allerdings nicht Ausfluss der (unquantisierten) ART selbst, sondern folgt erst unter Berücksichtigung von **Quanteneffekten** am Horizont. Hawking benutzte zur Ableitung des Effekts die semiklassische Theorie - ART plus Quantenfelder, aber *ohne quantisiertes* Gravitationsfeld.

20.7.8 Massenskala

Die Masse von Schwarzen Löchern dient zur Unterscheidung mehrerer Typen, die verschiedene Entstehungsmechanismen und Entwicklungen durchlaufen:

◇ **Schwarze Mini-Löcher** wiegen soviel wie Elementarteilchen. Im Speziellen wurden **Schwarze Löcher im TeV-Bereich** (engl. *TeV black holes*) vorgeschlagen, die etwa so schwer sind, wie 1000 Protonen, nämlich ein TeV. Allerdings kann es sie nur unter der Voraussetzung geben, dass Extradimensionen existieren und dadurch die klassische Planck-Skala auf die Skala der elektroschwachen Energieschwelle (etwa ein TeV) reduziert wird. Die Mini-Löcher sind spekulativ, werden allerdings in Teilchenbeschleunigern gesucht.

Es wurde sogar vorgeschlagen, dass sie in natürlicher Form in der kosmischen Strahlung vorkommen. Doch auch das ist spekulativ und bislang nicht bestätigt worden.

◇ Primordiale Schwarze Löcher haben Massen von etwa 10^{18} g oder entsprechend 10^{-15} Sonnenmassen. Das entspricht etwa der Masse eine irdischen Berges. Der zugehörige Radius des Ereignishorizonts beträgt nur etwa 10^{-12} m oder 1 pm und kommt damit in den subatomaren Bereich. Das Attribut *primordial* bezieht sich darauf, dass diese Löcher eventuell in den Frühphasen des Universums existiert haben. Die Existenz der primordialen Löcher ist ebenfalls spekulativ und umstritten, weil es dafür keine Belege aus der Beobachtung gibt, beispielsweise Signaturen in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Auch ihre Entstehung ist unklar: es könnten **super-kritische Brill-Wellen** kollabiert sein und diese winzigen Löcher übrig gelassen haben. Der bekannte Kosmologe *Stephen Hawking* zeigte, dass durch Quanteneffekte solche Löcher schnell zerstrahlen müssen: Nach ihm wurde die **Hawking-Strahlung** benannt, deren Emission schließlich zum schnellen Verschwinden des Loches führt. Deshalb können die primordialen Löcher ihre Existenz nicht bis in den lokalen Kosmos überdauert haben.

◇ Stellare Schwarze Löcher haben Massen im Bereich von etwa 3 bis 100 Sonnenmassen. Vielleicht gibt es sogar Löcher dieses Typs, die leichter sind als 3 Sonnenmassen - je nachdem, wie schwer Neutronensterne werden können. Stellare Löcher sind im Gravitationskollaps massereicher Sterne entstanden. Astronomen finden sie häufig in Röntgendoppelsternen, vor allem sind Mikroquasare gute Kandidaten für stellare Schwarze Löcher. Der klassische Massentyp des stellaren Schwarzen Lochs ist historisch betrachtet am längsten bekannt. Die Astronomen gehen von der Existenz dieser sternschweren Löcher aus.

◇ **Mittelschwere Schwarze Löcher** (in der Fachsprache: *intermediate-mass black holes*, IMBHs) haben größere Massen von 100 bis eine Mio. Sonnenmassen. Im Jahr 2000 entbrannte die Diskussion um die Existenz Schwarzer Löcher auf der Grundlage von Röntgenbeobachtungen der Starburstgalaxie M82 mit Chandra. Supercomputersimulationen stützen inzwischen die Existenz eines mittelschweren Loches von einigen hundert Sonnenmassen im Zentrum des jungen Sternhaufens MGG 11 (*Zwart et al.* 2004).

Im Jahr 2002 hat man gute Hinweise darauf gefunden, dass dieser intermediäre Lochtyp auch in alten Sternhaufen, den Kugelsternhaufen, existieren könnte (Objekte M15 und G1). Kugelsternhaufen sind alte galaktische Komponenten und befinden sich in einer sphäroiden Randregion einer Galaxis, dem galaktischen Halo. Aufgrund des hohen Alters weisen Kugelsternhaufen fast kein interstellares Gas mehr auf, das aufgesammelt werden könnte. Die mittleren Schwarzen Löcher könnten aus leichteren stellaren Schwarzen Löchern hervorgegangen sein, dadurch dass in den dichten Kugelsternhaufen häufige Verschmelzungsereignisse (engl. *merging events*) geschahen. Ihre aktuelle hohe Masse von einigen tausend bis zehntausend Sonnenmassen hätten sie dann durch Akkretion gewonnen.

Die Art wie sich Sterne im Kugelsternhaufen um sein Zentrum bewegen, beschreibt die so genannte *Geschwindigkeitsdispersionskurve*. Sie kann bei einigen Kugelsternhaufen sehr elegant mit massereichen Schwarzen Löchern erklärt werden. Es wäre auch möglich, dass ganze Sterne vom zentralen Loch aufgesammelt werden. Dann hätten Astronomen die Chance, in damit assoziierten hochenergetischen Strahlungsausbrüchen (Röntgenbursts) indirekt die Existenz eines massereichen Schwarzen Loches in Kugelsternhaufen abzuleiten.

In den kleinsten Galaxientypen, den Zwerggalaxien, nehmen einige Astronomen zentrale Schwarze Löcher zwischen 100000 und einer Million Sonnenmassen an. Sie zählen auch zu den

intermediate-mass black holes. Zwei dieser Kandidaten sind die Zwerggalaxien mit Seyfert-Kern NGC 4395 (*Shih et al.*, 2003) und POX 52 nahe (*Barth et al.*, 2003, 2004).

Vom theoretischen Standpunkt ist es schon lange rätselhaft, weshalb es bei diesen Massen nicht auch Schwarze Löcher geben sollte. Die Versuchung ist entsprechend groß, den *intermediate-mass black holes* eine Existenz zuzusprechen. Aber so reizvoll diese Hypothese auch sein mag - die Evidenzen für IMBHs müssen durch weitere Beobachtungen und überzeugende Simulationen noch mehr gefestigt werden. Eine Etablierung eines neuen Massentyps Schwarzer Löcher bleibt demnach abzuwarten.

◇ **Supermassereiche, massereiche oder superschwere Schwarze Löcher** (engl. *supermassive* oder *massive black holes*) haben noch weit größere Massen von 10^6 bis 10^{10} Sonnenmassen. Der Großteil der Astronomen ist davon überzeugt, dass diese Giganten unter den Löchern in beinahe jeder Galaxie in deren Zentrum vorkommen. Besonders offenkundig ist das bei den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), deren Aktivität nicht ohne 'Superloch' als Schlüsselelement zu erklären ist. Das folgt rechnerisch mit der Diskussion der Eddington-Leuchtkraft. Auch das eher inaktive Zentrum unserer Galaxis, der Milchstraße, beherbergt ein supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen (Infrarotgruppe MPE), das sogar zu rotieren scheint.

In den riesigen elliptischen Radiogalaxien, die in den Zentren gigantischer Galaxienhaufen sitzen, leitet man die größten Massen Schwarzer Löcher ab: 10^{10} Sonnenmassen! Aufwendige kosmologische Simulationen auf Supercomputern, wie die *Millennium Simulation* (*Springel et al.*, Nature 435, 629, 2005), belegen, dass in den Zentren der schwersten Galaxienhaufen auch die schwersten Löcher und die ältesten Sterne sitzen. Auf dieser Massenskala liegen die supermassereichen Schwarzen Löcher der Galaxien M87 und CXO 0312 Fiore P3. Knapp darunter befindet sich die starke Radiogalaxie Cygnus A. Davon zeugt die astronomische Beobachtung.

20.7.9 Wie man ein Schwarzes Loch entdeckt

Schwarze Löcher kann man astronomisch durch ihre extremen bzw. exotischen Auswirkungen auf ihre unmittelbare Umgebung nachweisen. Mittlerweile bezeugen zahlreiche astronomische Beobachtungen, dass Schwarze Löcher existieren müssen. Es bietet sich an, den unterschiedlichen Nachweismethoden eine Nomenklatur zuzuweisen, die mit dem jeweiligen Effekt zusammenhängt (*A. Müller*: Dissertationsschrift 2004; Proceeding Dubrovnik Sommerschule 2007):

◇ **kinematische Verifikation**: Sterne können auf stabilen Kepler-Bahnen um Schwarze Löcher kreisen. Aus der Geschwindigkeit dieser Bewegung folgt die Masse des Loches, das der Stern in einem bestimmten Abstand umläuft (vergleiche auch Kepler-Gesetze). Schwarze Löcher folgen in vielen Fällen zwingend, wenn die abgeleitete Zentralmasse hoch, dunkel und kompakt ist. Diese Astronomen sprechen in in diesem Zusammenhang vom **MDO**, dem Massereichen, Dunklen Objekt (engl. *massive dark object*).

Ebenfalls kinematisch folgt die Masse vieler supermassereicher Schwarzer Löcher aus der Geschwindigkeitsdispersion mit der **M-σ-Relation** (Beschreibung dieser Beziehung unter supermassereiche Schwarze Löcher).

Eine Methode namens Reverberation Mapping kann ebenso als kinematisches Verfahren bezeichnet werden. Astronomen schätzen hier die Massen (präzise: *Virialmassen*) Schwarzer Löcher ab, indem sie die Dopplergeschwindigkeiten und den Abstand der leuchtenden Materiewolken vom Drehzentrum ermitteln.

◇ **eruptive Verifikation**: Sterne, die dem Schwarzen Loch zu nahe kommen und den Gezeitenradius erreichen, können bei entsprechender Masse und entsprechendem Radius in spektakulärer Weise vollständig zerrissen werden. Diesen Sternzerriss (engl. *stellar tidal disruption*) durch starke Spannung und Kompression beobachtet man als Röntgenflare

charakteristischer Signatur. Solche Phänomene sind von besonderer Bedeutung für 'schlafende Schwarze Löcher' in inaktiven Galaxienzentren, die mangels Umgebungsmaterial kaum noch akkretieren.

Aber auch die Gamma Ray Bursts (inklusive Hypernovae) kann man in einer Vielzahl der Fälle als eruptive Indikatoren von gerade gebildeten stellaren Schwarzen Löchern auffassen (in Supernovae bildet sich normalerweise ein Neutronenstern).

◇ **akkretive Verifikation**: Ist in der Umgebung Schwarzer Löcher ausreichend interstellares Gas vorhanden, so wird es vom Loch aufgesammelt. Diesen Prozess nennt man Akkretion. Dabei heizt sich das Gas zu einem heißen, ionisierten und magnetisierten Akkretionsfluss auf. Die Heizung erfolgt einerseits hydrodynamisch über Turbulenz und dissipative Viskosität, also im Prinzip Reibung der Plasmateilchen in der zähen Strömung, aber andererseits auch magnetohydrodynamisch über magnetische Turbulenz (siehe MRI) und Rekonnexion, also der Vernichtung von Magnetfeldern entgegengesetzter Polarität. Die in den Feldern gespeicherte Energie wird so auf das Plasma in Form kinetischer Energie übertragen. Aber auch Strahlungsprozesse (Bremsstrahlung, Comptonisierung, Synchrotronstrahlung) spielen eine große Rolle bei Heizung und Kühlung des Akkretionsflusses. Letztendlich wird ein großer Teil des strömenden Plasmas vom Schwarzen Loch aufgesammelt, reichert es mit noch mehr Masse an und vergrößert es damit. Das Gas leuchtet dabei unter kräftiger und variabler Emission in allen Spektralbereichen und sorgt nach dem **AGN-Paradigma** für die typischen enormen Leuchtkräfte aktiver Galaxienkerne. Diese Aktivität verrät die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher in den Galaxienzentren, denn sie folgen direkt aus dem Eddington-Argument

◇ **spektro-relativistische Verifikation**: Spektren von leuchtender Materie in der Umgebung Schwarzer Löcher werden durch relativistische Effekte wie Beaming, Linseneffekte und Gravitationsrotverschiebung stark deformiert. Das gilt insbesondere für Spektrallinien, vor allem im Bereich der Röntgenstrahlung, z. B. bei der Eisenlinie (Fe Kα). Solche relativistischen Spektren und Spektrallinien können als Diagnoseinstrument dienen, um ein Schwarzes Loch nachzuweisen und seine Umgebung zu studieren. Auf einige Parameter des Schwarzen Loches können die Astronomen aus den Spektren schließen.

◇ **obskurative Verifikation**: Die Gravitationsrotverschiebung bedingt eine Schwärzung des Berandungsgebiets um das Schwarze Loch rund um den äußeren Horizont, und nicht erst am Horizont selbst. Der relativistische Rotverschiebungsfaktor (relativistisch verallgemeinerter Dopplerfaktor, g-Faktor) beeinflusst **alle Formen elektromagnetischer Strahlung** in der Nähe Schwarzer Löcher. Denn im Rahmen der Theorie ist bekannt, dass der g-Faktor bei der Auswertung des Strahlungsflusses in hoher Potenz eingeht. Das sorgt für eine starke Unterdrückung der Strahlungsemission in Horizontnähe. Selbst die gegenwärtigen Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch (Gravasterne und Holosterne - dazu gleich mehr) sind sehr dunkel, zwar nicht absolut schwarz, aber fast. Deshalb muss auch hier eine ausgeprägte dunkle Zone um das kompakte Objekt beobachtbar sein. Astronomen versuchen diesen '**Großen Schwarzen Fleck**' (engl. *Great Black Spot*, GBS, siehe Dissertation von A. Müller) zu messen. An der Himmelssphäre ist der scheinbare Durchmesser des Schwarzen Flecks von Kandidatenobjekten für Schwarze Löcher allerdings geradezu winzig und liegt im Bereich von Mikrobogensekunden (Millionstel von Bogensekunden; zum Vergleich: der scheinbare Durchmesser des Vollmonds beträgt etwa 1800 Bogensekunden). Diese Form der Diagnostik Schwarzer Löcher ist noch Zukunftsmusik, weil die räumliche Auflösung moderner Teleskope dafür noch nicht ausreicht. Den frühesten Erfolg verspricht die Radioastronomie, die mittels VLBI die größten Auflösungsvermögen in der Astronomie erzielt. Die Prognose lautet, dass innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre die Abbildung des Schwarzen Flecks radioastronomisch im Bereich der Millimeterwellen gelingen könnte (*Krichbaum et al.*, MPIfR Bonn, ePrints unter astro-ph/0411487, astro-ph/0610712 und astro-ph/0611288). Es ist deshalb zu erwarten, dass bald Teleskope durch einen Schwenk über diese dunklen Gebiete ***direkt*** Schwarze Löcher nachweisen können. Simulationen mittels Ray Tracing zeigen schon jetzt diesen

Effekt im Computerlabor!

- ◇ **aberrative Verifikation**: Die kompakte Masse eines Schwarzen Loches kann **Linseneffekte** verursachen und Strahlung anderer kosmischer Objekte ablenken oder bündeln. Auf diese Weise lassen sich kompakte, dunkle Massen indirekt ableiten, besonders die größeren supermassereichen Schwarzen Löcher. Aber auch stellare Schwarze Löcher könnten so als Mikrolinsen diagnostiziert werden. Besonders interessant ist, dass die Bahnform eines umlaufenden Körpers, die an sich kreisförmig oder elliptisch ist, extrem stark relativistisch verzerrt wird. Ein Beobachtungsnachweis exotischer Bahnformen würde deshalb Schwarze Löcher verraten und sogar die Eingrenzung einiger typischer Parameter wie Bahnradius, Neigung der Bahnebene und Rotation des Loches zulassen (ebenfalls im Detail nachzulesen in meiner Doktorarbeit, S.38f).
- ◇ **temporale Verifikation**: Diese Nachweismethode nutzt den Effekt aus, dass in der Nähe Schwarzer Löcher das Zeitmaß gestreckt wird (*Zeitdilatation*). Zeitlich variable Phänomene am Loch, z. B. in der Akkretionsscheibe oder ein um das Loch kreisender Stern, unterliegen daher diesem Effekt. Der Astronom könnte aus der Analyse von Lichtkurven feststellen, dass ein zeitlich variierender Vorgang durch die Anwesenheit des Loches 'zeitlich verzerrt' wurde (*Cunningham & Bardeen* 1973). Das wäre sehr leicht zu erkennen, falls der Astronom weiß, wie die zeitliche Variation eigentlich - nämlich im Ruhesystem - aussehen muss. Aus der Untersuchung zeitabhängiger Phänomene in der Umgebung Schwarzer Löcher lassen sich auch Eigenschaften des Loches ableiten, was die Grundidee dieser temporalen Methoden ist.

Das räumlich uns **am nächsten befindliche kosmische Schwarze Loch** befindet sich im Röntgendoppelstern XTE J1118+480. Dieser Galaktische Schwarz Loch Kandidat ist im Sternbild *Ursa Major* (dt. *Große Bär*, eigentlich *Große Bärin*) zu finden und hat eine Entfernung von 1800 Parsec oder 5870 Lichtjahren. Er sitzt im Galaktischen Halo der Milchstraße, also derjenigen kugelförmigen Berandungsregion unserer Galaxis, wo sich die Kugelsternhaufen tummeln. Das Schwarze Loch in diesem Binärsystem wiegt etwa acht Sonnenmassen (*McClintock et al.* 2004, astro-ph/0403251).

20.7.10 Doch kein Loch?

Im Jahr 2001 haben Physiker in der Theorie neue Alternativen zu den klassischen, singulären Schwarzen Löchern neben Bosonenstern und Fermionenstern gefunden. Diese neuen Raumzeiten haben keinen Ereignishorizont, und eine von ihnen kommt ohne Singularität aus und ist damit **regulär**. Der erste Vorschlag wurde von den Entdeckern *P. Mazur & E. Mottola* Gravastern getauft (*Mazur & Mottola* 2001, gr-qc/0109035). Der äußerste Bereich des Gravasterns entspricht der Schwarzschild-Lösung, dann folgt eine dünne Schale eines ultrarelativistischen Plasmas, das durch eine innere 'Blase' Dunkler Energie stabilisiert wird. Die Gravasterne sind statisch; bisher wurde noch keine rotierende Verallgemeinerung gefunden.

Der zweite Vorschlag, der eine Alternative zum klassischen Schwarzen Loch darstellt, heißt Holostern (*M. Petri* 2003, gr-qc/0306063 und gr-qc/0306066). In der Tat gibt es eine Reihe von Ähnlichkeiten zwischen Gravasternen und Holosternen: die wichtigste Gemeinsamkeit ist, dass beide Lösungstypen keinen Ereignishorizont haben!

Das Innere des Holosterns kann so verstanden werden, dass radiale Strings im Innern für einen anisotropen Druck sorgen (die Interpretation mit Strings ist allerdings nicht zwingend). Etwa dort, wo beim klassischen Schwarzschild-Loch der Horizont ist, hat der Holostern eine Membran, die vermutlich ebenfalls aus Teilchen besteht. Diese Membran hat jedoch Dicke null.

Die beide neuen Lösungsvorschläge weisen die gleiche Beschränkung auf, wie die klassische Schwarzschild-Geometrie: keine Rotation. Die Rotation wird allerdings nicht nur von allen möglichen kosmischen, rotierenden Objekten nahe gelegt, sondern ist insbesondere eine **vitale Voraussetzung**, um in einer Ergosphäre die beobachteten Jets magnetohydrodynamisch zu erzeugen (siehe oben, auch in Einzelheiten beschrieben unter Blandford-Znajek-Mechanismus und Penrose-Prozess). Solange also im Rahmen der Theorie keine Verallgemeinerung zum rotierenden Gravastern bzw. zum rotierenden

Abbildung 20.6: Das Innere Schwarzer Löcher in verschiedenen Theorien.

Holostern gefunden ist, muss die **Kerr-Geometrie** als die astrophysikalisch relevante Raumzeit angesehen werden, wenn sie auch im Innern singulär ist. Das heißt jedoch nicht, dass man Alternativen 'links liegen lassen' sollte - im Gegenteil. Die Erforschung der neuen regulären Raumzeiten ist ein spannendes, aktuelles Forschungsgebiet.

20.7.11 Thermodynamik Schwarzer Löcher

Schwarze Löcher können auch im Rahmen der Thermodynamik behandelt werden. Man findet Eigenschaften der Löcher, die eine Analogie zu thermodynamischen Größen aufweisen. Dazu gehören die Hawking-Temperatur und die Bekenstein-Hawking-Entropie. Der abgeleitete Zahlenwert dieser Entropie regt zur Diskussion an, denn *Bekenstein* zeigte schon 1973, dass Schwarze Löcher enorme Entropien haben. Bereits ein stellares Schwarzes Loch von einer Sonnenmasse hat eine Entropie von 10^{77} k_B (k_B ist die Boltzmann-Konstante). Dieser gigantische Wert liegt weit über der Entropie eines typischen Sterns, der ja der Vorläufer eines solchen Schwarzen Loches gewesen sein muss. Diese Problematik bezeichnet man als **Entropie-Paradox** (*Informationsparadox*). Gravasterne lösen dieses Paradoxon, weil sie viel kleinere Entropien haben. Sie skaliert nur linear mit der Masse der dünnen Materieschale, die den Gravastern umhüllt.

Nach aktuellen Erkenntnissen lösen auch die Stringtheorien das Entropie-Paradox. Sie gehen sogar noch etwas weiter: *Samir Mathur* (*Mathur* 2004, hep-th/0401115) argumentiert, dass der Ereignishorizont ein Konglomerat aus Strings und Branen verhülle. Dieses Gebilde nennt er *fuzzball* (dt. 'Fusselknäuel'). Er enthalte noch Informationen über den Vorläufer, aus dem das Loch entstand. Die Hawking-Strahlung könne nun diese Informationen aufnehmen und abstrahlen. Das heißt, dass nicht alles im Loch verloren wäre, wenn dieses String-Szenario stimmen sollte. Schwarze Löcher hätten doch 'ein paar Haare mehr'!

20.7.12 Die Singularitätenfrage

Die Abbildung 20.6 ist eine schematische Gegenüberstellung zwischen klassischen und modernen Raumzeiten, die von außen betrachtet wie ein Schwarzes Loch aussehen, sich jedoch stark im

Inneren unterscheiden. Bis heute kann niemand sagen, welche Sichtweise korrekt ist! Jede Theorie, auf denen die Vorschläge basieren, hat ihre Vor- und Nachteile. Die ART ist zwar eine Theorie, die sich bewährt hat, aber es ist nicht klar, ob sich Physiker bereits abseits ihres Gültigkeitsrahmens bewegen, wenn sie den Ereignishorizont und das Innere eines Schwarzen Loches beschreiben wollen (Quanteneffekte!). Die Stringtheorien sind ein guter Anwärter auf eine vereinheitlichte Theorie. Dennoch sind sie den Physikern noch den Beweis schuldig, dass sie tatsächlich die Natur beschreiben. Insofern sind alle stringtheoretischen Aussagen mit einem gewissen Vorbehalt behaftet. Holosterne sind eine reizvolle, theoretische Alternative. Ihr Inneres kann sogar mit den Stringtheorien in Einklang gebracht werden. Auch die Gravasterne in der Quantengravitation von *Mazur & Mottola* sind attraktiv. Ihre äußere Metrik unterscheidet sich jedoch nicht vom klassischen Schwarzschild-Fall der ART. Es erscheint angesichts der starken Gravitationsrotverschiebung fragwürdig, ob jemals durch astronomische Beobachtung entschieden werden kann, ob es sich um ein Schwarzes Loch, einen Holostern, einen Gravastern oder einen Fuzzball handelt. Der aktuelle Stand der Theorie skizziert hier eine aussichtslose Lage: Man sieht im wahrsten Sinne des Wortes schwarz!

20.7.13 Klärung mit Gravitationswellen oder Loops?

Inzwischen gibt Anzeichen für einen möglichen Ausweg aus dem Dilemma: Es ist richtig, dass die Gravitationsrotverschiebung eine Unterscheidung erschwert - aber nur, falls man mit elektromagnetischen Wellen beobachtet. Es wurde kürzlich gezeigt, dass Ereignishorizont und Lochspin über Gravitationswellen nachgewiesen werden könnten (*Berti & Cardoso* 2006, gr-qc/0605101). Die experimentelle Gravitationswellenforschung läuft auf Hochtouren, so dass Hoffnung besteht, dass es bald aufregende Neuigkeiten zu vermelden gibt. Falls das gelingt, könnte man dies *gravitationswelleninduzierte Verifikationsmethode* Schwarzer Löcher nennen (*Müller* 2004).

Positive Entwicklungen verzeichnet auch die Loop-Quantengravitation: verschiedene Autoren konnten zeigen, dass Krümmungssingularitäten durch Loop-Effekte vermieden werden könnten (*Bojowald et al.* 2005, *Goswami et al.* 2006).

Dennoch ist die **Singularitäten-Frage** noch nicht gelöst: Sind Singularitäten ein Bestandteil der Natur oder sind sie ein Artefakt einer unzulänglichen, mathematischen Beschreibung?

20.7.14 Weiteres im Wissensportal

- ◇ umfangreicher Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ *A. Müller*: Experimental Evidence of Black Holes, eingeladener Seminarvortrag bei der *School on Particle Physics, Gravity and Cosmology*; Preprint: astro-ph/0701228 (2007)
- ◇ *A. Müller*: *Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry*, Dissertationsschrift, Heidelberg, 2004; pdf

20.8 Schwarzschild-de-Sitter-Lösung

Die Schwarzschild-de-Sitter-Lösung ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** Λ-Term (siehe kosmologische Konstante). Physikalisch motiviert ist diese Raumzeit, wenn man eine Punktmasse oder ein nicht rotierendes Schwarzes Loch beschreiben will, das sich in einer Umgebung befindet, die mit dem Λ-Fluidum angefüllt ist.

20.8.1 zum Namen

Der Name Schwarzschild-de-Sitter-Lösung kommt daher, weil diese Metrik beides beinhaltet: die statische und kugelsymmetrische Eigenschaft von der Schwarzschild-Lösung und die kosmologische Konstante wie in der de-Sitter-Lösung.

20.8.2 Eigenschaften: Masse und Λ

Die Schwarzschild-de-Sitter-Raumzeit ist eine **Zwei-Parameter-Lösung**, weil Massenparameter M und die kosmologische Konstante Λ die Eigenschaften der Metrik eindeutig festlegen.

20.8.3 Unterscheidung nach Vorzeichen von Λ

Wie bei der de-Sitter-Raumzeit auch, sprechen Theoretiker von der Schwarzschild-de-Sitter-Lösung (SdS-Metrik), falls $\Lambda > 0$ (repulsive kosmologische Konstante; Antigravitation) und von der Schwarzschild-Anti-de-Sitter-Lösung (SAdS-Metrik), falls $\Lambda < 0$ (attraktive kosmologische Konstante). Im Grenzfall $\Lambda = 0$ ist gerade die gewöhnliche Schwarzschild-Metrik mit verschwindender kosmologischer Konstante realisiert.

Interessanterweise hat die SAdS-Metrik **keinen Ereignishorizont**.

20.8.4 Linienelement

Das Linienelement der Schwarzschild-de-Sitter-Lösung aus demjenigen der Kerr-de-Sitter-Lösung abgeleitet werden, wenn man dort $a = 0$ setzt.

20.8.5 Weitere Raumzeiten

Falls der Drehimpuls des Loches verschieden von Null ist, so liegt gerade Kerr-de-Sitter-Lösung vor. Gibt es Drehimpuls und eine zusätzliche elektrische Ladung, so resultiert die Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung.

20.9 Schwarzschild-Lösung

Die Schwarzschild-Lösung ist die erste Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen, die 1916 von dem deutschen Astrophysiker *Karl Schwarzschild* (1873 - 1916) gefunden wurde. *Albert Einstein* war sehr verwundert darüber, dass bereits im Publikationsjahr seiner Allgemeinen Relativitätstheorie eine Lösung gefunden wurde, denn die Struktur der nichtlinearen, gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen erschien ihm so kompliziert, dass er sich nicht vorstellen konnte, dass sie so schnell jemand lösen würde.

20.9.1 Was beschreibt die Schwarzschild-Lösung?

Allgemein gesprochen beschreibt die Schwarzschild-Lösung den kugelsymmetrischen, materiefreien Außenraum einer elektrisch ungeladenen, nicht-rotierenden Punktmasse. In den Anfängen wurde sie meist für die relativistische Beschreibung der Gravitation von langsam rotierenden Sternen wie der Sonne verwendet - das ist auch heute noch eine gute Approximation. Viel später brachte man die Schwarzschild-Metrik mit den Schwarzen Löchern in Zusammenhang. Die Schwarzschild-Lösung beschreibt eine kugelsymmetrische Vakuum-Lösung der Feldgleichungen (ohne Λ-Term) und wird als Außenraumlösung nicht-rotierender, ungeladener Schwarzer Löcher interpretiert. Üblicherweise notiert man die Schwarzschild-Geometrie in folgender Weise als Linienelement:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + r^2 \sin^2\theta \, d\Phi^2 + \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 \, d\theta^2.$$

Alternativ kann man auch nur den metrischen Tensor der Schwarzschild-Metrik in Matrixform notieren. Der metrische Tensor in kontravarianter Form lautet dann

$$\mathbf{g}^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g^{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g^{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g^{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/(1-2\,M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-2\,M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(r\sin\theta)^2 \end{pmatrix},$$

und in kovarianter Form

$$\mathbf{g}_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1-2\,M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1-2\,M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2\sin^2\theta \end{pmatrix}.$$

Wie man sieht hängt diese Raumzeit nur von einem einzigen Parameter ab, der mit der Punktmasse bzw. Lochmasse M assoziiert ist.

20.9.2 Eigenschaften im Vergleich mit der Kerr-Lösung

Die Schwarzschild-Lösung ist der Spezialfall der rotierenden Kerr-Lösung. Setzt man in der Kerr-Lösung den Rotationsparameter (Kerr-Parameter) null, $a = 0$, so resultiert die statische Schwarzschild-Lösung. Der Schwarzschildradius ist der Abstand, wo die Entweichgeschwindigkeit gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit wird und beträgt zwei Gravitationsradien. Diese Grenze nennt man Ereignishorizont des Schwarzschild-Loches, weil Ereignisse innerhalb dieser Grenze nicht zu einem Außenbeobachter dringen können. Nimmt man den Ereignishorizont als Kriterium und setzt gleiche Lochmassen voraus, so ist das Schwarzschild-Loch von seiner radialen Ausdehnung in der Äquatorebene her gerade doppelt so groß als ein Kerr-Loch, das maximal ($a = M$ in geometrisierten Einheiten) rotiert; denn beim Kerr-Loch liegt der äußere Horizont bei nur **einem** Gravitationsradius. Außerdem besitzt das Kerr-Loch eine an den Polen abgeplattete Ergosphäre. Bei Kerr-Löchern ist die intrinsische Singularität eine axialsymmetrische Ringsingularität. Bei der Schwarzschild-Geometrie ist es hingegen eine Punktsingularität - beide sind dennoch bei $r = 0$ lokalisiert, wie eine Diskussion der Riemannschen Invarianten wie dem Kretschmann-Skalar zeigt. Zusammenfassend stellt die Abbildung 20.5 (siehe Eintrag Schwarzes Loch) die Strukturen des statischen Loches dem rotierenden Loch gegenüber.

20.9.3 innere Schwarzschild-Lösung

Im gleichen Jahr, in dem *Karl Schwarzschild* die erste Lösung der Einstein-Gleichung veröffentlichte, fand er eine zweite Lösung! Heute bezeichnet man die erste als **äußere Schwarzschild-Lösung**, die zweite als **innere Schwarzschild-Lösung**. Sie unterscheiden sich dadurch, dass der Energie-Impuls-Tensor für die äußere Lösung global verschwindet, es handelt sich also um eine Vakuumlösung. Außerdem weist diese Metrik, die einen idealisierten Massenpunkt beschreibt, eine zentrale, echte Singularität beim Radius $r = 0$ auf.

Die innere Schwarzschild-Lösung hingegen ist etwas komplizierter: Schwarzschild nahm eine Kugel an, die aus einer idealen, d. h. inkompressiblen Flüssigkeit bestehe. An der Oberfläche dieser Kugel verschwindet wie bei einem Stern der Druck. Der Energie-Impuls-Tensor dieser Flüssigkeitskugel ist *nicht* null, aber von relativ einfacher Gestalt. Als 4×4-Matrix geschrieben, verschwinden alle Komponenten, außer denjenigen auf der Matrixdiagonalen. Im Gegensatz zur äußeren Schwarzschild-Lösung hat die innere Lösung **keine Singularität** mehr. Der Außenraum der Kugel entspricht der äußeren Metrik, während der Innenraum neue Eigenschaften aufweist.

Die (äußere) Schwarzschild-Lösung zeigt die Gültigkeit des Birkhoffschen Theorems und war ein historischer Erfolg für die Allgemeine Relativitätstheorie.

20.9.4 Aber: kosmische Schwarze Löcher rotieren

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die meisten Schwarzen Löcher im Kosmos durch die Kerr-Lösung beschrieben werden, weil der Entstehungsprozess Schwarzer Löcher mit einer Rotation der kollabierenden Objekte verbunden ist. Ein Beispiel ist das dramatische Schicksal eines massereichen, 'sterbenden' Sterns, wie es unter dem Eintrag Hypernova geschildert wird. Im Kollaps können alle Abweichungen von der sphärischen Symmetrie durch die Aussendung von Gravitationswellen abgestrahlt werden, nur nicht Drehimpuls! Dennoch sind nicht rotierende Schwarze Löcher nicht 'akademisch', weil Prozesse existieren, wie der Penrose-Prozess, der Blandford-Znajek-Mechanismus,

oder gravitomagnetische Dynamos, die den Drehimpuls eines Kerr-Lochs reduzieren können, bis sie ggf. nicht mehr rotieren könnten. Eine Realisierung der Schwarzschild-Lösung in der Natur ist daher denkbar.

Es ist davon auszugehen, dass die meisten Schwarzen Löcher rotieren, weil es unwahrscheinlich ist, dass der Drehimpuls des Vorgängerobjekts, z. B. der Vorgängergaswolke oder des Vorgängersterns, komplett abtransportiert werden konnte. Das ist insbesondere bei der Bildung stellarer Schwarzer Löcher zu erwarten. Im Allgemeinen sorgt Akkretion von Materie mit Drehimpuls immer für eine Erhöhung des Drehimpulses ('Aufziehen', engl. *spin-up*) des Loches sorgt, gerade bei den schon sehr lange akkretierenden supermassereichen Schwarzen Löchern, von deren Existenz die Astronomen in den Zentren von Galaxien, vor allem in den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) ausgehen.

20.9.5 Schwarzschild-Lösung ist besonders stabil

Ein wichtiges Kriterium für Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen ist deren Stabilität. Die Relativitätstheoretiker untersuchten in einer **Stabilitätsanalyse der Metrik**, wie sie sich unter kleinen, nicht kugelsymmetrischen Störungen verhält: Sie konnten zeigen, dass die gestörte Metrik in die ursprüngliche Lösung zurück schwingt (*Regge & Wheeler* 1957). Die Schwarzschild-Raumzeit kann unter diesem Gesichtspunkt als besonders stabil angesehen werden. Gewissermaßen ist sie der **Grundzustand der relativistischen Gravitation**. Demgegenüber ist die Kerr-Lösung zwar stabil gegen axialsymmetrische Störungen: es ist allerdings im Rahmen der Theorie zulässig, dass Penrose-Prozesse oder Blandford-Znajek-Mechanismen die Rotationsenergie *vollständig* extrahieren, so dass aus dem Kerr- ein Schwarzschild-Loch wird. In diesem Sinne ist die Kerr-Metrik weniger stabil.

20.9.6 Über die Existenz der Schwarzschild-Singularität

Die Existenz von Punkten in der Natur ist fragwürdig. Denn die **Quantentheorie**, insbesondere die Heisenbergsche Unschärferelation, legt nahe, dass jedes Objekt der Natur eine Minimalausdehnung hat. Aus dieser Perspektive ist auch die Existenz von Punktsingularitäten, wie diejenige der Schwarzschild-Lösung, zweifelhaft. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist eine klassische, **unquantisierte Theorie**. Es ist denkbar, dass Singularitäten ein Artefakt einer solchen unquantisierten und unvollständigen Beschreibung sind.

Erstaunlicherweise ist es gelungen, Lösungen von Einsteins Feldgleichungen zu finden, die in den Außenbereichen mit der Schwarzschild-Raumzeit übereinstimmen, aber im Innern keine Punktsingularität aufweisen. Neben der bereits dargestellten inneren Schwarzschild-Lösung sind das der Gravastern und der Holostern. Der Gravastern hat anstelle der Singularität einen Kern aus Dunkler Energie. Der Holostern besitzt einen Kern aus radial gespannten Strings. Diese modernen Alternativen sind (soweit Physiker heute wissen) mit den Konzepten der Quantenphysik verträglich. Beide sind statisch. Der Gravastern ist regulär, wohingegen der Holostern eine Krümmungssingularität aufweist. Und interessanterweise haben beide Lösungen **keinen Ereignishorizont**: Licht kann ihnen also entkommen! Die provokante Frage lautet: Sind klassische Schwarze Löcher akademisch und die kompakten Kandidaten für Schwarze Löcher in Wahrheit Gravasterne oder Holosterne? Aus der Sicht des Astrophysikers muss diese Frage bisher verneint werden. Der Grund ist, dass Astronomen eine Vielzahl von kosmischen Objekten nur mit rotierenden Schwarzen Löchern verstehen können - **Gravastern und Holostern rotieren jedoch nicht**. Die Frage müsste erneut geprüft werden, wenn *rotierende Verallgemeinerungen* von Gravastern und Holostern in der Theorie gefunden werden - falls das möglich ist.

20.9.7 Mehr Informationen

- ◇ umfangreicher Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation, darin speziell das Kapitel zur Schwarzschild-Lösung.
- ◇ Schwarzschilds Originalpapiere aus dem Jahr 1916 wurden 1999 ins Englische übersetzt und stehen auf dem ePrint-Server zur Verfügung: Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes

nach der Einsteinschen Theorie und Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie

20.10 Schwarzschild-Radius

Dieser charakteristische Radius entspricht gerade dem Radius des Ereignishorizontes eines nicht rotierenden Schwarzen Loches, der so genannten Schwarzschild-Lösung. Er beträgt: 1 $R_S = 2GM/c^2$, mit der Masse M des Schwarzen Loches, der Gravitationskonstante $G = 6.672 \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2} und der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299\ 792.458$ km/s.

20.10.1 Theoretiker machen es sich leicht

Relativisten und theoretische Astrophysiker setzen vereinfachend häufig geometrisierte Einheiten ein, d. h. sie setzen einfach $G = c = 1$. Dann haben Längen und Massen dieselbe Einheit und der Schwarzschild-Radius beträgt einfach $2M$. Manchmal wird das noch mehr vereinfacht zu $G = M = c = 1$. Dann wird R_S exakt 2 und ist in theoretischen Rechnungen einfacher zu handhaben.

20.10.2 Längenskala von Einsteins Theorie

Der Schwarzschild-Radius ist also eine fundamentale Längenskala bei der Untersuchung Schwarzer Löcher. Noch fundamentaler ist allerdings der Gravitationsradius, r_g. Dies ist der Horizontradius eines maximal rotierenden Loches vom Kerr-Typ. Er ist gerade halb so groß, wie der Schwarzschild-Radius: 1 $r_g = 0.5\ R_S = GM/c^2$. Beide Skalen sind in der relativistischen Astrophysik gebräuchlich.

20.11 Schwerkraft

siehe Gravitation.

20.12 Seltsamer Stern

Die englische Fachbezeichnung Strange Star ist üblicher und bezeichnet einen besonderen Quarkstern, der zu einem hohen Anteil aus **seltsamer Materie** besteht. '*Seltsam*' bezieht sich dabei auf die **Seltsamkeit**, einer Quantenzahl.

20.12.1 weich und formbar

Ein seltsamer Stern besteht ausschließlich aus u-, d- und s-Quarks und weist eine 'weichere' Zustandsgleichung auf. Die Folge: ein seltsamer Stern kann im Gravitationskollaps stärker zusammengepresst werden als normale Neutronensterne.

20.12.2 Beimischung von Hyperonen in Neutronensternen

Sehr schwere Baryonen, die Hyperonen, besitzen ebenfalls hohe Seltsamkeiten. Unter ihnen ist das **Omega-Hyperon** das seltsamste (S = -3). Die Hyperonen konstituieren zu anderen Materieformen in Neutronensternen und 'weichen' dessen Inneres auf. Sie entstehen allerdings **erst bei sehr hohen Dichten**, etwa zwei- bis dreifacher Kernmateriedichte, und befinden sich dabei im Sternkern und nicht in seiner äußeren Kruste.

20.13 Seltsamkeit

Seltsamkeit ist in der Teilchenphysik eine Quantenzahl bzw. ein weiterer Quantenfreiheitsgrad (wie z. B. die Ladung oder der Spin).

20.13.1 Warum seltsam?

Etymologisch geht der Begriff *seltsam* (engl. *strange*) auf die merkwürdige Beobachtung zurück, dass seltsame Materie so **kurzlebig** ist. Die Quantenzahl *Seltsamkeit* wird bestimmt durch die strange-Quarks, die jeweils $S = -1$ haben und die strange-Antiquarks, die $S = +1$ haben. Alle anderen Teilchen haben *per definitionem* $S = 0$. Teilchen, die aus mehreren strange-Quarks bestehen, haben lediglich die entsprechend aufsummierte Seltsamkeit ihrer Komponenten.

20.13.2 Hier gibt es seltsame Materie

Die uns umgebende, gewöhnliche Materie (baryonische Materie) besteht zum größten Teil aus *up*- und *down*-Quarks. So ist es beispielsweise bei den Nukleonen (Protonen und Neutronen).

Daneben gibt es aber auch die experimentell beobachteten *strange*-Quarks, deren Anteil in seltsamer Materie signifikant erhöht ist. Eine besondere Teilchenfamilie, die Hyperonen, sind alle seltsam.

In der Astronomie wird über die Existenz von so genannten seltsamen Sternen spekuliert. Diese Sterne bestehen ausschließlich aus u-, d- und s-Quarks und sind infolge einer 'weicheren' Zustandsgleichung stärker komprimierbar als normale Neutronensterne.

20.14 Seyfert-Galaxie

Dies ist eine spezieller Typus sehr heller Galaxien, die in der Astronomie zur Gruppe der Aktiven Galaktischen Kerne (AGN) gezählt werden. Ihre Aktivität ähnelt, wenn auch in einem viel schwächeren Ausmaß, der der Quasare. Seyfert-Galaxien sind nach ihrem Entdecker *Carl K. Seyfert* benannt, der sie 1943 erstmals beobachtete.

20.14.1 Eigenschaften

Die spektralen Eigenschaften dieser AGN sind neben dem enorm hellen Kern, sehr breite Emissionslinien, die durch den Doppler-Effekt turbulent strömenden Gases entstehen. Seyfert-Galaxien zeigen hohe optische Variabilität auf der Zeitskala von einigen Monaten, Ultraviolett- und Infrarotexzesse, Polarisation durch Synchrotronstrahlung und eine schwache Radioleuchtkraft (*radioleise*). Ein typisches Röntgenspektrum von Seyfert-Galaxien wird im Web-Artikel Röntgenlinien - Sendboten von Loch und Scheibe vorgestellt.

Die Wirtsgalaxien der Seyferts sind fast ausschließlich Spiralgalaxien (siehe Hubbletyp). Es sind nur wenige Seyfert-Galaxien ohne Spiralstruktur bekannt. Die Jets der Seyfert-Galaxien sind - im Gegensatz zu den Quasaren und Radiogalaxien - äußerst schwach ausgeprägt. Das passt zu den radioleisen Spektren. Seyfert-Galaxien zählen zu einem schwächeren Repräsentanten der AGN.

20.14.2 Seyfert Typ-1 und Typ-2

Astronomen unterscheiden unter den Seyfert-Galaxien (und auch Quasaren - siehe dort) weitere Unterklassen von Typ 1 bis Typ 2. Ursache für diese Zweiteilung (*Dichotomie*) ist der unterschiedliche Blickwinkel des Beobachters auf die Scheibe um den AGN. Blickt der Beobachter von oben auf die Scheibe (kleine Neigungen oder *Inklinationen*), sieht er das Zentrum des AGN. Das entspricht Typ 1. Der großskalige Staubtorus verhüllt bei hohen Inklinationen eine (optische) Sicht ins Innere des AGN - das entspricht gerade Typ 2.

Astronomen wissen sich bei der Typ-2-Orientierung zu helfen, um dennoch einen Blick ins Innere des AGN riskieren zu können. Da der Absorptionskoeffizient mit der Strahlungsfrequenz zur negativen

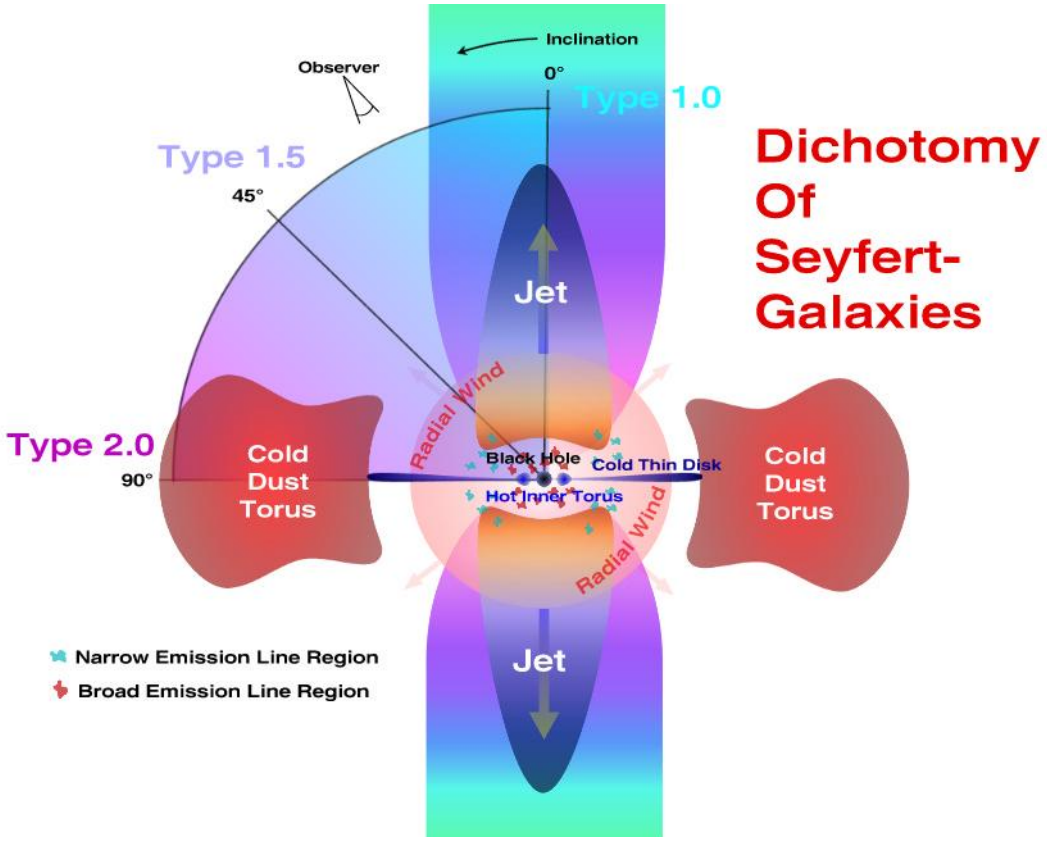

Abbildung 20.7: 2D-Schnitt durch Seyfert-Galaxie.

dritten Potenz abfällt, ist das Innere z. B. mittels harter Röntgenstrahlung astronomisch beobachtbar. Diese Strahlung kommt vor allem direkt aus dem Zentrum der aktiven Galaxie.

Typ 2 ist - bedingt durch Streueffekte im Staubtorus - im Radio und Infrarot heller als Typ 1. Die Inklination bestimmen Astronomen zum Beispiel anhand der Breite und Form der Emissionslinie von Eisen. Diese Spektrallinie liegt bei einer Ruheenergie von 6.4 keV, also im Bereich der Röntgenstrahlung. Die unterschiedlichen Ansichten auf eine Seyfert-Galaxie fasst die Illustration 20.7 zusammen:

20.14.3 typische Seyfert-Galaxien

- ◇ Bekanntester Vertreter ist die mit 8.9 Magnituden hellste Seyfert-Galaxie **NGC 1068** (M 77) im Sternbild *Walfisch* (*Cetus*). Sie ist etwa 55 Millionen Lichtjahre entfernt.
- ◇ Ebenfalls sehr hell ist **NGC 4151** in den *Jagdhunden* (*Canes Venatici*) mit $11.^m6$.
- ◇ **NGC 1275** ist die stärkste extragalaktische Röntgenquelle und entspricht den Quellen *Perseus X-1* bzw. *Perseus A*.
- ◇ Das Beobachtungsfoto 20.8 zeigt die **Circinus-Galaxie**, eine Seyfert-Galaxie vom Typ-2, die im Jahr 1999 mit dem Weltraumteleskop Hubble fotografiert wurde (Credit: *Wilson et al.*, HST/NASA 2000). Circinus ist etwa 4 Mpc entfernt. Im Foto erkennt man viel Staub, der durch Extinktion schwarze Strukturen hervorruft. Im oberen Teil des Bild sieht man violett leuchtendes Gas, das aus dem Zentrum der Galaxie heraus getrieben wird.

Abbildung 20.8: Circinus Galaxie, eine Seyfert-Galaxie Typ-2, beobachtet 2000 mit HST.

◇ Ein sehr intensiv studiertes Objekt ist die Seyfert-Galaxie **MCG-6-30-15** vom Seyfert-Typ 1 hat. Die Röntgenobservatorien ASCA, XMM-Newton und inzwischen auch SUZAKU haben viele Daten von MCG-6-30-15 geliefert, die uns viel über die Aktivität und Variabilität von AGN verraten. Insbesondere wurden intensiv die Akkretionsphysik und das supermassereiche Schwarze Loch in MCG-6-30-15 untersucht. 1995 gab es in dieser Quelle erstmals Hinweise auf ein rotierendes Kerr-Loch (*Tanaka et al., Nature 1995*).

20.15 Singularität

20.15.1 Grundsätzliches

Singularitäten sind im allgemeinen Sprachgebrauch vereinzelt auftretende Erscheinungen (*singuläre Ereignisse*). Der Wortstamm *singulus* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet 'einzeln'. In der Mathematik, Physik und Astrophysik gibt es ebenfalls Singularitäten, die als 'Unendlichkeiten' charakterisiert werden können.

20.15.2 Singularitäten in Mathematik und Naturwissenschaften

Die *singulären Punkte* in der Mathematik sind dadurch ausgezeichnet, dass sie mathematisch nicht definiert sind. Ein Beispiel ist hier das Teilen durch die Null. Dieser Wert strebt im Grenzwert gegen Unendlich, weil etwas Endliches (oder Konstantes) durch etwas beliebig Kleines geteilt wird.

Sogar in der Meteorologie gibt es Singularitäten. Hier sind allerdings spezielle Wetterphänomene gemeint, die immer wieder in charakteristischer Weise, aber über das Jahr gesehen vereinzelt auftreten; z. B. die *Eisheiligen* oder der *Altweibersommer*.

Singularitäten in der Physik hängen mit denjenigen der Mathematik zusammen: eine physikalische Größe wie Druck, Temperatur oder Massendichte wird unendlich. Dieses merkwürdige Verhalten

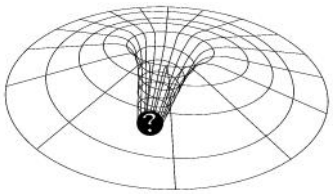

Abbildung 20.9: Singularität.

ereignet sich allerdings nur im Rahmen der theoretischen Physik bei einer Rechnung - ist aber bislang **nicht in der Natur beobachtet** worden.

20.15.3 Zwei Formen der Singularitäten in der Astrophysik

Singularität in der Astrophysik meint zwei völlig verschiedene Singularitätsformen, die in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) auftreten: **Koordinatensingularitäten** und **Krümmungssingularitäten**, die nachfolgend ausführlich vorgestellt werden. Einsteins ART beschreibt die Gravitation geometrisch mit gekrümmten Raumzeiten. Mathematisch werden diese vierdimensionalen Mannigfaltigkeiten durch ein Linienelement dargestellt. Dabei muss ein bestimmtes Koordinatensystem gewählt werden, in dem das Linienelement als Gleichung notiert werden kann. Nun kann es aber passieren, dass Terme im Linienelement mathematisch nicht definiert sind ('Division durch Null'). In diesen Fällen artet das Linienelement aus und eine mathematisch-physikalische Beschreibung der Raumzeit versagt: es liegt eine Singularität vor! Falls eine Wahl anderer Koordinaten (kartesische Koordinaten, Kugelkoordinaten, Zylinderkoordinaten etc.) die Singularität verschwinden lässt, so handelte es sich nur um eine Koordinatensingularität. Als Beispiel sei die Achse mit verschwindendem Poloidalwinkel in der (äußeren) Schwarzschild-Lösung mit pseudo-sphärischen Koordinaten genannt. Diese Koordinatensingularität verschwindet bei der Verwendung von pseudo-kartesischen Koordinaten. Gravierend ist es, wenn die Singularität in allen Koordinatensystemen existiert. Dann handelt es sich um eine Krümmungssingularität, die auch *echte* oder *intrinsische Singularität*, manchmal auch *Raumzeit-*, *physikalische* oder *wesentliche* Singularität genannt wird. Diese ist **nicht** zu beheben! Es scheint plausibel anzunehmen, dass die Raumzeit hier eine **unendliche Krümmung** erfährt. Aus diesem Grund divergieren hier auch Gezeitenkraft und die Materiedichte.

20.15.4 Wichtige Singularitäten der Astronomie

Früher (vor 1967) meinte der Begriff Singularität in der Astronomie ausschließlich Schwarze Löcher. Die Krümmungssingularität der Schwarzen Löcher ist durch einen Ereignishorizont verborgen. In diesem Punkt unendlicher Krümmung steckt die gesamte Masse eines Schwarzen Loches! Anders gesagt: Die Quelle der Gravitation eines Schwarzen Loches ist die Krümmungssingularität.

In der Kosmologie fanden die Relativitätstheoretiker die zweite wichtige Singularität der Astronomie: die **Urknallsingularität**. Als die Pioniere der Kosmologie Anfang des 20. Jahrhunderts die Allgemeine Relativitätstheorie zur Beschreibung des Kosmos als Ganzes benutzten, fanden sie dynamische Universen. Der expandierende Kosmos konnte sehr gut die astronomischen Beobachtungsdaten klären, denn die amerikanischen Astronomen *V. Slipher* und *E. Hubble* konnten messen, dass sich auf sehr großen, kosmologischen Raumskalen die Galaxien voneinander entfernen: Sie folgen der expandierenden Raumzeit des Universums! Extrapoliert man diese Ausdehnung in die Vergangenheit, so muss es ein sehr kleines Universum gegeben haben. 1931 fand *G.A. Lemaître*, dass der Kosmos in einem beliebig kleinen Punkt vereint gewesen sein muss. Dies war die Entdeckung der Urknallsingularität. *Lemaître* sprach von der 'Geburt des Raumes'.

20.15.5 Berechnen von Krümmungssingularitäten

Eine gute Methode, um die echten Singularitäten zu finden, ist die Verwendung von **Krümmungsinvarianten** (engl. *curvature invariants*). Diese (skalaren) Größen hängen mit dem Riemannschen Krümmungstensors (*Riemannsche Invarianten*), dem Ricci-Tensors (*Ricci-Invarianten*) und dem Weyl-Tensor (*Weylsche Invarianten*) zusammen und sind in jedem Koordinatensystem gleich! Eine Diskussion dieser Größen verrät vieles über die Krümmungseigenschaften einer Raumzeit. So ist ein gutes Kriterium für das Auffinden von intrinsischen Singularitäten, dass man die Stellen (Koordinatenpunkte, besser: Weltpunkte) sucht, wo die Krümmungsinvarianten *divergieren*, also ins Unermessliche ansteigen. Das passiert z. B. bei einer Division durch Null. Im Unterschied zu den Koordinatensingularitäten lässt sich die Divergenz nicht mit anderen Koordinatensystemen beheben.

So erhält man die Riemannschen Invariante, indem der kontravariante Riemann-Tensor (alle vier Indizes oben) mit dem kovarianten Riemann-Tensor (alle vier Indizes unten) multipliziert wird, wie es im Lexikoneintrag Kretschmann-Skalar exemplarisch gezeigt wird. Die so gewonnene Größe ist invariant, d. h. **in allen Koordinatensystemen gleich**. Diejenigen Orte, wo die Riemannsche Invariante divergiert (Nennernullstellen, Polstellen), kennzeichnen gerade die intrinsische Singularität.

20.15.6 Echte Singularitäten der Schwarzen Löcher

Intrinsische Singularitäten treten wie bereits beschrieben bei den klassischen Schwarzen Löchern der ART auf. Die echte Singularität der Schwarzschild-Metrik ist im Ursprung $r = 0$, weil die Riemannsche Invariante den Wert $48\ M^2/r^6$ hat. Die Bezeichnung 'Loch' kann in diesem Fall auch so interpretiert werden, dass die Schwarzschild-Geometrie diesen singulären Punkt aufweist, dem eine Sonderrolle in der gesamten Raumzeit zukommt.

Die Kerr-Geometrie zeigt anstelle der zentralen Punktsingularität eine intrinsische Ringsingularität, die jedoch ebenfalls bei $r = 0$ ist - dies belegen die Krümmungsinvarianten. [*Für Experten*: die Ringform ist dann zu entdecken, wenn man die Funktion ρ der pseudo-sphärischen Boyer-Lindquist-Koordinaten auf Kerrs ursprüngliches pseudo-kartesisches Koordinatensystem zurück transformiert. Das verwundert etwas, sind doch die Riemannschen Invarianten unabhängig vom verwendeten Koordinatensystem; aber es gibt eben Koordinaten, die eine einfache Interpretation der Singularitätenstruktur zulassen und solche die es eher verschleiern oder sogar verhindern.]

Letztendlich steckt in diesen wesentlichen Singularitäten die Masse der Schwarzen Löcher. Denn ansonsten ist die Raumzeit 'leer', es gibt keine weiteren Quellen in der Schwarzschild- oder Kerr-Geometrie. Bei der Schwarzschild-Lösung ist die Raumzeit-Singularität ein statischer Punkt; bei der Kerr-Lösung ist es ein stationärer, rotierender Massenfluss in Form eines unendlich dünnen Ringes.

20.15.7 Definition einer Krümmungssingularität

Die Definition einer Singularität ist gar nicht so trivial: *B.G. Schmidt* prägte 1970 die Definition, dass in Singularitäten Geodäten, die Bahnen von Materie und Licht, enden und auch die Raumzeit in diesen singulären Punkten nicht mehr fortgesetzt werden kann, weil die Krümmung unendlich wird.

Die physikalischen Gesetze finden demnach in Singularitäten keine Anwendung mehr. Es ist keine physikalische Aussage (im Rahmen der ART) möglich, weil hier wesentliche, physikalische Größen wie Dichte oder Krümmung divergieren.

20.15.8 Existieren Singularitäten in der Natur?

Der bekannte Relativist *J.A. Wheeler* sieht im Auftauchen der Singularitäten bzw. unendlicher Krümmungen ein Anzeichen dafür, dass hier die klassische Allgemeine Relativitätstheorie versagt und die **Domäne einer quantisierten Gravitationstheorie** beginnt. Im Rahmen der unquantisierten ART muss man sich mit Singularitäten anfreunden. Aber die spannende Frage ist, was mit Krümmungssingularitäten in einer Theorie der Quantengravitation passiert. Viele quantengravitative Konzepte wurden schon erarbeitet: In den 1970er Jahren wurden Hawking-Strahlung und Unruh-Effekt entdeckt. Das theoretische Regime dieser beiden bislang nicht in der Natur beobachteten Phänomene

ist jedoch eine semi-klassische Quantengravitation. Das bedeutet: die Teilchen werden als quantisierte Felder beschrieben, aber das Gravitationsfeld bleibt wie in der ART unquantisiert! Anwärter auf 'echte Quantengravitationstheorien' sind die Stringtheorien (siehe auch Branenwelten) und die Loop-Quantengravitation (LQG). In diesen Theorien wird tatsächlich versucht, das Gravitationsfeld zu quantisieren und zwar in Gravitonen (bei den Stringtheorien) bzw. in Wilson-Loops (bei der LQG). Wie die ART auch, müssen sich alle diese Theorien an der beobachtbaren Natur messen und bestätigen lassen. Erst nach dieser Phase der *Bewährung*, wie es der Philosoph *K.R. Popper* wissenschaftstheoretisch formulierte, kann auch den neuen Theorien vertraut werden. Bislang gab es weder den experimentellen Nachweis von Singularitäten oder Hawking-Strahlung, noch von Strings oder Extradimensionen, noch von Loops oder Loop-Effekten. Die nahe Zukunft wird in dieser Hinsicht sehr spannend!

20.15.9 Singularitätentheoreme

Doch so leicht lassen sich Singularitäten nicht loswerden: Die theoretischen Physiker *R. Penrose* und *S. W. Hawking* gingen in der Untersuchung und dem Auftreten von Singularitäten noch weiter: Sie fanden seit 1965 mathematische Sätze, die als **Singularitätentheoreme** bekannt sind. Diese Sätze sind *unabhängig* von der ART und basieren auf viel schwächeren Annahmen! Es gehen nur die folgenden drei Bedingungen ein:

- ◇ die geometrische Interpretation der Gravitation ('Masse und Energie krümmen die Raumzeit, Raumzeit beeinflusst Masse und Energie über Geodäten'), wie sie schon vom Machschen Prinzip nahe gelegt wurden;
- ◇ die Bedingungen für Energiedominanz, d. h. die lokale Schallgeschwindigkeit ist niemals höher als die lokale Lichtgeschwindigkeit;
- ◇ und das Kausalitätsprinzip, d. h. die Ursache kommt immer zeitlich vor der Wirkung.

Unter diesen Voraussetzungen verlangen die Singularitätentheoreme die notwendige und unvermeidliche Existenz von Singularitäten! Diese Aussage ist niederschmetternd für alle Gegner von Singularitäten. Gegner könnte man sein, weil man nicht an Orte im Kosmos glauben möchte, wo die physikalische Beschreibung zusammenbricht. Gegner könnte man auch sein wollen, weil man nicht an Punktsingularitäten glaubt, die nicht mit den Prinzipien der Quantentheorie vereinbar scheinen. Überspitzt formuliert: Glauben Sie, dass die Natur die Existenz von Punkten ohne jede Ausdehnung erlaubt? Vor diesem Wissenshintergrund sind die Singularitätentheoreme sehr strikte Aussagen.

Aber: Die Existenz von Singularitäten wurde noch nicht gesichert in der Natur nachgewiesen. Die Astrophysik kommt zwar mittlerweile kaum ohne klassische Schwarze Löcher aus, doch ist die herausfordernde Frage, ob die in der Natur gesichteten Kandidaten **nur aussehen wie** Schwarze Löcher, aber in Wahrheit etwas vollkommen anderes sind.

Ein wichtiges Werkzeug kommt aus der Mathematik: die Behandlung von Topologien. Dann besagen die Singularitätentheoreme, dass es immer Geodäten gibt, die *nicht erweiterbar* sind und in einem singulären Punkt enden. Leider besagen die Theoreme nur, *dass* Singularitäten auftreten, aber nicht *wo* und auch nicht *wie* ihr 'Inneres' beschaffen ist. Die Frage ist natürlich, ob diese Annahmen bei starken Gravitationsfeldern oder kleinen Raumskalen, also der Domäne eines **quantisierten** Gravitationsfeldes, relativiert werden müssen. Insofern werden Forderungen laut, die Singularitätentheoreme der Siebziger Jahre erneut auf den Prüfstand zu bringen.

20.15.10 Zweifel an den Singularitäten

Im Big-Bang-Modell der Kosmologie entsteht das Universum aus einer Singularität unendlicher Dichte, Temperatur und Druckes. Diese Singularität heißt wie bereits vorweggenommen **Urknallsingularität**, Friedmann-Singularität oder kosmologische Singularität. Extrapoliert man das expandierende Universum rückwärts in der Zeit, so gelangt man zu diesem singulären Punkt. Im Unterschied zur punktförmigen Schwarzschild-Singularität gehört die Urknall-Singularität zu einem materiegefüllten

Kosmos plus kosmologischer Konstante; die Schwarzschild- und Kerr-Raumzeiten sind hingegen global materiefrei.

Der Urknall hat durch das Ekpyrotische Modell erstmals eine mögliche - wenn auch abenteuerliche und spekulative - Erklärung erfahren: Er sei die Folge kollidierender Universen, so genannter **Branen-Universen**. Das Ekpyrosis-Modell steht nun seit einigen Jahren im Raum. Es dürfte außerordentlich schwierig sein, diese Bedingungen vor dem Urknall mit einem Experiment zu testen. Attraktiv an der *Ekpyrosis-Hypothese* ist, dass sie einen physikalischen Grund für den Urknall anzugeben vermag.

Die Methoden der Loop-Quantengravitation scheinen sogar anzudeuten, dass es gar keine Singularitäten gibt, wenn das Gravitationsfeld in Loops quantisiert wird! Das gilt sowohl für die Singularitäten der klassischen Schwarzen Löcher (*Bojowald*, Phys. Rev. Lett. 95, 2005; als ePrint: gr-qc/0506128), als auch für die Urknall-Singularität (*Bojowald*, Gen. Rel. Grav. 35, 1877, 2003; als ePrint: gr-qc/0305069 sowie der Vortrag astro-ph/0309478). Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass der Gravitationskollaps zu Singularitäten durch so genannte *Quantenevaporationen* unterbunden werden kann (*Goswami et al. 2006*). Damit ist gemeint, dass die granulare, also quantisierte Raumzeit der LQG im Kollaps bewirkt, dass die kollabierende Materie einen negativen Druck aufbaut. Wie bei der Dunklen Energie in der Kosmologie wirken die negativen Drücke eines Feldes antigravitativ. Das treibt einen nach außen gerichteten Massenverlust der kollabierenden Materie an und **verhindert die Entstehung einer Singularität**.

Das Aufregende an diesen Rechungen ist auch, dass sie im Prinzip astronomisch beobachtbar sind! Der Massenverlust im Kollaps erzeugt Variationen in der Lichtkurve der Sternexplosion, die mit dem Kollaps einhergeht. Man sollte jedoch nicht verfrühte Hoffnungen wecken: Zu den LQG-bedingten Variationen gesellen sich andere physikalisch bedingte Schwankungen, und es wird schwierig sein die Quantenevaporation von Singularitäten zu bestätigen.

Die brisanten Forschungsergebnisse von Bojowald, Goswami und Kollegen haben noch vorläufigen Charakter, und die Erforschung auf diesem Neuland der Gravitation dauert an.

20.15.11 Masse ohne Materie?

Was geschieht mit Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt? Wie reichert sie das Schwarze Loch mit Masse an? In welcher Form liegt sie vor? Als '**singuläre Materie**'? Diese entscheidenden Fragen wurden bislang nicht geklärt. Vom Standpunkt der Relativisten verliert die einfallende Materie ihre Materieeigenschaften. Als 'Masse ohne Materie' könnte man dieses Phänomen umschreiben. Das Keine-Haare-Theorem stützt die Vermutung, dass alle Eigenschaften außer Masse verloren gehen in einem Schwarzen Loch vom Schwarzschild-Typus. Freilich ist dieses Unwissen zum Haare raufen und Physiker arbeiten daran, Materie unter hohen Massendichten zu untersuchen - sowohl theoretisch, als auch im Labor. Eine konsequente Beantwortung der Frage, was mit in ein Loch einfallender Materie geschieht, wäre die Untersuchung des Quark-Gluonen-Plasmas. Welchen Phasenübergang macht diese exotische Materieform aus freien (!) Quarks und Gluonen unter weiterer Erhöhung der Dichte? Diese Frage müsste mit den Mitteln der Quantenfeldtheorie und den experimentellen Mitteln in Teilchenbeschleunigern erforscht werden.

Das aktuelle Gebiet der Astrophysik, das diesen Fragen nachgeht, beschäftigt sich mit Vakuumsternen. Letztendlich geht es darum zu verstehen, welchen Grundzustand die Materie einnimmt. Ist der Kern eines Schwarzen Loches angefüllt mit Dunkler Energie - wie im Falle der Gravasterne? Oder gibt es hinter dem verhüllenden Ereignishorizont gar keine Singularitäten, sondern Strings und Branen? *Fuzzball* und Holostern sind mit den Stringtheorien verträglich. Die modernen Vakuumsterne bringen jedenfalls die klassischen Schwarzen Löcher in Bedrängnis. Die Hypothesentests der Modelle an der Natur und die innere Konsistenz der zugrunde liegenden Theorien werden zeigen müssen, welches Modell die Natur am besten beschreibt.

20.15.12 Auch Singularitäten machen FKK: Nackte Singularitäten

In der Terminologie der ART gibt es noch ein weiteres Attribut: *nackte Singularitäten*. Diese sind nach Definition für die Außenwelt sichtbar, weil unter bestimmten Umständen Information aus

nackten Singularitäten entkommen kann. So ist die Ringsingularität in der extremen Kerr-Metrik (Kerr-Parameter a = -M bzw. a = +M) eine nackte Singularität, weil alle Horizonte und der Ring zusammenfallen. Die *kosmische Zensur* verbietet jedoch nackte Singularitäten und erlaubt nur, dass sich echte Singularitäten hinter Ereignishorizonten 'verstecken'. Falls Ereignishorizonte wirklich die 'Bademäntel des Universums' sind, scheint das wohl das Kernproblem beim Auffinden von Singularitäten in Experimenten zu sein. Wie weit aber der Gültigkeitsrahmen dieser kosmischen Zensur reicht, ist ein offenes Problem.

20.15.13 Grenzen und Auswege moderner Physik

Viele Physiker haben bei der Konfrontation mit Singularitäten 'Bauchschmerzen'. Immerhin versagt hier die Physik und diese Bereiche entziehen sich bisher jeder naturwissenschaftlichen Beschreibung und lassen viel Raum für Spekulation und Science-Fiction (siehe auch Wurmlöcher). Sie werden daher von Kritikern als 'unphysikalisch' bezeichnet, und das könnte ein Hinweis darauf sein, dass dort, wo sie auftreten, die physikalische Beschreibung überdacht und modifiziert werden muss. Eine Vermutung kann sein, dass das Auftreten von Singularitäten ein Artefakt einer unzulänglichen Beschreibung ist, wie *Wheeler* mutmaßte und die aktuellen Ergebnisse der Schleifen-Quantengravitation (=LQG) andeuten.

Daher wurde die Erfindung der Gravasterne als Alternativen zum Schwarzschild-Loch von einigen Forschern besonders begrüßt. Doch das Gros der *scientific community* ist entweder indifferent oder noch recht zurückhaltend und abwartend, was die neuen Lösungen angeht. Für so manchen Forscher mag der Schritt zu gewagt, zu heterodox sein, von den klassischen Schwarzen Löchern Abschied zu nehmen; andere sind orthodoxe Verfechter der Singularitätentheoreme.

Gravasterne, Holosterne, Fuzzballs sowie andere Vakuumsternlösungen und die Singularitätenfrage sind aktuelle und brisante Forschungsthemen. Die Frage, ob die intrinsischen Singularitäten der Astrophysik ein künstliches Artefakt einer unzulänglichen, mathematischen Beschreibung sind muss daher noch unbeantwortet stehen gelassen werden.

20.15.14 Literatur

◇ *Hawking, S.W.* & *Penrose, R.*: The Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology, Proc. Roy. Soc. Lond. A 314, 529, 1970

20.16 skalares Boson

Bezeichnung für ein Boson mit Spin 0, so ist beispielsweise das Higgs-Teilchen skalar.

20.17 SNR

Das Akronym SNR steht für *Supernova Remnant*. Dies sind die Relikte oder Überreste von Supernovae (SN). SNRs sind mit GRBRs vergleichbar. Beide Phänomene zeigen Strukturen von expandierenden Schockwellen (*blast waves*) durch das interstellare Medium (ISM). Über Fermi-Prozesse können dabei ultra-hochenergetische Neutrinos gebildet werden.

20.17.1 Beispiel: Crab-Pulsar

Der bekannteste Supernovaüberrest ist wohl der **Crabnebel** im Sternbild *Taurus* (dt. Stier). Im Jahr 1054 ereignete sich hier eine Supernova, die von chinesischen Astronomen aufgezeichnet wurde. Diese Sternenexplosion ließ einen Neutronenstern als kompaktes Objekt übrig. Das Besondere an diesem Objekt (übrigens das erste Messier-Objekt, M1) ist, dass der rotierende Neutronenstern von der Erde aus als Pulsar beobachtet werden kann, der 30 Mal in der Sekunde um seine Achse rotiert. Damit gehört dieser Neutronenstern zu den **Millisekundenpulsaren** (Periodendauer 33 ms). Mehr noch: die

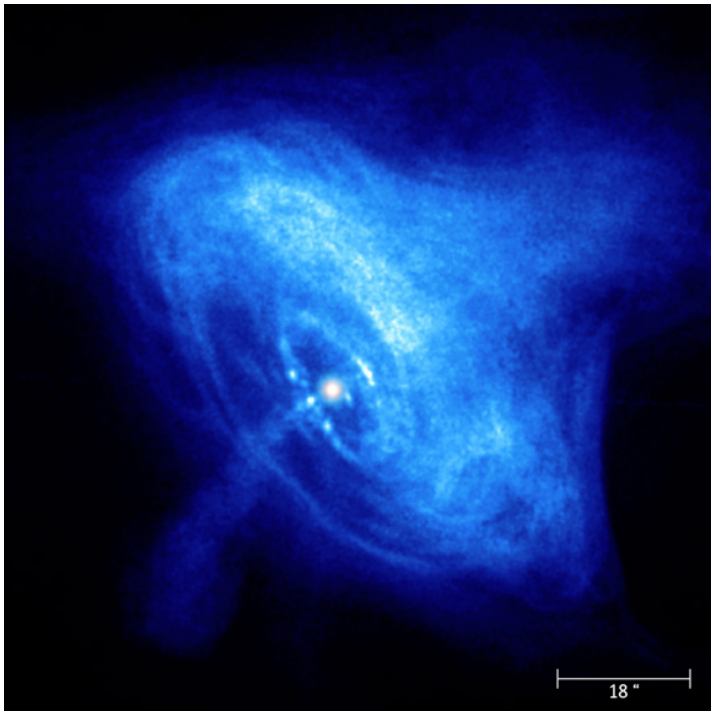

Abbildung 20.10: Chandra-Röntgenbild des Krebsnebels mit Pulsar.

Strahlung liegt im *optischen* Spektralbereich, so dass das charakteristische Blinken des Pulsars optisch beobachtet werden kann. Die mittlerweile weit in den interstellaren Raum expandierte, ellipsoidale Explosionswolke durchmisst etwa 7 Lichtjahre entlang der größeren Halbachse. Der Crabnebel ist 6300 Lj entfernt. Damit ist die scheinbare Größe des Nebels 6 × 4 Bogenminuten.

Die Abbildung 20.10 ist eine Röntgenfotografie des Crabnebels, die mit dem amerikanischen Röntgensatellit Chandra aufgenommen wurde (Credit: NASA/CXC/ASU/*J.Hester et al.* 2001). Der Pulsar ist mit der zentralen, hellen Punktquelle assoziiert. An seinen Polen entsteht ein Paarplasma, das vornehmlich aus Elektronen und Positronen besteht. Der schnell rotierende Neutronenstern beschleunigt dieses Material auf relativistische Geschwindigkeiten, also vergleichbar schnell wie das Licht! Man nennt dieses Material den **Pulsarwind**. Es bildet außerdem einen Jet, der ebenfalls als längliche Struktur von links unten nach rechts oben im Bild zu sehen ist. Das ausströmende Plasma trifft auf Material in der Umgebung. Auslaufende Schockwellen regen es zum Leuchten im Röntgenlicht an. So kommen die konzentrischen Ringe zustande, die unterschiedlich hell leuchten. Die ausgedehnte, diffuse Strahlung des Nebels rührt von Elektronen her: auf optischen Aufnahmen leuchten sie blau, aber wie dieses Chandra-Bild belegt, emittieren sie auch Röntgenstrahlung. Sie sind so heiß, dass sie thermisch im Röntgenlicht strahlen. Es gibt aber auch eine nicht-thermische Komponente, die Synchrotronstrahlung.

20.17.2 Die höchsten Lorentz-Faktoren im Universum!

Der zugrunde liegende Mechanismus für den Pulsarwind ist elektrodynamischer Natur: ein elektromagnetischer Energieausfluss, der so genannte Poynting-Fluss, reißt das Plasma mit sich, so dass es schon nach Durchlaufen einer kurzen Beschleunigungsstrecke gigantische Lorentz-Faktoren von 10^7 erreicht! Mit anderen Worten: Schnell rotierende Neutronensterne sind sehr effiziente, kosmische Teilchenbeschleuniger. Damit gehören die **relativistischen Pulsarwinde** sicherlich zu den faszinierendsten Objekten des Universums.

20.18 Soft Gamma-Ray Repeater

Die *Soft Gamma-Ray Repeater*, abgekürzt mit SGR, kennzeichnen eine bestimmte Entwicklungsphase von Neutronensternen, im Speziellen von Magnetaren.

20.18.1 Wenn Neutronensterne beben

SGRs sind gekennzeichnet von sich wiederholenden Ausbrüchen (engl. *bursts*) im Bereich der hochenergetischen Gammastrahlung. Ursächlich wird dafür ein Sternbeben in der Kruste des Neutronensterns angesehen, die durch den Transfer freiwerdender magnetischer Energie (*Rekonnexion*) auf das Krustenmaterial entstehen.

20.18.2 Vergleich mit GRBs

Im Gegensatz zu den SGRs sind die Gamma Ray Bursts singuläre Ereignisse, weil der oder die Vorläufersterne im GRB vollständig vernichtet werden. GRBs emittieren eher im Bereich der harten Gammastrahlung.

Eine mögliches Entwicklungsszenario, das unter anderem die SGRs einschließt, findet sich unter dem Lexikoneintrag Magnetare.

20.19 Sonne

Die Sonne ist der massenreichste Körper im Sonnensystem und dominiert damit die Bewegungen aller Körper im Sonnensystem. Die Sonne ist auch der Spender des Lebens, weil ihre elektromagnetische Strahlung die Erde mit Wärme versorgt. Daher nennt man sie auch unser **Zentralgestirn**.

20.19.1 Schwerkraft der Sonne

Streng genommen sitzt die Sonne nicht genau im Zentrum des Sonnensystems, weil Massen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Der Schwerpunkt des Sonnensystems liegt eben sehr nahe bei der Sonne (sogar noch innerhalb ihrer Oberfläche), weil sie so massereich ist.

Das dominierende Schwerefeld der Sonne beeinflusst die Bewegungen von Planeten, Planetoiden, Kometen und anderen, viel kleineren Himmelskörpern maßgeblich. Die Graviton der Sonne kann in der Regel mit der Newtonschen Gravitationstheorie gut beschrieben werden - nur der innerste Planet Merkur zeigt Abweichungen (*Periheldrehung*), die die Allgemeine Relativitätstheorie erfordern. Relativistisch formuliert müsste man dann von der solaren, gekrümmten Raumzeit sprechen.

20.19.2 Du bist mein Stern

Die Sonne ist unter allen Körpern im Sonnensystem aber auch ein ganz Besonderer: Die Sonne ist ein Stern, also eine Ansammlung aus heißem, ionisiertem Gas, das über Prozesse der thermonuklearen Fusion beträchtliche **Strahlungsenergien** freisetzt. Die restlichen Körper im Sonnensystem strahlen zwar auch im Wesentlichen Wärmestrahlung ab, aber die Sonne ist der einzige Körper, der die Strahlungsenergie aus der Fusion von leichten Atomkernen bezieht. Sie ist damit bei weitem der hellste Himmelskörper.

Jupiter beispielsweise ist zwar der zweitschwerste Körper im Sonnensystem (0.001 Sonnenmassen), aber er strahlt mehr Wärmestrahlung ab (die er aus der Gaskompression gewinnt), als er Strahlung von der Sonne erhält.

20.19.3 AU!

Die Sonne ist der nächste Stern zur Erde: Ihre Entfernung zur Erde beträgt im Mittel etwa 150 Millionen Kilometer, eine Entfernung, der man in der Astronomie extra einen Namen gegeben hat: die

Astronomische Einheit (dt. AE, internat. AU abkürzt). Diese Skala ist typisch für die Längen in Planetensystemen und wird auch bei extrasolaren Planeten verwendet.

20.19.4 Phasen, Mofi & Sofi

Die Strahlung der Sonne verursacht unterschiedliche Beleuchtungseffekte im Sonnensystem: So entstehen charakteristische **Phasen** der inneren Planeten (Merkur und Venus), je nachdem, wie die aktuelle, relative Position zwischen Sonne, Erde und innerem Planet ist. Auch der irdische Mond zeigt aus demselben Grund diese Phasen, die wir als Neumond, zunehmende Phase, Vollmond und abnehmende Phase kennen.

Daneben gibt es ganz besondere Beleuchtungsphänomene, wie die Sonnenfinsternis und die Mondfinsternis. Astronomisch handelt es sich um triviale Schattenwürfe zwischen den Himmelsobjekten, die an bestimmten Orten betrachtet, Himmelskörper 'verschwinden' lassen: Bei der **Sonnenfinsternis** steht der Neumond so zwischen der Verbindungslinie von Sonne und Erde, dass der Mondschatten die Erde trifft und im Kernschattengebiet (der etwa 200 km auf der Erdoberfläche durchmisst) eine *totale* Sonnenfinsternis, im Halbschattengebiet eine *partielle* Sonnenfinsternis hervorruft. Bei der **Mondfinsternis** hingegen befindet sich der Mond gerade im Kernschatten der Erde und erscheint durch an der Erde gestreutes Sonnenlicht rot.

20.19.5 Sonnenphysik

Vom Standpunkt des Astronomen ist die Sonne natürlich ein Glücksfall, nicht nur, weil sie sein Leben überhaupt erst ermöglichte, sondern auch weil sie der nächste Stern zur Erde und somit ideales Studienobjekt der **Stellarphysik** ist. Forschungsthemen der Sonnenphysik sind die physikalischen Eigenschaften der Sonne sowie Entstehung und Entwicklung der Sonne. Unser Zentralgestirn bietet die Gelegenheit, einen eher unscheinbaren Vertreter der Gattung Stern zu erforschen. Im Zuge der Stellarphysik, als immer mehr Sterne in der Umgebung der Sonne auch mit physikalischen Parametern beschrieben werden konnten, zeigte sich, dass die Sonne weder besonders groß und schwer, noch besonders heiß oder leuchtkräftig ist.

20.19.6 Aufbau der Sonne

Die Strukturen in der Sonne werden in Grafik 20.11 visualisiert.

Sonnenkern

Das **Sonneninnere** besteht aus einem heißen, **radiativen Kern**, in dem die Fusionsprozesse ablaufen. Hier werden die Photonen erzeugt, die für ihren Weg durch das Sonneninnere relativ viel Zeit benötigen, weil sie gestreut und reemittiert werden (Strahlungstransport). Dann schließt sich ebenfalls noch im Innern die so genannte **Wasserstoff-Konvektionszone** an. Ihre Dicke macht etwa 1/10 des Sonnenradius aus. Hier ist die Umwälzung der Gasmassen ein effizienter Mechanismus des Energietransports: heiße Gasblasen steigen mit Geschwindigkeiten von einigen Kilometern pro Sekunde auf, während abgekühlte Gasmassen absinken (analog zur Konvektion in der irdischen Atmosphäre).

Photosphäre

Dieser Prozess erzeugt die charakteristische **Granulation** der Sonnenoberfläche, eine Körnung in Konvektionszellen (*Granulen*) mit einem typischen Durchmesser von etwa 1400 km, die eine mittlere Lebensdauer von nur bis zu 10 Minuten haben. Der Temperaturunterschied von Granulen und intergranulem Bereichen beträgt etwa 300 K. Die Granulation steht selbstähnlich mit der **Supergranulation** auf viel größeren Längenskalen von etwa 30 000 km in Verbindung: diese haben höhere Lebensdauern im Bereich von etwa 30 Stunden.

Die Granulation ist auf der Sonnenoberfläche beobachtbar, ein Bereich, der als Photosphäre bezeichnet wird. Eigentlich ist es eine Schicht, die nur etwa 100 bis 200 km dick ist. Sie verdankt

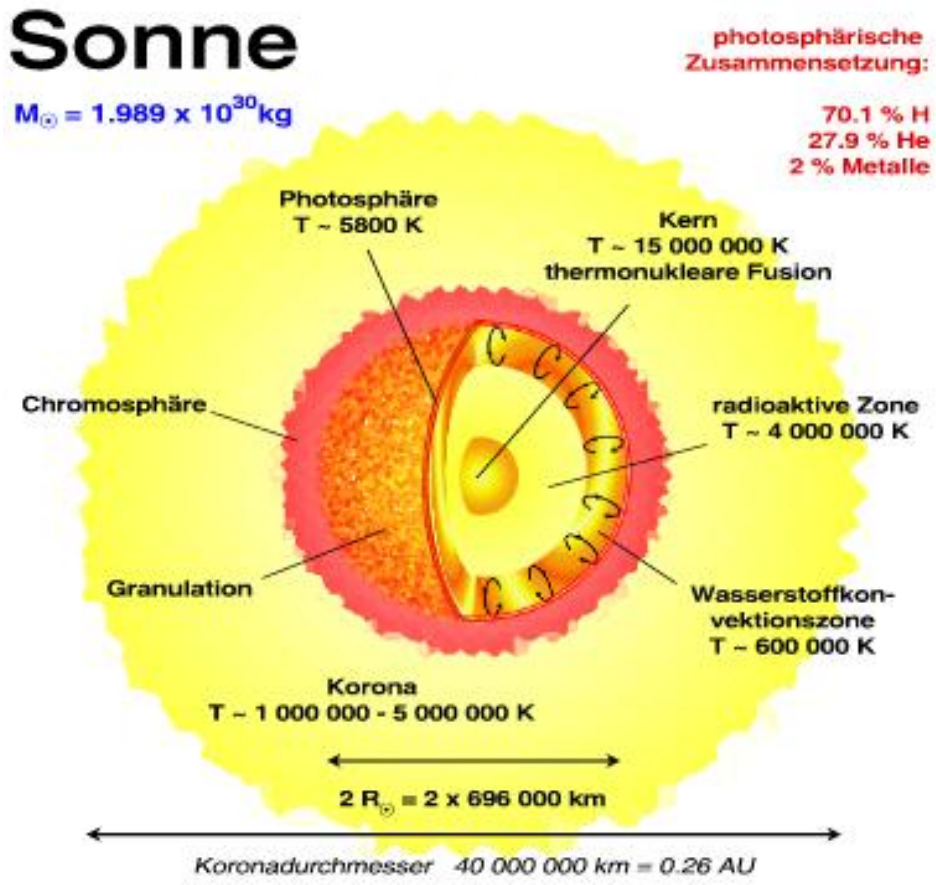

Abbildung 20.11: innere Struktur der Sonne.

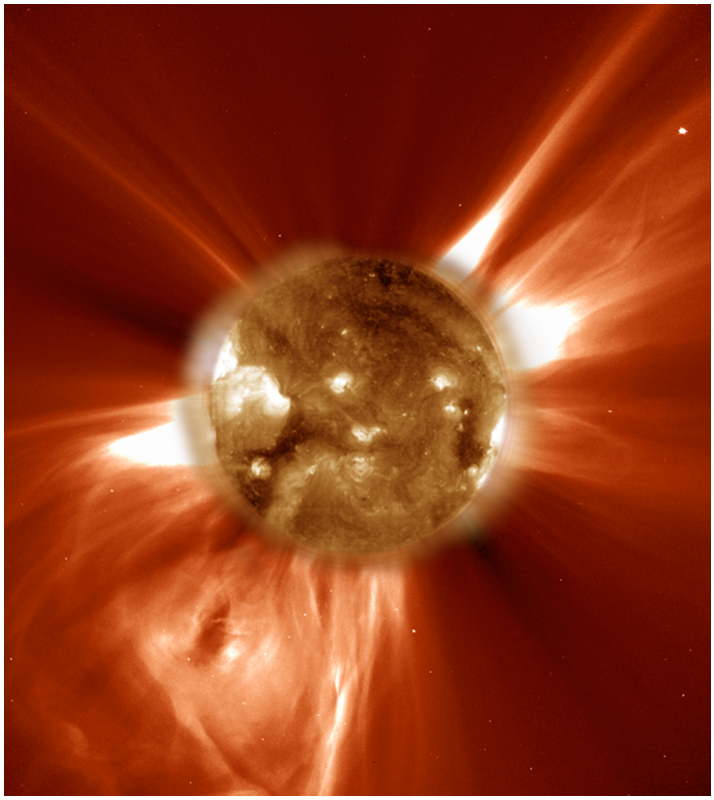

Abbildung 20.12: SOHO-Bild der Sonnenstürme und Massenausflüsse.

ihren Namen dem Umstand, dass aus dieser Schale die Photonen kommen, die wir beobachten. Dies ist gerade die sichtbare Sonnenscheibe.

Chromosphäre

Darüber liegt die Chromosphäre mit etwa 10000 km Dicke. In Sonnenfinsternissen erscheint sie rot (daher ihre Bezeichnung: grch. *chromos* heißt Farbe). Diese inhomogene Region ist von flammenartigen *Spicules* durchzogen. In den so genannten *Flash-Spektren* kann man kurzzeitig die Chromosphäre vor und nach der totalen Sonnenfinsternis (2. und 3. Kontakt) spektroskopieren. Sonnenforscher wählen dazu geeignete Emissionslinien von Wasserstoff und Kalzium aus.

Korona

Die Korona ist die äußerste Schicht der Sonne und erscheint in totalen Sonnenfinsternissen als der berühmte Strahlenkranz, daher auch ihr Name (dt. 'Krone'). Die Korona weist eine außerordentlich geringe Teilchendichte auf (10^8 Teilchen pro Kubikzentimeter); das Erstaunliche an der Korona ist, dass sie mit **2 bis 5 Millionen Grad** um ein Vielfaches heißer ist, als die Sonnenoberfläche (nur etwa 6000 K)! Diese lange rätselhaft gebliebene **Aufheizung der Korona** kann die Magnetohydrodynamik (MHD) erklären: MHD-Wellen dringen aus dem Sonnenplasma in den koronalen Bereich ein. Dort vernichten sich die Magnetfelder entgegengesetzter Polarität (*Rekonnexion*). Was passiert mit der Energie, die im Magnetfeld gespeichert war? Nun, sie wird umgewandelt in kinetische Energie, nämlich thermische Energie der Teilchen in der Korona. Die hohen Temperaturen werden durch magnetische Effekte erklärt. Die Beobachtung der Korona bewerkstelligen

Sonnenforscher mit *Koronographen*, die durch Abdeckung der Sonnenscheibe gewissermaßen eine künstliche Sonnenfinsternis herbeiführen. Die äußeren Bereiche der Collage 20.12 wurden mit dieser Technik aufgenommen; der innere Bereich ist die Sonnenscheibe, fotografiert im UV-Licht (Credit: SOHO, NASA/ESA, 2002). Das Foto zeigt in dramatischer Weise unsere Sonne als höchst aktiven Stern! Im Licht der hochenergetischen Ultraviolettstrahlung (die unsere Haut bräunt) präsentiert sich die Sonne strukturreich mit Sonnenflecken, die hier weiß erscheinen - optisch sind die Sonnenflecken schwarz (s. u. 'Modelle von der Sonne'). Der Betrachter kann geradezu sehen, wie das Sonnenplasma kocht! Auch die Granulation ist sichtbar, wenn auch nicht so kontrastreich wie in Hα-Filtern.

Die vorstehend beschriebenen Vorgänge in der solaren Magnetosphäre sorgen für gewaltige Plasmaauswürfe, die von der Sonnenoberfläche bis tief in den planetaren Raum eindringen. Der Bildrand entspricht etwa zwei Millionen Kilometer Entfernung von der Sonnenoberfläche. Die hier sichtbaren Filamente und herausgeschleuderten Gasblasen heißen **koronale Massenausflüsse** (engl. *coronal mass ejection*, CME). Erreichen sie die Erde, können der Funkverkehr empfindlich gestört oder sogar Satelliten beschädigt werden.

Als äußersten Randbereich der Korona geben Astronomen 20 Millionen Kilometer an, was schon 0.13 AU entspricht. Die Randbereiche der Korona sind demnach schon relativ nahe an der Erde. Die **Koronakondensationen** sind helle Aktivitätsknoten in der Korona, die auch längerfristig, im Bereich von Wochen, stabil sein können. Im Bereich optischer Strahlung ist die Korona dreigeteilt:

- ◇ Die **K-Korona** weist ein Kontinuum (daher K) auf, was durch Streuung von photosphärischen Photonen an heißen, koronalen Elektronen hervorgerufen wird.
- ◇ Die **F-Korona** zeigt die berühmten *Fraunhoferschen Linien* (daher F), Absorptionslinien, die zur Entdeckung eines neuen Elements führten: **Helium** (grch. *helios*: Sonne), das erst später auf der Erde nachgewiesen wurde. Die Linien bleiben scharf, weil die Streuung in der F-Korona an langsamen Staubteilchen stattfindet.
- ◇ Die **L-Korona** macht nur 1% der koronalen Gesamtstrahlung aus und besteht aus einigen wenigen Emissionslinien, besonders von Eisen und Kalzium. Dies ist der eigentliche 'Fingerabdruck' der Koronastrahlung bzw. Koronamaterie.

20.19.7 physikalische Daten der Sonne

- ◇ Masse: $M_{sol} = 1.989 \times 10^{30}$ kg. Diese Größe definiert eine fundamentale Massenskala in der Astrophysik, die **Sonnenmasse**.
- ◇ Sonnenradius: $R_{sol} = 6.96 \times 10^5$ km
- ◇ Sonnenoberfläche: 6.09×10^{18} m^2
- ◇ Sonnenvolumen: 1.41×10^{27} m^3
- ◇ Solarkonstante (solare Strahlungsflussdichte, integriert über sämtliche Frequenzen): S = 1.37 kW m^{-2}
- ◇ Leuchtkraft (Produkt aus Solarkonstante und Sonnenoberfläche; folgt aber auch aus Sonnenradius und Effektivtemperatur): $L_{sol} = 3.853 \times 10^{26}$ W $= 3.853 \times 10^{33}$ erg/s
- ◇ Röntgenleuchtkraft: 4.7×10^{27} erg/s (im Maximum), 2.7×10^{26} erg/s (im Minimum)
- ◇ mittlere Gasdichte (Quotient aus Sonnenmasse und Sonnenvolumen): 1.408 g cm^{-3}
- ◇ Effektivtemperatur (Sonne als Planck-Strahler, T^4-Gesetz): $T_{eff} = 5780$ K
- ◇ Spektraltyp (geht aus der Oberflächentemperatur hervor): **G2V**, ein *gelber Zwerg*
- ◇ scheinbare visuelle Helligkeit: m_V = -26.7^{mag}
- ◇ absolute visuelle Helligkeit: $M_V = 4.87^{mag}$

- ◇ Schwerebeschleunigung an der Oberfläche: $\mathbf{g}_{sol}$ = 274.0 m/s^2 = 27.93 **g** (**g**: mittlere Erdbeschleunigung)
- ◇ zeitlich und räumlich stark variables **Magnetfeld** mit 10^{-4} T mittlerer Stärke und 1 T starken, lokalen Spitzen!
- ◇ mittlere Fluchtgeschwindigkeit an der Oberfläche: v_{esc} = 617.7 km s^{-1}
- ◇ siderische Rotationszeit an mittleren Breiten: 2.1928×10^6 s = 23.38 d (differenzielle Rotation)
- ◇ Inklination der solaren Äquatorebene gegen die Ekliptik: 7 Grad 15 Minuten
- ◇ mittlere Entfernung der Sonne zur Erde: 149.597870×10^6 km **= 1 AU**. Die Astronomische Einheit AU ist eine fundamentale Längeneinheit bei Größenskalen des Sonnensystems.
- ◇ Metallizität (Metallhäufigkeit relativ zu Nichtmetallen): 2%

(Datenquellen: *Schülerduden Astronomie*, Stand 1989 und berechnet; L_X aus *Peres et al.* ApJ 528, 537, 2000)

20.19.8 Sternentwicklung der Sonne

Die **Entwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)** für Sterne von einer bis etwa drei Sonnenmassen, also auch der Sonne, gestaltet sich folgendermaßen:

Die Sonne ging aus einem Protostern hervor, der sich in der Kontraktionsphase noch rechts von seiner *Hayashi-Linie* (parametrisiert durch Masse und chemische Zusammensetzung) befand. Die Kontraktion endet mit der vollständigen Ionisation des Sterngases: der Stern geht über ins hydrostatische Gleichgewicht. In diesem Gleichgewichtszustand gleichen sich die Kräfte im Stern, wie Gravitation, Gasdruck, Strahlungsdruck und auch Zentrifugalkraft, in jedem Punkt aus. Dann läuft der Stern auf der thermischen Zeitskala (*Kelvin-Helmholtz-Zeitskala*) im HRD entlang seiner Hayashi-Linie nach unten, was mit einer Abnahme in Radius und deshalb auch Leuchtkraft (siehe Gleichung im Eintrag Effektivtemperatur) verbunden ist. Infolgedessen nimmt die Temperatur im Innern zu. Schließlich zündet bei Erreichen einer kritischen Temperatur die **thermonukleare Fusion**. Leuchtkraft und Temperatur steigen nun wieder an, so dass der Stern nach links oben im HRD wandert (nach links: Temperaturzunahme, nach oben: Leuchtkraftzunahme). Das Einsetzen des simpelsten Fusionsprozesses, dem **Wasserstoffbrennen** (Fachbegriff: pp-Kette) bei einer Million Grad (Deuterium, schwerer Wasserstoff, *H-2*) bzw. zehn Millionen Grad (leichtestes Wasserstoffisotop, *H-1*) Zündtemperatur, markiert gerade die *Geburtslinie im HRD*: das Erreichen der **Hauptreihe**. Der Stern ist dann ein **Alter-Null-Hauptreihenstern** (**ZAMS** Stern, englisches Akronym für *Zero-Age-Main-Sequence star*).

Die weitere Zeit (einige Milliarden Jahre!) auf der Hauptreihe ist von einer ruhigen Sternphase geprägt, was die Entwicklung von Leben sicherlich begünstigt hat. Im Innern wird ständig Wasserstoff zu Helium fusioniert, bis das Verhältnis von Brennstoff zu 'Asche' ungünstig wird. Dann schrumpft der Kern und wird heißer. Dies ist die Phase des **Wasserstoffschalenbrennens**, was mit einem Aufblähen der äußeren Sternschichten verbunden ist: Die Sonne ist nach etwa 11 Mrd. seit ihrer Entstehung zum **Roten Riesen** geworden. Im HRD bewegt sie sich nun horizontal (konstante Leuchtkraft) nach rechts. Deshalb wird die Sternoberfläche kühler, d. h. röter, was dieser Sternphase den Namen gab. Der horizontale Pfad im HRD reicht nur bis zum Erreichen der Hayashi-Linie der Sonne (rechts im HRD). Weiter geht es nicht, denn die Hayashi-Linie ist unüberwindbar: Bei weiterem Aufblähen wandert der Stern daher im HRD nach oben (Zunahme der Helligkeit bzw. Leuchtkraft). Hierbei bleibt wiederum die Oberflächentemperatur (Spektralklasse) fast konstant. Der schrumpfende Heliumkern wird immer heißer, bis bei 100 Millionen Kelvin Helium abrupt brennt (auch Triple-Alpha-Prozess genannt). Der Heliumkern aus entartetem Gas ist so dicht, dass Wärmeleitung der effizienteste Mechanismus zum Energietransfer nach außen ist: dieser Sternkern ist also nicht konvektiv. Die Temperatur steigt durch das Brennen weiter, *ohne* damit verbundene Ausdehnung des Kerns. Das ist gerade das Wesen der Entartung. Doch bei zu hoher Temperatur hört die Gasentartung auf und der Heliumkern expandiert

explosionsartig (so genannter *Helium Flash*). Kurzzeitig sackt der Stern auf seinem Pfad im HRD nach links unten ab. Weil die massive Sternhülle die Explosion abfangen kann, bleibt der Stern als Ganzes stabil. Im Kern befindet sich nicht entartetes Gas aus Kohlenstoff, der 'Asche des Heliumbrennens.

Nun erreicht der Stern den **horizontalen Riesenast** im HRD, auf dem er (evt. nach mehreren solcher Zirkulationen) verglichen mit dem Aufenthalt auf der Hauptreihe kurz verweilt.

Nach dem Heliumbrennen im Kern, setzt das **Zwei-Schalen-Brennen** ein, bei dem sich zwei Brennphasen abwechseln: in weiter äußeren, d. h. kühleren Schichten, verbrennt Wasserstoff; in einer weiter innen liegenden Schichten verbrennt Helium. Diese Brennphasen sind jedoch äußerst instabil, was in einem Massenverlust mündet: der Riesenstern wirft große Mengen an Sternmaterie aus. Diese heftigen **Sternwinde** bilden den **Planetarischen Nebel** in der Umgebung des Sterns. Wiederum bläht sich das Äußere der Sonne enorm auf. In dieser Phase bewegt sich die Sonne auf dem **Asymptotischen Riesenast** (engl. *Asymptotic Giant Branch*, kurz **AGB**) im HRD. Die hier vorherrschenden komplizierten und instabilen Brennphasen bewirken schleifenförmige Pfade im HRD (*loops*), weil der Stern sich abwechselnd aufbläht und wieder kontrahiert. In der **Post-AGB-Phase** fehlt infolge des Materialverlustes und des Schalenbrennens der Gasdruck: der Stern schrumpft und bewegt sich steil im HRD nach unten. Die Sonne bzw. Sterne ähnlicher Masse verlieren dann sämtliche Hüllen und übrig bleibt noch der Kohlenstoffkern, der ein kompaktes Objekt von Erdgröße formt: einen **Weißen Zwerg** (genauer im Fall der Sonne: CO-Weißer Zwerg). Diese Relikte massearmer Sterne bevölkern die Zentren Planetarischer Nebel und auch Kugelsternhaufen. Sie werden nur durch den Entartungsdruck der Elektronen stabilisiert (Details unter Chandrasekhar-Masse). Weiße Zwerge sind an der Oberfläche sehr heiß, etwa einige zehntausend Kelvin. Als Zwerge sind sie aber nur sehr kleine Objekte und befinden sich daher links unten im HRD (links: hohe Effektivtemperatur, unten: geringe Leuchtkraft). Weiße Zwerge kühlen langsam auf der Zeitskala von einigen Milliarden Jahren aus und enden dann als dunkles, baryonisches Objekt, als Schwarzer Zwerg. Als solche tragen sie zur baryonischen Komponente der Dunklen Materie bei.

Die Sonne befindet sich stellarevolutionär gesehen in ihrer aktuellen Phase auf der Hauptreihe, auf der sie noch einige Milliarden Jahre verweilen wird. Dann schließt sich das Stadium des Roten Riesen an. Der zentrale thermonukleare Fusionsprozess ist die **pp-Kette**, während der CNO-Zyklus nur eine marginale Rolle (Anteil von 3% an Heliumproduktion) spielt. In etwa fünf Milliarden Jahren, wenn der Wasserstoff für die Fusionsprozesse im Innern erschöpft ist, wird die Sonne ihre äußeren Hüllen abstoßen und als stabile Endkonfiguration einen **Weißen Zwerg von etwa einer halben Sonnenmasse** übrig lassen, der in einen farbenprächtigen Planetarischen Nebel eingebettet ist. Spätestens dann sind die sonnigen Tage in unserem Sonnensystem gezählt...

20.19.9 Modelle von der Sonne

Die **theoretische Sonnenphysik** gliedert sich im Wesentlichen in zwei Domänen: die innere Sonne wird mit den Methoden der **radiativen Hydrodynamik** in drei Raumdimensionen beschrieben und liefert gute Erklärungen und Prognosen für den Strahlungstransport von innen nach außen sowie die Konvektion/Granulation. Die Oberfläche der Sonne kann bestens mit der **solaren Magnetohydrodynamik** in drei Raumdimensionen beschrieben werden. Hier wird das solare Magnetfeld wichtig, dessen Morphologie und Dynamik viele Phänomene wie *Sonnenflecken*, *Protuberanzen* (Materieauswürfe), *Flares*, dunkle, kühle *Filamente*, *Fackeln*, *Loops* (Bögen), *Surges* (Spritzer) und *Sprays* erklärt.

Das solare Magnetfeld ist zwar lokal chaotisch, weil es an die Plasmabewegung koppelt, weist jedoch global eine Gestalt auf, die in einem Zyklus von 22 Jahren (ohne Berücksichtigung der Polarität die halbe Periode: 11 Jahre) periodisch ist.

In der MHD beschreibt man die Sonnenflecken dadurch, dass **magnetische Flussröhren** (engl. *flux tubes*) des Plasmas die Photosphäre durchstoßen. An den Durchstoßpunkten entstehen gerade die Sonnenflecken. Diese Gebilde unterteilt man in eine zentrale dunkle Region, die *Umbra*, und eine periphere Region, die *Penumbra*. Der Sonnenfleck ist signifikant kühler als die Umgebung und erscheint daher als dunkler Fleck. Die Beobachtung dieser Flecken über einige Stunden belegt sehr eindrucksvoll die differenzielle Rotation der Sonne: die Rotationsgeschwindigkeit ist am Äquator deutlich höher.

Abbildung 20.13: aktuelle Sequenz der Spektratypen von Sternen.

Außerdem variiert die Fleckenzahl mit der Sonnenaktivität: viele Flecken heißt hohe Aktivität und bestätigt den 11jährigen Sonnenzyklus.

20.19.10 Sonnenwind & Polarlichter

Auch die heftige Teilchenemission der Sonne, der **Sonnenwind**, wird durch magnetohydrodynamische Wellen (*torsional Alfvén wave train*, TAWT) erklärt, die aus der Sonnenoberfläche hinausbewegen und dabei Sonnenplasma mitreißen. Dabei entstehen typische, bogenförmige Strukturen (*loops*), die schließlich zerplatzen und das Plasma an das interplanetare Medium freigeben. Aber auch die weniger stark gebundenen koronalen Teilchen diffundieren in den interplanetaren Raum hinaus. Ist die kinetische Energie der Partikel groß genug, können sie sogar bis zur Erde gelangen. Von der irdischen Magnetosphäre werden sie dann eingefangen und rufen die farbenfrohen **Polarlichter** hervor. Dies geschieht bevorzugt an den magnetischen (nicht geographischen!) Erdpolen, weil dort das dipolartige Magnetfeld in Trichterform die geladenen Teilchen nicht abblocken kann.

20.19.11 Die Sonne als Röntgenstrahler

Die gemessene **Röntgenemission der Sonne** ist auf thermische Emission der Korona und Eruptionen sowie Bremsstrahlung zurückzuführen, die durch abgebremste Plasmateilchen (beispielsweise im solaren Magnetfeld) erzeugt wird.

20.19.12 exotische Teilchen von der Sonne?

Möglicherweise emittiert die Sonne eine exotische Form sehr leichter Teilchen: die hypothetischen Axionen. Einige Physiker nehmen an, dass sie durch Oszillationen aus Photonen erzeugt werden können (*Primakoff-Effekt*) und in irdischen Axion-Helioskopen nachweisbar seien. Für Nichtphysiker klingt Folgendes sicher schlimm: Die Axionen sind pseudoskalare Nambu-Goldstone-Bosonen, die die chirale Peccei-Quinn-Symmetrie brechen (Gebiet der Quantenchromodynamik). Es wäre von großer Wichtigkeit für die Teilchenphysik und Kosmologie zu wissen, ob dieser Primakoff-Effekt tatsächlich in der Natur stattfindet.

20.20 Spektraltyp

Eine Einteilung der Spektren von Sternen nach **abnehmender Oberflächen- bzw. Effektivtemperatur**, die auf der Harvard-Klassifikation beruht. Jeder Klasse ordnete man einen Buchstaben zu (siehe Abbildung 20.13). Die heute international anerkannte Sequenz lautet seit etwa 1999:

O, B, A, F, G, K, M, L, T

was man sich mit dem Satz '**O**h, **B**e **A** **F**ine **G**irl, **K**iss **M**y **L**ips **T**enderly.' (oder ähnlichen) merken kann. Mein Beitrag zu deutschen Merksätzen lautet: '**O**rdentliche **B**älle **A**us **F**eurigem **G**as **K**önnen **M**ehr **L**euchten, **T**ja!'.

20.20.1 Achtung, das ist neu!

Die Sequenz OBAFGKMRNS ('*Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me Right Now, Smack!*') ist nicht mehr gebräuchlich, weil RNS-Typen recht selten sind. Die Spektraltypen **L** und **T** haben sich durchgesetzt, weil seit den 1990er Jahren immer mehr **Ultrakühle Zwergsterne** (engl. *ultra cool dwarfs*, UCDs) entdeckt wurden. UCDs sind massearme Sterne, Braune Zwerge und jupiterartige Planeten.

Die einzelnen Klassen werden nochmals feiner durch die Abfolge der Ziffern 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 unterteilt. So ist beispielsweise der Typ F5 exakt zwischen den Typen F0 und G0.

20.20.2 spektrale Eigenschaften der Spektraltypen

- ◇ **O**: dominante Linien **ionisierten Heliums** (HeII), Wasserstoff-Linien sind unterdrückt.
- ◇ **B**: Balmer-Serie des Wasserstoffs ist zunehmend, **neutrales Helium** (HeI) ist stark ausgeprägt, während HeII nicht vorhanden ist.
- ◇ **A**: dominante **Wasserstoff-Linien** und schwache Beiträge ionisierter Metalle, wie einfach ionisiertes Kalzium (CaII).
- ◇ **F**: **ionisiertes Kalzium** (CaII) wird stärker, wohingegen relative Stärken von Wasserstoff-Linien abnehmen.
- ◇ **G¿**: **CaII** ist besonders stark, Wasserstoff nimmt weiterhin ab, während nun auch viele **neutrale Metalle** auftauchen. Die Sonne hat einen Spektraltyp G2.
- ◇ **K**: Dies ist die Domäne der **Metalllinien**. Außerdem finden sich nun auch aufgrund signifikant tieferer Temperaturen Molekküllinien mit charakteristischen **Bandenspektren** (rotatorische und vibronale Freiheitsgrade).
- ◇ **M**: Die **neutralen Metalllinien** sind beobachtbar, wie beispielsweise Kalzium. Daneben gibt es **Titanoxidbanden**.
- ◇ **L**: Diese neue Klasse zeigt Liniensysteme von **Metallhydriden** (z. B. *CrH, FeH*). Daneben gibt es Anzeichen von **neutralen Alkaliatomen** wie Natrium (NaI), Kalium (KI), Rubidium (RbI), Cäsium (CsI), die im roten und nahinfraroten Bereich strahlen.
- ◇ **T**: T-Zwerge zeigen Banden des **Wassermoleküls** (H_2O) und **Methan** (CH_4). Diese 'kühlsten Typen' strahlen typischerweise im Infrarot, oberhalb Wellenlängen von einem Mikrometer (=Mikron).

20.20.3 Extrawürste

Im Prinzip reichen die Spektraltypen O bis M, weil 99% aller Sterne in diesem Bereich liegen. Die Sonderklassen R, N und S gelten für Riesensterne, so genannte AGB-Sterne. AGB ist ein englisches Akronym für *asymptotic giant branch*, also dem asymptotischen Riesenast, einem speziellen Bereich im Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne. AGB-Sterne haben einen Heliumkern und um diesen Kern einen Mantel, in dem Wasserstoffbrennen abläuft (*Schalenbrennen*). Die AGB-Phase ist kurz und instabil. Deshalb sind RNS Typen recht selten und haben heute den Status von Sonderklassen.

20.20.4 Spektraltypen L und T

Die neuen Spektraltypen L und T wurden von *Davy Kirkpatrick* vom Caltech 1999 vorgeschlagen. Vom Temperaturbereich her liegen L-Zwerge im Bereich zwischen 2100 und 1300 Kelvin, während T-Zwerge sich daran von 1300 bis 800 Kelvin anschließen. Diese letztgenannte Temperatur von etwa 500 °C wird von jeder Kerzenflamme leicht überschritten! Bei diesem Vergleich gilt es jedoch zu beachten, dass für den Astronomen nicht nur die Temperatur, sondern auch die Größe der strahlenden Fläche von Belang ist. Beide Größen zusammen bestimmen den astronomisch wesentlichen Parameter Leuchtkraft (siehe Gleichung im Eintrag Effektivtemperatur).

Die Wolf-Rayet-Sterne erhalten bisweilen auch den Spektraltyp W, während die T Tauri-Sterne auch mit dem Spektraltyp T bezeichnet werden.

20.20.5 Wie berechne ich die Farbe eines Sterns?

Man kann diesen Spektraltypen eindeutig **Sternfarben** zuweisen, weil die Effektivtemperatur über das Planck-Gesetz (thermische Strahlung) bzw. das Wiensche Verschiebungsgesetz eine bestimmte Wellenlänge maximaler Intensität festlegt

$$\lambda_{\max} = \frac{2\ 880\ 000}{T_{\text{eff}}\ [K]}\ \text{nm}.$$

So sind O-, B- und A-Sterne blau, F-Sterne blauweiß, G-Sterne weiß bis gelb (z. B. die Sonne), K-Sterne orange bis rot und alle Klassen darunter rot.

20.20.6 Anhängsel verraten Details

Man fügt an die Symbole für Spektralklasse und Dezimalzahl ein Suffix an, das Besonderheiten des Spektrums charakterisiert. Die Vereinbarung lautet:

- ◇ *e* weist auf Emissionslinien hin (engl. *emission*), häufig Wasserstofflinien (Lyman-, Balmer-Serie).
- ◇ *f* kennzeichnet ebenfalls Emissionslinien, aber diejenigen von Helium und Neon.
- ◇ *k* ist eine Abkürzung für die K-Linie und weist auf ausgeprägte, interstellare Spektrallinien von Kalzium hin.
- ◇ *m* als Abkürzung für *metals*, also starken Metalllinien. Dies ist erst - wie aus obiger Diskussion ersichtlich - ab Spektraltypen unterhalb von A zu erwarten.
- ◇ *n* als Abkürzung für *nebulous* (dt. nebulös) weist auf diffuse Spektrallinien hin. Dies ist die Folge einer hohen Rotation des Sterns.
- ◇ *neb* leitet sich von *nebula* (dt. Nebel) ab. Das Spektrum eines interstellaren Nebels ist also mit dem des Sterns vermischt.
- ◇ *nn* kennzeichnet noch diffusere Spektrallinien als *n*.
- ◇ *pec* kennzeichnet spektrale Besonderheiten (engl. *pecularity*).
- ◇ *s* weist auf scharfe (engl. *sharp*), d. h. enge Spektrallinien hin.
- ◇ *v* oder *var* (engl. *variable*) kennzeichnet ein variables Spektrum.
- ◇ *wl* für *weak lines* (dt. schwache Linien) weist auf einen metallarmen Stern hin.

Ein bekanntes Beispiel für diese Nomenklatur sind die Be-Sterne, also Sterne vom Spektraltyp B und starken Emissionslinien. Es handelt sich meist um periodisch auftretende Linien der Balmer-Serie von Wasserstoff.

20.20.7 Leuchtkraftklasse

Ein weiteres Suffix ist die **Leuchtkraftklasse** oder Yerkes-Leuchtkraftklassen. Sie wird als römische Ziffer angehängt.

Es gibt auch die alternative Vereinbarung, die diese Information durch lateinische Buchstaben als Präfixe symbolisiert. Hier lautet die Regelung:

- ◇ *c* für einen Überriesen (engl. *supergiant*),

- ◇ *d* für einen Zwerg (engl. *dwarf*),
- ◇ *g* für einen Riesen (engl. *giant*),
- ◇ *sd* oder *SD* für einen Unterzwerg (engl. *subdwarf*),
- ◇ *w*, *wd* oder *D* für einen Weißen Zwerg (engl. *white dwarf*).

So ist der Spektraltyp der Sonne G2V oder alternativ dG2, also ein Hauptreihenstern (V) bzw. ein (gelber) Zwerg (d) mit starken Spektrallinien ionisiertem Kalziums und einiger neutraler Metalle (G2).

20.21 Spezialität

Neben Unitarität und Orthogonalität eine bestimmte Eigenschaft von Transformationsmatrizen - oder allgemein gesprochen von Operatoren. Operatoren sind für die Quantentheorie das, was die Tensoren für die Allgemeine Relativitätstheorie sind. Operatorgleichungen wie beispielsweise die *Schrödinger-Gleichung* legen die Eigenschaften und die Dynamik von Quantensystemen fest. Häufig können physikalische Operatoren als Matrizen, eine Anordnung von (reellen oder komplexen) Zahlen oder auch Funktionen, dargestellt werden. Matrizen haben bestimmte mathematische Eigenschaften. Eine davon ist, dass spezielle Matrizen (gemeint: Matrizen mit der Eigenschaft Spezialität) einen Wert von 1 für ihre Determinanten haben. Für die Matrix S gilt dann

$$\det(S) = 1$$

Die Transformationen, die diese Matrizen bewerkstelligen, können Gruppen oder Symmetriegruppen bilden und sind dann besonders wichtig in der Gruppentheorie der Physik, wie sie besonders in der Teilchenphysik angewandt wird.

Die (Matrizen-)Eigenschaften Unitarität, Orthogonalität und Spezialität dienen dann einer **Klassifikation dieser Gruppen**. Details werden unter dem Eintrag Gruppe und Symmetriegruppe besprochen.

20.22 Spezielle Relativitätstheorie

Die Spezielle Relativitätstheorie oder kurz **SRT** war der erste Schritt einer fundamentalen Theorie des 20. Jahrhunderts von *Albert Einstein* (1879 - 1955), die nicht nur die Sichtweise der physikalischen Welt vollkommen umwälzte. Einstein publizierte die SRT in seinem 'Wunderjahr' 1905, in dem er viele wichtige Arbeiten veröffentlichte. Salopp gesagt ist die Spezielle Relativitätstheorie eine Theorie der hohen Geschwindigkeiten und verschiedenen Beobachter, die einen Vorgang in der Natur betrachten. Etwas präziser formuliert beschreibt die SRT die Transformation einzelner physikalischer Größen oder physikalischer Gesetze, wenn man das **Bezugssystem** wechselt. Die Effekte der SRT werden besonders dann relevant, wenn die **relative Geschwindigkeit** zwischen den betrachteten Bezugssystemen vergleichbar wird mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

20.22.1 Einsteins erste Ansätze

Ausgangspunkt waren Einsteins **Gedankenexperimente**. Schon als 16jähriger stellte er sich die Frage, wie die Welt aussehen möge, wenn man auf einem Lichtstrahl reitet. Die Theorie der klassischen Elektrodynamik von *J.C. Maxwell* faszinierte ihn sehr früh. Er stellte fest, dass es eine Inkonsistenz zwischen dieser Theorie und der klassischen Gravitationstheorie von *Isaac Newton* gab: Im Kern ist es aus heutiger Sicht klar, dass die **Galilei-Invarianz** der Newtonschen Theorie völlig wesensverschieden von der Lorentzinvarianz der Maxwellschen Theorie ist. Deshalb musste es zu diesem Missverhältnis kommen.

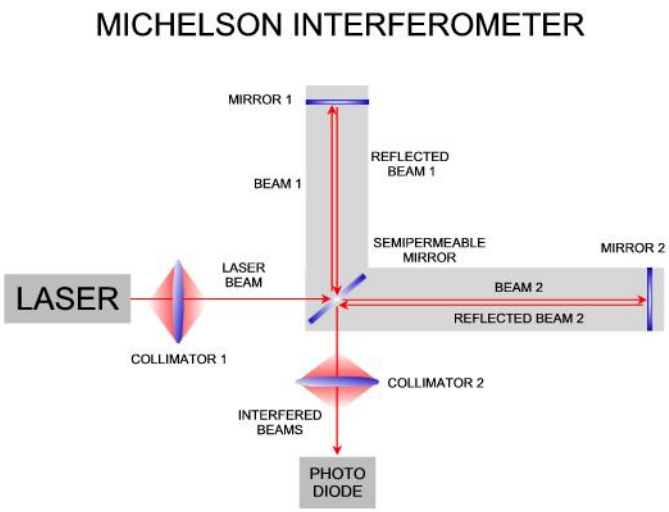

Abbildung 20.14: Bauweise eines Michelson-Interferometers.

20.22.2 Die Experimente von Michelson und Morley

Als Einstein noch ein Knabe war, wurden die *Michelson-Morley-Experimente* (1881 und 1887) durchgeführt. Dieses Experiment ist eine Anordnung, die zum Ziel hatte, die Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeit von Lichtwellen zu zeigen. Die Physiker nahmen bis dato an, dass - analog zur Akustik, wo sich Schallwellen z. B. im Medium Luft ausbreiten - ein Medium für die Lichtwellen existiere, das sie *Weltäther* nannten. Sollte er existieren, so müsste dieses Medium (ebenso wie Luft) durch die Erdrotation abgelenkt werden. Als Messinstrument kam ein präzises, optisches Messsystems mit der Bezeichnung **Michelson-Interferometer** zum Einsatz (in Grafik 20.14 dargestellt mit modernem Laser und Photodiode). In dieser Anordnung von Lichtstrahlen sollte die Mitbewegung des Lichtäthers, also auch der Lichtwellen auf einem der Interferometerarme nachgewiesen werden. Dabei sollte sich das Interferenzmuster verändern, doch war keine Interferenzverschiebung beobachtbar! Die Lichtgeschwindigkeit ist demnach in alle Richtungen gleich und unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle! Die Nichtnachweisbarkeit des Äthers wird in der Literatur als *Negativresultat* bezeichnet.

20.22.3 Einsteins verblüffende Lösung

Einstein konnte diese experimentelle Beobachtung erklären, indem er forderte, dass es erstens gar keinen Weltäther gebe und zweitens, dass die **Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen konstant** sei. Neben diesem ersten Postulat, der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, nahm er ein zweites an, das **Relativitätsprinzip**. Dessen Aussage ist, dass die physikalischen Gesetze und Messungen in allen zueinander gleichförmig geradlinig bewegten Systemen gleich seien.

20.22.4 Ein Vorschlag erschüttert die Welt

Diese Postulate hatten weit reichende Konsequenzen und führten zu einer **Revision der Begriffe Zeit, Raum und Gleichzeitigkeit**. Der Wechsel zwischen relativ zueinander geradlinig gleichförmig bewegten Bezugssystemen wird mathematisch nicht mit der *Galilei-Transformation* beschrieben, sondern mit der **Lorentz-Transformation**. Sie zeigt, dass Raum und Zeit ein **vierdimensionales Kontinuum** bilden und nicht unabhängig voneinander sind. So beschreibt ein *Ereignis* oder *Weltvektor* einen Punkt in der vierdimensionalen Raumzeit, der durch die Zeit und die drei räumlichen Koordinaten eindeutig festgelegt ist. Der raumzeitliche (4er-)Abstand (siehe auch Linienelement)

zwischen zwei Ereignissen ist eine **Lorentz-Invariante**, d. h. unabhängig von der Wahl des Bezugssystems. Lorentz-Invarianten verändern sich nicht unter Lorentz-Transformationen. Raum und Zeit für sich genommen hingegen sind abhängig vom Bezugssystem. Durch die SRT verlor die Zeit ihren absoluten Charakter, den *Aristoteles* und *Newton* in ihr sahen. Daher ist auch die Gleichzeitigkeit ein relativer Begriff in der Relativitätstheorie.

Bewegt sich ein kräftefreier Körper in einem Bezugssystem geradlinig und gleichförmig, so nennt man dieses System **Inertialsystem** (vgl. inert: 'träge'). In einem Inertialsystem wirken also auch keine 'Scheinkräfte', wie die Trägheitskräfte Zentrifugalkraft und Coriolis-Kraft. Die Erde ist demnach *kein Inertialsystem*.

20.22.5 Konsequenzen einer absoluten Vakuumlichtgeschwindigkeit

Die Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit c zog bizarre Effekte, wie die **Längen-** oder **Lorentz-Kontraktion** und die **Zeitdilatation** nach sich, die auch heute noch für den alltäglichen Gebrauch seltsam anmuten. Im ersten Fall wird die Länge eines Objekts in Bewegungsrichtung gestaucht - und zwar für jemanden, der das Objekt von außen beobachtet. Im zweiten Falle wird ein Zeitintervall einer bewegten Uhr gedehnt, die ein Außenbeobachter an sich vorbeifliegen sieht. Beides wird also relativ betrachtet vom Ruhesystem zu einem Beobachtersystem, die sich mit der konstanten Relativgeschwindigkeit v zueinander bewegen. Die Effekte der SRT werden dann besonders groß, wenn v und c vergleichbare Beträge haben. Das ist der Grund, weshalb uns speziell relativistische Phänomene im Alltag fremd sind. In der **relativistischen Astrophysik** sind die Effekte Normalität, z. B. bei den Jets der Schwarzen Löcher oder bei den Bewegungen von Akkretionsflüssen.

Rechnerisch ableiten lassen sich diese Effekte formal mit der Lorentz-Transformation, die man mathematisch als Matrix-Vektor-Produkt schreiben kann. Hier wird die Lorentz-Transformationsmatrix auf (ko- oder kontravariante) Vierervektoren angewendet, die einen **Weltpunkt** definieren. Ein Weltpunkt ist ausgezeichnet durch eine Zeitkoordinate und drei Raumkoordinaten, gemessen in einem Bezugssystem.

20.22.6 $E = m\mathrm{c}^2$

Die bekannteste Gleichung Einsteins, sicherlich die bekannteste der Physik, ist wohl das **Masse-Energie-Äquivalent**, $E = mc^2$. Sie besagt als wichtiger, erkenntnistheoretischer Aspekt, dass Masse und Energie *wesensgleich* sind.

E ist die Gesamtenergie eines Systems. Der **Lorentz-Faktor** (γ, manchmal auch Γ, 'gamma'; wieder mit der relativen Geschwindigkeit v des Körpers und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c)

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

mit

$$\beta = v/\mathrm{c},$$

steckt in dieser berühmten Gleichung und kann für kleine Geschwindigkeiten v entwickelt werden (Binomische Reihe). Nach dieser Prozedur zeigt sich, dass die Gesamtenergie aus Beiträgen verschiedener Energien besteht: $E = E_0 + E_{\mathrm{kin}} + ...$ Die kinetische Energie ist der klassisch bekannte Term: $E_{\mathrm{kin}} = \frac{1}{2}\, m_0\, v^2$. Der erste Term jedoch ist neu: $E_0 = m_0\, \mathrm{c}^2$ nennen Physiker die **Ruheenergie**, die *unabhängig* von der Geschwindigkeit v ist. Durch die sehr große Zahl c^2 steckt in jedem Teilchen also eine gigantische Energie, die genutzt werden kann. Genau das passiert im Innern von Sternen in thermonuklearen Fusionsprozessen und auch in kernphysikalischen Experimenten.

Am Ende des Lexikoneintrags Relativitätstheorie wird ein aktueller, experimenteller Test vorgestellt, der in einem Versuch die Richtigkeit von $E = mc^2$ mit hoher Präzision demonstriert hat.

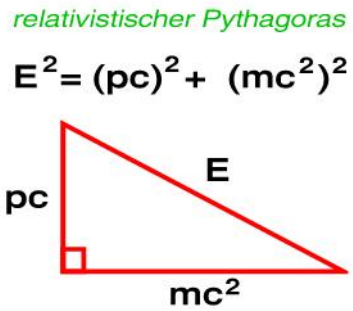

Abbildung 20.15: Relativistischer Energieerhaltungssatz: 'relativistischer Pythagoras'.

20.22.7 Von der flachen zur gekrümmten Raumzeit

Mit der **Allgemeinen Relativitätstheorie** (ART) gelang es Einstein und vor allem seinem Studienkollegen *Marcel Grossmann* nach jahrelanger Arbeit das Relativitätsprinzip auf *beschleunigte* Systeme zu verallgemeinern. Das neue Prinzip heißt **Äquivalenzprinzip**. Da die Gravitation Systeme beschleunigt, ist die ART damit eine **Theorie der Gravitation**. Die Verallgemeinerung lautet: frei fallende Labore sind Inertialsysteme.

Die vierdimensionale Raumzeit der SRT ist *flach*, d. h. sie weist keine Krümmungen auf und wird durch die Minkowski-Metrik beschrieben. Das ist in der ART wesentlich komplizierter: die Metrik ist im Allgemeinen *gekrümmt*. Der metrische Tensor hat dann keine konstanten Einträge mehr, wie in der Spezielle Relativitätstheorie, sondern Komponenten, die vom Weltpunkt selbst (also Koordinatenzeit und den drei räumlichen Koordinaten) abhängen. Die Krümmung kann sich von Weltpunkt zu Weltpunkt ändern und wird durch Energieformen, wie beispielsweise von Masse, erzeugt. Diese Information steckt vollständig im Energie-Impuls-Tensor. Die zentrale Gleichung der ART ist die **Einsteinsche Feldgleichung**, die mathematisch ausdrückt, wie Massen die Raumzeit krümmen und umgekehrt, wie die Raumzeit den Testmassen eine Bewegung auf Geodäten diktiert.

20.23 Spin

Der Spin wird im Deutschen mit dem Begriff *Eigendrehimpuls* bezeichnet. Spin ist ebenso wie Ladung und Masse eine fundamentale Eigenschaft eines Teilchens und stellt einen weiteren Freiheitsgrad dar. Allerdings besitzt er als quantenmechanische Observable *kein klassisches Analogon*. Die Vorstellung, dass ein kugelförmiges Teilchen um seine eigene Achse rotiert ist nur eine klassische Vorstellung, die nicht besonders hilfreich ist. Neben anderen Quantenzahlen ist die **Spinquantenzahl** S ist eine unveränderliche Teilcheneigenschaft.

20.23.1 Dirac-Theorie: Spin ist relativistisch

Der Spin ist eine relativistische Eigenschaft! Man kann ihn physikalisch nur erklären, wenn man die Konzepte der Quantenmechanik mit der Speziellen Relativitätstheorie verknüpft. Die fundamentalen Gleichungen dieser **Dirac-Theorie**, benannt nach dem britischen Physiker *Paul Dirac* (1902 - 1984), kann man recht schnell ableiten, wenn man die Größen E und p im relativistischen Energiesatz ('relativistischer Pythagoras', siehe Abbildung 20.15) gemäß des **Korrespondenzprinzips** in Differentialoperatoren (E: Zeitableitung, p: Ortsableitung) übersetzt. Die resultierende Gleichung nennt man **Klein-Gordon-Gleichung**, die die Bewegungsgleichung des Elektrons ist. Sie ist zweiter Ordnung in der Ableitung nach Ort und Zeit und eine *Wellengleichung*.

Diracs Verdienst war es nun, diese Gleichung zu faktorisieren, so dass die **Dirac-Gleichung** resultierte. Mit dieser Gleichung kann man das Elektron (bzw. dessen *Antiteilchen*, das Positron) als

freies Teilchen oder im elektromagnetischen Feld beschreiben. Bei der Linearisierungsprozedur tauchten neue Objekte auf, quadratische Matrizen, die man **Dirac-Matrizen** (oder auch *Spinoperatoren*) nennt. Sie genügen bestimmten *Kommutatorrelationen* (Vertauschungsrelationen). Dirac folgerte, dass nun im Allgemeinen auch die Wellenfunktionen nicht mehr einkomponentige Objekte sein können: man notiert sie wie einen Vektor und nennt sie **Spinor**. In diesen Komponenten steckt die ganze Information über den Teilchenspin. Die Dirac-Gleichung ist also eine Matrix-Gleichung und durch die Linearisierung nur noch erster Ordnung in Zeit und Ort.

20.23.2 Antimaterie

Eine bahnbrechende Erkenntnis bei der Formulierung der Dirac-Gleichung war die **Vorhersage des Positrons**, des Antiteilchens des Elektrons mit gleicher Ruhemasse (511 keV), aber positiver Ladung. Diese Leistung gelang durch eine physikalische Interpretation einer zweiten Lösung der Dirac-Gleichung. Der Begriff Antimaterie war mit dieser theoretischen Leistung geboren.

Im speziellen Fall der Elektronen und Positronen konstituieren sich die Dirac-Matrizen aus den **Pauli-Matrizen**. Die Pauli-Matrizen sind 2×2-Matrizen, während die Dirac-Matrizen 4×4-Matrizen sind. Die Wellenfunktionen des Elektrons/Positrons sind in der Dirac-Theorie vierkomponentige Spinoren.

20.23.3 Hilbertraum des Spins

Betrachtet man nur den **Hilbertraum** des Spins, so gilt allgemein, dass ein Teilchen mit Spinquantenzahl S als $(2S+1)$-komponentiger Spinor geschrieben werden kann. Elektronen, Positronen, Protonen und Neutronen haben Teilchenspin 1/2, so dass ihr Hilbertraum des Spins zweidimensional ist und ihre Spinoren zwei Komponenten haben: 'Spin nach oben' (engl. *spin up*) und 'Spin nach unten' (engl. *spin down*). Diese Orientierungen sind so zu verstehen, dass der Spinvektor **S** parallel oder antiparallel zur z-Achse ausgerichtet sein kann. Diese Eigenschaft nennen Quantenphysiker generell **Richtungsquantelung**, d. h. es kann nur diskrete Einstellungsmöglichkeiten des Spins relativ zur z-Achse geben. Dies kann man als **Eigenwertgleichung** für den Spinoperator $\mathbf{S}_z$ (der Projektion des Spinoperators **S** auf die z-Achse) darstellen, wobei die diskreten Eigenwerte gerade die Produkte aus Planckschem Wirkungsquantum h geteilt durch 2π und der magnetischen Quantenzahl m sind. m kann bei einem Teilchenspin S die Werte -S, -S+1, -S+2....+S annehmen. Im Fall $S = 1/2$ sind das nur die beiden Werte m = -1/2 und m = +1/2.

Die Umstellung zwischen diesen beiden Werten, die auch **verschiedenen energetischen Zuständen** entsprechen, vermitteln Spinoperatoren, die den Spin umklappen können (engl. *spin flip*). Solche Leiter- oder Stufenoperatoren sind analog zu den Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren der Quantenfeldtheorien. In der Quantentheorie des Spins erzeugen bzw. vernichten sie **Spinquanten**.

20.23.4 Terminologie bei Spins

- ◇ Teilchen mit $S = 0$ nennt man **skalare Bosonen**. Dazu gehören beispielsweise das Higgs-Teilchen und die Phononen. Letztere sind quantisierte Gitterschwingungen im Festkörper.
- ◇ Teilchen mit $S = 1$ nennt man **Vektorbosonen**. Hier seien die Photonen, die Gluonen der QCD, die schwachen Eichbosonen W^-, W^+ und Z^0 der schwachen Wechselwirkung, die X-Bosonen und Y-Bosonen der GUT sowie das Magnon als Beispiele genannt.
- ◇ Teilchen mit $S = 2$ nennt man **Tensorbosonen**. Diese Eigenschaften ordnen die Physiker dem hypothetischen Graviton zu, das die Gravitation als Eichboson vermitteln soll.

20.23.5 Bedeutung des Spins

Der Spin spielt eine **zentrale Rolle im Aufbau der Materie**: so ist das *Periodensystem der Elemente* nur dann verständlich, wenn man den Elektronenspin berücksichtigt. Die Natur unterscheidet Teilchen

mit halbzahligem Spin, die Fermionen, von solchen mit ganzzahligem Spin, die Bosonen (siehe auch Spin-Statistik-Theorem). Diese beiden Teilchenarten verhalten sich unterschiedlich, weil die Fermionen dem **Pauli-Prinzip** unterliegen und nicht in allen Quantenzahlen übereinstimmen dürfen, d. h. nicht denselben quantenmechanischen Zustand besetzen dürfen. Für Bosonen gilt das nicht! Aus diesem Grund können sie alle denselben, den niedrigsten, energetischen Zustand einnehmen, wenn man das Bose-System nur weit genug abkühlt. Diese Phänomen kennt man als **Bose-Einstein-Kondensation**.

Der **Magnetismus** in Festkörpern ist ebenfalls eine Erscheinung, die nur mit dem Teilchenspin erklärt werden kann, also letztendlich auch ein relativistisches Phänomen! Magnetismus auf der subatomaren Ebene heißt, dass sich viele Spins spontan parallel orientieren. Gebiete im Festkörper gleicher Spin-Orientierung nennt man gerade die *Weißschen Bezirke*. Elektronen parallelen Spins versuchen einander auszuweichen, wie das Pauli-Prinzip diktiert. Die magnetischen Spinmomente etablieren dann eine *spontane Magnetisierung* des Festkörpers. In der theoretischen Festkörperphysik formuliert man dies mit den **Hartree-Fock-Gleichungen**, die Vielteilchensysteme quantentheoretisch beschreiben.

20.23.6 Drehimpulsalgebra

Die Rechtfertigung des Terminus *Drehimpuls* für den Spin besteht darin, dass er sich in einen speziellen, mathematischen Formalismus einbetten lässt, der *Drehimpulsalgebra*. Dahinter stecken bestimmte Kommutatorrelationen, die *alle* Drehimpulse erfüllen. Es sind Operatorgleichungen, die typisch sind für die Quantentheorie, und die bei Drehimpulsen eine wohldefinierte Form haben. Neben dem Spin als Eigendrehimpuls, erfüllt auch der klassische Bahndrehimpuls diese Relationen. Aber auch tiefer reichende Konzepte der Quantenfeldtheorien, wie der **Isospin** oder **schwache Isospin** transformieren sich wie Drehimpulse. Alle diese Spins sind als weitere Freiheitsgrade eines Quants aufzufassen und dienen deren Unterscheidung und Ordnung im Teilchenzoo der Elementarteilchenphysik.

20.23.7 Spins als Elementarmagneten

Mit jedem Spin ist ein **magnetisches Moment** verknüpft, über den spinbehaftete Teilchen an ein äußeres Magnetfeld koppeln können. So, wie sich ein Stabmagnet im irdischen Magnetfeld ausrichtet, richten sich Teilchen mit Spin in Magnetfelder aus. Mit einem spinbehafteten Teilchen verbindet sich die Vorstellung eines winzigen **Elementarmagneten** mit Nord- und Südpol. Im **Stern-Gerlach-Versuch** (1921) wird ein Atomstrahl (Silberatome) in ein starkes, inhomogenes Magnetfeld eingeschossen. Die Experimentatoren beobachten dann eine Aufspaltung des Strahls in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität. Dieses Experiment deutete gerade auf eine bis dato verborgene Teilcheneigenschaft hin: den Spin. Die Aufspaltung demonstriert gerade die Richtungsquantelung.

20.23.8 Was passiert im Kernspintomographen?

Eine wichtige Anwendung des Teilchenspins in der Medizin ist die *Kernspintomographie* (*Nuklearmagnetische Resonanz*, kurz NMR). Hier nutzt man aus, dass auch die Teilchen im Atomkern, die Nukleonen (Neutronen und Protonen), halbzahligen Spin tragen. Alle diese Spins summiert man auf, um den Gesamtspin des Atomkerns, den *Kernspin*, zu erhalten. Bestimmte Atomkerne haben einen von null verschiedenen Kernspin (in der Medizin häufig H-1, H-2, C-13, N-14) und können als medizinische Diagnostika dienen. Der Kernspin **koppelt** an die Spins der Elektronen in der Atomschale und bewirkt auf diese Weise unterschiedliche energetische Zustände im Gesamtsystem. Man kann nun *gezielt höhere energetische Zustände anregen*, indem man das Material einem starken, homogenen Magnetfeld aussetzt, das von einem weiteren starken, inhomogenen Magnetfeld überlagert wird. Die Spins werden dann durch die Ausrichtung im Magnetfeld umgeklappt. Bestimmte Kerne lassen nur zwei Einstellungsmöglichkeiten zu: in Richtung des Magnetfeldes (parallel) oder entgegengesetzt dazu (antiparallel). Abschalten des Magnetfeldes lässt nun die Spins wieder in ihre Ruhelage zurückkehren (*relaxieren*): dieser Vorgang, eine Zustandsänderung von einem energetisch höheren in einen niederenergetischen Zustand ist mit der Emission eines Photons verbunden. In diesem Fall sind es

Radiophotonen mit einigen MHz Strahlungsfrequenz. Diese Photonen sind das eigentliche Messsignal in der NMR und können mit einer photoempfindlichen Anordnung registriert werden. Das räumlich inhomogene Magnetfeld dient einer genauen Ortsauflösung des Signals, um die tomographischen Daten nach der Messung visualisieren zu können.

20.23.9 21cm-Linie in der Astronomie

In der Astronomie gibt es ebenfalls einen wesentlichen Beobachtungsindikator, der auf der Spin-Physik beruht: der **Hyperfeinstrukturübergang im neutralen Wasserstoff** (HI), der als 21cm-Linie im Radiobereich messbar ist. Dieser Übergang beruht auf den unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten des Spins von Elektron und Proton (im Isotop H-1) zueinander: die Spinorientierungen können parallel oder antiparallel sein. Der antiparallele Zustand ist energetisch niedriger und der Grundzustand des atomaren Wasserstoffs. Wasserstoff ist das häufigste Element im Universum. Deshalb kommt es trotz hoher Lebensdauer von 1.1×10^{10} Jahre des energetisch angeregten Zustands zu einer signifikanten Emission von Photonen mit der zwischen diesen Energieniveaus korrespondierenden Frequenz von 1.42 GHz oder 21.1 cm Wellenlänge. Das interstellare Medium wird mit dieser Radiostrahlung weiträumig kartographiert und verrät damit die Verteilung des neutralen Wasserstoffs (21cm-Tomographie).

20.24 Spin-Netzwerk

Spin-Netzwerke (engl. *spin network*) wurden 1971 von dem Relativisten *Roger Penrose* erfunden und stellen einen kombinatorischen Zugang zur Raumzeit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) dar. Dieser mathematische Formalismus wurde in der Loop-Quantengravitation (LQG) wieder entdeckt und erweitert. Spin-Netzwerke haben die **Wilson-Loops** als mathematische Orthonormalbasis des LQG-Hilbert-Raums abgelöst. Sie bestehen schematisch aus Knoten und Linien und stellen gerade den **quantisierten Raum** dar, den die LQG nur aus den Konzepten der ART und der Quantenmechanik (siehe Quantentheorie) abzuleiten vermag. Umordnungen im Spin-Netzwerk definieren dann einen **lokalen Zeitbegriff** und münden in den Spinschaum. Eine ausführliche Beschreibung ist unter Loop-Quantengravitation nachzulesen.

20.25 Spinschaum

Der Begriff des Spinschaums (engl. *spin foam*) wurde in der Loop-Quantengravitation (LQG) geprägt, einer Quantengravitation, die einen anderen Ansatz verfolgt, als die Stringtheorien. Unter Spinschaum versteht man die Gesamtheit zeitlich sich entwickelnder Spin-Netzwerke. Ein Spin-Netzwerk ändert dabei sprungartig seine Knoten-Linien-Struktur. Darin sehen die Loop-Theoretiker Änderungen des Quantenzustands der Raumzeit. Die schaumige Struktur offenbart sich erst auf den winzigen Skalen der Planck-Skala, also auf charakteristischen Längenskalen von nur 10^{-33} cm.

20.26 Spin-Statistik Theorem

Die Fermionen mit **halbzahligem Spin** sind streng von den Teilchen mit **ganzzahligem Spin**, den **Bosonen**, abzugrenzen. Durch das von *Wolfgang Pauli* 1925 empirisch gefundene und 1940 theoretisch bewiesene **Spin-Statistik-Theorem** erhalten Fermionen und Bosonen ihre fundamentale, statistische Deutung:

- ◇ Die Bosonen sind **identische Teilchen** und werden durch total symmetrische, quantenmechanische Zustände beschrieben. In einem Zustand (charakterisiert durch die Quantenzahlen) können sich *beliebig viele* Bosonen aufhalten. Dadurch wird auch verständlich, warum das **Bose-Einstein-Kondensat (BEK)** bei sehr tiefen Temperaturen existieren kann: alle Bosonen sitzen im tiefstmöglichen Zustand, dem Grundzustand des Systems (vergleiche Abb. 20.16).

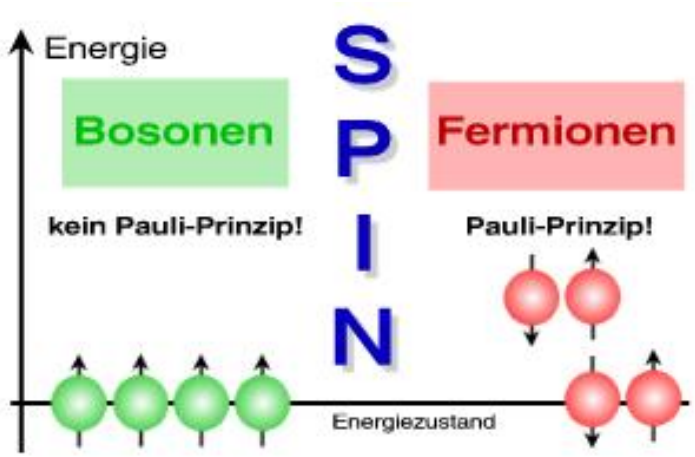

Abbildung 20.16: Bosonen vs. Fermionen.

◇ Die Fermionen sind hingegen **unterscheidbare Teilchen** und werden durch total antisymmetrische, quantenmechanische Zustände (*Slater-Determinanten*) beschrieben.

20.26.1 Formulierung des Pauli-Prinzips

Daraus resultiert schließlich dass für den Aufbau der Materie (z. B. Periodensystem der Elemente) so wichtige **Pauli-Prinzip**:

*In einem System von identischen Fermionen können **nie** zwei Teilchen in allen Quantenzahlen übereinstimmen.*

20.26.2 Struktur der Materie

Demnach **müssen** sich beispielsweise zwei Elektronen, die dieselbe Atomschale bevölkern und sich sonst in allen Quantenzahlen gleichen in ihrem Spin unterscheiden: eines hat *spin down*, das andere *spin up*! Ist das nicht der Fall, so muss eines der Elektronen den energetisch nächsthöheren Zustand bevölkern. Genau nach diesem Rezept lassen sich die Elektronen in den Atomschalen verteilen, um die leichten bis schweren Atome im Periodensystem der Elemente aufzubauen. Wenn die Materie ein Haus wäre, dann wäre der Spin der Architekt, der sie strukturiert.

20.27 Spintessenz

Ein hypothetisches Quintessenz-Modell in der Kosmologie, in dem die Dunkle Energie durch ein komplexwertiges Skalarfeld generiert wird, das rotiert. Die Rotation nimmt mit der Expansion des Universums ab, so dass auch die Dunkle Energie zeitabhängig ist und abnimmt. Das Modell stammt von *L.A. Boyle, R.R. Caldwell & M. Kamionkowski* aus dem Jahr 2001 (Publikation astro-ph/0105318).

Zurzeit werden Quintessenzen aufgrund der astronomischen Beobachtungslage nicht favorisiert, sondern eher Einsteins kosmologische Konstante Λ.

20.28 s-Prozess

Der s-Prozess ist ein wichtiger Prozess in der **nuklearen Astrophysik**, der neben der thermonuklearen Fusion zur Erzeugung besonders schwerer Elemente beiträgt. Er findet im Innern von Roten

Riesensternen statt, die sich in der AGB-Phase befinden, also den asymptotischen Riesenast im Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne durchlaufen.

20.28.1 Das Innere eines AGB-Sterns

In AGB-Sternen werden Helium und Kohlenstoff im **Schalenbrennen** fusioniert, der Sternkern ist weitgehend inaktiv. Demzufolge ist das hydrostatische Gleichgewicht der AGB-Sterne ziemlich gestört. Die Brennphasen und der Stern als Ganzes sind sehr instabil und deutlich komplizierter als bei anderen Sternphasen. Die Brennprozesse im Innern generieren in jedem Fall ein **neutronenreiches Milieu** mit typischen Neutronendichten von 10^8 cm^{-3}, also 100 Millionen Neutronen in einem Kubikzentimeterwürfel.

20.28.2 Was passiert im s-Prozess?

Schwere Atomkerne im Sternplasma haben einen größeren Wirkungsquerschnitt, d. h. eine größere Wahrscheinlichkeit, die Neutronen einzufangen. Das schwerste Element, das der Stern bis dato gebildet hat, ist Eisen (*Fe*). Die **Eisenkerne** stellen demnach die Ausgangsprodukte (Edukte) für den s-Prozess dar. Die Kerne benötigen vergleichsweise viel Zeit, bis sie die Neutronen eingefangen haben. Die typische Zeitskala liegt im Bereich von Jahren. Der s-Prozess verdankt seinen Namen gerade dieser Langsamkeit (engl. ***s**lowness*), *nicht* etwa weil die beteiligten Neutronen langsam wären. In den mit Neutronen übersättigten Kernen finden die üblichen kernphysikalischen Umwandlungsreaktionen statt: der β^--Zerfall der Neutronen generiert Protonen in den Eisenkernen und erzeugt damit Elemente höherer Ordnungszahl (Zink *Zn*, Kupfer *Cu*). Diese wiederum fangen ihrerseits Neutronen ein und werden auch zu schweren Elementen umgewandelt (Gallium *Ga*, Germanium *Ge*). Dies funktioniert bis hinauf zu Wismut (*Bi*-209, Ordnungszahl 83), dem letzten stabilen Nuklid.

20.28.3 Limit bei schweren Kernen

Alle schwereren Kerne sind besonders instabil und zerfallen schnell. Weil die Halbwertszeiten beteiligter instabiler Nuklide in dieser Kette deutlich kürzer sind als charakteristische Einfangzeiten der Neutronen, bewegt sich der s-Prozess **im unteren Bereich nahe am Stabilitätstal** auf der Nuklidkarte. Trägt man die Protonenzahl eines Kerns (Ordnungszahl des Elements; Kernladungszahl) über der Neutronenzahl auf, so ergeben sich etwa entlang der Diagonalen (Protonenzahl = Neutronenzahl) die Orte stabiler Elemente, die also *nicht radioaktiv* zerfallen. Diese Diagonale, die für schwere Kerne nach unten abknickt (schwere Kerne sind neutronenreicher; anschaulich deshalb, um die abstoßenden Coulombkräfte der Protonen durch neutrale Teilchen dazwischen zu kompensieren), heißt Stabilitätstal.

20.28.4 Bedeutung des s-Prozesses

Der s-Prozess ist von hoher Relevanz, um die Anreicherung des interstellaren Mediums (ISM) mit Metallen zu erklären. Damit ist der s-Prozess mit verantwortlich für die schweren Elemente, die wir heute im Sternenstaub und auf der Erde finden. Der zweite Mechanismus, der ähnlich, aber auf deutlich kürzeren Zeitskalen (Millisekunden!) abläuft ist der **r-Prozess** in Supernovae. Er generiert noch **schwerere Elemente als der s-Prozess**.

Daneben spielt der p-Prozess, eine Protoneneinfangreaktion, eine untergeordnete Rolle. Er führt zur Erzeugung weiterer 32 stabiler, schwerer Metalle, allerdings mit geringer Isotopenhäufigkeit.

20.28.5 Empfohlene Quelle

- ◇ Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Arbeitsgruppe Nukleare Astrophysik

20.29 Standardkerzen

Dieser etwas flapsige Ausdruck subsumiert sämtliche Quellen am Himmel, deren absolute Helligkeit M Astronomen sehr genau astronomisch direkt messen können oder auf deren absolute Helligkeit man sehr genau indirekt mittels anderer Parameter schließen kann.

20.29.1 Was macht man mit M?

Mit einer weiteren Messung der relativen Helligkeit m, d. h. derjenigen Helligkeit, die man direkt beobachtet, kann über das **Entfernungsmodul** m - M = -5 + 5×log(r) die **Entfernung** r dieser Objekte angeben. Die Entfernung einer Quelle ist ein sehr wichtiger Parameter für die Astronomie, erlaubt sie doch eine dreidimensionale Kartierung des Universums.

20.29.2 Ein Blick an den Himmel ist ein Blick in die Vergangenheit

Die Lichtgeschwindigkeit ist gemäß der Speziellen Relativitätstheorie eine absolute Obergrenze: keine Information kann schneller zu uns gelangen, als das Licht. Dennoch ist die Geschwindigkeit begrenzt und beträgt im Vakuum etwa 300 000 km/s. Mit anderen Worten: Die Strahlung einer kosmischen Quelle braucht eine gewisse Zeit, bis sie beim irdischen Beobachter ankommt. So benötigt das Licht des Mondes für seine Entfernung zur Erde eine gute Sekunde, von der Sonne aus gut acht Minuten, zum nächsten extrasolaren Stern etwa vier Jahre und am weitesten Objekt, dass das bloße menschliche Auge zu erblicken vermag, der Andromedagalaxie in der Lokalen Gruppe, 2 Millionen Jahre. Dieser Zeitaspekt macht deutlich, dass ein Astronom mit zunehmender Entfernung in die Vergangenheit des Kosmos blickt. Somit betritt er das Terrain der Kosmologie und beschäftigt sich automatisch mit der **Entwicklung von Objekten** im Universum und mit der des Universums an sich. Damit ist klar, weshalb gute Standardkerzen so wichtig in der Astronomie sind: Sie markieren feste Bezugspunkte im Kosmos und sind Voraussetzung für präzise, kosmologische Modelle.

20.29.3 Katalog guter Standardkerzen

- ◇ die Cepheiden, eine spezielle Klasse veränderlicher Sterne, deren absolute Helligkeit man aus der so genannten *Perioden-Leuchtkraft-Beziehung* gewinnt.
- ◇ Supernovae vom Typ Ia, weil das Modell für den Helligkeitsausbruch sehr gut verstanden ist und eine fixe Obergrenze für die absolute Helligkeit von -19.7^{mag} liefert. Anders gesagt: Alle Weißen Zwerge explodieren beim Überschreiten der Chandrasekhar-Grenze auf die mehr oder weniger gleiche Art und Weise.
- ◇ RR Lyrae-Sterne, die sich vor allem im Zentrum von Kugelsternhaufen befinden. Für diese so genannten *Haufenveränderlichen* gelten die gleichen Argumente wie für die Cepheiden.

20.30 Standardmodell

Das Standardmodell der Elementarteilchen (häufige Abkürzung **SM**) ist der erfolgreiche Versuch, drei der bekannten vier fundamentalen Wechselwirkungen von Materie unter einer einheitlichen Sichtweise zu verstehen. Die **elektromagnetische**, die **schwache** und die **starke Wechselwirkung** sind Gegenstand des Standardmodells. Die vierte Kraft, die **Gravitation** konnte nicht in das Standardmodell eingebettet werden. Das Graviton ist *kein* Teilchen des Standardmodells.

20.30.1 Bausteine der Materie: Quarks & Leptonen

Die wesentlichen Teilchengruppen des Standardmodells sind die Quarks und Leptonen (siehe Übersichtsgrafik 20.17). Die Teilchenphysiker unterscheiden sechs Quarks, die sich durch ihren *Flavor* unterscheiden: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom*, *top* (sowie weitere sechs Antiquarks).

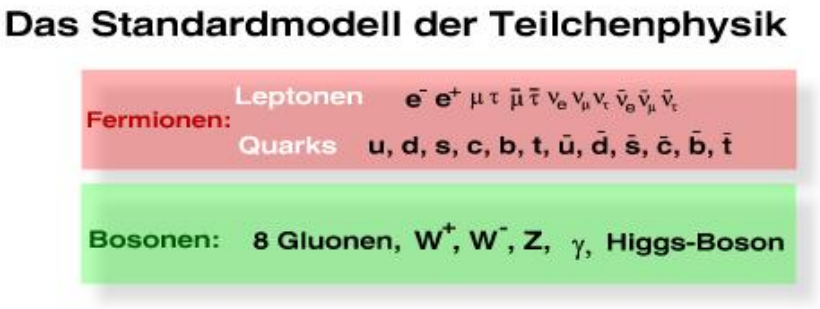

Abbildung 20.17: Standardmodell der Teilchenphysik.

Alle konnten experimentell nachgewiesen werden. Die Quarks tragen neben der drittelzahligen elektrischen Elementarladung eine Farbladung (daher das *chromos*, grch. 'Farbe', im Begriff Quanten*chromo*dynamik). Hinter den Leptonen, die **farblos** sind, verbergen sich Elektron, Myon, Tauon und deren Antiteilchen sowie die zugehörigen Neutrinos, also Elektron-, Myon-, Tau-Neutrino und entsprechende Antineutrinos. Alle diese Teilchen sind **punktförmig** in dem Sinne, dass sie keinerlei Substruktur aufweisen. Quarks und Leptonen sind elementar und bestehen nicht aus irgendwelchen anderen Teilchen.

20.30.2 Atome, Atomkerne, Nukleonen

Atomkerne bestehen aus Nukleonen, den Kernteilchen. Im Speziellen enthalten die Atomkerne unterschiedliche Anzahl von Protonen und Neutronen und bereichern in dieser Vielfalt die Tafel der chemischen Elemente. Nukleonen besitzen eine Substruktur: Sie enthalten unterschiedliche Kombinationen aus drei Quarks. Das Proton besteht aus zwei u-Quarks und einem d-Quark (uud), das Neutron enthält dagegen zwei d-Quarks und ein u-Quark (udd). Elektronen bevölkern die Atomhülle. Nach außen hin sind Atome elektrisch neutral, weil sich die negative Ladung aller Elektronen gerade mit der positiven Ladung aller Protonen im Atomkern aufhebt. Im klassischen Bohrschen Atommodell 'umkreisen' die leichten Elektronen die Atomkerne. Im Orbitalmodell der Quantenchemie sind die Elektronen in Form von elektronischen Wellenfunktionen um den Atomkern 'verschmiert'.

20.30.3 Mesonen und Baryonen sind Hadronen

Hadronen ist der Oberbegriff für alle Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind. Dabei unterscheidet man weiterhin die **Mesonen** und die **Baryonen**: Baryonen bestehen aus drei Quarks, während die Mesonen nur aus zwei Quarks zusammengesetzt sind. Genauer gesagt sind die Konstituenten der Mesonen ein Quark und ein Antiquark, weshalb sie recht kurzlebig sind. Bekannte Baryonen sind neben dem Proton und dem Neutron die Lambda- und Omega-Teilchen; bekannte Mesonen sind die drei Pionen, die neutral (Quarkgehalt u und anti-u), negativ (d, anti-u) und positiv (u, anti-d) geladen sind, die Kaonen sowie das Psi-Teilchen (eine Realisierung von *Charmonium*), das aus einem c-Quark und einem anti-c-Quark besteht.

Kürzlich wurden sogar Quarksysteme nachgewiesen, die aus vier - Tetraquarks - und sogar fünf Quarks - Pentaquarks - bestehen.

20.30.4 Isospin

Führt man eine weitere Quantenzahlen ein, wie den **Isospin**, der ebenso wie der Spin (daher *iso*, grch. 'gleich') der üblichen Drehimpulsalgebra der Quantenmechanik genügt, so kann man Proton und Neutron als Nukleon unifizieren. Proton und Neutron bilden ein **Isospindublett** (s = 1/2)

und haben lediglich unterschiedlichen *Isospinprojektionen* bzw. unterscheiden sich in der dritten Komponente des Isospins (1/2 gegenüber -1/2). Diese Idee geht auf den deutschen Quantenphysiker *Werner Heisenberg* zurück. Die unterschiedlichen Eigenschaften kommen erst zum Tragen, wenn man die elektromagnetische Wechselwirkung 'einschaltet'. Physiker sagen, die elektromagnetische Wechselwirkung bewirke eine Symmetriebrechung, die darin mündet, das eines der Nukleonen eine elektrische Ladung erhält und die Massen beider Nukleonen leicht differieren. Anders gesagt: Ohne Elektromagnetismus sind Proton und Neutron ununterscheidbar.

20.30.5 Das mysteriöse Higgs-Boson

Das letzte, noch nicht nachgewiesene Teilchen des Standardmodells ist das schwere **Higgs-Boson**. Der britische Physiker *Peter W. Higgs* hat es bereits 1964 vorhergesagt. Das Higgs-Teilchen stattet im Higgs-Mechanismus die Teilchen mit Masse aus und ist aufgrund seiner kurzen Lebensdauer außerordentlich schwierig nachzuweisen. Am CERN hat man dafür im November 2000 'schwache Evidenzen' gefunden, kurz bevor der *Large Electron Positron Collider (LEP)* abgeschaltet werden musste. Die Hoffnungen liegen nun im neuen Beschleuniger am CERN, dem *Large Hadron Collider (LHC)*, der Ende 2007 eingeschaltet wird.

20.30.6 Tests des Standardmodells

Das Standardmodell der Teilchenphysik hat sich hervorragend bewährt und gilt als **mächtige, etablierte, physikalische Theorie**. Die Vorhersagen der Teilchen des Standardmodells sind außer im Fall des Higgs-Bosons eingetroffen und stützen das Standardmodell. Für Teilchen- und Hochenergiephysiker ist es Alltaggeschäft mit dem Standardmodell zu rechnen und Experimente in Teilchenbeschleunigern auf der Grundlage dieser Theorie zu analysieren.

Im Modell sind mehr als zwanzig Parameter (Teilchenmassen, Kopplungskonstanten etc.) enthalten, die *nicht* aus der Theorie folgen. Physiker nennen sie **freie Parameter**, weil sie experimentell bestimmt werden müssen. Auf der Grundlage dieser gemessenen Parameter sind schließlich Prognosen möglich. Die Physiker unternehmen daher große Anstrengungen, um die freien Parameter immer wieder aufs Neue und so präzise wie möglich zu bestimmen.

20.30.7 Die drei Kräfte als mathematische Gruppe

Gruppentheoretisch beschreibt man die elektromagnetische Wechselwirkung als **Quantenelektrodynamik, QED** mit der unitären Gruppe **U(1)**, die schwache Wechselwirkung mit der speziellen, unitären Gruppe **SU(2)** und die starke Wechselwirkung als **Quantenchromodynamik, QCD** mit der speziellen, unitären Gruppe **SU(3)**. Das Standardmodell ist gerade das **direkte Produkt** dieser Gruppen **SU(3)** $\times$ **SU(2)** $\times$ **U(1)**. Die bosonischen Austauschteilchen der Wechselwirkungen (*intermediäre Bosonen*) sind acht Gluonen bei der starken, neutrales Z- und elektrisch geladene W^+- und W^--Teilchen bei der schwachen und das masselose und neutrale Photon bei der elektromagnetischen Wechselwirkung. Diese **Eichbosonen** des Standardmodells folgen direkt aus der Gruppentheorie.

20.30.8 Vier Naturkräfte waren einmal eine

Studiert man die **Kopplungskonstanten** der vier Wechselwirkungen, so stellt man fest, dass sie bei großen Abständen wechselwirkender Teilchen (oder äquivalent dazu kleinen Energiebereichen) sehr unterschiedlich sind. Erst auf subatomaren Größenskalen ($\sim 10^{-20}$ cm) nähern sich die Werte der Kopplungskonstanten (die also gar nicht konstant ist!) an und treffen sich schließlich bei etwa 10^{-29} cm. Dieses Verhalten nennt man *dimensionale Transmutation*, und es gilt zumindest für die drei Wechselwirkungen *außer* der Gravitation! Die entsprechende Energieskala von 2×10^{16} GeV wird von den **Großen Vereinheitlichten Theorien** (engl. *Grand Unified Theories*, **GUT**) beschrieben. Bei diesen Energien bzw. Temperaturen oberhalb von 10^{29} Kelvin sind die elektromagnetische, schwache

und starke Kraft ununterscheidbar. Diese neue, universelle Kraft heißt X-Kraft. Hochenergiephysiker und Kosmologen sind davon überzeugt, dass dieses Milieu Sekundenbruchteile nach dem Urknall vorgeherrscht habe. In der Kosmologie nennt man diese Phase die **GUT-Ära**. Die **Gravitation** spielt eine Sonderrolle, denn sie ist nicht unter den vereinigten drei Kräften dabei (Hierarchieproblem). So ist man immer noch auf der Suche nach der 'Urkraft' bzw. der **Unified Theory (UT)**. Es stellt sich heraus, dass immer höhere Energien nötig sind, um die Wechselwirkungen zu vereinen. Deshalb benötigen die Hochenergiephysiker immer größere Teilchenbeschleuniger, um die prognostizierten Teilchen herstellen und nachweisen zu können. Ein erster Erfolg bei der Vereinheitlichung von Kräften bzw. Quantenfeldtheorien ist die **elektroschwache Wechselwirkung**. Hier wird die elektromagnetische mit der schwachen Wechselwirkung vereinigt. Diese Theorie heißt auch GSW-Modell, nach den Pionieren Glashow, Salam und Weinberg. Aus dieser Behandlung konnten die Weakonen, die sehr massereichen W- und das Z-Teilchen (80 bzw. 90 Protonenmassen!) vorhergesagt und erfolgreich nachgewiesen werden. Diese Leistung wurde auch mit dem Nobelpreis honoriert.

20.30.9 Supersymmetrie

Abseits des Standardmodells wird besonders intensiv die Supersymmetrie (SUSY) untersucht. Diese Symmetrie zwischen Bosonen und Fermionen prognostiziert eine Vielzahl neuer Teilchen: die **SUSY-Teilchen**. Die Supersymmetrie ist ein gewichtiger Zusatz zum Standardmodell, auf den die moderne Teilchenphysik kaum verzichten kann. Ein Nachweis von SUSY-Teilchen wird deshalb erstrebt, nur haben sie deutlich höhere Massen und können demzufolge erst mit neuen, noch leistungsfähigeren Teilchenbeschleunigern erzeugt werden.

20.30.10 Probleme mit der Schwerkraft

Ein schwieriges Unterfangen ist die Vereinigung aller vier Naturkräfte. Die Unifikation von Gravitation und den drei übrigen Wechselwirkungen birgt viele formale Hindernisse. Die bisher erfolgreichste Theorie der Gravitation ist die Allgemeine Relativitätstheorie von *Albert Einstein*. Sie ist eine klassische (d. h. nicht quantisierte) Theorie und beschreibt Gravitation als geometrische Eigenschaft des Raumes (genauer der vierdimensionalen Raumzeit). Als unquantisierte Theorie enthält sie keines der quantenmechanischen Konzepte wie Unschärfe oder Welle-Teilchen-Dualismus. Auch der mathematische Apparat, nämlich die Tensorrechnung ist völlig wesensverschieden vom Quantisierungsapparat der Quantenfeldtheorien. Wie gelingt also nicht nur eine Vereinigung der Teilchen/Wechselwirkungen, sondern auch eine Vereinigung der Theorien?

20.30.11 Anwärter auf Quantengravitationen

Eine Erfolg versprechende Lösung scheinen die supersymmetrischen Stringtheorien (**Superstringtheorien**) zu sein. Sie münden zusammen mit der Supergravitation in die M-Theorie, von der man bislang nur einige Eigenschaften kennt. Die scharfen Kritiker der Stringtheorien werfen vor, dass es nicht gelungen ist, mit den Stringtheorien wesentliche, physikalische Parameter vorauszusagen. Auch die Konzepte, die metrische Gravitationstheorien wie die Allgemeine Relativitätstheorie vorgeben (Diffeomorphismusinvarianz), scheinen nicht adäquat berücksichtigt worden zu sein. Die Anhänger der Stringtheorien loben den unifizierenden Charakter der Theorie, die Vorhersage von Gravitonen als quantisierte Austauschteilchen der Gravitation und konsistente Vorhersage einiger Details (z. B. der Bekenstein-Hawking-Entropie), die auch andere Theorien enthalten.

Alternativ wird die **Loop-Quantengravitation** (LQG) entwickelt, die eine Quantengravitation ist und völlig neue, radikale Aspekte von Zeit und Raum aufwirft. Diese Theorie beschreibt allerdings (noch?) nicht die Teilchen des Standardmodells, sondern nur eine quantisierte Gravitation. Die LQG hat bislang noch keinen unifizierenden Charakter. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich Stringtheorien und Loop-Quantengravitation als unterschiedliche oder womöglich überlappende Grenzfälle einer umgeordneten Theorie entpuppen könnten.

20.30.12 Die wichtigsten Teilchen der Astronomie

- ◇ Allen voran schätzen Astronomen das **Photon**, weil es nicht nur historisch das erste war, das ihnen Informationen aus den Tiefen des Alls zur Erde brachte, sondern auch in mannigfacher Ausführung vorkommt und zwar als Radio-, Infrarot-, optisches, Ultraviolett-, Röntgen-, Gamma- oder TeV-Photon. Die astronomischen Informationen sind im Photon in Form von Energie, Anzahl, Polarisation und Richtung gespeichert.
- ◇ Das **Elektron**, einem der Leptonen, das zwar nicht direkt von einer Quelle zum irdischen Detektor gelangt, aber eine fundamentale Rolle in vielen astrophysikalischen Prozessen spielt (so z. B. in allen elektromagnetischen Übergängen in Atom- und Ionenhüllen, Synchrotronstrahlung, Streuprozessen wie der Comptonisierung, Paarbildung und -vernichtung, als entartetes Fermigas in Weißen Zwergen etc.).
- ◇ Das **Neutrino**, ebenfalls ein Lepton, das durch seine Punktförmigkeit, geringe Masse von wenigen Elektronenvolt und vor allem sein Durchdringungsvermögen durch die exklusive Teilnahme an schwacher Wechselwirkung und Gravitation auch in elektromagnetisch verborgene Bereich des Alls vordringt, und uns so Informationen aus dem kollabierenden Innern von Sternen (beobachtet bei Supernova SN 1987A) bringen kann.

20.30.13 hypothetische Teilchenexoten

Neben diesen erwiesenen Botenteilchen der Astronomie gibt es noch zwei *hypothetische Teilchen*, die sich als äußerst interessant erweisen könnten. Das **Graviton** und das **Cosmon**. Das Graviton ist ein Tensorboson (Spin 2), das man mit dem Austauschteilchen einer quantisierten Gravitation identifiziert. Leider wurde dieses Teilchen weder experimentell entdeckt, noch ist die theoretische Ausarbeitung einer quantisierten Gravitationstheorie in Analogie zu den anderen Quantenfeldtheorien geglückt.

Das Cosmon ist das Quant, das man mit der Quintessenz assoziiert. Theoretisch konnte man dafür eine äußerst geringe Masse ableiten, die noch unterhalb der der Neutrinos liegt. Von dem Cosmon verspricht man sich neue Erkenntnisse über die Dunkle Energie, weil diese Energieform unser spätes Universum offenbar dominiert. Das **Standardmodell macht keinerlei Aussage über die Dunkle Energie und die Dunkle Materie**. Das ist an sich schon erstaunlich, denn diese beiden Energieformen machen 96% im Kosmos aus! Eine **Physik abseits des Standardmodells** ist deshalb dringend erforderlich. Zurzeit wird ein **Standardmodell der Kosmologie** entwickelt und erforscht, das auf zuverlässigen Daten der experimentellen Kosmologie beruht.

20.31 Standardscheibe

Die Standardscheibe ist die Bezeichnung für einen Materieströmung, die um ein zentrales, kosmisches Objekt rotiert. Der Materiefluss sammelt sich in einer flachen Scheibe, der so genannten **Akkretionsscheibe**.

20.31.1 Was ist Akkretion?

Akkretion ist der Vorgang des Aufsammelns von Materie, der in sehr vielen kosmischen Objekten stattfindet: von sehr jungen Sternen wie den Protosternen über kompakte Objekte wie Weißen Zwergen oder Neutronensternen bis hin zu den Schwarzen Löchern unterschiedlichster Massen (stellar, mittelschwer, supermassereich) wird Materie aus der Umgebung durch das Gravitationsfeld angezogen und bewegt sich auf das Zentralobjekt zu. Dabei bildet sich der **Akkretionsfluss** (engl. *accretion flow*) aus, der ganz unterschiedliche Eigenschaften haben kann. Er wird ganz allgemein z. B. durch geometrische Form, Geschwindigkeitsfeld, Temperatur- und Dichteverlauf, Viskosität (Zähigkeit der Strömung), andere thermodynamische Größen wie der Entropie, der Gestalt und Stärke des Magnetfelds charakterisiert.

20.31.2 prominenter Spezialfall: Standardscheibe

Die Standardscheibe ist einer von vielen Akkretionsflüssen, die Fachleute sprechen von **Akkretionslösungen** (nämlich Lösung eines bestimmten Satzes von Differentialgleichungen). Sie ist eine selbst-konsistente, analytische Lösung, die auf der *reinen* Hydrodynamik (keine Magnetfelder) basiert. Astrophysiker nennen sie auch *Standardakkretionsscheibe* (engl. *standard accretion disk*, **SAD**) oder *Shakura-Sunyaev Disk* (**SSD**). Letzteres ist eine Benennung nach den Pionieren, die im Rahmen eines theoretischen Modells die nicht-relativistische Standardscheibe 1973 gefunden haben (*Shakura & Sunyaev*, A& A 24, 337, 1973). Kurze Zeit später wurde die SSD-Lösung relativistisch verallgemeinert (*Novikov & Thorne*, Black Holes 343, 1974).

20.31.3 Eigenschaften der Standardscheibe

- ◇ Die Strömung rotiert in einer flachen Materiescheibe. Die Akkretionsphysiker sagen, die Standardscheibe sei **geometrisch dünn**. Dies kann man parametrisieren, indem man das Verhältnis von Scheibenhöhe H und typischen Scheibenradius R bildet. H/R heißt Skalenhöhe. Sie ist für Standardscheiben viel kleiner als 1 (entsprechend sind Gebilde mit $H/R \sim 1$ geometrisch dick wie z. B. der ADAF).

  Rotierende Materie besitzt physikalisch gesprochen **Drehimpuls**. Der Akkretionsfluss muss zu einer Scheibe abflachen, weil dieser Zustand energetisch günstiger ist und von der Drehimpulserhaltung diktiert wird. Die Scheibenform bzw. Achsensymmetrie ist gerade die korrespondierende Symmetrieeigenschaft zum erhaltenen Drehimpuls. Dieser Effekt gilt für alle rotierenden, kosmischen Scheiben (protostellare, protoplanetare oder galaktische Scheiben, Spiralgalaxien). Ein paar Zeilen weiter werden wir sehen, dass bei der Abflachung auch die Strahlung eine wesentliche Rolle spielt.

- ◇ Die **Bewegung der Materie** in der Scheibe setzt sich aus einer Rotationsbewegung um das Zentralobjekt *und* einer Bewegung in Richtung des Zentralobjekts zusammen. Die Rotationsbewegung kann sehr gut mit den Kepler-Gesetzen beschrieben werden: Astrophysiker sagen, Standardscheiben haben ein *Keplersches Geschwindigkeitsprofil*. Es ist dadurch charakterisiert, dass die Winkelfrequenz mit dem Radius nach außen gemäß $r^{-3/2}$ abfällt. Weil die Geschwindigkeit das Produkt aus Winkelfrequenz und Radius ist, folgt sofort, dass die Keplergeschwindigkeit mit $r^{-1/2}$ abfällt. Die Rotationsbewegung ist demnach vergleichbar mit derjenigen der Planeten im Sonnensystem: Die Umlaufgeschwindigkeit nimmt mit der Annäherung an das Zentralobjekt zu. Es gibt allerdings einen innersten Rand der Scheibe, denn stabile Rotation bricht an der marginal stabilen Bahn zusammen. Dieser Innenrand heißt auch innerste stabile Kreisbahn (engl. *innermost stable circular orbit*, **ISCO**). Die langsame Einfallbewegung zum Zentralobjekt nennt man *radiale Drift*.

- ◇ Das Scheibenmaterial bewegt sich mikroskopisch wie eine zähe Flüssigkeit turbulent - also ungeordnet. Das Keplersche Geschwindigkeitsprofil ist demgegenüber eine geordnete, makroskopische Bewegung. Sie bedingt, dass benachbarte (idealisiert gedachte) Ringe von Scheibenmaterial unterschiedlich schnell rotieren. Die 'Flüssigkeitsringe' stehen miteinander in Verbindung, so wie die Teilchen in einer Flüssigkeit locker zusammen gehalten werden. Doch die Rotation verschiebt die Ringe gegeneinander. Bei dieser *Scherung* wird dem Scheibenmaterial turbulente Bewegungsenergie entzogen und in Wärmeenergie umgewandelt. Generell heißt die Umwandlung einer Energie in Wärmeenergie *Dissipation*. Die Dissipation in Standardscheiben ist eine Folge der turbulenten, hydrodynamischen Viskosität. Die Akkretionsphysiker sprechen gerne von einer **viskosen Heizung**.

- ◇ Der **Temperaturverlauf** in der Standardscheibe ist auf der Grundlage des Modells nach *Shakura & Sunyaev* genau bekannt: Die Scheibentemperatur T folgt einem Potenzgesetz und nimmt nach innen mit dem Radius r zu: $T \propto \mathrm{r}^{-3/4}$; sie nimmt mit der Masse M des Zentralobjekts ab: $T \propto \mathrm{M}^{-1/4}$, und sie steigt leicht mit der Akkretionsrate in der Potenz 1/4 an. Die Maximaltemperatur am Innenrand hängt generell von der Masse des

Zentralobjekts, der Akkretionsrate (aufgesammelte Masse pro Zeit) und dem Ort des Innenrands (ISCO) ab. Eine typische Maximaltemperatur in der Nähe eines supermassereichen Schwarzen Loches von 100 Millionen Sonnenmassen ist etwa eine Million Kelvin! Das entspricht etwa einem Zehntel der Zentraltemperatur der Sonne. Diese hohen Temperaturen belegen, dass das Scheibenmaterial häufig ein Plasma ist. Atomare und molekulare Standardscheiben sind nur bei tieferen Temperaturen denkbar. Dennoch spricht man oft von kalten Standardscheiben. Diese Bezeichnungsweise hat sich ergeben, weil es einen noch deutlich heißeren Akkretionsfluss gibt, den ADAF.

- ◇ Die **Strahlung** der Standardscheibe ist **thermisch**. Man kann sich die dünne Scheibe in Ringe zerlegt denken, von denen jeder Ring eine bestimmte Temperatur hat. Jeder Ring kann wie ein Planckscher Wärmestrahler behandelt werden, der bei einer bestimmten Wellenlänge (Farbe) sein Strahlungsmaximum annimmt. Das gesamte Spektrum der Standardscheibe ist entsprechend die Summe der Planck-Kurven aller Ringe. Astronomen nennen das resultierende Spektrum einen modifizierten Schwarzen Körper (engl. *multi-color black body*). Die optische **Leuchtkraft** der Standardscheibe steht gemäß $L \propto M^{4/3}$ in Beziehung zur Masse des aufsammelnden Zentralobjekts. Außerdem nimmt L auch mit der Akkretionsrate in der Potenz 2/3 zu.
- ◇ Durch die Abstrahlung elektromagnetischer Wärmestrahlung verliert der Akkretionsfluss Energie. Die **Kühlung ist bei Standardscheiben besonders effizient**. Das heißt die thermische Energie des Materiestroms wird nahezu vollständig als Strahlungsenergie abgestrahlt. Das sorgt zusammen mit der Rotation dafür, dass der Akkretionsfluss in sich zusammenfällt - vertikal kollabiert: somit sind Standardscheiben dünne, abgeflachte Akkretionsflüsse.
- ◇ Der gerade angesprochene vertikale Kollaps - das In-sich-Zusammenfallen - hat zur Konsequenz, dass das Scheibenmaterial verdichtet wird. Innerhalb der Scheibe kann sich elektromagnetische Strahlung kaum fortpflanzen, weil sie ständig gestreut, absorbiert, reemittiert und reabsorbiert wird (Strahlungstransport). Deshalb sind Standardscheiben mehr oder weniger undurchsichtig (opak) für elektromagnetische Wellen. Es sei angemerkt, dass es für die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen eine Abhängigkeit von der Energie (Farbe) der Strahlung gibt. Diese Eigenschaft der Undurchsichtigkeit bei Standardscheiben verlieh ihnen das Attribut *optisch dick*. Im Prinzip ist es wie beim Nebel des irdischen Wetters, nur dass der Nebel - fein verteilte Wassertröpfchen - die Strahlung schluckt (siehe auch optische Tiefe, Abkürzung τ).

20.31.4 Energiebilanz

Zusammenfassend kann man sagen, dass in Akkretionsflüssen wie den Standardscheiben Energieformen ineinander umgewandelt werden: Am Anfang steht die **Gravitationsenergie**, eine potentielle Energie, die Materie in einigem Abstand zum aufsammelnden Objekt (*Akkretor*) hat. Diese Energie der Lage wird im Falle der Standardscheiben zunächst vor allem in **Rotationsenergie** (Bewegungsenergie, kinetische Energie) umgewandelt. Scherung und Turbulenz bewerkstelligen eine Umwandlung in **thermische Energie** (mikroskopisch betrachtet auch eine kinetische Energie der Teilchen). Schließlich findet eine Umwandlung in **Strahlungsenergie** statt. Dieser letzte Umwandlungsprozess ist der entscheidende für die Astronomie, machen sich doch auf diese Weise die kosmischen Objekte aus großer Entfernung bemerkbar.

20.31.5 andere Akkretionsflüsse

Nach der vorangehenden Beschreibung kann man sich selbstverständlich fragen, weshalb nicht alle Akkretionsflüsse Standardscheiben sind. Mittlerweile weiß man, dass die Standardscheibe **nur eine Akkretionslösung unter vielen** ist. Historisch zeichnete sich sogar bald nach der Entdeckung der Standardscheiben ab, dass sie allein nicht ausreichen, um die Beobachtungen zu erklären: Das bemerkten die Astronomen bei den hochenergetischen (d. h. *harten*) Spektren einiger Röntgendoppelsterne wie Cyg X-1 in den 1970er Jahren. Das harte Spektrum ist der Bereich

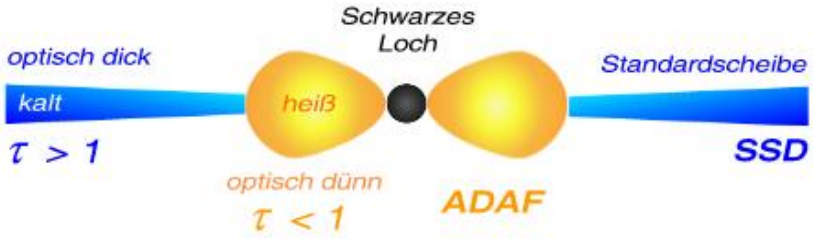

Abbildung 20.18: Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.

höchster Energien ab einigen keV. Es konnte nicht mit dem modifizierten Schwarzkörperspektrum der Standardscheiben erklärt werden. Es musste eine Komponente noch heißeren Plasmas geben. Das mittlerweile weithin akzeptierte Modell ist, dass es ein Reservoir heißen Plasmas, die so genannte **Korona**, gibt. Die direkte Wärmestrahlung dieser Quelle ist deutlich härter als bei Standardscheiben. Damit noch nicht genug: Niederenergetische (*weiche*) Photonen aus der Umgebung dringen in das weniger dichte, heiße Gas der Korona ein und werden zu noch höheren Strahlungsenergien gestreut. Dieser Prozess heißt **Comptonisierung** und erklärt die harten Spektren bis etwa 100 keV - das so genannte Compton-Kontinuum.

Wie die Korona beschaffen ist, welche geometrische Gestalt sie hat und wo sie sich genau im akkretierenden System befindet, ist nicht ganz klar. Es wurden eine Reihe von Modellen vorgeschlagen die unter dem Lexikoneintrag Korona diskutiert werden. Im Falle von Cyg X-1 wird angenommen, dass in der Umgebung eines stellaren Schwarzen Lochs eine Standardscheibe (als kalte Komponente) und ein ADAF (als heiße Komponente) existieren. Damit können die gemessenen Spektren sehr gut reproduziert werden. Schematisch kann ein Schnitt durch den Akkretionsfluss entlang der Symmetrieachse des Systems daher illustriert werden wie in Abbildung 20.18. Welche Akkretionslösungen vorliegen, ist auch eine Frage der **Akkretionsrate**, d. h. wie viel Masse pro Zeit auf das Zentralobjekt einfällt. Im Lexikoneintrag Akkretion wird dazu ein vereinheitlichendes Schema vorgestellt, das weitere Akkretionslösungen beinhaltet. Ein diesbezüglich wesentlicher Begriff ist auch die **Eddington-Leuchtkraft**.

20.31.6 Standardscheiben um Schwarze Löcher

Von besonderem Interesse sind die Standardscheiben um ein **Schwarzes Loch**. Der innere Rand der stabil rotierenden Scheibe liegt auf dem marginal stabilen Orbit, der bei einem Loch wenige Gravitationsradien beträgt. Eine besondere Entartung tritt bei maximal rotierenden Kerr-Löchern auf: die marginal stabile Bahn entspricht dann dem (äußeren) Ereignishorizont, also exakt einem Gravitationsradius. In der Natur kommt das vermutlich nicht vor, weil auf der Basis der Akkretionstheorie Maximaldrehimpulse für die rotierenden Löcher vorgeschlagen wurden (z. B. $a = 0.998\,M$, *Thorne* 1974).

Kandidaten für Schwarze Löcher gibt es nicht nur in Röntgendoppelsternen, sondern auch in den Zentren von Galaxien. Hier sind sie allerdings deutlich gewichtiger und wiegen Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Standardscheiben muss es somit auch in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) geben. Das konnte auch vielfach mittels astronomischer Beobachtungen nachgewiesen werden: Das modifizierte Schwarzkörper-Spektrum der Standardscheibe macht sich im Galaxienspektrum als breiter Buckel im Bereich der optischen und UV-Strahlung bemerkbar. Dieser so genannte 'große blaue Buckel' (engl. *big blue bump*, BBB) hat sein Maximum bei etwa 100 Nanometern Wellenlänge. Entsprechend muss sich die Standardscheibe von wenigen zu einigen 10000 Gravitationsradien erstrecken. In anderen Längeneinheiten ausgedrückt reicht die SAD der AGN bis zur pc-Skala.

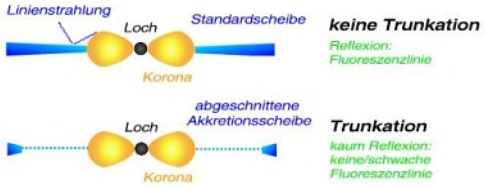

Abbildung 20.19: Entstehung oder Vermeidung von Fluoreszenslinien bei verschiedenen Scheibenmodellen.

20.31.7 Verallgemeinerung zur magnetischen Akkretion

Die Standardscheibe ist eine analytische, hydrodynamische Lösung, d. h. Magnetfelder wurden bei der Herleitung **nicht** beachtet. Die Akkretionsphysiker haben mittlerweile erkannt, dass Magnetfelder eine herausragende Rolle in der Dynamik von Akkretionsflüssen spielen - erst recht in der Nähe eines rotierenden Schwarzen Loches. Eine Erweiterung des theoretischen Regimes stellt die Magnetohydrodynamik (MHD) dar. Im Prinzip wird in diesem theoretischen Zweig die Strömung einer magnetisierten Flüssigkeit untersucht. Ein Durchbruch der MHD-Akkretionsphysik gelang 1991, als *Balbus* und *Hawley* eine neue Instabilität entdeckten, die sehr effizient den Drehimpuls in einem rotierenden Akkretionsfluss umzuverteilen vermag. Diese **magnetische Rotationsinstabilität** (engl. *magneto-rotational instability*, **MRI**) oder *Balbus-Hawley-Instabilität* sorgt für eine magnetisch getriebene Turbulenz, die deutlich stärker ist, als das hydrodynamische Pendant. Die MRI ist verantwortlich für den **Drehimpulstransport** nach außen - das ist gerade die Voraussetzung dafür, dass die Materie überhaupt ins Zentralobjekt fallen kann. Anders formuliert: Auf dies Weise kann das akkretierte Plasma die *Drehimpulsbarriere* überwinden und langsam radial nach innen fließen. Radiale Drift und Rotationsbewegung überlagern sich zur charakteristischen einwärts gerichteten 'Strudelbewegung' des Akkretionsflusses. Schließlich endet die Reise für den größten Teil der Materie im Zentrum des akkretierenden Systems. Auf diese Weise wird der Akkretor mit Masse angereichert, wächst und wird noch effizienter. In den AGN ist dieser höchst effiziente Akkretor ein schnell rotierendes, supermassereiches Schwarzes Loch, das eine weithin sichtbare, enorme Leuchtkraft erzeugt. In der Tat erzeugt (paradoxerweise) das Dunkelste, was es im Universum gibt, das Hellste, was es im Universum gibt! Erst wenn der Ereignishorizont die gleißend leuchtende Materie verhüllt, entzieht sie sich der Sicht des Astronomen.

20.31.8 Übergang zu advektionsdominierten Akkretionsflüssen

Wird die Scheibenmaterie heiß genug - ab etwa 10 Mio. Kelvin - wird die Standardscheibe aufgebläht. Die Scheibe *evaporiert* vornehmlich am Innenrand und wird dadurch geometrisch dick. Dies bezeichnet man als Übergang von einer Standardscheibe zu einer advektionsdominierten Akkretionslösung wie dem ADAF (engl. *SSD-ADAF transition* oder auch *ADAF-SSD transition*). Der ADAF könnte in diesem Szenario als Korona fungieren. Alternativ werden auch advektive Tori, also ausgedehnte, heiße, schlauchförmige Akkretionsflüsse diskutiert. Pseudo-Newtonsche, radiative Hydro-Modelle (mit Wärmeleitung) von *Hujeirat & Camenzind (2000)* legen nahe, dass die Standardscheibe an ihrem inneren Ende **trunkiert**, also abgeschnitten, ist. Ursache ist die effiziente Kühlung durch Strahlung und die Berücksichtigung der Wärmeleitung im Plasma. Es ist aufgrund dieser Effekte denkbar, dass sich die Standardscheibe gar nicht bis zur marginal stabilen Bahn erstreckt, sondern der Innenrand schon bei **deutlich größeren Radien** liegt. An der Oberfläche von Standardscheiben kommt es durch Fluoreszenz zur Emission charakteristischer Röntgen-K-Linien. Dieser Vorgang ist mit einer Reflexion vergleichbar, wo eine hochenergetische Primärquelle - die Korona - einen kalten 'Spiegel' - die Standardscheibe - beleuchtet. Wie Abbildung 20.19 illustriert, sind heiße, ausgedehnte Korona und kalte, reflektierende Scheibe im Szenario trunkierter Scheiben so weit voneinander entfernt, dass es nicht oder kaum zur Reflexion der Primärstrahlung und der Ausbildung von Eisenlinien kommen

kann. Das würde erklären, weshalb Astronomen in vielen Quellen **keine** Röntgen-K-Linien von Eisen beobachten.

20.31.9 Akkretionsphysik erfordert Supercomputer

Der aktuelle Trend der der Akkretionsphysik bewegt sich aufgrund der rapiden Entwicklung von Computern und numerischen Methoden weg von den analytischen Lösungen. Heutzutage schreiben die Akkretionsphysiker aufwendige Computersoftware, die die komplizierten, nichtlinearen und gekoppelten Gleichungen der Hydrodynamik, Magnetohydrodynamik - sogar schon in Verbindung mit der Allgemeinen Relativitätstheorie oder Strahlungsphysik - *numerisch* löst. Diese wissenschaftliche Software (*Solver*) produziert riesige Datenmengen, die schließlich mit weiteren Computerprogrammen visualisiert werden. Am Ende der aufwendigen Prozedur, die viele Jahre Arbeit und viel Manpower verschlingt, stehen künstliche geschaffene Bilder und Animationen, die z. B. zeigen wie Materie in ein rotierendes Schwarzes Loch hineinfällt. Das **Computerlabor** bietet damit die einzigartige Gelegenheit, kosmische Quellen in allen Einzelheiten zu studieren - mehr noch: Der Theoretiker gibt sogar vor, wie sich die Quelle zu verhalten hat.

20.31.10 Vergleich mit der Beobachtung

Die beobachtende Zunft der Astronomen ist dagegen darauf angewiesen, welches Schauspiel die Natur gerade bietet. Die hochauflösenden Beobachtungstechniken wie VLBI erlauben es bereits, die simulierten Bilder und Spektren mit detaillierten Beobachtungsfotos bzw. Spektren zu vergleichen. Daraus resultiert ein physikalisches Verständnis der kosmischen Himmelsobjekte.

20.31.11 Weitere Informationen

- ◇ Web-Artikel: Akkretionsflüsse um rotierende Schwarze Löcher
- ◇ Sehr verständlicher, externer Web-Artikel von Andreas Müller bei Einstein online (AEI Golm): Glühende Scheiben: Wie Schwarze Löcher ihre Nachbarschaft zum Leuchten bringen

20.32 Starke Wechselwirkung

Die Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung ist gerade die Quantenchromodynamik. Sie erklärt den Zusammenhalt der Nukleonen im Atomkern und den der Nukleonen (Proton und Neutron) selbst. In einer **Theorie der Kernkräfte** gelang es dem Japaner *Hideki Yukawa* (1907 - 1981) die Kräfte zwischen Nukleonen durch den Austausch von Mesonen zu beschreiben, die mit dem Yukawa-Potential verknüpft sind. Alle Mesonenbeiträge formen das charakteristische der Kernkraft.

20.33 Statisches Universum

Ein Universum mit konstantem Weltradius ist statisch - es dehnt sich nicht aus; es fällt nicht in sich zusammen. Diese Modell-Universen waren kurz nach der Formulierung der Allgemeinen Relativitätstheorie besonders erstebenswert für die Kosmologie ab etwa 1917. Vor allem *Albert Einstein* war Verfechter dieser Idee. Ein sich entwickelndes Universum, das sich auszudehnen oder zusammenzuziehen vermag, war jenseits jeder Vorstellung in der damaligen Zeit.

Die Entdeckung der Friedmann-Gleichung, die die **Dynamik des Universums** in Abhängigkeit von ihren Energieinhalten zu beschreiben vermag, gestattete auch dynamische Universen. Erst durch *Vesto Sliphers* und *Edwin Hubbles* Beobachtungen an extragalaktischen Systemen (siehe auch Hubble-Gesetz), die die **Expansion des Kosmos** untermauerten, fanden auch theoretische Modelle Einzug, die dynamisch sind.

Eine Beschreibung in größerem Kontext ist im Eintrag Friedmann-Weltmodelle zu finden.

20.34 Staubtorus

Der Staubtorus (engl. *dusty torus* oder *molecular torus*) ist ein sehr ausgedehntes, schlauchförmiges Gebilde, das sich in Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) weiter außen, bei einigen 10^4 Gravitationsradien bzw. typischerweise auf der pc-Skala befindet. Der Torus befindet sich weit genug weg vom supermassereichen Schwarzen Loch, so dass die Newtonsche Gravitationsphysik vollkommen ausreichend ist, um die Tori physikalisch zu beschreiben.

20.34.1 Eigenschaften des Staubtorus

Der Staubtorus ist recht groß: 10^4 (bei kleinen AGN wie den Seyfert-Galaxien) bis 10^8 Sonnenmassen (bei Quasaren und Blazaren) ist sein Anteil an der gesamten Galaxie. Allerdings findet man ihn nicht in allen Galaxien, wie bisherige Beobachtungen besagen: In elliptischen Galaxien (siehe auch Hubbletyp) beispielsweise ist der Staubtorus sehr schwach ausgeprägt.

Der Staubtorus besteht aus relativ kaltem Material: typische Temperaturen liegen zwischen 100 und 1500 Kelvin. Dieser Temperaturbereich ist so gering, dass sich hier nur einige Moleküle wie PAKs (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), Silikate (Silizium-Sauerstoffverbindungen) und Graphit (Kohlenstoff) nachweisen lassen. Dabei überwiegt der Anteil an Silikaten. Diese Spezies machen sich durch **Molekülllinien** und **Infrarotemission** bemerkbar. Die IR-Emission ist reprozessierte hochenergetische Strahlung (Ultraviolett-, Röntgen-, Gammastrahlung, kurz UVXGamma) aus dem Zentrum des AGN. Sie wird beim **Strahlungstransport** durch den Torus stark abgeschwächt (Extinktion). Dieses Szenario muss man sich so vorstellen, dass energiereiche Strahlung aus dem heißen Zentrum der aktiven Galaxie das kalte Material des Staubtorus erreicht und daran gestreut wird. Bei diesem Streuvorgang verlieren die harten Photonen Energie und werden zu weichen Infrarotphotonen.

Die obere Temperaturgrenze von etwa 1500 Kelvin markiert gerade die Sublimationstemperatur für Staub. Am Innenrand des Staubtorus bildet sich daher eine **Sublimationskante** aus: Die intensive, hochenergetische Strahlung sublimiert das Torusmaterial, d. h. der Aggregatszustand des Staubs ändert sich direkt von fest nach gasförmig (vergleiche Kometenschweif aus sublimiertem Material der Koma). Von einigen nahen Seyfert-Galaxien vom Typ 2 erhofft man sich die Abbildung einer X-förmigen Struktur, die gerade die innere Berandung des Staubtorus in Emission zeigt. Diese Aufnahme soll mithilfe interferometrischer IR-Teleskope (ISO, SIRTF=Spitzer-Teleskop) gemacht werden. Die Morphologie des Staubtorus wird unterschiedlich modelliert: In einem 'patchworkartigen Modell' (engl. *patchy model*) besteht er aus einzelnen, zerrupften Staubwolken, die eine gewisse Transparenz (selbst bei Typ 2) zulassen. Die Alternative besteht in einer axialsymmetrischen Verteilung, die eher opak ist.

20.34.2 Woher kommt der Staub?

Der Staub dieses toroidalen Objekts stammt von den Sternen: rote Riesen und AGB-Sterne (auf dem asymptotischen Riesenast - ***a**symptotic **g**iant **b**ranch* - im HRD) blasen am Ende ihrer Sternentwicklung Materie in das interstellare Medium. Dabei bilden sich die farbenprächtigen Planetarischen Nebel. Viele dieser massearmen Sterne (Massen weniger als etwa 1.2 Sonnenmassen) einer Galaxie haben dieses Stadium bereits hinter sich und haben sich in Weiße Zwerge verwandelt. Die Astronomen gehen davon aus, dass typischerweise 10% aller Sterne Weiße Zwerge sind. Der Staub besitzt auch Drehimpuls weshalb sich unter Annahme eines konstanten, spezifischen Drehimpulses die Geometrie eines Torus ausbildet.

20.34.3 Staubtorus ist nicht stabil

Diese Konfiguration ist allerdings nicht stabil: Die *Papaloizou-Pringle-Instabilität (PPI)* besagt, dass nicht-axiale Störungen kleiner Ordnung jede Toruskonfiguration zerstören. Diese Instabilität wächst auf der dynamischen Zeitskala (Keplerrotation am Torusinnenrand, Schalllaufzeit vom Innenrand zum Zentrum) an. Das sind entsprechend für Staubtori Zeitskalen von etwa 100 Millionen Jahren.

Tori sind daher *generell keine* stabilen Konfigurationen. Eine weitere Instabilität, die magnetische Rotationsinstabilität (engl. *magneto-rotational instability*, MRI oder *Balbus-Hawley-Instabilität*), sorgt ebenso für eine Störung des Torus. Bei dieser Instabilität sind schwache (interstellare) Magnetfelder involviert, die aufgrund der differenziellen Rotation magnetische Turbulenz treiben.

Die Instabilitäten bewirken letztendlich die Akkretion auf das zentrale Objekt, das supermassereiche Schwarze Loch. Denn eine wesentliche Konsequenz der Instabilitäten ist der effiziente **Drehimpulstransport**. Er ist Voraussetzung dafür, dass überhaupt Material ins Zentrum der Galaxie fällt. Sonst würde es nämlich an der Drehimpulsbarriere reflektiert werden. Als Folge dieser Prozesse bildet sich inwärts an den Staubtorus die so genannte Standardscheibe aus. Durch effiziente Strahlungskühlung ist sie vertikal kollabiert - Astrophysiker sagen *geometrisch dünn* - und optisch dick.

20.34.4 Staubtorus bewirkt zwei Galaxientypen: Typ-1 und Typ-2

Bei den AGN-Typen, vor allem den **Seyfert-Galaxien** und den Quasaren, sorgt der Staubtorus für die bekannte Zweiteilung (*Dichotomie*) in Typ 1 und 2: Bei Typ-1 schaut der Beobachter von oben, mehr oder weniger entlang der Symmetrieachse der Galaxie, in den Bereich verbreiterter Linien (engl. *Broad Line Region*, BLR). Die auffällige Linienverbreiterung ist kinematisch bedingt und stammt von turbulentem, schnell strömendem Plasma, das sich mit Geschwindigkeiten bis zu 10 000 km/s um das Zentrum bewegt. Die Neigung des Systems (Inklination) bewegt sich also von etwa 0° (engl. Fachbegriff *face-on*) bis etwa 35°. Bei Typ-2 schaut man genau auf den Staubtorus, so dass die BLR und das Zentrum der Galaxie verborgen sind und nicht optisch identifiziert werden kann. Nur die Gebiete enger Linien (engl. *Narrow Line Region*, NLR) kann beobachtet werden. Hier hat das Gas nur noch Geschwindigkeiten von 300 bis 1000 km/s. Die Inklinationen dieser Systeme sind von etwa 35° bis 90° (engl. Terminus *edge-on*). Astronomen unterscheiden auch intermediäre Typen von Seyfert-Galaxien (also z. B. 1.3 oder 1.7), je nach ihrem gemessenen Neigungswinkel.

Es handelt sich bei dem gerade beschriebenen Sachverhalt um eine **geometrisches Unifikationsmodell der AGN**, das auf *Antonucci & Miller* (1985) zurückgeht. Unter dem Eintrag Quasar wird diskutiert, dass es neuerdings Anzeichen gibt, dass diese geometrische Interpretation von Typ-1 und Typ-2 eine zu starke Vereinfachung sein könnte.

20.34.5 Belege für den Staubtorus

Der einwandfreie Nachweis des Staubtorus ist durchaus nicht so trivial. Es gibt ein schönes Musterbeispiel, wo der Nachweis gelungen ist. Die Abbildung 20.20 zeigt eine Beobachtung des Weltraumteleskops *Hubble*, die die Existenz des Staubes in der Spiralgalaxie M51 verrät. Die Staubinformation steckt in der **auffälligen X-Struktur**. Je ein Strich des X kommt von einer Staubscheibe/einem Staubtorus. Es ist nicht klar, weshalb mindestens einer der Staubtori so ungewöhnlich orientiert ist - nämlich senkrecht zur Scheibenebene der Spiralgalaxie. Auch ist nicht klar, warum überhaupt ein zweites großes Staubreservoir existiert.

Das zentrale supermassereiche Schwarze Loch (*supermassive black hole*, SMBH) sitzt vermutlich genau am Kreuzungspunkt des X. Es hat eine Masse von etwa einer Million Sonnenmassen und hat damit nur ein Drittel der Masse des Galaktischen superschweren Loches bei Sgr A* (Credit: *Ford et al.* 1992, STScI/NASA).

Im Jahr 2005 berichteten die Infrarotastronomen von Beobachtungen an Quasaren mit dem IR-Weltraumteleskop *Spitzer*, die das geometrische AGN-Unifikationsmodell stützen (*Siebenmorgen et al.*, astro-ph/0504263). Sie untersuchten eine starke Spektrallinie des Elements Silizium, die bei 10 Mikrometern zu beobachten ist (*10 micron feature*). Die Spektrallinie kann entweder in Emission oder in Absorption beobachtet werden. Mit Spitzer detektierten die Infrarotastronomen die Linie **bei AGN Typ-1 in Emission** und **bei AGN Typ-2 in Absorption**. Das ist geometrisch leicht zu erklären: Je nach Orientierung des Staubtorus zum Beobachter wird die hochenergetische UVXGamma-Strahlung aus dem Zentrum des AGN am Staubtorus reflektiert, so dass die Siliziumlinie in Emission im Spektrum auftaucht; oder sie wird durch den Torus gestreut, so dass der Astronom sie in Absorption sieht. Es

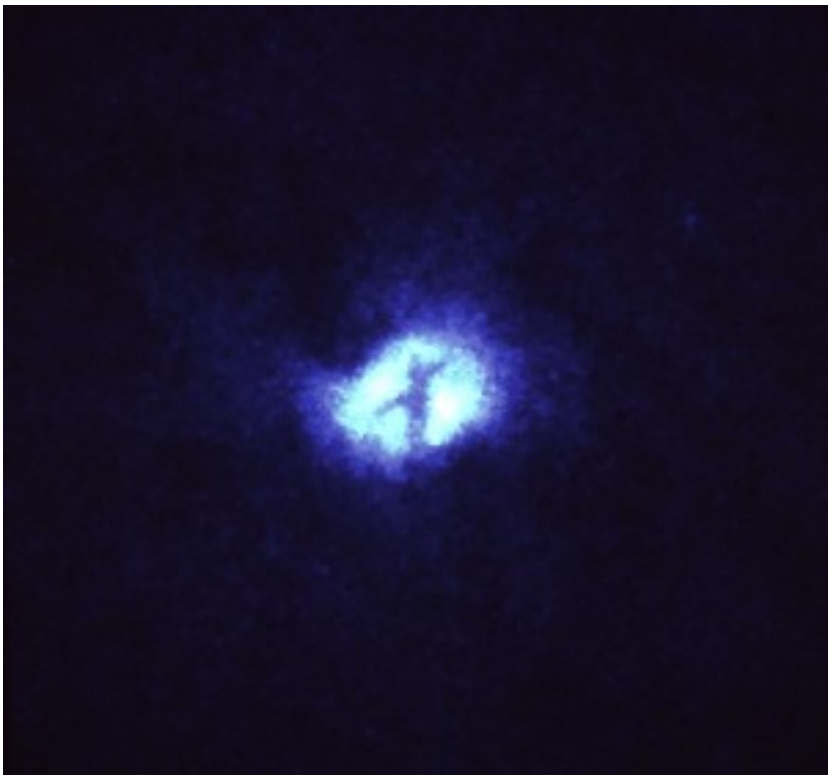

Abbildung 20.20: Staubtorus: Staubabsorption formt ein Kreuz inmitten von M51, beobachtet mit dem HST.

war nur eine kleine Anzahl von AGN, die untersucht wurden, aber die Beobachtungen unterstützen das geometrische Unifikationsmodell.

20.35 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Siehe im Zusammenhang unter Planckscher Strahler.

20.36 stellare Schwarze Löcher

Schwarze Löcher treten auf sehr vielfältige Weise im Universum in Erscheinung. Ein Kriterium, um diese Löcher zu klassifizieren ist die Masse bzw. ihre kosmische Entwicklung. Die stellaren Schwarze Löcher sind in dieser Hinsicht etwa so schwer wie Sterne, genauer zwischen drei und etwa hundert Sonnenmassen. In diesem Sinne sind sie als *stellar* zu verstehen. Ansonsten unterscheiden sich stellare Schwarze Löcher extrem von Sternen. Andere Klassen von Schwarzen Löchern sind die Mini-Löcher, die primordialen Schwarzen Löcher, mittelschwere Schwarze Löcher (*intermediate-mass black holes*) und supermassereiche Schwarze Löcher.

20.36.1 So entsteht ein stellares Schwarzes Loch

Im Rahmen der Sternentwicklung wandeln die Sterne in verschiedenen Umsetzungszyklen (pp-Kette, CNO-Zyklus etc.) allmählich den nuklearen Brennstoff aus leichten chemischen Elementen in schwere Elemente um. Dies geschieht im heißen Innern über die thermonuklearen Fusionsreaktionen. Dabei entsteht nicht nur Wärme, sondern vor allem auch das charakteristische Sternenlicht, die Leuchtkraft des Sterns. So könnte es ewig weitergehen, wäre da nicht eine natürliche, kernphysikalische Grenze bei dem etwa mittelschweren Element Eisen: Bei der Fusion dieses Elements wird *keine* Energie mehr frei, so dass nun das hydrostatisches Gleichgewicht des Sterns empfindlich gestört wird, weil die zentrale Energiequelle versiegt. So tritt der Gravitationskollaps ein und der Stern fällt in sich zusammen.

Am Ende dieses Kollapses steht eine Endkonfiguration, die sehr kompakt ist. Wie sie genau beschaffen ist, hängt im Wesentlichen von der Restmasse des Vorläufersterns ab. In der Astronomie unterscheidet man folgende kompakte Objekte:

- ◇ Weißer Zwerg (engl. *white dwarf*, WD),
- ◇ Neutronenstern (engl. *neutron star*, NS),
- ◇ und stellares Schwarzes Loch (engl. *black hole*, BH)

Neben diesen klassischen drei Vertretern, könnten sich zukünftig die hypothetischen Typen Quarkstern (engl. *quark star*, QS), seltsamer Stern, Gravastern (engl. *gravastar*) und Holostern (engl. *holostar*) als Alternativen bewähren.

20.36.2 gewaltige Sternexplosionen

Bei ausreichend hoher Masse des Vorläufersterns ist der Kollaps und die Verwandlung in einem katastrophalen Ereignis in weiten Teilen des Universums zu sehen. Denn die kollabierenden Sternhüllen werden am kompakten Sternkern reflektiert und treiben eine heftige Sternexplosion: eine Supernova oder eine Hypernova bzw. einen Gammastrahlenausbruch. Hier wird ein Teil des kollabierenden Sterns wieder in den interstellaren Raum geblasen, während der Sternkern im freien Fall in sich zusammenfällt. Bei diesen Sternexplosionen überstrahlt der sterbende Stern für kurze Zeit die Galaxie, in der er sich befindet!

20.36.3 Der ultimative Sieg der Gravitation: ein Loch entsteht

Welche neue Gestalt der Sternkern hat, entscheidet seine Masse. Der Kollaps kann durch Drücke aufgehalten werden, die nur mit der Quantentheorie (nämlich dem Pauli-Prinzip) zu verstehen sind. So kann der **Entartungsdruck** der Fermionen (Elektronen bei WD, Neutronen bei NS) zur Stabilisierung des Kollapsars führen; überschreitet die Kollapsmaterie eine Masse von **etwa drei Sonnenmassen**, so ist die Bildung eines stellaren Schwarzen Loches unausweichlich!

20.36.4 Eigenschaften des stellaren Loches

Es ist auf der Basis des Drehimpulserhaltungssatzes der Physik anzunehmen, dass sich die Rotation des Vorläufersterns auf das Loch überträgt. Ein rotierendes Schwarzes Loch wird in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie als rotierende Raumzeit beschrieben. Hier verwenden die Theoretiker im Speziellen die Kerr-Lösung. Diese Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen hat nur zwei Eigenschaften: **Masse und Drehimpuls** (= Rotation). Alle anderen 'Haare' (siehe Keine-Haare-Theorem) des Vorläufersterns werden durch die Emission von Gravitationswellen abgestrahlt.

20.36.5 Wo gibt es stellare Löcher?

Stellare Schwarze Löcher sind in der Milchstraße häufig anzutreffen, und es gibt sehr gute Kandidaten, die vielerorts als Röntgendoppelsterne in Erscheinung treten. Von diesen Röntgendoppelsternen mit Schwarzem Loch (*black hole X-ray binary*, BHXB) kennen die Astronomen derzeit etwa 40 Stück in unserer Heimatgalaxie (*McClintock et al.*, ApJ 2006) - sicherlich gibt davon tausende. Es muss sie aber auch in anderen Galaxien in großer Zahl geben!.

In einem BHXB bilden stellare Schwarze Löcher eine Partnerschaft mit einem 'normalen' Stern. Es gibt nicht nur Doppel-, sondern auch Mehrfachsternsysteme. Ist der Begleiter ein Riesenstern, so kann es zur Überschreitung des Roche-Volumens kommen. Dann findet ein Massentransfer über den inneren Lagrange-Punkt auf die kompakte Komponente, das Loch, statt. Auf diese Weise wird das Schwarze Loch von seinem Wirtsstern gefüttert und durch Akkretion aktiv.

20.36.6 einige Quellennamen von stellaren Löchern

Zu den Galaktischen Schwarzen Löcher (engl. *Galactic Black Holes*, GBHs) zählen beispielsweise

- das historisch zuerst entdeckte Schwarze Loch Cyg X-1,
- das nächstgelegene kosmische Schwarze Loch überhaupt: XTE J1118+480,
- Cyg X-3, wie Cyg X-1 im Sternbild *Schwan* (international: *Cygnus*),
- das mit 14 Sonnenmassen bislang schwerste stellare Schwarze Loch in GRS 1915+105, das auch nahe am Maximalwert rotiert.

20.36.7 Jets von stellaren Löchern

In Analogie zu den Quasaren, die leuchtkräftigste Variante Aktiver Galaktischer Kerne, nennt man einige Röntgendoppelsterne wie GRS 1915+105 Mikroquasare. Sie zeigen wie ihre gigantischen Brüder relativistische, radiolaute Jets.

20.36.8 Ursprung der Röntgenstrahlung

Die starke Röntgenemission ist eine Folge der Materieaufsammlung (*Akkretion*) des Schwarzen Lochs. In der Regel bildet sich bei der Akkretion eine undurchsichtige (Astronomenjargon: *optisch dicke*) Standardscheibe aus. Die Scheibe strahlt **Wärmestrahlung** ab, die wegen der enormen Temperaturen im inneren Bereich der Scheibe im Röntgenbereich liegt. Das ist gerade die Röntgenstrahlung der BHXBs. Die Scheibe reicht nach innen bis zur so genannten marginal stabilen Bahn. Dieser Innenrand

ist näher beim Loch, wenn es rotiert. Die Röntgenstrahlung wird umso energiereicher (*härter*), wenn der Innenrand näher am Loch liegt. Auf diese Weise nutzen Röntgenastronomen die Röntgenstrahlung, um die Eigenschaften der Akkretionsscheibe und die Lochrotation zu messen. Eine weitere Methode, die diese Eigenschaften zu bestimmen erlaubt, ist die Analyse von Eisenlinien. Sie werden jedoch nicht von allen Quellen ausgesandt.

Letztendlich fällt das meiste akkretierte Materiel in das 'Nadelöhr Loch'. Das kompakte Gebiet wird dabei stark aufheizt und setzt neben der hochenergetischen, thermischen Strahlung (Planckscher Strahler) auch **nicht-thermische Strahlung** wie Synchrotronstrahlung frei. Außerdem zeigen sich in den Spektren Comptonisierte Kontinua: weiche Strahlung aus der Umgebung (Scheibe, Hintergrundstrahlung) wird hier durch inverse Compton-Streuung in harte Strahlung verwandelt. So entstehen die harten Röntgen- und Gammaspektren.

Je nachdem, wie viel Futter das Loch pro Zeit erhält (wie groß demnach die *Akkretionsrate* ist) können sich innen auch andere Akkretionsflüsse ausbilden. Einer davon ist der advektionsdominierte Akkretionsfluss oder ADAF, der räumlich ausgedehnt und evaporiert ist. Im Gegensatz zur Standardscheibe ist er auch durchsichtig (*optisch dünn*) und kann die Funktion einer Korona übernehmen.

20.36.9 kleine und große Löcher sind verwandt

Die Akkretionsphysik ist bei *allen* Schwarzen Löchern - egal wie schwer - ähnlich. Die Astrophysiker versuchen alle Löcher mit einer **einheitlichen Physik** zu beschreiben. Durch die Materieaufsammlung wächst das Loch: die Masse wird größer und damit auch der Einflussbereich des Loches (z. B. der Ereignishorizont). Ein Teil der einfallenden Materie wird jedoch wieder vom Loch als Jets und Winde herausgeschleudert.

Die Verwandtschaft von stellaren und supermassereichen Schwarze Löcher konnte anhand charakteristischer Zeitskalen in Variationen der Röntgenstrahlung demonstriert werden (*McHardy et al.*, Nature **444**, 730, 2006). Der Schlüssel für diese Entdeckung bestand darin, dass die zeitlichen Variationen um die Akkretionsrate korrigiert werden müssen, bevor man leichte und schwere Löcher vergleicht.

20.37 Stern

Die Sterne sind die ureigenen Forschungsobjekte der Astronomie. Neben dem Erdmond und den hellsten Planeten sind sie der visuellen Beobachtung sehr einfach zugänglich. Der 'Stern vor unserer Haustür' ist die Sonne. Das Bild 20.21 zeigt eine Beobachtung des Sonnenobservatoriums SOHO im UV-Licht des einfach ionisierten Heliums (HeII), aufgenommen 1997 (Credit: SOHO/EIT, ESA & NASA, 1997). Die Sonnengranulation, Eruptionen und eine Protuberanz links unten sind deutlich zu erkennen. Das Sonnenlicht benötigt von der Oberfläche unseres Heimatgestirns nur gut 8 Minuten bis zur Erde. Die Sonne ist der am besten untersuchte Stern. Es verwundert kaum, dass deshalb die Anfänge der Astronomie von der **Stellarphysik** geprägt waren.

20.37.1 Zum Begriff Stern

Der Begriff Stern im landläufigen Sinne umfasst alles, was am Nachthimmel als helles (mit bloßem Auge punktförmiges) Objekt erscheint, also auch die helleren Planeten des Sonnensystems.

Sterne im engeren Sinne der Astrophysik sind jedoch näherungsweise kugelförmige Ansammlungen von ionisiertem Gas, das durch thermonukleare Fusionsprozesse Energie vor allem in Form von elektromagnetischer Strahlung freisetzt. Die häufig zu lesende Definition eines Sterns als 'selbstleuchtendes Objekt' (wohingegen Planeten nur angestrahlt werden und diese Strahlung reflektieren) ist kritisch, denn die Thermodynamik lehrt, dass **alle Objekte** strahlen, weil sie eine endliche Temperatur aufweisen: Es sind Wärmestrahler (Planck-Strahler). So erzeugen schon die inneren Gasplaneten, Jupiter und Saturn, mehr eigene Strahlungsenergie, als sie von der weit entfernten

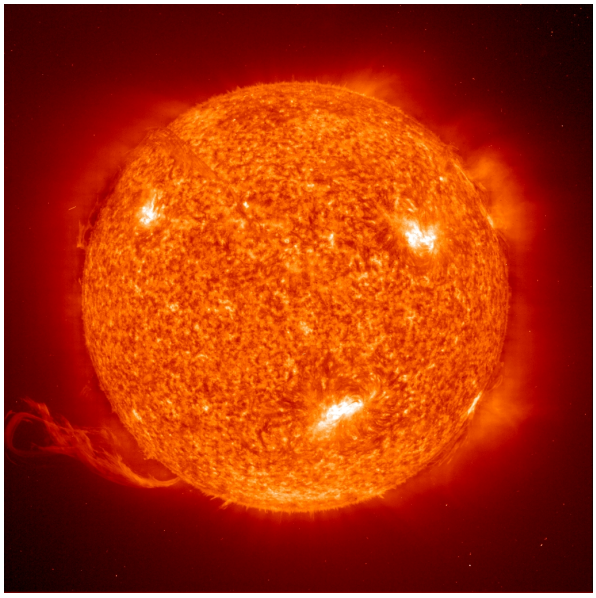

Abbildung 20.21: Sonne im Licht von Helium-II, beobachtet mit SOHO.

Sonne erhalten. Sterne in der besseren Definition sind also kosmische Fusionsreaktoren, in denen leichte Elemente zu schweren fusioniert werden. Astrophysiker sprechen in diesem Zusammenhang gerne vom *Brennen*, was chemisch nicht ganz korrekt ist. Gemeint ist immer eine Verschmelzung von Atomkernen - die stellare Nukleosynthese.

Nach dieser engeren Definition sind Braune Zwerge *keine* Sterne, sondern eher verwandt mit Planeten. Dies brachte ihnen auch den Namen 'Jupiters' ein, weil sie nur wenige Vielfache schwerer sind als der größte der Gasplaneten im Sonnensystem. Braune Zwerge gewinnen ihre geringe Strahlungsenergie nicht aus der Fusion, dazu sind sie zu leicht, sondern aus der Kompression von Gas.

20.37.2 Auf einen Stern wirken folgende Kräfte

- ihre eigene Gewichtskraft, also die **Gravitation**,
- der **Gasdruck**, der durch eine Zustandsgleichung für das Gas gegeben ist,
- die **Zentrifugalkraft**, weil der Stern rotiert,
- der **Strahlungsdruck**, weil im Innern des Sterns thermonukleare Fusionsprozesse ablaufen, die Photonen unterschiedlicher Energie freisetzen. Photonen haben einen Impuls und üben entsprechend einen Druck auf eine Fläche aus. Die aus der Fusion gewonnene Strahlung wandert durch das Plasma des Sterns, wird dabei gestreut, absorbiert und reemittiert und erreicht irgendwann seine Oberfläche (hydrodynamisches Strahlungstransportproblem). Diese Grenzschicht nennt man *Photosphäre*, weil hier die Photonen den Bereich des Sterns verlassen. Tagsüber sehen wir bei guten Sichtverhältnissen die dünne Photosphäre der Sonne als helle Berandungsfläche (Besser mit Schutzbrille beobachten!).

20.37.3 hydrostatisches Gleichgewicht

Eine Bilanz aller Kräfte (oder alternativ Drücke) im Stern führt auf eine Bedingung für das hydrostatische Gleichgewicht. In vielen Fällen befindet sich der Stern in einem stationären Zustand

und verändert sich in seiner äußeren Gestalt kaum. Dies gilt insbesondere für die Hauptreihensterne (engl. *main sequence stars*).

20.37.4 Das Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne

Diese Bezeichnung rührt daher, weil viele beobachtete Sterne in einer Auftragung ihrer Leuchtkraft über ihrer (effektiven) Oberflächentemperatur eine von links oben nach rechts unten verlaufende Linie bevölkern. Diese Form der Auftragung heißt Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) und ist fundamental in der Stellarphysik. Die charakteristische Linie heißt *Hauptreihe*. Alternativ kann im Diagramm anstelle der Effektivtemperatur die Spektralklasse auf der Abszisse (x-Achse) aufgetragen werden. Das HRD war historisch zunächst eine Darstellung von Helligkeit über der Farbe des Sterns, die etwas einfacher der damaligen visuellen Beobachtung zugänglich waren.

Es gibt aber auch Sterne, die sich in einem sehr dynamischen Zustand befinden und **pulsieren**: Der Sternradius oszilliert, oft auch mit regelmäßigen Perioden, wie es bei den Cepheiden oder den RR Lyrae-Sternen der Fall ist. Diese Objekte findet man auf dem so genannten Instabilitätsast im HRD. Dieser Typus von Pulsationsveränderlichen zeigt eine variable Leuchtkraft, weil seine Oberfläche schwingt.

20.37.5 Sterne - nach Alter sortiert

Eine Klassifikation von Sternen ist im Rahmen der Sternentwicklung nach ihrem **Alter** möglich. Am Anfang stehen die Protosterne und die YSOs. Dann folgt ein Zustand, der als eher 'ruhige Phase' charakterisiert werden kann (was von sonnenartigen Sternen mittleren Alters anzunehmen ist) oder sehr dynamisch sein kann, wie bei den Pulsationsveränderlichen. Bestimmte Sterne kommen auch in ein Stadium, das man als Roten Riesen bezeichnet. Dabei bläht sich der Stern um ein Vielfaches auf. Diese Phase wird auch die Sonne in einigen Milliarden Jahren durchlaufen und sich dabei die inneren Planeten Merkur und Venus einverleiben. Auf der Erde wird es dann so ungemütlich heiß, dass sogar die Ozeane verdampfen!

20.37.6 Vom Schicksal der Sterne

Am Ende der Sternentwicklung stehen zwei Möglichkeiten, die von der **Sternmasse** abhängen. Entweder gibt es ein spektakuläres Finale in Form einer Sternexplosion - einer Supernova, einer Hypernova oder einem Gamma Ray Burst, was nur massereichen Sternen vorbehalten ist. Oder der Stern streift seine äußeren Hüllen nach dem Rote-Riesen-Stadium (Post-AGB-Phase) ab und bildet dabei einen farbenprächtigen, **planetarischen Nebel** aus, in dessen Zentrum ein Weißer Zwerg sitzt. Das letzte Szenario gilt für masseärmere, sonnenartige Sterne.

Die Endkonfiguration eines Sterns wird ebenfalls im Wesentlichen von der **Masse des Vorläufersterns** bestimmt. Entweder die Konfiguration wird in der Supernova vollständig zerrissen, so dass kein Relikt, sondern nur verteilte 'Asche' übrig bleibt oder es bildet sich ein kompaktes Objekt aus. Massearme Sterne werden zu Weißen Zwergen, was von der Sonne in etwa 6 Milliarden Jahren zu erwarten ist (dann geht der 'Brennstoff' für die Fusion aus). Massereichere Sterne enden mit steigender Ausgangsmasse als Neutronenstern, eventuell auch als Quarkstern, als stellares Schwarzes Loch oder - alternativ zu letztgenannten - als Gravastern oder Holostern, sollten diese Raumzeiten tatsächlich in der Natur realisiert sein.

Kein Stern durchläuft alle diese Phasen! Im Wesentlichen bestimmt seine Masse sein Schicksal und an welchen der oben genannten Phasen bzw. Klassifizierungen er teilnimmt. Daraus kann man zu einer Vorstellung über die Entwicklung von Sternen gelangen und vollständige Entwicklungspfade von 'Sternengeburt' bis 'Sternentod' im HRD eintragen.

20.37.7 Sternpopulationen

Eine weitere Klassifikation von Sternen gelingt über deren Gehalt an Metallen bzw. deren Position in ihrer Galaxie (Bulge, Scheibe oder Halo): Die Population unterscheidet dann **drei Sternpopulationen**. Dies entspricht einer zeitlichen Einordnung von Sternen im Rahmen der Kosmologie. PopIII-Sterne gehören in dieser Terminologie zu der **ersten Generation von Sternen** im Universum.

20.37.8 Zustandsgrößen von Sternen

Unter dem Eintrag Zustandsgröße werden wichtige stellare Merkmale vorgestellt, die ihre Charakterisierung und Klassifikation erlauben. Der wichtigste Parameter eines Sterns ist seine **Masse**, weil sie über die weitere Entwicklung und das Ende des Sterns entscheidet. Die Grenzmasse zur thermonuklearen Fusion von Wasserstoff darf sogar als Definitionskriterium für einen Stern herangezogen werden, wie eingangs beschrieben wurde.

20.37.9 aktuelle Forschung

Die Stellarphysik ist zwar eine klassische Disziplin der Astronomie, dennoch sind eine Reihe von Fragen rund um Sterne nicht vollends geklärt: So ist beispielsweise unklar, **wie schwer** Sterne prinzipiell werden können. Diese Frage hängt mit einer weiteren Herausforderung zusammen, nämlich **wie die ersten Sterne im Kosmos entstanden** (PopIII, s. o.). Ebenso neu ist die Erkenntnis, dass die **Masse-Leuchtkraft-Relation** massearmer Sterne bisher falsch bewertet wurde. Zu diesen Themen gibt es ebenfalls Beschreibungen im Eintrag Zustandsgröße.

20.38 Sternentstehung

Die Sternentstehung behandelt wohl eine der fundamentalen Fragen der Astronomie:

Woher kommen die hellen Lichtpunkte an der Himmelssphäre?

20.38.1 HRD - ein nützliches Entwicklungsdiagramm

Die Sterne durchlaufen in ihrem 'Leben' eine Reihe von Stadien, die auch in der Regel einen eigenen Namen erhalten haben. Eine Einordnung und übersichtliche Darstellung der **Sternentwicklung** gelingt durch Pfade im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD). Doch bevor die Sterne auf die Hauptreihe gelangen (was die meisten Sterne auch tun), hat man es mit sehr jungen Objekten zu tun: mit Protosternen und YSOs. Es soll nun dargestellt werden, wie und unter welchen Voraussetzungen diese Objekte entstehen.

20.38.2 Das Jeans-Kriterium

Das physikalische Kriterium für die Entstehung eines Sterns ist die Jeans-Masse. Diese Grenzmasse legt fest, bei welchen Dichten, Temperaturen und astrochemischen Voraussetzungen eine Ausgangsmasse, z. B. eine Gaswolke, gravitativ instabil wird und kollabiert. Dabei zeigt sich, dass nicht *eine* Wolke zu *einem* Stern kollabiert, sondern eine riesige Gaswolke von etwa 3000 Sonnenmassen gravitativ instabil wird, kollabiert und schließlich in kleinere Klumpen zerbricht - sie **fragmentiert**, wie die Astrophysiker sagen. Erst diese Fragmente bilden die Ausgangsobjekte (engl. *building blocks*) für die Protosterne. Dies belegen auch komplexe Simulationen mit dem Zugang der SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*).

Der Zahlenwert von 3000 Sonnenmassen ergibt sich gerade bei Zugrundelegung typischer Verhältnisse im interstellaren Medium (ISM): Dichten von 1 cm^{-3} und tiefen Temperaturen von etwa 10 K.

Bei einer Temperatur von 100 K erhält man eine Jeans-Masse von 100 000 Sonnenmassen. Diese Masse ist vergleichbar mit der Masse der Kugelsternhaufen.

20.38.3 Riesenmolekülwolken: Brutstätten der Sterne

Die Gaswolken kennt man auch unter der Bezeichnung **Riesenmolekülwolken** (engl. *giant molecular clouds*, GMCs). Ihre Ausdehnung sind typischerweise bei etwa 300 Lichtjahren. Sie befinden sich vor allem in den Spiralarmen von Galaxien und sind mit 10 bis 20 K extrem kalt. Aus diesem Grund liegt hier der **Wasserstoff in molekularer Form** (H_2) vor. Daneben gibt es weitere Moleküle wie Kohlenmonoxid (CO), Schwefelkohlenstoff (CS) und Ammoniak (NH_3), was die Astronomen spektroskopisch anhand molekularer Spektrallinien nachgewiesen haben. Dieses Material befindet sich in **dichten Kernen** der GMCs und hat eine wesentlich kleinere Jeans-Masse von **etwa einer Sonnenmasse**! Dies könnte also den Kollaps zu sonnenartigen Sternen erklären.

Das Wasserstoffmolekül kann durch Hitze oder Strahlung wieder in seine Bestandteile zerlegt werden (*Dissoziation*). Molekularer Wasserstoff dissoziiert erst bei einer Energie von 4.478 eV pro Molekül, entsprechend einer hohen Temperatur von 2000 K. Diese Temperaturen werden erst dann erreicht, wenn die molekularen Kerne der GMCs isotherm kollabieren und sich schließlich adiabatisch erhitzen. Der Staub geht dann direkt von der festen in die gasförmige Phase über (*Sublimation*). Unter diesen Voraussetzungen setzt der Kollaps auf den Protostern ein.

20.38.4 junge Sterne verstecken sich

Die astronomischen Beobachter haben bei den Protosternen immer das Problem, dass diese eingebettet sind in Gaswolken, aus denen sie entstehen. Der kalte Staub besitzt eine sehr hohe Opazität, so dass die Wolke eine optisch dicke Region darstellt. Diese **Dunkelwolken** weisen so hohe Extinktionen auf, dass keine Chance besteht, die Protosterne in ihren frühen Phasen (Klasse 0 YSOs) optisch zu detektieren. Meist weichen die Astronomen dann auf Infrarotstrahlung aus, die durch den Staub durchgelassen wird. Im Eintrag Extinktion gibt es dafür zwei schöne Nebelbeispiele, und im Eintrag Lokale Gruppe befindet sich in dieser Hinsicht eine interessante Gegenüberstellung von optischer und infraroter Aufnahme der *Großen Magellanischen Wolke* (**LMC**).

Hier betrachten wir Foto 20.22, das von lähmender Schönheit ist. Das Foto ist ein direkter Blick in einen 'Sternenkinderstube' und wurde mit dem Weltraumteleskop Hubble aufgenommen (Credit: NASA/ESA, *J.M. Apellaniz*, 2007). Im Bild links sieht man das typische Aussehen einer Sternentstehungsregion: ein heller Emissionsnebel (NGC 6357) wird von Dunkelwolken aus Staub durchzogen, in deren Innern verborgen die Sterne entstehen. Rechts vom Nebel befindet sich eine 'Kinderschar' von Sternen, die sich bereits durch ihren heftigen Strahlungsdruck vom umgebenden Material befreien konnte. Es ist der *offene Sternhaufen* mit der Bezeichnung *Pismis 24*. Die jungen Sterne rechts verursachen gerade das helle Leuchten des Emissionsnebels links, weil sie mit ihrer hochenergetischen Strahlung das Nebelmaterial zum Leuchten anregen. Die Region um Pismis 24 offenbart nicht nur eine faszinierende Schönheit der Natur - sie ist auch aus astrophysikalischer Sicht hochinteressant. Denn der hellste Stern im offenen Sternhaufen ist der bislang **massereichste Stern der Milchstraße**: die Beobachtungen ergeben zusammen mit den Sternmodellen eine Masse von etwa 200 Sonnenmassen! Damit übertrumpft dieser Superstern sogar η Carinae.

20.38.5 auch junge Sterne geben Röntgenstrahlen ab!

Mit der oben beschrieben Staubsublimation bei etwa 1500 K, fällt die Opazität rasant ab (*Opazitätslücke*). Jetzt kann Akkretion einsetzen, was den Protostern mit Materie anreichert. An der Oberfläche bilden sich durch die Abbremsung akkretierten Materials Schockfronten aus, die sehr hohe Temperaturen von bis zu einer Million Kelvin erzeugen (beobachtete, thermische **Röntgenemission** der Klasse 1 YSOs)! Die harten Photonen dieses Planckspektrums passieren ungehindert die Opazitätslücke und treffen auf weiter außen liegenden Staub. Dort werden sie wieder absorbiert und als weiche Infrarotphotonen reemittiert (Staubkühlung). Protosterne sind also typischerweise hinter

Abbildung 20.22: Der offene Sternhaufen *Pismis 24* mit massereichen, jungen Sternen (rechts) und der Emissionsnebel NGC 6357 (links); HST 2006.

einer Staubhülle (*dust envelope*) verborgen und treten erst optisch in Erscheinung, wenn diese durch stellare Aktivität (Strahlungsdruck aus Brennzyklen) weggeblasen werden. Dann beginnt die typische Phase der T Tauri-Sterne.

Der **Drehimpuls** des akkretierten Materials und des Protosterns flacht das Gebilde geometrisch zu einer Scheibe ab. Die Staubscheibe ist charakteristisch für T Tauri-Sterne, wird jedoch sukzessive durch Strahlungsdruck und Teilchenwind abgetragen.

20.39 Strange Star

Ein besonderer, hypothetischer Quarkstern, der aus **Strange-Materie** besteht, also aus gleichen Anteilen u-, d- und s-Quarks. Die deutsche Bezeichnung ist seltsamer Stern (siehe dort für weitere Details).

Seltsam sind diese Sterne in der Tat, doch bezieht sich *seltsam* auf die Quanteneigenschaft (Quantenzahl) **Seltsamkeit**.

20.40 Stringtheorien

Die Stringtheorie (engl. *string theory*) ist eine Theorie, die Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte beschreibt. Dabei zielt sie insbesondere auf eine Unifikation ab, d. h. es wird der Versuch unternommen, die fundamentalen Naturkräfte in einem einheitlichen Bild zu beschreiben. Weil dabei auch die Gravitation sowie die Quantisierung berücksichtigt werden, ist die Stringtheorie auch eine Variante einer Quantengravitation.

20.40.1 Warum String?

Etymologisch geht die Bezeichnung *Stringtheorie* (engl. *string*: Saite) darauf zurück, dass in der Theorie zunächst nur eindimensionale, fadenförmige Gebilde eine besondere Rolle spielten. Das Anregungsspektrum dieser schwingungsfähigen Objekte wurde mit den bekannten Elementarteilchen des Standardmodells in Verbindung gebracht: je nach Schwingungszustand sollte der String ein bestimmtes Teilchen repräsentieren.

20.40.2 Geschichtliches

Die Entwicklung der Stringtheorien war historisch betrachtet nicht geradeaus, sondern - wie bei der Quantentheorie auch - sprunghaft und über Umwege. Die Forschung dauert an, und so werden immer wieder neue Erkenntnisse zu den Stringtheorien veröffentlicht. Die Stringtheorien wurden in den 1960er Jahren bei der Diskussion der Streumatrix-Theorie motiviert, enthalten aber auch wesentliche Erkenntnisse, die die **Kaluza-Klein-Theorie** bereits in den 1920er Jahren offen legte - so z. B. die Kompaktifizierung.

Die historische Urform der Stringtheorie ist die **bosonische Stringtheorie**. Sie wurde Ende der 1960er und in den 1970er Jahren entwickelt, um die starke Wechselwirkung mit quantenmechanischen Strings zu beschreiben. Diese Theorie hat 26 Dimensionen, 25 Raum- und eine Zeitdimension! Diese Stringtheorie beschreibt nur Bosonen und damit vor allem die Kräfte in der Natur, die durch Bosonen vermittelt werden. Fermionen (z. B. Elektronen, Quarks und Neutronen sind Fermionen) sind leider nicht enthalten. Eine weitere Unzulänglichkeit ist, dass die bosonische Stringtheorie Teilchen mit imaginärer Masse hervorbringt, die Tachyonen. Solche Teilchen wurden nie beobachtet und würden fundamentale Probleme in der Physik hervorrufen, z. B. mit der Kausalität. All diese Probleme der bosonischen Stringtheorie einerseits und die Erfolge der Quantenchromodynamik bei der Beschreibung der starken Wechselwirkung andererseits, führten schließlich zur Aufgabe dieser ersten Version der Stringtheorie.

Die 1970er Jahre waren ausgezeichnet durch die Vermutung, dass die Stringtheorien alle vier Wechselwirkungen in der Natur vereinigen könnten - siehe auch **Vereinheitlichung**. Eine

überraschende Entdeckung war, dass in den Stringtheorien so genannte **Spin-2-Anregungen** (Tensorbosonen) auftraten, die die Physiker gerade mit dem Austauschquant der Gravitation, dem (hypothetischen) Graviton, in Verbindung bringen. Anfangs hatten die Stringtheorien oft phänomenologische und semi-klassische Grundzüge, aber auch der Formalismus der erfolgreichen Quantenfeldtheorien wurde benutzt. Mitte der 1980er Jahre stellte sich heraus, dass nicht nur Strings als Fäden, sondern auch höherdimensionale Objekte möglich sind. Diese Gebilde wurden von *Paul Townsend* p-Branen mit einer Dimension p getauft. Der Wortbestandteil *Bran* nimmt Bezug auf *Membran*, also ein flächenhaftes, schwingfähiges Objekt. Bei verschwindender Dimension, $p = 0$, hat man es mit einer 0-Bran zu tun, einem **Punktteilchen**; eine 1-Bran entspricht dem wohl bekannten, eindimensionalen **String**; die 2-Bran ist eine zweidimensionale Fläche, die man **Membran** nennt usw.

1997 fand *Juan M. Maldacena* die so genannte **AdS/CFT-Korrespondenz** (dazu später mehr), die völlig neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Gravitation und Teilchenphysik offen legte und zu aktiver Forschung in den Stringtheorien anregte.

Moderne Teilchenbeschleuniger wie der *Relativistic Heavy Ion Collider* (**RHIC**) in den USA und der Ende 2007 startende *Large Hadron Collider* (**LHC**) am CERN liefern wichtige, experimentelle Daten, die u. a. mit Prognosen der Stringtheorien verglichen werden können.

Die Stringtheorien haben auch Einzug in die Astronomie gehalten. Dort bieten sie interessante Szenarien für Materie unter extremen Bedingungen, z. B. im Innern von kompakten Objekten an. In der Kosmologie wurden stringtheoretische Modelle vorgeschlagen, die unser Universum in völlig neuem Licht erscheinen lassen.

20.40.3 Die Stringtheorie oder die Stringtheorien?

Bis etwa Mitte der 1990er Jahre kannten die Theoretiker eine **26D bosonische Stringtheorie und fünf verschiedene, zehndimensionale Stringtheorien**. Damit ist eine Formulierung wie '*...das basiert auf den Stringtheorien.*' ebenfalls in Ordnung. In den Stringtheorien wurde eine in der Physik sehr vertraute Methode ausgenutzt, die Störungstheorie heißt. Mit diesem mathematischen Apparat konnten physikalisch relevante Aussagen getroffen werden.

20.40.4 neue Sicht auf elementare Bausteine der Materie

Die Sichtweise des Standardmodells, dass die fundamentalen Bausteine der Materie, Quarks und Leptonen, punktförmig seien, wird in der Stringtheorie dadurch abgelöst, dass alle Teilchen als Anregungs- oder Schwingungszustände eines solchen Strings angesehen werden. Dabei ist die Schwingungsenergie des Strings assoziiert mit der Masse des Teilchens. Die Nullpunktsschwingung, die man mit dem Grundzustand der Quantenmechanik identifiziert, entspreche einem Teilchen mit Masse Null. Dies seien gerade die masselosen, bosonischen Austauschteilchen (**Eichbosonen**) wie das Photon, die Gluonen oder das Graviton. Angeregte Schwingungsmoden repräsentieren Teilchen höherer Masse, wie Elektronen, Neutrinos und Quarks. Die unteilbaren Konstituenten der Materie sind gemäß der Stringtheorie winzige schwingende Fäden oder Flächen auf der Planck-Längenskala (10^{-35} m).

20.40.5 verschiedene Typen von Strings

In der **String-Topologie** unterscheidet man *geschlossene Strings* (engl. *closed strings*) von *offenen Strings* (engl. *open strings*). Das Graviton und skalare Felder (z. B. das Dilaton) werden durch geschlossene Strings repräsentiert, während die anderen Eichbosonen offene Strings sind. Die Abbildung 20.23 illustriert die topologisch verschiedenen Strings unten und zeigt darüber die zeitliche Entwicklung dieser Strukturen in einem Raum-Zeit-Diagramm. In der zeitlichen Entwicklung erscheint das Punktteilchen (**0-Bran**) als Linie (links), während die offenen oder geschlossenen Strings (**1-Branen**) flächenhaft erscheinen (Mitte und rechts).

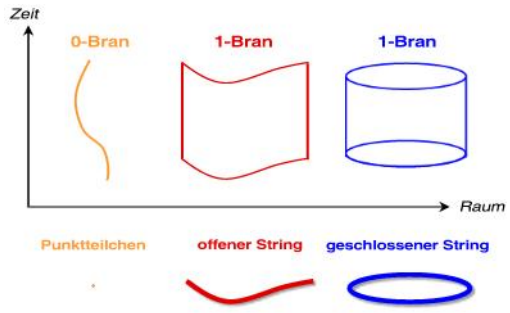

Abbildung 20.23: Stringtheorie: Punktteilchen, offene und geschlossene Strings.

20.40.6 Die fünf Stringtheorien

Die Terminologie der Stringtheorien definierte seit etwa Mitte der 1980er Jahre folgende fünf verschiedene, zehndimensionale Stringtheorien:

- Typ I,
- Typ IIA,
- Typ IIB,
- O-heterotisch oder SO(32)
- und E-heterotisch oder $E_8 \times E_8$.

Typ I

Die Stringtheorie Typ I behandelt offene und geschlossene Strings. Typ I Strings sind nicht orientiert und elektrische Isolatoren. Offene Strings haben Ränder, auf denen sie elektrische Ladungen tragen. Bei den offenen Strings fixiert man an den Enden **Randbedingungen vom Dirichlet-Typ** (wie bekannt aus der klassischen Elektrodynamik), daher nennt man sie auch **D-Brane**. Die Typ I Stringtheorie ist wohl eine äquivalente Formulierung der schwachen Wechselwirkung.

Typ IIA und IIB

Diese beiden Stringtheorien behandeln ausschließlich geschlossene Strings. Typ IIA und IIB Strings sind elektrische Isolatoren. Der Unterschied zwischen Typ IIA und IIB besteht darin, dass Typ IIA keine Orientierung der Strings aufweist, aber Typ IIB hingegen schon. Weiterhin ist die Eichsymmetrie von Typ IIA eine U(1)-Gruppe, wohingegen Typ IIB keine Eichsymmetrie hat.

O-heterotisch und E-heterotisch

Diese heterotische Stringtheorien beschreiben auch nur geschlossene Strings, die orientiert und supraleitend sind. Der Unterschied der beiden besteht in der Eichgruppe: sie heißt SO(32) bei der O-heterotischen Stringtheorie, aber sie heißt $E_8 \times E_8$ bei der E-heterotischen Stringtheorie.

Die beiden heterotischen Stringtheorien bilden sich aus Kombination von Typ II Stringtheorien und bosonischen Stringtheorien. Die Erweiterung auf fermionische Strings gelang im *Ramond-Neveu-Schwarz-Modell*, kurz **RNS-Modell** genannt. In diesem Modell erweiterten die Theoretiker die *Polyakov-Wirkung*, die Strings auf gekrümmten Hintergrundmetriken beschreibt so, dass die Weltfläche eine lokale Supersymmetrie aufweist. Wie gewohnt, führen Wirkungsfunktionale oder alternativ Lagrangedichten, die man ansetzt auf Bewegungsgleichungen (Feldgleichungen). Deren Lösungen sind

mit Feldern assoziiert, die gerade bestimmte Teilchen repräsentieren. Die RNS-Wirkung liefert gerade solche Lösungen, die man *Majorana-Weyl-Spinoren* nennt. An diese offenen oder geschlossenen Strings kann man Randbedingungen stellen. Eine Vorzeichenwahl legt dann Ramond-Randbedingungen (**R-Randbedingungen**) oder Neveu-Schwarz-Randbedingungen (**NS-Randbedingungen**) fest. Der Hilbert-Raum hat dann einen R-Sektor und einen NS-Sektor. Die sich ergebenden Wellenfunktionen sind mit Fourier-Koeffizienten gewichtet und können mit Bosonen (symmetrische Zustände) bzw. Fermionen (antisymmetrische Zustände) identifiziert werden.

20.40.7 Superstringtheorien: supersymmetrische Stringtheorien

Alle fünf Stringtheorien sind supersymmetrisch. Aus diesem Grund heißen sie auch **Superstringtheorien**. Supersymmetrie (SUSY) vermeidet die oben erwähnten tachyonischen Anregungszustände, die zu Akausalitäten führen.

SUSY herrscht zwischen zwei Teilchengruppen: den Bosonen und den Fermionen. Jedes Boson habe einen fermionischen Superpartner, und jedes Fermion habe einen bosonischen Superpartner. Das habe zur Konsequenz, dass weit mehr Teilchen existieren müssen, als im Standardmodell bekannt sind. So hätte das bosonische Graviton den fermionischen Superpartner *Gravitino* oder die Eichbosonen als Superpartner fermionische *Gauginos* (Beschreibung der Suffixe unter SUSY). Alle diese supersymmetrischen Partner haben relativ große Massen. Deshalb wurden sie bisher in Teilchenbeschleunigern oder anderen Experimenten nicht entdeckt. Beunruhigend ist in der Tat, dass bisher **kein einziges SUSY-Teilchen experimentell nachgewiesen** wurde - weder direkt, noch indirekt! Nur die Beobachtung, dass die Kopplungskonstanten der vier Wechselwirkungen, die gewissermaßen ein Maß für die Stärke der jeweiligen Kraft ist, *energieabhängig* sind und sich zu hohen Energien einander nähern, weist auf die Existenz der SUSY hin.

20.40.8 Was leisten die Stringtheorien?

- ◇ Jede der fünf Stringtheorien enthält die **Gravitation**, d. h. es gelingt eine Beschreibung der Gravitation auf der Quantenebene (Quantengravitation).
- ◇ Die Stringtheorien sagen eine **supersymmetrische Natur** voraus. Bislang wurde diese Eigenschaft nicht experimentell bestätigt, aber falls das der Fall sein wird (eventuell schon bald in modernen Teilchenbeschleunigern), würde das sehr für die Superstringtheorien sprechen. SUSY wird von den meisten Teilchenphysikern als vernünftige Erweiterung des Standardmodells der Teilchenphysik betrachtet.
- ◇ Mit den Stringtheorien können Berechnungen im Regime starker Kopplung der Quantenchromodynamik durchgeführt werden, wo die Störungstheorie der herkömmlichen Feldtheorien versagt. Mit diesen **QCD-Strings** können beispielsweise die experimentellen Daten von Gold-Gold-Stößen, die am Teilchenbeschleuniger RHIC gemessen wurden, sehr gut erklärt werden.
- ◇ Ende der 1990er Jahre wurde im Rahmen der Stringtheorien eine der wichtigsten Erkenntnisse der theoretischen Physik in jüngster Zeit gefunden: die so genannte **AdS/CFT-Korrespondenz**. Diese Korrespondenz besteht zwischen einer Stringtheorie auf einer 5D Anti-de-Sitter-Raumzeit (abgekürzt AdS), die die Gravitation berücksichtigt und einer konformen Feldtheorie (engl. *conformal field theory*, abgekürzt CFT) ohne Gravitation, die nur auf dem 4D Rand operiert. Die 5D-Strings vermögen nun eine Reihe der Eigenschaften der 4D-QCD (*Yang-Mills-Theorie*) zu beschreiben. Es ist sogar gelungen, diese Dualität für andere Raumzeiten zu verallgemeinern: sie gestaltet sich dann als eine fundamentale **Dualität zwischen Eichung und Gravitation** (*gauge/gravity dual*).
- ◇ Mit den Methoden der Stringtheorien lässt sich die Bekenstein-Hawking-Entropie berechnen. Das Resultat stimmt mit demjenigen der klassischen Theorie Schwarzer Löcher überein. Diese Parallele allein besagt nicht viel; aber es lassen sich äußerst interessante **Analogien zwischen**

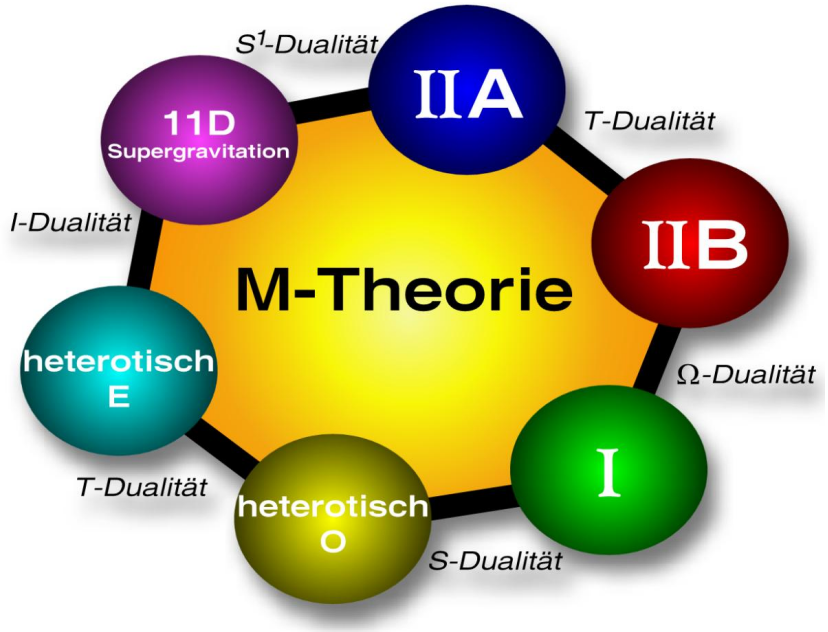

Abbildung 20.24: duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.

Quantenchromodynamik und Schwarzen Löchern ziehen: So entspreche ein Übergang in ein Quark-Gluonen-Plasma, wie es die 4D-QCD beschreibt, phänomenologisch der Erzeugung eines Schwarzen Loches in der 5D-Stringtheorie (*Maldacena*, Nature **423**, 695, 2003). Die Bekenstein-Hawking-Entropie klassischer Schwarzer Löcher hängt dann mit der Entropie eines Plasmas aus Quarks und Gluonen zusammen! Das sind vollkommen neue Einsichten in die Natur.

20.40.9 M-Theorie - mysteriöser Überbau von sechs Theorien

Neben den fünf Stringtheorien kennen die Physiker die davon (scheinbar) unabhängige Supergravitation, die Supersymmetrie und Allgemeine Relativitätstheorie (ART) miteinander verknüpft. Nach 1995 entdeckten die Stringtheoretiker, dass die fünf Stringtheorien miteinander über bestimmte, mathematische Relationen, den **Dualitäten**, in Zusammenhang stehen (*Horava & Witten* 1996). Die Forscher vermuteten, dass eine übergeordnete Theorie höherer Dimension existiere, die alle Stringtheorien enthalte: die elfdimensionale **M-Theorie**. **M** steht für wahlweise für **m**agic, **m**ystery oder **m**atrix - alles Eigenschaften, die der M-Theorie zugeschrieben werden. Erstaunlicherweise stellte sich heraus, dass die M-Theorie eine weitere Theorie enthält: die ebenfalls elfdimensionale Supergravitation (SUGRA). SUGRA und M-Theorie stimmen bei kleinen Energien überein, d. h. die Supergravitation ist der Niederenergielimes der M-Theorie (*Horava & Witten* 1996). Die folgende Abbildung 20.24 fasst die fünf Stringtheorien und SUGRA zur M-Theorie zusammen. Bis heute sind nur wenige Eigenschaften der M-Theorie bekannt. Die Stringtheoretiker wissen nur, dass sie

- elfdimensional sei,
- der Supergravitation im Limes kleiner Energien entspreche,
- ihre Objekte, die **M-Branen**, Strings und p-Branen seien,
- sie nicht perturbativ, also störungstheoretisch nicht zugänglich, sei.

Wenn mindestens zwei Strings miteinander wechselwirken, kommt eine physikalische Größe ins Spiel, die **Kopplungskonstante** heißt. Die numerische Zugänglichkeit der Stringtheorien hängt empfindlich von dieser Größe ab, weil man den Apparat der Störungsrechnung verwendet. Ist die Kopplungskonstante kleiner als eins, ist eine störungstheoretische (*perturbative*) Behandlung möglich. Ist sie größer als eins, gibt es in seltenen Ausnahmefällen alternative Methoden. Das gestaltet die Formulierung und experimentelle Verifikation der M-Theorie so außerordentlich schwierig.

20.40.10 Wo stecken die anderen Raumdimensionen?

Eine interessante Frage ist nun, weshalb die sechs zusätzlichen Raumdimensionen, die jede der fünf zehndimensionalen Stringtheorien gegenüber der vierdimensionalen Raumzeit der ART mehr hat, nicht im alltäglichen Leben bzw. in physikalischen Messungen in Erscheinung treten. Antwort: Sie sind 'sehr klein', oder wie Physiker sagen, sie sind **kompaktifiziert**. Unter Kompaktifizierung versteht man, dass Raumdimensionen auf kleinen Raumskalen 'zusammengerollt' sind. Deshalb bleiben sie in der Regel verborgen. Vorstellen kann man es sich anschaulich so, dass beispielsweise eine gezeichnete Linie, die uns als Betrachter eindimensional erscheint, bei hoher Vergrößerung mit einem Mikroskop weitere Dimensionen offenbart: die Linie erscheint dicker, ausgedehnt und wird zu einem zweidimensionalen Streifen.

In den zehndimensionalen Stringtheorien untersucht man nun bestimmte Unterräume mit weniger als zehn Dimensionen, die flach (engl. *flat*) oder gekrümmt (engl. *curved* oder *warped*) sein können. Dazu gehören die **Orbifolds**, Mannigfaltigkeiten die singuläre Punkte aufweisen und **Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten**, die Ricci-flach (der Ricci-Tensor verschwindet) und vom Typ her *Kähler-Metriken* sind. Diese Unterräume werden von kompaktifizierten Raumdimensionen aufgespannt. Im Allgemeinen kann man alle Stringtheorien und die elfdimensionale Supergravitation in Untermannigfaltigkeiten zerlegen: So entsprechen die Typ II Stringtheorien einer Zerlegung in die zuvor bekannte vierdimensionale Raumzeit und dreidimensionale Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit. Die heterotischen Stringtheorien können in die vierdimensionale Raumzeit sowie einer K3-Fläche und einem zweidimensionalen Torus zerlegt werden. Schließlich 'synthetisiert' man die elfdimensionale Supergravitation aus vierdimensionaler Raumzeit, dreidimensionaler Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit und einem eindimensionalen Kreis.

Ein **Soliton** ist ein bestimmter Typus einer Welle, ein *Wellenpaket*, das sich besonders stabil ausbreitet. Es gibt diese gegenüber Störungen sehr widerstandsfähigen Wellen in vielen Bereichen der Physik, so z. B. sowohl in der Optik (*optisches Soliton*), als auch in der Akustik und Hydrodynamik (*Soliton-Wasserwelle*). Alle p-Branen der Stringtheorien, die Solitonen sind, lassen sich als Lösungen einer elfdimensionalen Supergravitation finden.

Die Welt der ART ist vierdimensional. Die anderen sieben Dimensionen der Supergravitation bzw. M-Theorie sind kompaktifiziert. Die neuen Dimensionen bezeichnen die Physiker auch als **Extradimensionen**, die bisher nicht experimentell nachgewiesen werden konnten. Bei kurzen Abständen erwartet man, dass das Newtonsche Gravitationsgesetz mit seiner typischen r^2-Abfall für die Gravitationskraft *nicht* mehr gültig ist. Dies überprüfen die Physiker in Cavendish-Experimenten und anderen Tests. Bislang fanden sie dabei **keine Anzeichen für weitere Raumdimensionen** außer den klassischen dreien. Das erklären die Stringtheoretiker so, dass die Extradimensionen auf *noch kleineren Abständen* kompaktifiziert seien, als in Experimenten getestet werden kann. Die aktuelle Grenze liegt im Bereich von Mikrometern, d. h. der so genannte *Kompaktifizierungsradius* müsse kleiner sein, als ein Millionstel Meter.

Auch in modernen Teilchenbeschleunigern könnte es möglich sein, die Extradimensionen abzuzählen, nämlich dann, wenn die Experimentatoren dort künstlich ein Schwarzes Loch im Miniformat erzeugen und dessen Zerfall durch Hawking-Strahlung beobachten könnte. Die Stringtheorien könnten erklären (aber sie fordern es nicht zwingend!), falls die fundamentale Planck-Skala reduziert sei und daher Effekte der Quantengravitation bereits auf der TeV-Skala auftreten könnten (*TeV-Quantengravitation*). Dann würden Teilchenbeschleuniger wie der LHC diese Effekte sichtbar machen können.

20.40.11 String landscape: blühende Landschaften der Stringwelt

Die Formulierung von Stringtheorien auf verschiedenen Calabi-Yau-Räumen kann *Spiegelsymmetrien* aufweisen, so dass das Studium der einen Stringtheorie etwas über die entsprechende dual gespiegelte Stringtheorie verrät.

Eine generelle Problematik ist, dass es möglich ist, unter einer Vielzahl von Calabi-Yau-Räumen auszuwählen. Daraus folgen jedoch beliebig viele Grundzustände (*metastabile Vakua*) in den Stringtheorien. Diese enorme Zahl falscher Vakua wird unter dem Begriff **Stringtheorie-Landschaft** (engl. *string theory landscape*) zusammengefasst.

20.40.12 neue Schwarze Löcher in Stringtheorien

Es ist sogar möglich, im Branen-Formalismus die klassischen Schwarzen Löcher der ART zu verallgemeinern. Die punktförmigen Schwarzen Löcher wären demgemäß 0-Branen, deren Generalisierungen in Form einer 1-Bran, dem **Schwarzen String** (engl. *black string*) und der 2-Bran, der **Schwarzen Bran** (engl. *black brane*) existierten. Wie in der Quantenfeldtheorie folgen die Bewegungsgleichungen oder Feldgleichungen oder Euler-Lagrange-Gleichungen aus der angesetzten Lagrangedichte (*Lagrangian*). Die klassische Hilbert-Einstein-Langrangedichte

$$\mathcal{L}_{\text{Einstein}} = \sqrt{-g}R$$

führt auf eine Bewegungsgleichung (eom, engl. *equation of motion*), die das Verschwinden des Ricci-Tensors diktiert. Diese Gleichung hat also *Ricci-flache Lösungen*, z. B. ungeladene Schwarze Löcher (Schwarzschild-Lösung). Setzt man hingegen die Einstein-Maxwell-Lagrangedichte an, die den Maxwell-Tensor enthält, so findet man Branen-Verallgemeinerungen der klassischen Reissner-Nordstrøm-Lösung.

Eine entsprechende Verallgemeinerung des Ansatzes für den Einstein-Maxwell-Lagrangian in elf Dimensionen führen auf Lösungen, die man **pp-Welle** (einem bestimmten Typ einer Gravitationswelle) und **Taub-NUT-Lösung** nennt. Letzteres ist eine nicht-diagonale Metrik, die nicht asymptotisch flach ist. Die seltsame Bezeichnung dieser Vakuumlösung der Einsteinschen Feldgleichungen geht auf die Relativisten zurück, die sie erstmals fanden: *A.H. Taub* 1951 und in erweiterter Form *E.T. Newman*, *Unti* sowie *Tamborino* 1963. Mit einer 'tauben Nuss' hat diese Lösung nichts zu tun.

Schwarze Löcher können auch durch **Schwingungsmoden von 3-Branen** repräsentiert werden. Sie tragen dann Masse, elektrische Ladung und Drehimpuls. Damit entspricht dies der Kerr-Newman-Lösung Schwarzer Löcher. Das erstaunliche Ergebnis ist, dass die Stringtheorie exakt die gleiche Entropie vorhersagt, wie sie als thermodynamisches Analogon in der Theorie Schwarzer Löcher gefunden wurde, nämlich die Bekenstein-Hawking-Entropie.

Im Rahmen des D-Branen-Formalismus kann auch die **Hawking-Strahlung** beschrieben werden: Wechselwirkende offene Strings auf einer D-Brane führen zur Emission von geschlossenen Strings. Diese Behandlung liefert ein so genanntes *Graukörper-Spektrum* (engl. *grey-body spectrum*), einer Erweiterung des klassischen Schwarzkörper- oder Planck-Spektrums, das um einen energieabhängigen Absorptionsquerschnitt erweitert ist.

20.40.13 Branenkosmologie

In der modernen, relativistischen Kosmologie werden ebenfalls Konzepte der Stringtheorien angewendet. Ein Modell besteht darin, eine größere Zahl zueinander paralleler Branen auf einer flachen Hintergrundmetrik anzusetzen. Offene Strings gehen an der einen Bran aus und enden an einer anderen. Solche Szenarien laufen unter dem Etikett **Stringkosmologie** oder **Branenkosmologie**. Konkrete Beispiele sind das ADD-Szenario und die Randall-Sundrum-Modelle, die großen Anklang in der modernen Kosmologie gefunden haben. Eine besonders spektakuläre Anwendung dieser Form ist das Ekpyrotische Szenario und dessen Erweiterung, das Zyklische Universum (*Khoury et al.* 2001, *Steinhardt & Turok* 2001). Diese Modelle liefern sogar eine **Erklärung des Urknalls**! Jedoch: Sollten sich diese Modelle als richtig erweisen, so stützen sie zwar die Stringtheorie, beweisen jedoch nicht

strikt ihre formale Notwendigkeit und Richtigkeit, denn auch eine vierdimensionale Feldtheorie reicht schon als mathematische Basis aus.

20.40.14 Stringtheorien als 'Weltformel'?

Die Physiker suchen nach einer **Theory Of Everything (TOE)**, einer '*Theorie für Alles*', die alle vier fundamentalen Wechselwirkungen in einer einheitlichen, theoretischen Sichtweise vereint. Bei der Vereinheitlichung der elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkung ist das bereits in Form der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) gelungen, einer SU(5)-Theorie *ohne Strings*.

Nur die Gravitation macht ernste Probleme eingebettet zu werden. Die **Sonderrolle der Gravitation** kann man auch daran sehen, dass in einigen Modellen schwache, starke und elektromagnetische Kraft (also das Standardmodell) nur auf den zehndimensionalen 'Wänden' der elfdimensionalen Welt der M-Theorie existieren, während die Gravitation in der kompletten elfdimensionalen Welt (Bulk) vorherrsche! Viele solcher **Bulk-Bran-Systeme** wurden vorgeschlagen, die eine Menge interessanter, physikalischer Aspekte bergen - doch keines davon konnte als *das* Modell für die Natur auserkoren werden. Die Erforschung geht weiter. Die Stringtheoretiker hoffen, dass sie so mehr über die M-Theorie erfahren und die Gravitation als etwas Neues, jenseits der Einsteinschen Theorie, entschleiern.

20.40.15 Kritik an den Stringtheorien

Die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Stringtheorien gestaltet sich so, dass Methoden der Stringtheorien - die nicht nur Strings beschreiben, wie nun klar sein sollte - auf bekannte Probleme der Quantenphysik, Teilchenphysik und Astrophysik angewendet werden. Dies offenbart erstaunliche, neue Perspektiven auf bekannte Phänomene, die oft über den bisherigen Verständnishorizont hinausgehen. Trotzdem bleiben uns die Stringtheorien bzw. die bekannten Facetten der M-Theorie nach wie vor den Beweis schuldig, dass sie **konsistente, physikalische Theorien** sind. Die ernste Frage ist, ob Stringtheorien wirklich die Natur beschreiben oder eine anspruchsvolle, mathematische Phantasie sind. Kritiker der Stringtheorien werfen ein, dass sie bisher nicht nachweisbare Konzepte, wie die Existenz von Extradimensionen und die Supersymmetrie, verfolgt. Diese Konzepte sind notwendig, um konsistente Stringtheorien (Vermeidung von Tachyonen etc.) zu entwickeln, verweigern sich jedoch bisher hartnäckig jedem experimentellem Nachweis. Diese Einwände sind ernst zu nehmend, berechtigt und mündeten in eine Suche nach Alternativen zu den Stringtheorien.

20.40.16 Alternative zur Stringtheorie

In der so genannten **Loop-Quantengravitation (LQG)** wurde ein anderer Ansatz gefunden. Der entscheidende Unterschied ist der Folgende: die Stringtheorien folgen quantenfeldtheoretischen Methoden, d. h. Teilchen und Felder werden auf einem **Hintergrund**, der Raumzeit, betrachtet. Sämtliche Gebilde 'leben' auf dieser Bühne. Die LQG dagegen ist **unabhängig von einem Hintergrund**. Diese Eigenschaft bezeichnet man mathematisch als (aktive) *Diffeomorphismus-Invarianz*. Die Hintergrundunabhängigkeit folgt auf natürliche Weise den Prinzipien der klassischen ART, denn hier wird die **Raumzeit selbst als deformierbares, dynamisches Gebilde** angesehen; in diesem Sinne ist es kein Hintergrund, sondern dynamische Variable. Das hat aber einen hohen Preis: die gewohnten Begriffe von Position und Zeit verlieren ihre Gültigkeit. Die Denkweise der LQG ist anspruchsvoll und neu: sie basiert im Wesentlichen auf **Loop-Zuständen**, die man sich als Schleifen vorstellen kann. Diese Schleifen formen ein 'Gitter'. Die im Allgemeinen gekrümmte Raumzeit (Sprache der Relativitätstheorie) taucht dann in Form angeregter Zustände (Sprache der Quantentheorie) der Schleifen auf. Das Konzept folgt eher demjenigen der *Quantenmechanik*, wo ein Hamilton-Operator, die Dynamik des Systems in Form einer Schrödinger-Gleichung festlegt. So wie man das Spektrum des Hamilton-Operators in der quantenmechanischen Behandlung des Wasserstoffsproblems durchführt und die elektronischen Wellenfunktionen sowie Energieeigenwerte gewinnt, kann man in der LQG

das Spektrum des *Holonomie-Operators* berechnen, um die Raumzeit als angeregte Loop-Zustände zu interpretieren.

Die LQG kann allerdings nur eine Alternative zu den Stringtheorien in dem Sinne sein, dass sie eine andere Variante einer Quantengravitation darstellt - die LQG leistet es *nicht*, alle Naturkräfte zu vereinheitlichen. Schwache, starke und elektromagnetische Wechselwirkung werden in der LQG nicht quantisiert.

Einer der Pioniere auf dem Gebiet der LQG, *Carlo Rovelli*, hat einen sehr lesenswerten, kritischen Dialog zum Thema 'Stringtheorien vs. Loop-Quantengravitation' verfasst. Er enthält keine Formeln, setzt aber fundierte Kenntnisse auf dem Gebiet der Quantenmechanik, Quantenfeldtheorien und Relativitätstheorie voraus, Titel: *A dialog on quantum gravity*, hep-th/0310077.

Die LQG liefert einige wohl definierte Resultate, die experimentell getestet werden können. Eine Falsifikation von Vorhersagen der Stringtheorien ist ungleich schwieriger, weil viel Spielraum für alternative Stringmodelle oder andere Parameter besteht. Hier begegnet man Aspekten der **Wissenschaftstheorie**, wo gefordert wird, dass eine Theorie *falsifizierbar*, also widerlegbar, sein muss. Ist sie es nicht, so sagt diese Theorie alles und nichts über die Natur aus (die sie ja beschreiben soll) und ist in diesem Sinne unpragmatisch und dogmatisch.

Bei der Reproduktion des Standardmodells der Teilchenphysik tun sich beide Theorien schwer. Hier besteht besonderer Forschungsbedarf. Eine experimentelle Falsifikation von Extradimensionen oder der Supersymmetrie würde die Stringtheorie in arge Bedrängnis bringen, während die LQG ohne diese Konzepte auskommt. Die Antwort liegt also leider in der Zukunft. Stringtheoretiker (*stringy people*) und Verfechter der Loop-Quantengravitation (*loopy people*) hoffen, dass entweder die modernen Teilchenbeschleuniger oder kosmologische Beobachtungen die entscheidenden Hinweise bringen werden, die für die eine oder für die andere Theorie sprechen - oder für etwas vollkommen Neues.

20.40.17 Quellenverweise und weitere Informationen

- ◇ *Horava & Witten*: Heterotic and Type I string dynamics from eleven dimensions, Nucl. Phys. B **460**, 506, 1996
- ◇ *Horava & Witten*: Eleven-dimensional supergravity on a manifold with boundary, Nucl. Phys. B **475**, 94, 1996
- ◇ Website von Edward Witten (Princeton, USA)
- ◇ *Edward Witten*: Magic, Mystery, and Matrix, populärwissenschaftlicher Artikel, 1998
- ◇ Website zur Superstringtheorie
- ◇ *Carlo Rovelli*: A dialog on quantum gravity, hep-th/0310077
- ◇ Vortrag im Wissensportal: An introduction to Brane World Cosmology (Stand März 2004)

20.41 Subraum

Den Begriff *Subraum* (engl. *subspace*), findet man eher in der Science-Fiction, z. B. bei *Star Trek*. Der Terminus *Unterraum* in der Mathematik bezeichnet zunächst ganz allgemein einen Raum niedrigerer Dimension, der in einen Raum höherer Dimension eingebettet ist. In diesem Eintrag soll geklärt werden, inwiefern der Subraum einen Bezug zur Physik hat.

20.41.1 4D Raumzeit in Einsteins Theorie

In der Relativitätstheorie wird ein vierdimensionaler (4D) Raum, die Raumzeit, zugrunde gelegt, die aus drei Raum- und einer Zeitdimension aufgespannt wird. Diese Dimensionen sind jedoch nicht unabhängig voneinander und bilden ein *Kontinuum*. Die Raumzeit stellt gewissermaßen die Bühne da, auf der alle Ereignisse stattfinden (diese Bühne ist jedoch kein statischer Hintergrund - siehe Diffeomorphismus).

20.41.2 Verallgemeinerung zu Raumzeiten mit mehr Raumdimensionen

In der Physik fand man nach der Entdeckung der vierdimensionalen Raumzeit neue Theorien mit mehr Dimensionen.

1) Erstmals wurden zusätzliche Dimensionen in der **Kaluza-Klein-Theorie** in den 1920er Jahren angenommen - nämlich **eine räumliche Extradimension**. Diese höhere Dimensionalität war nötig, um einen Versuch der Vereinheitlichung von Relativitätstheorie und Elektrodynamik zu unternehmen. Die Kaluza-Klein-Theorie scheiterte jedoch und geriet zunächst in Vergessenheit - auch durch die Erfolge einer konkurrierenden Theorie: der Quantentheorie.

2) Ende der 1960 Jahre entdeckten die Physiker den Reiz dieser Idee neu und zwar in der **bosonischen Stringtheorie**. Diese Theorie sollte die Physik der starken Kraft erklären und hat insgesamt sogar 26 Dimensionen, also 25 Raumdimensionen - das sind **22 Raumdimensionen mehr** als aus der Alltagserfahrung bekannt sind! Wie bereits in der Kaluza-Klein-Theorie sind diese Zusatzdimensionen nicht ohne weiteres beobachtbar, weil sie kompaktifiziert, d. h. auf kleinen Raumskalen 'aufgewickelt', seien. Aktuelle Experimente besagen, dass diese Raumskala kleiner sein muss als Mikrometer. Die bosonische Stringtheorie hatte jedoch auch Unzulänglichkeiten, so dass es in der Folgezeit zu Nachbesserungen kam.

3) Ende des 20. Jahrhunderts modifizierten die Theoretiker die Stringtheorien und fanden fünf zehndimensionale Stringtheorien, eine elfdimensionale Supergravitation und eine ebenfalls elfdimensionale M-Theorie. Das sind demnach **sechs bzw. sieben räumliche, kompaktifizierte Extradimensionen** in diesen Theorien. Diese Dimensionalitäten werden bis heute in diesen String-, Supergravitations- und M-Theorien zugrunde gelegt.

20.41.3 Subraum in der Physik?

Mit einer gewissen Berechtigung könnte man den Unterraum, den sämtliche (kompaktifizierte) Extradimensionen aufspannen, als **Subraum** bezeichnen. Freilich wird dieser Begriff *nicht* von den Physikern verwendet. So sprechen Stringtheoretiker eher z. B. von *Calabi-Yau-Mannigfaltigkeiten*, von *Orbifolds* oder ganz allgemein vom **Bulk**.

20.41.4 Nachweis des Subraums

Bisher sind die Extradimensionen jedoch noch spekulativ, denn deren experimenteller Nachweis in Cavendish-Experimenten oder in Teilchenbeschleunigern ist nicht gelungen. Eventuell bieten Teilchenbeschleuniger der neusten Generation eine Möglichkeit, die Extradimensionen abzuzählen. Eine Möglichkeit bestünde darin, wenn es gelänge, in Teilchenkollisionen sehr kleine Schwarze Löcher zu erzeugen. Sie wären in ihrer Größenordnung um ein Vielfaches kleiner als die primordialen Schwarzen Löcher der Kosmologie. Ihre Massen sind vergleichbar mit den Schwerpunktsenergien der kollidierenden Teilchenstrahlen. Sind die Szenarien einer TeV-Quantengravitation richtig und die Planck-Skala wäre tatsächlich reduziert, so läge diese Schwelle bei etwa 1 TeV, also einer winzigen Masse von 1.8×10^{-21} g! Solche hypothetischen, künstlich generierten Schwarzen Löcher würden jedoch nur kurzzeitig existieren, weil sie infolge der (bisher nie beobachteten) Hawkingstrahlung zerstrahlen müssten. Ihre Lebensdauer wäre so kurz, dass sie nicht mal signifikant Umgebungsmaterie oder gar die Erde akkretieren könnten, so dass sie keine Gefahr darstellen sollten. Auch ohne TeV-Quantengravitation bieten die Stringtheorien die Existenz von Extradimensionen an, die sich in Teilchenbeschleunigern bemerkbar machen sollten. Auf diese Weise stellen Teilchenbeschleuniger eine Möglichkeit dar, den Subraum zu erforschen und seine Dimensionalität zu messen. Stellen die Physiker keine Extradimensionen in solchen Experimenten fest, so würde sich der Kompaktifizierungsradius weiter verringern. Oder das wäre gegebenenfalls der Hinweis, Theorien ohne Extradimensionen zu favorisieren oder solche zu entwickeln.

20.42 Supergravitation

Supergravitation (engl. *supergravity*, abgekürzt **SUGRA**) verbindet die Supersymmetrie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Motiviert war dieser Ansatz dadurch, dass Einsteins Gravitation quantisiert werden sollte. Ziel ist also eine Quantengravitation.

20.42.1 Mehr Raum, aber kleiner Raum

Eine besonders interessante Supergravitation ist eine elfdimensionale Theorie. SUGRA involviert demnach sieben Extradimensionen, die wie in den Stringtheorien kompaktifiziert sind. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Supergravitationsmodellen mit unterschiedlicher Dimensionalität.

20.42.2 Folgen der eingebetteten Supersymmetrie

Die SUGRA ist *lokal* supersymmetrisch. Das **Graviton** mit Spin 2 (es ist somit ein Tensorboson) hat in der SUGRA einen supersymmetrischen Partner, das **Gravitino** mit Spin 3/2.

20.42.3 11D SUGRA hat Verwandte

Mitte der 1990er Jahre stellte sich heraus, dass die fünf bekannten Stringtheorien und SUGRA über mathematische Beziehungen, den **Dualitäten**, in Zusammenhang stehen. Das lässt vermuten, dass hinter den einzelnen Theorien eine übergeordnete Theorie steht, die M-Theorie genannt wurde. Die elfdimensionale Supergravitation ist der **Niederenergielimes** der elfdimensionalen M-Theorie, d. h. bei kleinen Energien geht die M-Theorie in die SUGRA über.

20.42.4 AdS/CFT

Die AdS/CFT-Korrespondenz (siehe dort für Einzelheiten) besteht zwischen SUGRA auf einer AdS_5-Raumzeit multipliziert mit einem sphärisch kompaktifizierten Raum und einer konformen Feldtheorie auf dem AdS-Rand.

20.42.5 Ist die Natur supergravitativ?

Die Supergravitation bietet eine Reihe interessanter, physikalischer Aspekte an, dennoch handelt es sich nicht um eine bewährte Theorie der Physik, weil weder Graviton oder Gravitino, noch Extradimensionen experimentell nachgewiesen wurden.

20.43 supermassereiche Schwarze Löcher

Schwarze Löcher können nach ihren Massen klassifiziert werden. Die supermassereichen Schwarzen Löcher (engl. *supermassive black holes*, kurz **SMBHs**) sind um viele Zehnerpotenzen schwerer als die stellaren Schwarzen Löchern. Diese gigantischen Objekte des Universums haben typische Massen von einigen Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Es sind die schwersten Schwarzen Löcher, die bekannt sind.

Bei einer Milliarde Sonnenmassen ist der Schwarzschild-Radius so groß, dass er sich bei der Bahn des Uranus befände, wäre das supermassereiche Schwarze Loch am Ort der Sonne! Supermassereiche Schwarze Löcher sind zwar sehr massereich, aber ihre räumliche Ausdehnung ist nur auf der Skala von Astronomischen Einheiten - also angesichts der Masse verhältnismäßig gering.

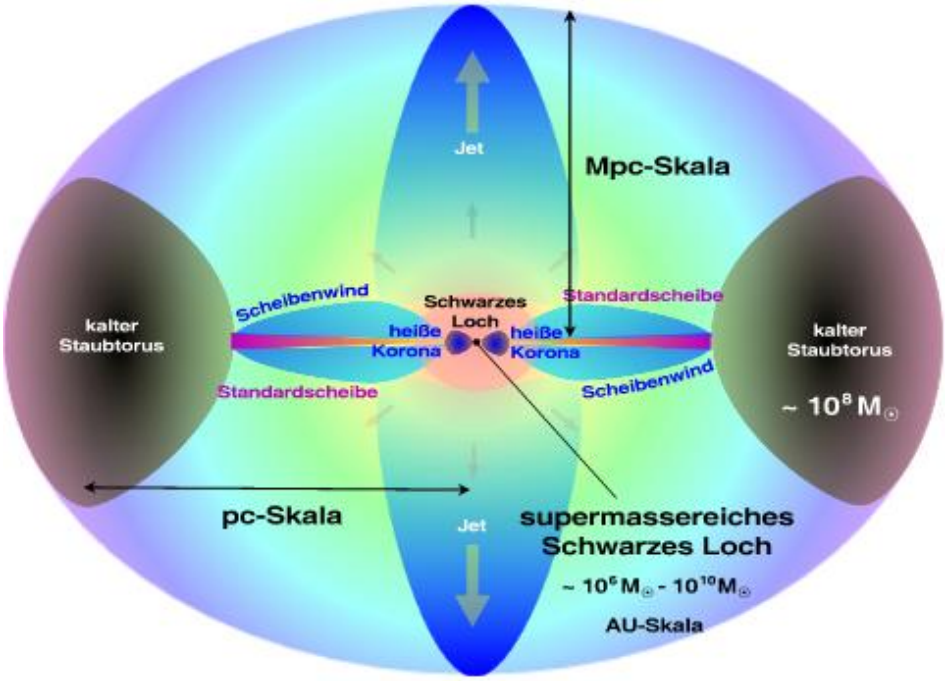

Abbildung 20.25: Querschnitt durch die Morphologie eines AGN.

20.43.1 Das Herz von Galaxien

Supermassereiche Schwarze Löcher sind keine völlig isolierten Objekte, sondern mit dem Zentrum von Galaxien assoziiert. Diese Idee ist schon über vierzig Jahre alt und wurde erstmals für aktive Galaxien vorgeschlagen (*Zel'dovich & Novikov* 1964, *Salpeter* 1964, *Lynden-Bell* 1969, *Lynden-Bell & Rees* 1971). Heute ist das ein allgemein akzeptiertes Standardmodell für Aktive Galaktische Kerne (AGN). Astronomen sind überzeugt, dass fast *jede Galaxie* (bis auf wenige Ausnahmen, z. B. bei verschmelzenden Galaxien, wo der Kern entrissen wurde) ein solches gewaltiges Schwarzes Loch im Zentrum beherbergt.

20.43.2 Gibt es wirklich diese Schwarzen Löcher?

Der Nachweis für diese Vermutung ist jedoch noch nicht exakt erbracht worden. Generell ist es schwierig, den strengen Beweis für ein klassisches Schwarzes Loch zu erbringen (*Müller* 2007, astro-ph/0701228). Es gibt jedoch bislang kein konkurrenzfähiges Alternativmodell, und die Indizien aus astronomischen Beobachtungen favorisieren die Existenz von Schwarzen Löchern (klassische 4D-Löcher der ART) in vielen Fällen.

20.43.3 Das AGN-Paradigma

Die AGN können dabei ganz verschiedene Erscheinungsformen annehmen: als Quasare, Blazare, Seyfert-Galaxien, Radiogalaxien oder BL Lac-Objekte - mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften und unterschiedlichen Leuchtkräften. Jedoch kommt kein AGN-Modell **ohne** ein supermassereiches Schwarzes Loch als zentralen 'Motor' für diese enormen Leuchtkräfte aus. Der Erzeugungsmechanismus zur Freisetzung dieser gigantischen Strahlungsmengen ist die Akkretion auf das zentrale supermassereiche Schwarze Loch. Wie das Schnittbild 20.25 durch den zentralen Teil einer aktiven Galaxie illustriert, dient der gigantische, rotierende, kalte und molekulare Staubtorus als Futterquelle

für das Loch. Der Abstand des Torus ist kleiner als etwa ein Parsec. Zum Zentrum des AGN hin bildet sich der Akkretionsfluss aus, weil der Torus generell hydrodynamisch instabil ist. Drehimpuls und effiziente Strahlungskühlung flachen diese Strömung zur Standardscheibe ab. Im Innern des AGN, wenige Gravitationsradien vom SMBH entfernt, wird der Akkretionsfluss sehr heiß, die Strahlungskühlung ineffizienter, was einen evaporierten, advektionsdominierten Akkretionsfluss generiert, den ADAF. Das geschieht vornehmlich bei kleinen Akkretionsraten gegenüber der Eddington-Akkretionsrate (etwa 0.01-0.1 Eddington-Akkretionsrates). Simulationen des Plasmaflusses mithilfe der Gleichungen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik (MHD) zeigen diese **Akkretionslösungen**, die unter Umständen auch eine advektive Torus-Konfiguration auf der Höhe der marginal stabilen Bahn bilden können. Aber auch dieser innere Torus kann nicht stabilisiert werden und verschwindet im Loch, bis der äußere Akkretionsstrom ein ähnliches Gebilde erneut 'auffüttert'. Dieses Szenario kann die beobachtete, starke AGN-Variabilität qualitativ und quantitativ erklären - es gibt aber auch andere Erklärungen. Die typische Variabilitätszeitskala im Bereich von Stunden und weniger spricht für ein **kompaktes Emissionsgebiet**, das nahe am SMBH lokalisiert ist. Die unaufhörliche Fütterung mit immer wieder neuem Gasmaterial sorgt für die Aktivität des AGN.

Mit der Akkretion untrennbar verknüpft ist die Erzeugung von **Materieausflüssen**. Im Gegensatz zur landläufigen Meinung verschlucken Schwarze Löcher nicht alles, ein Bruchteil der einfallenden Materie vermag den Einflussbereich des Loches wieder zu verlassen. Im einfachsten Fall bilden sich Winde, die von der Akkretionsscheibe wegströmen. Sie könnten unter Umständen zu Jets gebündelt werden (Blandford-Payne-Szenario), oder die Jets entstehen in der Ergosphäre eines (dann unbedingt) rotierenden Lochs, indem die Rotationsenergie über Magnetfelder ein Paarplasma erzeugt (Blandford-Znajek-Mechanismus). Während der größte Teil des umgebenden Gasmaterials vom Loch akkretiert wird, kann ein Teil davon wieder ausgestoßen werden. Die relativistischen, großskaligen Jets der AGN können nur **magnetisch getrieben** sein. Reine hydrodynamische Modelle reichen nicht aus. Aktuell favorisieren Astronomen, dass die komplizierte Wechselwirkung der rotierenden Raumzeit der Schwarzen Löcher (Kerr-Lösung) mit der Magnetosphäre des Akkretionsstroms verantwortlich ist für die Bildung von Plasmaausflüssen wie Jets und Winden. Nur schnell rotierende Löcher bilden eine signifikant große Ergosphäre aus, die die Voraussetzung für die Operation von Penrose-Prozessen und Blandford-Znajek-Mechanismen ist. Bei der Penrose-Paarbildung entsteht das (leptonische) Paarplasma aus der Wechselwirkung von einfallenden Gammaphotonen mit Photonen, die im Photonenorbit gefangen sind. Beim Blandford-Znajek-Mechanismus verstärkt Frame-Dragging das vom Akkretionsstrom herbeigebrachte Magnetfeld. Irgendwann ist das Feld so stark und enthält soviel Feldenergie, dass das Vakuum spontan ein Paarplasma erzeugt - direkt aus der Feldenergie. Das Feld bricht dabei zusammen. In beiden Fällen wird der Jet mit leptonischen Teilchenspezies, d. h. Elektronen und Positronen, gespeist. Der Blandford-Znajek-Mechanismus treibt außerdem Alfvénwellen, auf denen das Plasma 'reitet' und fortgetragen werden kann. Die magnetische Rekonnexion (Vernichtung von Magnetfeldern entgegengesetzter Polarität) setzt die in den Magnetfeldern gespeicherte Energie frei und wandelt sie in kinetische Energie des Plasmas um (siehe auch Poynting-Fluss). Beide Mechanismen - Penrose-Prozess und Blandford-Znajek-Mechanismus - gehen zu Kosten der Rotationsenergie des Loches, so dass seine Rotation abnehmen müsste. Unter realistischen Bedingungen nimmt das Loch allerdings ständig Materie mit Drehimpuls durch Akkretion auf. Das führt wieder zu höherer Rotation (höherem Kerr-Parameter) und 'zieht das Loch auf'. Der Frame-Dragging-Effekt zeichnet sich in vielerlei Hinsicht relevant: Er bewirkt eine Torsion von Magnetfeldlinien, was torsionale Alfvénwellen treibt, und er versetzt Partikeln in der Ergosphäre einen 'Kick', was möglicherweise zu (intrinsisch) **einseitigen** Jets führen könnte (*Williams* 2002).

Für dieses komplexe und attraktive Standardmodell von AGN gibt es keine brauchbaren Alternativen. Es zeigt, wie wichtig die Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Magnetohydrodynamik für die Astrophysik sind.

20.43.4 Das superschwere Loch im Zentrum unserer Heimatgalaxie

Auch die Milchstraße besitzt im Zentrum - von uns aus gesehen im Sternbild *Schütze* (internat. *Sagittarius*, Sgr) gelegen - ein supermassereiches Schwarzes Loch mit einer Masse von etwa 3.6 Millionen

Sonnenmassen (*Eisenhauer et al.* 2005). Diese Masse wurde kinematisch aus der Kepler-Bewegung von Sternen nahe der Radioquelle Sgr A* (Zentrum der Milchstraße, Ort des SMBH) berechnet. Bislang kamen dazu verschiedene Teleskope zum Einsatz: das NTT (*Eckart & Genzel* 1990er Jahre), Keck (*Ghez et al.*), das VLT mit NAOS/CONICA (*Schödel et al.* 2001) und jüngst das VLT mit dem neuen Spektrographen SINFONI (ebenfalls Genzel-Gruppe des MPEs seit 2005). Helle Blitze, so genannte *Flares*, im Nahinfrarot (*Genzel et al.*, Nature 2003) und Röntgenbereich (XMM-Newton: *Aschenbach et al.* 2004, Chandra: *Baganoff et al.* 2003) bestätigen die Lochmasse und machen sogar Aussagen über die Lochrotation. Das Loch im Zentrum der Milchstraße rotiert. Im Einzelnen wird der Kerr-Parameter zu $a/M \sim 0.52$ (NIR) bzw. $a/M \sim 0.99$ (Röntgen) bestimmt. Das ist die **beste Evidenz für ein Kerr-Loch**, die bisher überhaupt beobachtet wurde!

Leider ist das Galaktische Zentrum durch Staub verdeckt, so dass die Astronomen es nicht optisch, aber durch andere Strahlung wie Röntgen-, Infrarot- und Radiowellen beobachten können. Dieser Thematik des 'Supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum der Milchstraße' widme ich einen separaten Artikel.

20.43.5 Koloss auf der Waage - So wiegen Astronomen supermassereiche Löcher

Die **Massenbestimmung supermassereicher Schwarzer Löcher** ist über verschiedene Methoden möglich (die im Einzelnen unter dem Eintrag Schwarzes Loch beschrieben werden): Monitoring der Sternbewegung oder von Flares bei nahen Schwarzen Löchern, aber auch die Linienemission von Gas, Staub oder Plasma in unmittelbarer Umgebung des Schwarzen Loches, insbesondere die Untersuchung der *Broad Line Regions* (Materiewolken mit breiten Emissionslinien) mittels Reverberation Mapping oder die Analyse von Masern (Laser im Bereich der Mikrowellen). Problematisch ist dabei natürlich die Anwendung dieser Methoden bei weit entfernten Objekten, weil deren scheinbare Helligkeit sehr klein ist.

In der Analyse der Struktur von Galaxien wurden sehr nützliche Relationen gefunden. Darunter fällt die **M-σ-Relation**, die sich aus dem Studium umfangreicher Galaxiensamples ergab. Sie besagt, dass die Lochmasse M mit der Geschwindigkeitsdispersion σ in der vierten Potenz skaliert (*Tremaine et al.* 2002):

$$M_{\mathrm{SMBH}} \propto \sigma^4.$$

Die Geschwindigkeitsdispersion (Einheit km/s) misst man spektroskopisch mit einem Spalt, der über die zentrale Helligkeitsverteilung der Galaxie gelegt wird. In dieser Größe steckt eine gewisse systematische Unsicherheit, weil sie unterschiedlich definiert wird oder aus verschiedenen Aperturen gemessen wird. Weiterhin zeigen Untersuchungen an, dass die M-σ-Relation bei großen Rotverschiebungen nicht mehr zu gelten scheint. Das ist ein aktuelles und brisantes Forschungsgebiet. Eine ähnliche Relation stellt einen Zusammenhang zwischen der Masse des SMBHs und der Bulgemasse der Galaxie her (*Magorrian et al.* 1998). Der *Bulge* (dt. Wulst, gesprochen 'balsch') bezeichnet gerade die zentrale, sphäroide Verdickung einer Galaxie, bestehend aus vielen Sternen. Die Bulgemasse skaliert mit der Lochmasse in der Potenz von 1.12 (*Häring & Rix* 2004):

$$M_{\mathrm{SMBH}} \propto M_{\mathrm{bulge}}^{1.12}.$$

In beiden Beziehungen folgt die schwierig zu messende Lochmasse aus dynamischen Modellen der Galaxienzentren. Generell enthüllt die M-σ-Relation, dass die innersten Sterne einer Galaxie und das zentrale superschwere Loch eine **gemeinsame Entwicklung** durchlaufen.

20.43.6 Woher kommen diese Riesenlöcher?

Die Entstehung supermassereicher Schwarzer Löcher gehört - vielleicht neben der Natur der Dunklen Energie - zu den **größten Rätseln der Astrophysik**. Ihre Entstehungsweise ist noch nicht ganz geklärt und ein derzeit sehr aktives Forschungsgebiet.

Zu den ersten Modellen gehören so genannte **Zel'dovich-Podourets-Instabilitäten** relativistischer Sternhaufen. In diesem Szenario kollabiert eine sphärisch symmetrische Konfiguration eines relativistischen Sternhaufens in einer relativistischen Metrik (zum Beispiel zunächst vereinfachend angenommen in der Schwarzschild-Geometrie). *Shapiro* und *Teukolsky* haben 1985 solche Modelle numerisch studiert und gezeigt, dass kompakte, isotherme Sternhaufen instabil gegen radiale Störungen werden können. Die Sterne, die als Teilchen in einem Stoßmodell beschrieben werden, können dabei Lichtgeschwindigkeit erreichen und die Metrik eines Schwarzen Loches bilden.

Moderne Modelle haben einen anderen Ansatz: Simulationen mit Hochleistungsrechnern auf theoretischer Seite und Tiefenfeldbeobachtungen auf Beobachterseite liefern große Datenmengen, die zu einem konsistenten und plausiblen Gesamtbild zusammengefügt werden müssen. In der Strukturbildung, einem Teilgebiet der Kosmologie, wird derzeit ein Szenario favorisiert, in dem aus 'Saatlöchern' von etwa einigen hundert Sonnenmassen durch Akkretion und Galaxienverschmelzungsprozessen die beobachteten, superschweren Löcher wurden (z. B. *Volonteri et al.*, ApJ 2003 und 2005). Kurioserweise gibt es bereits bei z 6 (und nicht erst bei z 0) die Milliarden Sonnenmassen schweren Löcher, wie Beobachtungen im *Sloan Digital Sky Survey* belegen (*Fan et al.*, 2001).

Dieses Wachstum von Klein nach Groß heißt **hierarchisches Szenario**. Demgegenüber stehen Beobachtungen, die belegen, dass es bereits die schwereren Löcher in hellen Quasaren in größerer Häufigkeit *zeitlich vor* den weniger schweren Löchern in Seyfert-Galaxien gab (*Hasiger, Miyaji & Schmidt* 2005). Solche **antihierarchischen Szenarien** können auch theoretisch erklärt werden (*Merloni* 2004).

Es ist bis heute nicht klar, wie die zeitliche Abfolge in der Bildung von Galaxien und SMBH im Detail war. Es stellt sich wie das Problem vom Huhn und vom Ei dar: Wer war zuerst da? Sollten sich durch irgendwelche Prozesse (spekulativ: kollabierende Brill-Wellen?) zuerst leichtere Saatlöcher gebildet und danach die Galaxien um sie herum konfiguriert haben können? Die meisten Astronomen favorisieren derzeit das folgende Bild: aus dem primordialen Gas (im Wesentlichen Wasserstoff und Helium, siehe auch primordiale Nukleosynthese) bildeten sich die ersten besonders massereichen Sterne im Universum. Diese Sterngiganten gehören zur so genannten Population III. PopIII-Sterne sind so schwer, dass sie am Ende ihrer kurzen Sternenkarriere im Gravitationskollaps direkt in stellare Schwarze Löcher übergehen, die etwa hundert bis einige hundert Sonnenmassen schwer sind (siehe dazu auch Paarinstabilitäts-Supernova unter dem Eintrag Supernova). Die Relikte der ersten Sternengeneration fungieren als Saatlöcher, die durch Gasakkretion und Verschmelzung zu den sehr schweren Löchern werden, die wir heute zwischen z 6 und z 0 beobachten. Die Astronomen wollen mit Teleskopen immer weiter in die Tiefe des Alls schauen, um dieses Vorstellung zu überprüfen. Hier liegt die Zukunft aufgrund der kosmologischen Rotverschiebung in der Infrarot- und Radioastronomie. Wenn die Detektion von Gravitationswellen gelänge, könnte man sogar noch tiefer ins All blicken, als mittels elektromagnetischer Strahlung, vielleicht sogar bis zum Urknall!

20.43.7 Ein tiefer Röntgenblick ins All

Auch das kurzwellige Ende des Spektrums kann benutzt werden. Trotz der kosmologischen Rotverschiebung bleibt die Röntgenstrahlung der Quelle im Röntgenbereich, wenn sie auf der Erde ankommt. Röntgenstrahlung ist ideal, um Rückschlüsse auf die unmittelbare Umgebung Schwarzer Löcher zu ziehen, weil sie gerade dort entsteht.

Die bislang längste Belichtung (etwa eine Woche!) eines bestimmten Himmelsareals, dem *Lockman Hole*, mit dem europäischen Röntgensatellit XMM-Newton zeigte 50 bis 100 AGN. Die Beobachtung wurde unter der Leitung von Günther Hasinger, Direktor am MPE und dort Leiter der Röntgenastronomie, durchgeführt. Die AGN liegen in großen kosmologischen Entfernungen bis $z \sim 4.5$ und strahlen helle Röntgenstrahlung ab, die aufgrund der Entfernung stark abgeschwächt wird. Diese so genannten Deep-Field-Aufnahmen sind von großem Interesse, um die Entstehung der Galaxien und ihre Entwicklung zu studieren. Die Astronomen können die Daten nur so erklären, dass supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien Materie aus der Umgebung aufsammeln und dabei ungeheure Leuchtkräfte freisetzen. Sie sind unterschiedlich weit entfernt und

ihre Röntgenstrahlung wird durch die kosmische Expansion rotverschoben. Dennoch erreicht die Röntgenstrahlung das irdische Messgerät im Satelliten. Weitere dieser Beobachtungen sind erfolgt (z. B. beim internationalen Projekt COSMOS) und werden folgen: mit größeren Himmelsfeldern (und entsprechend 'besserer Statistik'), mit höherer Empfindlichkeit und mit höherer räumlicher Auflösung. Auf diese Weise kartieren die Astronomen das Universum und gelangen durch einen Vergleich dieser Daten der Natur mit simulierten Daten zu einem Verständnis, wie sich die großen Strukturen im Kosmos bildeten - und welche Rolle dabei die supermassereichen Schwarzen Löcher spielten.

20.43.8 supermassereiche Schwarze Löcher und ihre Bedeutung für Leben

Diese Verbindung mag auf den ersten Blick weit hergeholt erscheinen, aber die in diesem Eintrag vorgestellten Aspekte machen klar, dass superschwere Löcher bedeutsam für das Leben auf der Erde sind. Zunächst ist da die **gemeinsame Entwicklung von zentralem Superloch und umgebender Galaxie**. Die saloppe Kausalkette lautet: Ohne Loch, keine Galaxie. Ohne Galaxie, keine Sonne. Ohne Sonne, keine Erde. Ohne Erde, kein Leben.

Wem diese Argumentation zu platt erscheint, der möge die AGN-Jets betrachten: Ausflüsse und Jets bilden sich im Blandford-Znajek-Szenario durch ein rotierendes Schwarzes Loch, das wie ein Katapult einen Teil der aufgesammelten Materie wieder auswirft. Die gebündelten und nachbeschleunigten Jets verlassen den Zentralbereich der Galaxie und reichen Tausende bis Millionen Lichtjahre hinaus. Dabei sorgen sie für einen großskaligen **Materiekreislauf**, und durchmischen die verschiedenen Elemente und Molekülverbindungen 'im ganz großen Stil'. Elementvielfalt ist aber Voraussetzung dafür, dass Sterne neuerer Generationen noch schwerere Elemente und noch größere Häufigkeiten derselben produzieren können. Das bietet ein reiches Stoffangebot für Leben und dessen komplexe Molekülphysik.

Am Beispiel der Galaxie NGC 4696 wurde gemutmaßt, dass ein superschweres Loch die **Sternentstehung in einer Galaxie abschalten** könne und damit die Galaxiengröße limitiere (Komposit von *Allen, Taylor, Harris et al.* 2006, Chandra-Website). Warum? Weil die Aktivität des Lochs durch Jets die Umgebung aufheize und bei heißer Materie der Kollaps zu einem Protostern erschwert sei (siehe auch Jeans-Masse).

Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien sind damit nicht nur astrophysikalisch äußerst interessante Studienobjekte - sie spielen eine wesentliche Rolle für unsere persönliche Existenz!

20.44 Supernova

Eine Supernova ist eine Explosion eines Sterns. Dieses katastrophale Ereignis ist mit einem deutlichen Helligkeitsausbruch am Explosionsort verbunden. Das macht die Supernova auch über astronomisch große Distanzen klar sichtbar.

20.44.1 Supernova vs. Nova

Supernovae sind streng von den Novae, einer verwandten Form von Helligkeitsausbrüchen, zu unterscheiden. Eine Differenzierung ist anhand der Lichtkurve möglich. So nennen Astronomen generell ein Diagramm, in dem die Strahlungsintensität (Helligkeit oder Leuchtkraft) über der Zeit aufgetragen wird. Im Moment des Helligkeitsausbruchs steigt die Intensität rapide an. Supernovae sind 'super', weil sie um einen Faktor von einer **Million** leuchtkräftiger sind als Novae. Es gibt aber auch grundlegende, physikalische Unterschiede zwischen Nova und Supernova (siehe dazu auch unter Nova).

20.44.2 zwei fundamentale Supernovatypen

Phänomenologisch unterscheidet man zunächst grundsätzlich zwei Typen von Supernovae (Abk. SN), bei denen das Kriterium das Vorhandensein bzw. Abwesenheit des Elements **Wasserstoff im Spektrum** ist. Eine **SN Typ I** enthält keine (oder nur eine äußerst schwache) Spektrallinie des Wasserstoffs, während eine **SN Typ II** eine Wasserstofflinie zeigt. Der Wasserstoff ist spektroskopisch nachweisbar, wenn der Stern vor der Explosion, der so genannte *Vorläuferstern*, noch

eine Wasserstoffhülle besaß. Es kann vorkommen, dass der Stern die Wasserstoffhülle abgestreift hat, beispielsweise weil ein starker Teilchenwind von ihm ausgeht. Dann ist der Wasserstoff spektroskopisch kaum oder gar nicht nachweisbar.

20.44.3 weitere Unterteilung der Supernovatypen

Supernova Typ Ia

Supernova Typ Ia oder *thermonukleare Supernova*: Sie entsteht, wenn Masse von einem Begleitstern auf einen Weißen Zwerg (genauer: einem Kohlenstoff-Sauerstoff-Zwerg, kurz *CO-Zwerg*; *Hoyle & Fowler*, ApJ 132, 565, 1960) akkretiert wird. SN Ia sind gute Standardkerzen für die **Entfernungsbestimmung**, weil dieser Explosionsvorgang immer nach demselben Schema abläuft. Das bestätigen aktuelle Erkenntnisse über die Explosionsvorgänge in SNe Ia (*Mazzali et al.*, Science 315, 825, 2007): Wenn der Weiße Zwerg gerade seine kritische Massengrenze, die so genannte Chandrasekhar-Masse von etwa 1.38 Sonnenmassen, überschreitet, wird er instabil und die gesamte Konfiguration wird zerrissen! Bei Erreichen der Chandrasekhar-Grenze bilden sich im Innern des Zwergs Inseln, wo thermonukleare Verbrennung einsetzt (*subsonische Deflagration*). Diese breiten sich nach außen aus und gehen dann in eine *Detonation* über (engl. *deflagration-to-detonation transition*, DDT). In Detonationen ist der Explosionsdruck höher als in Deflagrationen. Die DDT wird vermutlich durch Turbulenz verursacht. Daraus entsteht schließlich eine **schockgetriebene, supersonische Detonationswelle** - der Motor der Supernova. Die dabei frei werdenden Leuchtkräfte betragen **knapp 5 Mrd. Sonnenleuchtkräfte!**

Die Synthetisierung zu neuen chemischen Elementen läuft in den Explosionszonen unterschiedlich ab und richtet sich nach der Dichte der Sternmaterie: Bei hohen Sternmateriedichten liefert das thermonukleare Brennen radioaktives Nickel (Ni-56), das über β^+-Zerfall erst zu Kobalt (Co-56) und dieses ebenfalls über β^+-Zerfall zu Eisen (Fe-56) zerfällt. In den Betazerfällen entstehen schnelle Teilchen, die das Explosionsgas aufheizen. Es kühlt durch die Emission so genannter verbotener Linien von Eisen (Fe-II und Fe-III). Die Supernova leuchtet umso heller, je mehr Ni-56 vorhanden ist (*Colgate & McKee* 1969). In den Zonen geringer Sternmateriedichten dagegen werden mittelschwere Elemente wie Silizium (Si) synthetisiert. Silizium wird dominant in Supernovaexplosionen erzeugt und weist Gesamtmassen von etwas mehr als einer Sonnenmasse auf. Supernovae, die mehr mittelschwere Elemente wie Silizium synthetisieren, produzieren weniger Ni-56. Die hellsten SN haben auch die dünnsten Si-Zonen. Doppler-Blauverschiebung der starken Siliziumspektrallinie Si-II bei 6355 Angstrøm dient den Astronomen zur Geschwindigkeitsbestimmung. Sie finden typische Geschwindigkeiten des Si-Materials von etwa 12000 km/s. Das innere Explosionsmaterial ist dominiert von schwereren Elementen. Sie sind am besten **etwa ein Jahr nach der Explosion** beobachtbar. In diesem Stadium ist die Explosionswolke ausgedünnt und sieht aus wie ein Nebel mit transparentem Gas ('Nebelphase' der SN). Die neuen Simulationen von *Mazzali et al.* bestätigen, dass SNe vom Typ Ia gute Standardkerzen sind. **Geringe Helligkeitsunterschiede** sind begründet durch unterschiedliche Häufigkeiten von Nickel und Silizium.

Die absolute Helligkeit M der Explosionen streut zwar wenig und liegt immer bei etwa -19.7^{mag}; dennoch müssen die Supernovaforscher zur Ermittelung der Maximalleuchtkraft den Abfall der Lichtkurve genau betrachten. *Mark Phillips* fand 1993, dass der Abfall der Blauhelligkeit der Sternexplosion eine Funktion von der Maximalleuchtkraft ist (*Phillips, M.* ApJ 413, L105, 1993). Astronomen beschaffen sich aus dem Abfall der Blauhelligkeit innerhalb der ersten 15 Tage nach Maximalhelligkeit eine empirische Größe mit der Bezeichnung $\Delta m_{15}(B)$. Die Breite der Lichtkurve skaliert mit $\Delta m_{15}(B)$ und wird zusätzlich verändert durch die **kosmologische Zeitdilatation**. Aus $\Delta m_{15}(B)$ schließen die Astronomen auf die Maximalleuchtkraft. Mittlerweile wird diese Methode nicht nur bei Wellenlängen blauer Strahlung verwendet, sondern in ganz verschiedenen Spektralbereichen. Die Supernovaforscher sprechen dann von MLCS-Methoden (engl. MLCS für *Multi-Wavelength Light Curve Shape*; früher *multicolor light curve shape*).

Die Wirtsgalaxie der Supernova beeinflusst ebenfalls das Sternexplosionslicht durch **Staubextinktion**. Ohne Berücksichtigung dieses Effekts würde beispielsweise die wahre, maximale

Blauhelligkeit unterschätzt werden. Dieser Rötungseffekt kann korrigiert werden bzw. fanden Astronomen Relationen zwischen Abfall der Lichtkurve und Maximalleuchtkraft, die *nicht* von der Staubrötung beeinflusst werden (*Phillips et al.* AJ 118, 1766, 1999). Dazu ist es erforderlich die Langzeitentwicklung der SN-Helligkeit etwa 30 bis 90 Tage nach dem Helligkeitsmaximum mithilfe von Farbindizes zu betrachten. In der Tat stellt die Rötung durch Wirtsgalaxien die größte Unsicherheit dar und ist die damit die gravierendste Quelle für systematische Fehler bei der Messung kosmologischer Parameter.

Ein weiterer Effekt, der bei der Auswertung weit entfernter Sternexplosionen berücksichtigt werden muss, ist der Einfluss der kosmologischen Rotverschiebung. Sie schiebt das Supernovalicht aus dem Beobachtungsfilter. Dieser Effekt wird bei der so genannten **K-Korrektur** herausgerechnet.

Nach allen Korrekturen folgt die Distanz der Sternexplosion aus dem **Entfernungsmodul**. Es gibt dabei eine schlechte Nachricht: Die Entfernungsmessung mit SN Typ Ia bricht derzeit bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1.5$ zusammen. Denn für größere Distanzen wird die SN Ia zu lichtschwach, als dass sie noch entdeckt werden könnte.

Extrem leuchtkräftige Supernovae könnten von seltenen, schnell rotierenden, so genannten super-Chandra Weißen Zwergen kommen - dazu mehr am Ende dieses Eintrags.

Supernova Typ Ib

Supernovae Typ Ib zeigen im Gegensatz zu Typ Ia eine *schwach ausgeprägte Siliziumabsorptionslinie*. Die Lichtkurven von Typ Ia und Ib sind jedoch sehr ähnlich.

Supernova Typ Ic

Supernovae Typ Ic besitzen *keine Heliumlinie* mehr, weil der Vorläuferstern sehr massereich gewesen sein muss (z. B. Wolf-Rayet-Sterne), so dass er seine äußeren Hüllen aus Wasserstoff und Helium in starken Sternwinden abgeblasen hat. SN Typ Ic sind oft mit den spektakulären (langen) Gamma Ray Bursts (Hypernovae) assoziiert.

Supernova Typ II

Supernovae Typ II sind die bekanntesten Supernovae. Auf der Grundlage der beobachteten Lichtkurve werden sie ebenfalls in Subtypen unterteilt (z. B. *Nadyozhin & Imshennik* 2005): eine **SN Typ IIP** hat eine plateauartige Lichtkurve (P: Plateau); in den Sternhüllen befinden sich etwa 10 Sonnenmassen Wasserstoff. Eine **SN Typ IIL** hat eine linear abfallende Lichtkurve (L: linear); in den Sternhüllen befindet sich weniger als etwa eine Sonnenmasse Wasserstoff. Schließlich gibt es noch die **SN Typ IIn**, die ein bisschen Wasserstoff im Spektrum anzeigt, der vom Sternenwind in die Sternatmosphäre transportiert wurde.

Eine SN Typ II ist einerseits mit dem Gravitationskollaps eines Sterns (engl. *core collapse*) und andererseits einer folgenschweren Explosion verbunden. Der Grund für den Kollaps ist, dass der Stern an das Ende seiner Entwicklung gekommen ist ('Sternentod'): Die stellaren Brennprozesse in Form der thermonuklearen Fusion kommen im Sternkern zum Erliegen, so dass das hydrostatische Gleichgewicht des Sterns empfindlich gestört wird: Ohne Fusionsprozesse sinken Gas- und Strahlungsdruck im Innern rapide ab. Der entgegengesetzt wirkende Gravitationsdruck drückt den Stern weiter zusammen. Deshalb fallen die äußeren Sternschichten in Richtung Zentrum des Sterns. Dort hat sich allerdings im Laufe der Sternentwicklung ein relativ großer, dichter Sternkern aus schweren Elementen, der **Eisen-Nickel-Kern**, ausgebildet. Er entstand aus der Asche der vielen vorangegangenen Brennprozesse. Eisen und Nickel befinden sich gerade im Sternkern, weil das der heißeste Ort im Stern ist, der damit die schwersten Elemente der stellaren Nukleosynthese erzeugt. An diesem massiven, dichten Kern prallt die einlaufende Schockwelle ab und wird wieder nach außen reflektiert (engl. *back bounce*). Die nun wieder nach außen laufende Schockwelle treibt die Explosion, und es kommt zur **klassischen Kernkollaps-Supernova** (engl. *core-collapse SN*). Die Supernova bedeutet das Ende des normalen Vorläufersterns. Es findet ein Übergang in eine neue, (in der Regel) stabile Endkonfiguration statt. Diese neue

Abbildung 20.26: SN 1994D beobachtet mit HST.

Sternenexistenz ist verglichen mit dem alten Zustand 'exotisch', weil die Sternmaterie eine ganz neue Form, physikalisch gesprochen eine neue Zustandsgleichung, annimmt. Welche Form das ist, entscheidet die vom Vorläuferstern übrig gebliebene Masse, die kollabiert. Während des 'Sternlebens' hat der Vorläuferstern einiges seiner Masse nach außen ins interstellare Medium (ISM) transportiert. Das übliche Schicksal des Vorläufersterns bei einer SN Typ II ist der Kollaps auf einen **Neutronenstern**. In Neutronensternen liegt die Materie in sehr kompakter Form vor: kernphysikalische Prozesse wie der inverse β-Zerfall verändern die gewöhnliche Materie. Sie wird bei hohen Massendichten **neutronisiert**. Neben einer daraus resultierenden Neutronenflüssigkeit mit Beimischungen von Protonen, Elektronen und Neutrinos bestehen Neutronensterne vermutlich auch aus exotischen Teilchen wie Kaonen und Hyperonen. Astrophysiker diskutieren außerdem, ob bei noch höheren Dichten der Verbund aus Nukleonen aufgebrochen werden kann. Dieser Materiezustand heißt Quark-Gluonen-Plasma und könnte tief im Innern des Neutronensterns existieren. Typische Massen von Neutronensternen liegen **zwischen 1.0 und 1.5 Sonnenmassen**. Allerdings können diese kompakten Objekte nicht beliebig schwer werden. Die Maximalmasse der Neutronensterne wird nach wie vor diskutiert und reicht von 1.5 Sonnenmassen (*Burgio* 2004) bis zu einem konservativen Wert von maximal drei Sonnenmassen (*Nauenberg & Chapline* 1973, *Rhoades & Ruffini* 1974).

20.44.4 Was passiert beim Überschreiten der kritischen Kollapsmasse?

Ist die kollabierende Masse schwerer als etwa drei Sonnenmassen, so ist der Kollaps auf ein punktförmiges Objekt unausweichlich. Die meisten Astrophysiker favorisieren, dass sich in diesem Kollaps ein stellares Schwarzes Loch bildet. Im Rahmen der klassischen Beschreibung mithilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Sternmasse zu einer echten Singularität (Krümmungssingularität) zusammengefallen. Die damit assoziierte Sternexplosion heißt jedoch nicht mehr Supernova, sondern Hypernova oder langer Gamma Ray Burst. Diese Sternexplosion weist noch höhere Explosionsenergien auf.

20.44.5 Herkunft des Begriffs Supernova und Häufigkeit

Die Etymologie des Begriffs Supernova ist gezeichnet von einem Irrtum: Zunächst dachten die Himmelsbeobachter, dass bei einer Supernova ein neuer Stern geboren sei, daher der lateinische Name *nova*, aber - wie die Beschreibung oben demonstriert hat - ist das Gegenteil der Fall: Es handelt sich um das 'letzte Aufbäumen' eines sterbenden, explodierenden Sterns. Bei der Explosion strahlt der kollabierende Stern für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie! Die absoluten Helligkeiten liegen dabei

im Bereich von -14. bis -21. Magnitude, was dem **Zehnmilliardenfachen der Sonnenleuchtkraft** entspricht! Die relative Helligkeitszunahme des Sterns kann mehr als 20 Größenklassen betragen! Diese 'kosmischen Scheinwerfer' sind bis in die Tiefe des Alls zu beobachten. Oft sah man zuvor keinen Stern, und plötzlich taucht ein scheinbar 'neuer' (*nova*) auf. Die rasche Helligkeitszunahme wird durch die geradezu exponentielle Expansion der leuchtenden Fläche bewirkt. Solche Lichtkurven sind eindeutige Charakteristika von Supernovae. Trotz der hohen Zahl an Sternen in der Milchstraße plus extragalaktischer Systeme sind Supernovae relativ selten. Pro Galaxie gibt es nur wenige Supernovae pro Jahr.

Die Aufnahme 20.26 des Weltraumteleskops Hubble zeigt die Galaxie NGC 4526, in der sich 1994 eine Supernova Typ Ia ereignete (Credit: HST/NASA/ESA, The Hubble Key Project Team und The High-Z Supernova Search Team, 1999). Diese als **SN 1994D** katalogisierte Explosion eines Weißen Zwerges ist unten links im Foto klar zu erkennen. Man sieht auch, dass die Sternexplosion im Vergleich zur Galaxie tatsächlich sehr hell ist.

20.44.6 Ursprung schwerer Elemente als Eisen

Nur massereichere Sterne als die Sonne durchleben überhaupt eine Supernova vom Typ II. Typisch sind Ausgangsmassen im Bereich von 15 bis 25 Sonnenmassen, die im Verlauf des Sternlebens abgebaut werden. Physikalisch ist es eine Explosion, bei der der kollabierende Stern seine Außenhüllen (die 'Asche des Schalenbrennens') mit voller Wucht ins interstellare Medium (ISM) schleudert. In den **Supernova-Schockwellen** spielen sich wichtige Prozesse für das Leben im Kosmos ab: Die Vielfalt chemischer Elemente verdanken wir den Supernovae. Denn nur in den dichten, heißen Schockfronten kann sich das ISM mit den schwersten Elementen wie z. B. Gold anreichern. Die damit verbundenen kernphysikalischen Prozesse heißen r-Prozesse und p-Prozesse, wobei letztgenannte etwas seltener vorkommen. Mit jeder Supernova und jeder Sterngeneration nimmt deshalb die Häufigkeit schwerer Elemente, die Metallizität, im ISM zu.

20.44.7 Supernovaüberreste

Nach der Explosion, dem eigentlichen Strahlungsausbruch, breitet sich eine Schockfront in der Umgebung des ehemaligen Sterns aus. Dabei bildet sich ein **Supernovaüberrest** aus, den man auch Supernovaremnant nennt (gesprochen -'remmnent'). Ein bekanntes Beispiel dafür ist der *Crab-Nebel* im Sternbild *Stier*. Im Jahre 1054 ereignete sich eine Supernova, die von chinesischen Astronomen sogar tagsüber beobachtet und dokumentiert wurde. 1969 konnte man einen optischen Millisekunden-Pulsar (*CM Tau*) als Zentralstern identifizieren. Dieses Objekt wird ausführlich unter dem Eintrag SNR vorgestellt.

An dieser Stelle geht es um ein anderes farbenprächtiges Beispiel: den Supernovaüberrest **Cassiopeia A**. Die Abbildung 20.27 zeigt allerdings keine optische Fotografie von Cas A, sondern ein Falschfarbenbild. Jede der drei Farben entspricht einem bestimmten Energieband der Röntgenstrahlung: rot eingefärbt ist die Strahlung einer Energie von 1.78 bis 2.0 keV; grün ist das Energieband von 4.2 bis 6.4 keV und blau ist die hier energiereichste Röntgenstrahlung von 6.52 bis 6.95 keV. Das Röntgenbild wurde vom US-amerikanischen Satelliten Chandra aufgenommen (Credit: NASA/CXC/GSFC/*U.Hwang et al.* 2004). Das Bild ist nicht nur schön, sondern auch reich an Strukturen. Man sieht hier die übrig gebliebene, leuchtende und sich ausdehnende Explosionswolke eines 'gestorbenen' Sterns. Nach dem gewaltigen Lichtblitz der Explosion selbst, der sogar die Heimatgalaxie des sterbenden Sterns überstrahlte, breitet sich eine Schockwelle im ISM aus. Diese quasi kugelförmig auslaufende Welle heißt im Fachjargon *blast wave*. Der äußere, grüne Ring hat einen Durchmesser von etwa 10 Lichtjahren. Das in Falschfarben blaue Leuchten wird mit Eisen in Zusammenhang gebracht, das bei diesen Energien Fluoreszenzstrahlung abgibt (vergleiche Eisenlinie und Röntgen-K-Linien). Es stammt wie die Stellarphysik lehrt, aus den innersten Bereichen des sterbenden Sterns. Nicht leicht zu erkennen ist der Jet, Material, das sowohl links oben, als auch rechts unten ausströmt. Im Gegensatz zum Krebsnebel gibt es hier keine leuchtenden Ringe aus Elektronenplasma und dementsprechend keine Evidenz für einen **relativistischen Pulsarwind**. Cas

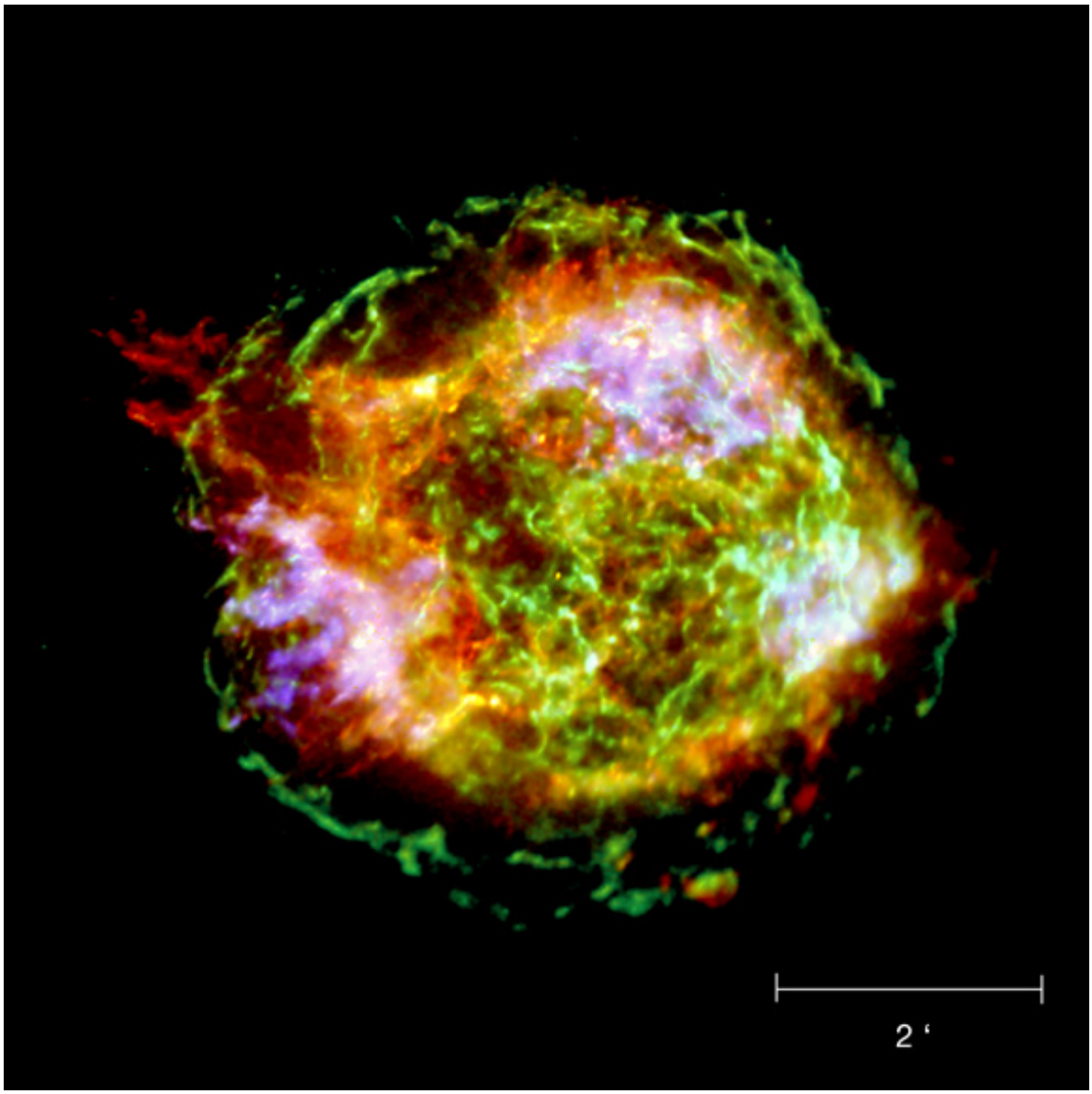

Abbildung 20.27: Chandra-Röntgenbild des Supernovaüberrests Cas A.

A kann als 'verhinderte Hypernova' aufgefasst werden: Die Explosionsenergie reichte nicht ganz aus, um einen ultrarelativistischen Jet zu treiben und weithin als Gamma Ray Burst in Erscheinung zu treten.

20.44.8 Paarinstabilitäts-Supernovae

Eine spezielle Form der Supernova ist die **Paarinstabilitäts-Supernova** (engl. *pair instability supernova*, PISN). Nach dem zentralen Heliumbrennen ist die Entropie groß genug, damit sich Temperatur- und Dichtebedingungen einstellen, die die Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren begünstigen. Weil diese Paare nicht mehr soviel zum Gesamtdruck des Sterns beitragen, wird das hydrostatische Gleichgewicht des Sterns abrupt gestört: der Stern kollabiert, wird heißer, bis Sauerstoff und Silizium explosionsartig brennen. Dieser Vorgang kann den Kollaps aufhalten und sogar umkehren! Die freigesetzten Energien sind um einen Faktor 100 größer als bei den üblichen Kernkollapssupernovae, nämlich rund 100 foe = 10^{53} erg! 1 foe ist eine Einheit, die die Supernovaforscher eingeführt haben. Sie entspricht der typischen Energie einer Supernova: 1 foe = 10^{51} erg (*ten to the power of **f**ifty-**o**ne **e**rgs*).

Das PISN-Szenario wird bei den **ersten Sternen** im Kosmos, der Population III, angewendet. Vermutlich fragmentierten besonders massereiche Sterne geringer Metallhäufigkeit - so genannte *Very Massive Stars* (**VMS**) - aus typischen Jeans-Massen von 1000 Sonnenmassen (bei typischen Temperaturen von 200 K und Dichten von 10^{-4} cm^{-3}). Daraus entstanden kleinere Sterne, die dann nur noch einige hundert Sonnenmassen aufwiesen (*Bromm et al.*). In der Kosmologie ist diese Entstehung erster Sterne am Ende des 'Dunklen Zeitalters' (engl. *dark ages*) einzuordnen, entsprechend kosmologischen Rotverschiebungen von $z = 15$ bis 30. Eine bestimmte Massendomäne, nämlich sehr massereiche Hauptreihensterne mit etwa 140 bis 260 Sonnenmassen weisen Heliumkerne mit 64 bis 133 Sonnenmassen auf (*Heger & Woosley, ApJ 567, 532, 2002*). Diese Sterne sind ausgezeichnet um PISNs zu erzeugen. Oberhalb dieses Massenbereiches entsteht aus dem Vorläuferstern ein stellares Schwarzes Loch.

Eine signifikante Anzahl an PISNs wird favorisiert, um die interstellare, metallarme Umgebung im jungen Universum mit Metallen angereichert zu haben. Die Astronomen hoffen mit dem neuen Multiwellenlängen-Satellit SWIFT die ersten Sterne bzw. deren PISNs oder sogar einen Gamma-Ray Burst mit z ¿ 10 beobachten zu können.

20.44.9 Die Supernova 1987A

Ein besonders aufregender Tag war für die Astronomen der 23. Februar des Jahres 1987: An diesem Tag waren Astronomen, ausgestattet mit modernem Beobachtungsgerät, Augenzeuge einer sehr nahen Supernova vom Typ II. Seither heißt sie **SN 1987A**. Sie ereignete sich in einer unserer Nachbargalaxien in 50 kpc Entfernung, der Großen Magellanschen Wolke (engl. *Large Magellanic Cloud*, LMC). Die Astronomen waren zwar Augenzeugen, doch aufgrund der endlichen Laufzeit des Lichts, ereignete sich die Explosion eigentlich vor gut 160000 Jahren. Von uns aus gesehen liegt SN 1987A im Sternbild *Schwertfisch* (internat. *Dorado*), am Südhimmel. Der Stern *Sanduleak* leuchtete an diesem Tag besonders hell auf und leitete damit seine letzte, spektakuläre Entwicklungssequenz ein. Die SN 1987A (eine SN Typ II) ist bislang das einzige Beispiel, wo der Vorläuferstern nachträglich mittels alter Fotoplatten identifiziert werden konnte: ein **blauer Überriese**. Für ein kompaktes Objekt, wie einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, das nach der Explosion blieb, gibt es bislang keinerlei Anzeichen. Mittlerweile wurde klar, dass es nicht ein einziger Vorläuferstern war, sondern sogar ein Doppelsternsystem: der Begleiter des blauen Überriesen war vermutlich ein roter Überriese.

Aufregend war dieses Ereignis deshalb, weil die Supernova besonders nah war und somit sämtliche Helligkeitsstadien (Prä- bis Postsupernova) in der Lichtkurve beobachtet und studiert werden konnten.

So war es erstmals möglich, Information über die Anreicherung des ISM mit schweren Elementen zu erhalten. Außerdem können zahlreiche Effekte und Einflüsse der Supernova auf die Umgebung untersucht werden (Entfernungsbestimmung, Aufheizung des ISM). Ein Durchbruch für die

Abbildung 20.28: SN 1987A beobachtet mit HST.

Neutrinophysik besteht darin, dass die SN 1987A **erstmals die Entdeckung kosmischer Neutrinos** ermöglichte (mit Kamiokande II, *Hirata et al.* 1987).

Von der SN 1987A wurden sogar harte und weiche Röntgenstrahlen entdeckt (*Sunyaev et al.* 1987; *Dotani et al.* 1987), deren Fluss sogar zunimmt (*Hasinger et al.* 1996). Die Zunahme liegt sehr wahrscheinlich daran, weil die Explosionsregion mit der Zeit immer durchsichtiger wird. Bei der Supernova wurde u. a. ein **UV-Blitz** erzeugt, der sich mit Lichtgeschwindigkeit in der Umgebung ausbreitete. Ein ganz erstaunlicher Vorgang war dabei, dass diese Strahlung auf einen zuvor noch dunklen Materiering traf. Durch die recht energiereiche UV-Strahlung wurde der Ring schon dreißig Tage nach der Supernova zum Leuchten angeregt (das ist die gleiche Physik wie bei Planetarischen Nebeln, nur liefert dort ein Weißer Zwerg die UV-Strahlung). Viel länger unterwegs war die supersonische (siehe dazu Schallgeschwindigkeit) Schockwelle. Das Beobachtungsfoto 20.28 zeigt eine Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble aus dem Jahr 2003 (Credit: *Challis, Kirshner, Sugerman*, HST/NASA 2003). Die auffälligen hellen Flecken sind gerade mit dem ehemals dunklen Materiering assoziiert, der schon etwa 20000 Jahre *vor* der Supernova existierte. Die Lichtflecken ordnen sich an wie auf einer Perlenkette und formen einen etwa 1.5 Lichtjahre durchmessenden Ring. Ihre Strahlung stammt von Gas, das durch die ankommende kugelförmige Schockwelle stark aufgeheizt wurde. Somit eignen sich die durch die SN freigesetzte Strahlung und Schockwellen, um etwas über das ISM zu erfahren.

20.44.10 weitere prominente Supernovae

Ein weiteres Beispiel für eine Supernova ist **SN 1998bu** in der Galaxie M96 in einer Entfernung von 10 Mpc, bei der überraschenderweise *keine* ^{56}Co-Radioaktivität gemessen werden konnte. Eine länger zurückliegende Supernova ist **SN 1979C** in der Galaxie M100.

20.44.11 Explosionskandidaten

In der Milchstraße gibt es eine Reihe von sehr massereichen Sternen, von denen man erwartet, dass sie bald in einer Sternenexplosion enden werden. Dazu zählen der rote Riesenstern *Beteigeuze* im Sternbild *Orion* (Nordhimmel) und vor allem η *Carinae* im Sternbild *Carina* (dt. *Schiffskiel*, Südhimmel).

Beteigeuze befindet sich in einer Entfernung von etwa 430 Lichtjahren. Eine typische Supernova Typ II erreicht eine absolute Helligkeit von -18 ^{mag}. Mithilfe des Distanzmoduls kann man aus diesen beiden Daten eine scheinbare Helligkeit von -13 ^{mag} errechnen, was derjenigen des Vollmondes entspricht. Sollte *Beteigeuze* also zu einer SN Typ II werden, strahlt er aufgrund seiner kosmischen Nähe so hell wie der Vollmond!

η *Carinae* ist dagegen ein Superstern von mindestens 100 Sonnenmassen, aber glücklicherweise 7500 Lichtjahre entfernt. Wie die Wolf-Rayet-Sterne bläst er unablässig heftige Sternenwinde in den interstellaren Raum, die einen bipolaren Ausfluss bilden. Mit der enormen Masse ist η *Carinae* eher ein Kandidat für eine Hypernova, als für eine SN Typ II. Die Explosion würde demnach wie ein Gamma Ray Burst ablaufen. Solche Explosionen sind noch heftiger als Supernovae! Die kosmische Gammastrahlung belastet ebenso wie die radioaktive Strahlung aus Gamma-Zerfällen irdischer Proben jeden lebenden Organismus, der der Strahlung ausgesetzt ist.

Schätzen wir doch die deponierte Energiedosis von η *Carinae* ab: Nehmen wir den schlimmsten Fall an, bei dem der anisotrope GRB genau auf die Erde gerichtet sei und etwa 100 Sekunden andauere. Damit resultiert eine auf den Tag bezogene Äquivalentdosis von fast einem Sievert (1 Sv). Das entspricht dem 300fachen der üblichen Jahresbelastung für einen Menschen! Das könnte man noch überleben. Aber eine kurzzeitige Ganzkörperbestrahlung von über 7 Sv führt nach wenigen Tagen zum Tode. Ein längerer GRB von etwa 1000 Sekunden oder mehr, was durchaus möglich wäre, würde die Bevölkerung auslöschen, die auf der dem GRB zugewandten Seite der Erdkugel wäre. Das kann aber nur derjenige Teil sein, der auch der GRB-Strahlung ausgesetzt war, nie jedoch die ganze Menschheit. Das ist sicherlich kein Trost.

Dieses Beispiel demonstriert, dass das irdische Leben immer Gefahren ausgesetzt war und ausgesetzt ist. So sind die Dinosaurier nach gängiger Auffassung ausgestorben, weil ein gewaltiger Meteorit die Erde vor etwa 60 Millionen Jahren traf. Gammablitze aus dem All sind da nur eine weitere kosmische Gefahr von vielen.

20.44.12 Zweifel an der Standardkerze SN Ia

Jüngst wurden Zweifel an dem Szenario angemeldet, dass SN Ia immer wieder gleichartig explodieren: Eine ganz bestimmte SN vom Typ Ia mit der Katalogbezeichnung *SNLS-03D3bb* konnte nur dadurch erklärt werden, dass der **Weiße Zwerg das Chandrasekhar-Limit von etwa 1.4 Sonnenmassen überschreitet** (*Howell et al.*, Nature 443, 308, 2006)! Dieser Zwerg heißt dann *super-Chandra-Weißer-Zwerg*. *SNLS-03D3bb* hat eine ungewöhnlich hohe Leuchtkraft und eine kleine kinetische Energie freigesetzt. Die Leuchtkraft wird durch Radioaktivität produziert, weil sich Nickel-56 durch β^--Zerfall zu Kobalt-56 und dieses wiederum zu Eisen-56 umwandelt. Aus der beobachteten Leuchtkraft folgt insgesamt ein abnorm hoher Anteil an Nickel-56 im Zwerg, was wiederum auf eine Gesamtmasse von **2.1 Sonnenmassen** hinauslaufen würde - bei weitem zuviel für einen Weißen Zwerg! Eventuell könnte eine ungewöhnlich hohe Rotation des Zwergs so eine Masse gestatten (*Yoon & Langer* 2005).

Bislang ist dieser super-Chandra-Zwerg ein Einzelfall, aber sollten sich mehr Repräsentanten dieser Klasse finden lassen, so würde das eine Krise in der SN-Ia-Kosmologie auslösen und eine Rekalibration der Daten erfordern.

20.44.13 Supernovae als Werkzeuge der Kosmologie

Viele hundert Supernovae wurden bisher beobachtet, doch sind sie zum Teil so weit entfernt, dass man daraus nicht besonders viele Informationen ziehen konnte. Die guten Standardkerzen SN Typ Ia (explodierende Weiße Zwerge) haben allerdings eine große Bedeutung für die Kosmologie, weil sie der Überprüfung und Bestimmung kosmologischer Parameter (z. B. der Hubble-Konstante, der

kosmologischen Konstante, der Zeitabhängigkeit der Dunklen Energie) und kosmologischer Modelle (siehe beispielsweise Friedmann-Weltmodelle, Quintessenz) dienen.

20.45 Supernovaremnant

Bezeichnung für das ausgedehnte, nebelartige Restgebilde nach einer gewaltigen Sternexplosion, einer Supernova (SN). Die deutsche Bezeichnung lautet Supernovaüberrest, das gebräuchliche Akronym ist SNR. Unter beiden Einträgen gibt es weitere Einzelheiten.

20.46 Superstringtheorie

Eine Bezeichnung für eine supersymmetrische Stringtheorie. Häufig meint man mit *Stringtheorie* verkürzend eigentlich die Superstringtheorie.

20.47 Supersymmetrie

Supersymmetrie ist ein theoretisches Konzept, das von *Akulov & Volkov* (1972) und *Wess & Zumino* (1974) gefunden wurde. Die Supersymmetrie (**SUSY**) bringt noch mehr Ordnung und Vereinheitlichung in den Teilchenzoo. Die Elementarteilchenphysiker versuchen mit Symmetrien, denen Quantenzahlen zugeordnet sind, eine Klassifikation der Teilchen durchzuführen.

20.47.1 Bosonen, Fermionen und ihre Spiegelbilder

Supersymmetrie scheint der letzte Schritt in dem Vereinheitlichungsbestreben zu sein und versucht die große Klasse der Fermionen (Teilchen mit halbzahligem Spin) mit der der Bosonen (Teilchen mit ganzzahligem Spin) zu vereinen. Fermionen sind die 'Materieteilchen', wie Quarks und Leptonen (Elektron und Neutrino, von denen es drei Untergattungen gibt), aus denen die Materie besteht. Sie unterliegen dem Pauli-Prinzip, d. h. höchstens zwei Fermionen mit antiparallelem Spin können sich im gleichen Zustand aufhalten. Die Bosonen sind die 'Wechselwirkungs- oder Austauschteilchen'. Teilchen mit ganzzahligem Spin vermitteln die Kräfte zwischen den 'Materieteilchen', indem sie ausgetauscht werden. Dies lässt sich in Feynman-Diagrammen veranschaulichen. Die **Photonen** vermitteln auf diese Weise die elektromagnetische Wechselwirkung, die elektrisch geladenen **W-** und das neutrale **Z-Teilchen** (die 'Weakonen') vermitteln die schwache Wechselwirkung, die **Gluonen** vermitteln die starke Wechselwirkung und die noch hypothetischen **Gravitonen** die Gravitationskraft.

Die Teilung der Welt in Fermionen und Bosonen kann man als künstlich oder als gebrochene Symmetrie auffassen. Die Supersymmetrie stellt gerade eine Einheitlichkeit, eine Symmetrie, zwischen den Teilchengruppen her (wie ein Spiegel, siehe Grafik 20.29). Supersymmetrie bedeutet auch eine **Vereinheitlichung von Kräften und Materie**. Die **Superpartner** der bisher bekannten Teilchen erweitern den Teilchenzoo beträchtlich.

20.47.2 witzige neue Namen

In der **Terminologie der Supersymmetrie** stellt man den Superpartnern der Materieteilchen ein 's' als Präfix vorweg. Die supersymmetrischen Partner der Austauschteilchen erhalten ein 'ino' als Suffix angehängt (siehe Illustration oben). Auf diese Weise erhält man nun neue SUSY-Teilchen, die man neben anderen als Selektronen, Squarks, Neutralinos, Gluinos und Higgsinos bezeichnet. Kleine Übung: Kann es somit Neutrinoinos in der SUSY geben?

20.47.3 gebrochene SUSY erzeugt verschiedene Superpartnermassen

Die Teilchen eines zusammengehörigen Superpartnerpaares haben die gleiche Masse (*Entartung*). Diese Massenentartung wird durch **Brechung der Supersymmetrie** aufgehoben. Dies ist analog zur

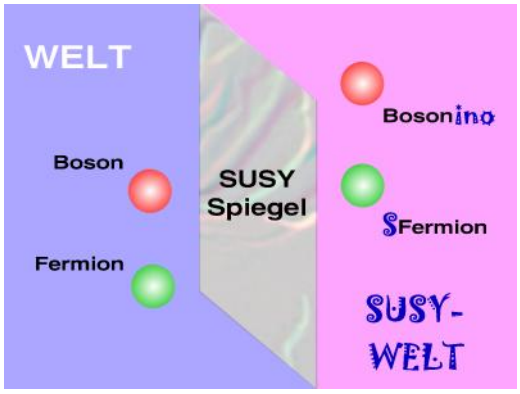

Abbildung 20.29: Die Spiegelwelt der Supersymmetrie.

Isospinsymmetrie zwischen Neutron und Proton (beide mit Isospin 1/2): die elektromagnetische Wechselwirkung bricht hierbei die Isospinsymmetrie und führt zu einer leichten Massendifferenz der Nukleonen sowie zur positiven, elektrischen Ladung des Protons und der Ladungsneutralität des Neutrons.

20.47.4 Ja wo laufen'se denn?

Die Problematik ist, dass die Physiker sich durch die Supersymmetrie eine Vielzahl neuer Teilchen eingehandelt haben, die sie früher oder später auch nachweisen müssen. Starke experimentelle Evidenz gibt es bisher für keines der Teilchen! Damit ist die **Supersymmetrie noch nicht experimentell bestätigt** worden. Es gibt allerdings (und nun werden wir sprachlich sehr spitzfindig) ein **gewichtiges, experimentelles Indiz, das auf die Supersymmetrie hindeutet**: Die Kopplungskonstanten der elektromagnetischen, schwachen und starken Kraft können in Experimenten mit Teilchenbeschleunigern gemessen und in ihrer Energieabhängigkeit dargestellt werden. Es zeigt sich, dass sich die Kopplungskonstanten zu hohen Energien hin einander annähern. Anschaulich gesprochen werden sich die drei verschiedenen Kräfte immer ähnlicher. Nun kann man mit einem theoretischen Modell die Kopplungskonstanten weiter extrapolieren. Ohne Supersymmetrie, im Rahmen des Standardmodells, stellt sich heraus, dass sich die Kurven der einzelnen Kopplungskonstanten *fast* in einem Punkt schneiden. Nimmt man nun die Supersymmetrie hinzu, so schneiden sich die *laufenden Kopplungskonstanten* **genau in einem Punkt**. Dies geschieht bei einer Energie von etwa 10^{16} GeV.

20.47.5 Alles wird GUT

Die drei Kräfte sind dann vereinheitlicht und werden als X-Kraft bezeichnet. Ab dieser kritischen Schwellenenergie gelangt man in die Domäne der GUT, der **Großen Vereinheitlichten Theorien** (engl. *Grand Unified Theories*). Damit geht die Supersymmetrie über das etablierte **Standardmodell der Elementarteilchen** hinaus ('Neue Physik', *Physics beyond the standard model*) und versucht den Unifikationsbestrebungen der Kräfte gerecht zu werden.

20.47.6 Angestrengtes Forschen

Das extrapolierte Verhalten der Kopplungen ist bisher der stärkste Hinweis auf die SUSY. Dennoch fehlt bisher der eindeutige, experimentelle Nachweis einzelner supersymmetrischer Teilchen. Sie sind aber leider zu schwer, als dass sie experimentell bislang nachgewiesen werden konnten. Mit jeder neuen Beschleunigergeneration hoffen die Hochenergiephysiker auf die Entdeckung des leichtesten

SUSY-Teilchens (engl. *lightest supersymmetric particle*, kurz LSP). Die Stringtheorien erfordern als **Superstringtheorien** ebenfalls die Supersymmetrie. Bilanzierend lässt sich sagen, dass die meisten Teilchenphysiker von der Gültigkeit der Supersymmetrie ausgehen. Sie arbeiten deshalb fieberhaft daran, einen Beweis dieses Konzepts zu erbringen.

20.47.7 kosmologische Bedeutung von SUSY

In der Astrophysik, speziell in der Kosmologie, gibt es auch ein großes Interesse an supersymmetrischen Teilchen. Denn - sollten sie im Universum existieren - stellen sie u.U. eine Form von Dunkler Materie dar. Diese Konzepte laufen unter dem Begriff **Dark SUSY**. Dunkle SUSY-Materie hätte einen additiven, vielleicht sogar gewichtigen Einfluss auf die Entwicklung des Kosmos.

20.48 Symbiotische Sterne

Symbiotische Sterne (engl. *symbiotic stars*) sind **Doppelsternsysteme** und eine Untergruppe veränderlicher Sterne. Sie bestehen aus einem Riesenstern und einem Weißen Zwerg. Ihr Charakteristikum ist ein 'zusammengesetztes' Spektrum. Ihre Spektren bestehen nämlich aus einem **Emissionsspektrum** und einem **Absorptionsspektrum**. Daraus resultierte die historisch bedingte Bezeichnung *symbiotisch* (grch. *symbion*: 'zusammenleben').

20.48.1 Wind-Akkretion anstelle von Roche-lobe overflow

Im Gegensatz zu den kataklysmischen Veränderlichen (CVs) kommt es bei Symbiotischen Sternen nicht zu einem *Roche-lobe overflow*, also einem Materieübertritt durch den inneren Lagrange-Punkt (siehe dazu Eintrag Roche-Volumen). Dazu sind die beiden Sterne des Binärsystems zu weit voneinander entfernt. Vielmehr kommt es zur **Wind-Akkretion**, d. h. der Teilchenwind des Sterns, der sich in alle Richtungen um den Stern ausbreitet, wird von dem Weißen Zwerg durch die Gravitationskräfte eingefangen und aufgesammelt. Dies ist eine Form der Akkretion.

20.48.2 Jetquelle MWC 560

Akkretionslösungen sind üblicherweise mit Ausflüssen verbunden. So werden von der Akkretionsscheibe magnetohydrodynamisch **Teilchenwinde** erzeugt (siehe auch Blandford-Payne-Szenario), die unter Umständen zu stellaren Jets gebündelt werden können. Einen solchen Jet beobachtet man unter besonders günstigen Bedingungen im System unter kleinen Neigungen, so dass man in den Plasmastrahl mehr oder weniger hineinblickt. Genau dies geschieht bei der Quelle **MWC 560**, sozusagen einem ganz besonderen Symbiotischen Stern. Aufgrund dieser einzigartigen Orientierung sieht der Astronom das Jetplasma als Absorptionskomponenten im Kontinuumsspektrum der Akkretionsscheibe und des Riesensterns. Aus diesen Charakteristika lassen sich die Jeteigenschaften ableiten, z. B. seine Geschwindigkeit. Im Falle von MWC 560 liegt die radiale Jetgeschwindigkeit zwischen 1000 km/s und 2500 km/s. Dabei zeigen sich ausgeprägte Beschleunigungsstrukturen, die quasiperiodisch wiederkehren.

20.49 Symmetrie

Der Begriff geht auf das Griechische zurück (*symmetria*, *symmetros*) und bedeutet soviel wie 'Ebenmaß' oder 'Gleichmäßigkeit'. Der Begriff der Symmetrie ist weithin bekannt aus der Geometrie, wo die Symmetrien geometrischer Figuren (Achsensymmetrie, Punktsymmetrie, Spiegelsymmetrie) untersucht werden.

20.49.1 unterschätzt: Symmetrien in der Physik

Man kann symmetrische Eigenschaften nicht nur auf Figuren beziehen, sondern auch auf mathematische Gleichungen. In diesem Zusammenhang spielen Symmetrien eine gewichtige Rolle in der Physik. Symmetrien vereinfachen Rechnungen oder legen einen tief liegenden, physikalischen Sachverhalt frei. In der Gravitationstheorie des 17. Jahrhunderts haben bestimmte Symmetrien bereits bei *Galileo Galilei* (1564 - 1642) und *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) eine Rolle gespielt: Denn die Newtonsche Gravitationstheorie ist **invariant** unter den *Galilei-Transformationen*: diese Transformationsgesetze verändern die Form der Newton-Gleichung nicht. Es zeigte sich, dass dieses **Konzept symmetrischer Naturgesetze** noch viel weiter trägt.

20.49.2 ein Beispiel

Physiker sind immer an den Symmetrieeigenschaften der Naturgesetze interessiert, ob beispielsweise eine Rückwärtslaufen der Zeit die Verhältnisse ändert oder so belässt, wie bei normalem Gang der Uhr. Ist letzteres erfüllt, so spricht man von einer **Zeitumkehrinvarianz**. So ist ein Weißes Loch gerade die zeitumgekehrte Lösung des Schwarzen Lochs (daher die komplementäre Beziehung der Farben). Offensichtlich sind die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie zeitumkehrinvariant!

20.49.3 Symmetrie - Invarianz

Der Begriff der *Symmetrie* ist eng verflochten mit dem Begriff der **Invarianz**. So ist man in der Physik ständig auf der Suche nach *Invarianten*, also Größen, die sich unter bestimmten **Transformationen** (einer Ersetzung alter Größen durch neue nach einer bestimmten Vorschrift) *nicht* ändern.

20.49.4 Unterteilung der Transformationen

- ◇ 1. *Globale* Transformationen sind unabhängig von Raum- und Zeitkoordinaten und in diesem Sinne ist überall dieselbe Transformationsvorschrift vorgeben.
- ◇ 2. *Lokale* Transformationen sind orts- und zeitabhängig. Damit kann die entsprechende Transformation unterschiedlich an verschiedenen Raumzeitpunkten sein. Eine *Invarianz unter lokalen Transformationen* stellt damit eine viel stärkere Bedingung dar.

  Die *Konstanten* sind bespielsweise *Invarianten in der Zeit*, weil sie zu allen Zeiten den gleichen Wert haben. Mathematisch spiegelt sich das darin, dass ihre Zeitableitung verschwindet.

  Die Invarianz kann sich jedoch auch auf andere Kriterien als die Zeit beziehen. Ist die Invarianz unter einer bestimmten Transformation gegeben, so heißt sie **Symmetrietransformation**. Die Mathematikerin *Emmy Noether* (1882 - 1935) konnte zeigen, dass mit jeder Symmetrietransformation eine **Erhaltungsgröße** assoziiert ist. Dieses **Noether-Theorem** aus dem Jahre 1918 besagt, dass eine Erhaltungsgröße (also eine zeitunabhängige Größe) zu jeder globalen Transformation existiert, die die **Langrangedichte** oder **Bewegungsgleichung** (auch Feldgleichung, die aus der Langrangedichte in wohl definierter Weise, nämlich über die Euler-Lagrange-Gleichungen folgt) invariant lässt!

  Dafür gibt es in der Physik zahlreiche Beispiele:

- ◇ 2.1 Eine *Invarianz unter Translationen* (verschiebende Transformationen) bewirkt die **Impulserhaltung**. Man spricht auch von **Homogenität des Raumes**.
- ◇ 2.2 Eine *Invarianz unter Rotationen* (drehende Transformationen) bewirkt die **Drehimpulserhaltung**. Dies nennt man **Isotropie des Raumes**.
- ◇ 2.3 Eine *Invarianz unter Zeittransformationen* bewirkt die **Energieerhaltung**. Das bezeichnet man als **Homogenität der Zeit**.

20.49.5 gute Quantenzahlen

Diese drei letztgenannten Symmetrien heißen **äußere Symmetrien**, weil sie sich auf Raum und Zeit beziehen. Daneben kennt man **innere Symmetrien**, die in den Quantenfeldtheorien sehr vielfältig auftreten und in die **Erhaltung von Quantenzahlen** (Isospin, elektrische Ladung, Seltsamkeit etc.) münden. Dieser Sachverhalt ist in der Quantentheorie wohl definiert. Dort ist der zentrale Operator, der **Hamilton-Operator**, der das Quantensystem eindeutig beschreibt. Ein Operator A, der mit dem Hamilton-Operator H vertauscht, erfüllt folgende *Kommutatorrelation*

$$[H, A] = HA - AH = 0 \rightarrow \frac{\partial A}{\partial t} = 0.$$

Dann haben Operator und Hamilton-Operator denselben *Satz an Eigenzuständen* (Wellenfunktion Ψ):

$$H|\Psi >= E|\Psi >;\ A|\Psi >= a|\Psi >,$$

und man kann den *quantenmechanischen Erwartungswert* a des Operators bilden

$$< \Psi|A|\Psi >= a,\ \mathsf{a\ \ ist\ \ Erhaltungsgröße!}$$

Dieser Erwartungswert ist gerade eine Erhaltungsgröße. In der Quantentheorie heißt eine solche Größe '**gute Quantenzahl**'. Sie aufzufinden ist ein wesentliches Ziel in den Quantenfeldtheorien.

20.49.6 Isometrien und Symmetrien in Einsteins ART

Aber auch die Untersuchung von Symmetrieeigenschaften von Raumzeiten im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) ist sehr nützlich. Alle Koordinatentransformationen, die die Metrik invariant lassen, also die Gestalt der Raumzeit nicht verändern, nennt man **Isometrien**. Die Isometriebedingung (verschwindende Lie-Ableitung des metrischen Tensors) führt gerade auf die Killing-Gleichung, dessen Lösungen, die Killing-Felder, die Symmetrien der Raumzeit eindeutig beschreiben.

In der ART gibt es noch eine viel wichtigere Symmetrie: die tensoriellen Einstein-Gleichungen (Feldgleichungen der ART) sind **invariant unter Lorentz-Transformationen**. Relativisten sagen: sie genügen der Lorentzinvarianz. Dies galt bereits für eine wesentlich ältere Theorie, nämlich der klassischen Elektrodynamik von *James Clerk Maxwell* (in der so genannten Lorentz-Eichung). Beide Theorien erfüllen das **Prinzip der Kovarianz**. Sie heißen daher **kovariante Theorien**.

Die Lorentz-Transformationen bilden eine mathematische **Gruppe**, die dann **Lorentzgruppe** genannt wird.

Die Newtonsche Gravitationstheorie ist invariant unter **Galilei-Transformationen**. Entsprechend heißt die Gruppe die damit zusammenhängt die **Galileigruppe**.

20.49.7 Konzept der Eichtheorien und Eichsymmetrien

In den Quantenfeldtheorien (siehe dazu die Einträge Quantenelektrodynamik, Quantenchromodynamik, schwache Wechselwirkung, elektroschwache Theorie und Quantengravitation sowie Standardmodell) ist das Konzept der Symmetriegruppe außerordentlich erfolgreich. Zu jeder Wechselwirkung finden sich Symmetriegruppen, die so genannten **Eichgruppen**, die eine bestimmte Gruppenstruktur aufweisen und vieles über die Wechselwirkung aussagen, so z. B. die Zahl der **Eichbosonen**. Alle diese Eichbosonen wären jedoch *masselos*. Das wäre für das Photon der QED, die Gluonen der QCD und das hypothetische Graviton einer Quantengravitation unproblematisch, weil sie keine Ruhemasse haben, jedoch weisen die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung (W^-, W^+, Z^0,) Massen auf. Dies kann erst durch den Mechanismus der **spontanen Symmetriebrechung** verstanden werden, den das (noch nicht experimentell verifizierte!) Higgs-Teilchen bewerkstelligt.

20.49.8 chirale Symmetrie

Unter der **chiralen Symmetrie** (*chira*, grch. 'Hand') versteht man wiederum die Symmetrie zwischen linkshändigen und rechtshändigen Quarks (die Helizität ist eine Erhaltungsgröße). Im **QCD-Vakuum** (Grundzustand) ist die chirale Symmetrie gebrochen, kann aber bei hohen Temperaturen (ab etwa 150 MeV) durch einen Übergang in die Hochtemperaturphase stark wechselwirkender Teilchen wiederhergestellt (*restauriert* in der Sprechweise der Physiker) werden. Somit erhält man das **Quark-Gluonen-Plasma (QGP)**, in dem sich Gluonen und Quarks quasi-frei bewegen und der Einschluss der Farbladungen aufgehoben ist (engl. *deconfinement*).

20.50 Symmetriebrechung

Eine Symmetriebrechung bewirkt eine **Erniedrigung der Symmetrie**. Der Begriff Symmetriebrechung geht auf den deutschen Quantenphysiker *Werner Heisenberg* (1901 - 1976) zurück. Symmetrien und Symmetriebrechungen sind von fundamentaler Bedeutung für die Naturwissenschaften, weil sie in ganz unterschiedlichen Bereichen der Natur vorkommen können. Insbesondere in der Physik wurde ein mächtiger, mathematischer Apparat entwickelt, der die Symmetrie mit Teilchen bzw. Feldern in Verbindung bringt, die ihren Quantenzustand sprungartig ändern, wenn sie eine kritische Temperatur erreichen (im Detail beschrieben beim Higgs-Teilchen). Diese Zustandsänderung bewirkt letztendlich die Symmetriebrechung und führt zum Verschwinden einer höheren Symmetrie.

20.50.1 Beispiele von Symmetriebrechungen in der Physik

- **Phasenübergänge** von einem Aggregatzustand der Materie in den anderen. Dies sei am Beispiel des Wassers verdeutlicht: Wasser in flüssiger Form besitzt eine höhere (räumliche) Symmetrie als ein Eiskristall. Das sieht man vereinfacht gesagt daran, dass flüssiges Wasser aus allen Richtungen gleich ausschaut (Isotropie), während ein Eiskristall nur unter bestimmten Sichtwinkeln immer wieder gleich ausschaut (bestimmte Richtungen im Kristall sind ausgezeichnet, es liegt eine Anisotropie vor). Verringert man nun die Umgebungstemperatur, so geht dieser flüssige Aggregatzustand in Eis über. Die Radialsymmetrie geht verloren, eine Symmetriebrechung hat stattgefunden!

- Ein völlig anderes Beispiel einer Symmetriebrechung ist die *Magnetisierbarkeit bestimmter Festkörper*. Bei einer kritischen Temperatur, der *Curie-Temperatur*, tritt eine **spontane Magnetisierung** ein. Unterhalb der Curie-Temperatur ist der Festkörper ferromagnetisch, oberhalb paramagnetisch.

- Auch die **Supraleitung** (engl. *super conduction*) ist ein Phänomen, das Folge einer spontanen Symmetriebrechung ist. Ab einer kritischen, relativ niedrigen Temperatur wird das Material supraleitend, d. h. leitet elektrischen Strom bei verschwindendem elektrischen Widerstand. Mikroskopisch wird dies mit der BCS-Theorie (nach den Pionieren *John **B**ardeen, Leon **C**ooper, Bob **S**chrieffer*) in der Festkörperphysik erklärt: Die Elektronen, die bekanntlich Fermionen sind, bilden im Festkörper ein Quasiteilchen, die bosonischen **Cooper-Paare**. Die Paare entstehen aufgrund einer starken Korrelation der Elektronen mit dem Gitter des Festkörpers. Die Bindung der Cooper-Paare kann ausschließlich über Energiezufuhr, in der Regel eine Temperaturerhöhung, aufgebrochen werden. Dann verschwindet die Supraleitung.

- Ein Pendant zur BCS-Supraleitung ist die Farbsupraleitung. Hier sind die Fermionen, die sich zu bosonischen Paaren zusammenfinden die Quarks. Der Mechanismus ist analog zur BCS-Theorie und wurde 1977 gefunden. Farbsupraleitung ist generell zu berücksichtigen, wenn Materie extrem hohe Dichten erreicht. Für die Astrophysik ist er von Relevanz, weil man annimmt, dass im Innern kompakter Objekte, wie den Neutronensternen, dieser Phasenübergang stattfindet und die Zustandsgleichung kompakter Materie modifiziert.

◇ Die **wichtigste, spontane Symmetriebrechung** in der Natur ist wohl diejenige, die durch das **Higgs-Teilchen** hervorgerufen wird. Dieses Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik (dessen experimenteller Nachweis noch aussteht!) stattet die masselosen Eichbosonen (siehe auch Eichtheorie) mit Masse aus. Die W- und Z-Teilchen, die die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung sind, erhalten damit eine endliche Ruhemasse. Der damit assoziierte *Higgs-Mechanismus* ist die Folge einer Symmetriebrechung: Bei bestehender Symmetrie sind die Teilchen masselos, nach gebrochener, verschwundener Symmetrie haben sie eine Masse.

20.50.2 Symmetriebrechungen sehr allgemein

In einem verallgemeinerten Konzept der Brechung einer globalen Symmetrie fordert man damit immer ein **masseloses Skalarfeld** (skalares Boson), das so genannte **Nambu-Goldstone-Boson**. Das Higgs-Feld ist gerade ein solches. Es handelt sich allerdings nur um *eine* mögliche Realisierung eines Nambu-Goldstone-Bosons in dem Konzept der Symmetriebrechung. So gibt es bei der **Brechung der chiralen Symmetrie** der Lagrangedichte in der Quantenchromodynamik (QCD) Pionen, Eta-Teilchen oder Kaonen die als Nambu-Goldstone-Bosonen fungieren. Wie das Higgs-Boson haben auch sie Spin 0. Es gibt noch ein weiteres Beispiel: Die **Brechung der Peccei-Quinn-Symmetrie** der QCD-Lagrangedichte führt auf ein neues Teilchen, das **Axion**, einem Favorit für die Dunkle Materie. Damit ist es von besonderem Interesse für die Kosmologie. Das Axion wurde allerdings noch nicht sicher nachgewiesen.

Die Beschreibung von Symmetrien und deren Brechung ist also ein sehr erfolgreicher Formalismus in der theoretischen Physik und ist eingebettet in die Gruppentheorie und Eichtheorie.

20.51 Symmetriegruppe

Eine Symmetriegruppe oder **Invarianzgruppe** ist eine mathematische Gruppe, deren zugeordnete Transformation Symmetrien zulässt. Hier untersucht der Theoretiker also Symmetrie- bzw. Transformationsgruppen, die eng mit **Symmetrieoperatoren** assoziiert sind. Die Methodik ist die Folgende: Eine beliebige Transformation (Abbildungsvorschrift, z. B. Drehung oder Verschiebung) sei gegeben. Der Theoretiker prüft nun die Kriterien dafür, ob diese Transformation als mathematische Operation die Gruppeneigenschaften (Abgeschlossenheit, neutrales Element, inverses Element, Assoziativität) erfüllt. Eine *abelsche Gruppe* genügt zudem der Kommutativität. Dann untersucht er, welche Gebilde (Lagrangedichten, Bewegungsgleichungen, Raumzeit etc.) durch die Transformation invariant gelassen werden.

20.51.1 einige Symmetriegruppen der Physik

Die historisch erste Symmetriegruppe war wohl die **Galileigruppe**. Die zugehörige *Galilei-Transformation* lässt die klassischen Newtonschen Gravitationsgesetze invariant. Die (Allgemeine) Lorentzgruppe hingegen basiert auf der (Allgemeinen) Lorentz-Transformation und lässt die Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie invariant. Die Poincarégruppe ist von besonderer Bedeutung für die Spezielle Relativitätstheorie. Die assoziierte Poincaré-Transformation lässt die Minkowski-Metrik invariant.

Das Konzept ist erweiterbar und wurde vor allem in den Quantenfeldtheorien, wie der Quantenelektrodynamik, der Quantenchromodynamik, der schwachen Wechselwirkung und elektroschwachen Theorie oder der Quantengravitation angewandt. Hier gelingt die mathematische Formulierung von Symmetrien mit der **Gruppentheorie** und führt auf ein übergeordnetes Konstrukt, den Eichtheorien.

Die mathematische Physik kennt viele Beispiele für Symmetriegruppen, die unter dem Lexikoneintrag Gruppe eingehend diskutiert werden.

Abbildung 20.30: Symmetriegruppe: unitäre Transformation.

20.51.2 unitäre Physik

Man klassifiziert die Transformationsgruppe nach den Eigenschaften dieses Operators. Die übliche Abkürzung für diesen Operator in der Physik ist **U**, weil der physikalische Operator **unitär** ist. Unitarität eines Operators bedeutet, dass seine Adjungation seinem Inversen entspricht. Man kann sich diesen Vorgang sehr gut bei Matrizen illustrieren, die oft eine Darstellung physikalischer Operatoren bewerkstelligen. Anschaulich, aber etwas salopp formuliert, ändert ein unitärer Operator die Physik nicht. Das manifestiert sich darin, dass der zentrale Operator der Physik, der **Hamilton-Operator** (oder auch kurz *Hamiltonian* genannt), der mit der Gesamtenergie im betrachteten System zusammenhängt, unter unitären Transformationen unverändert bleibt (siehe Abbildung 20.30): die erste Gleichung zeigt auf der linken Seite gerade die mathematische Formulierung der **unitären Transformation**. Man kann den Symmetrieoperator **U** erzeugen, wenn man einen weiteren Operator, den **Generator G** oder die **Erzeugende** genannt, als Exponent (multipliziert mit der imaginären Zahl **i**) in der e-Funktion notiert. Die Auswertung dieses Ausdrucks geschieht mit Reihendarstellung der e-Funktion unter Ausnutzung der Eigenschaften des Generators. Die *Baker-Hausdorff-Formeln*, die in zweiter Ordnung *Lie-Klammern* (der übliche **Kommutator** der Quantenmechanik) enthalten, erweisen sich hier bei Umformungen als nützlich.

20.51.3 orthogonale Operatoren

Neben den unitären Operatoren gibt es aber auch die orthogonalen. **Orthogonalität** lässt sich ebenfalls anhand der Matrizen verdeutlichen, weil die Transformationen durch Matrizen bewerkstelligt werden: diese Eigenschaft bedeutet, dass die transponierte Matrix (vertauschen von Zeilen mit Spalten) ihrem Inversen entspricht. Ein Beispiel für die orthogonalen Transformationsgruppen sind die Drehgruppen **SO(N)**, die darüber hinaus *speziell* sind.

20.51.4 Terminologie der Transformationsgruppen

- ◇ *U* für *unitär*, sollten aus oben genannten Gründen alle Symmetriegruppen sein, die die Physik beschreiben. Das trifft für die Symmetriegruppen der Quantenfeldtheorien auch zu.
- ◇ *O* für *orthogonal*,
- ◇ *S* für *speziell* bedeutet, dass die **Determinante** des Symmetrieoperators +1 ist und die **Spur** (Summe der Diagonalelemente) des Generators verschwindet.

Allgemein bezeichnet **U(N)** eine **unitäre Transformationsgruppe N-ter Dimension**, während sich hinter **SU(N)** eine **spezielle, unitäre Transformationsgruppe N-ter Dimension** verbirgt. Nur für eine spezielle, unitäre Transformationsgruppe existieren $\mathbf{N^2 - 1}$ **reelle, unabhängige Parameter**. Physikalisch interpretiert man sie als die **bosonischen Austauschteilchen** der jeweiligen Quantenfeldtheorie, den **Eichbosonen**, die die *Eichsymmetrie* bewerkstelligen.

20.51.5 Beispiel: GUT

In den *Grand Unified Theories (GUT)* ist die Vereinigung von dreien der fundamentalen Naturkräfte gelungen, indem man den einzelnen Wechselwirkungen unterschiedliche Symmetriegruppen zugeordnet hat. Die übergeordnete Transformationsgruppe ist gerade das **direkte Produkt** aus diesen Symmetriegruppen.

20.52 Synchrotron

Das Synchrotron (Ringbeschleuniger) ist die heute weit verbreitete Beschleunigerarchitektur, die geometrisch auf einem Kreisbeschleuniger basiert.

20.52.1 Gas geben im Partikelkarussell

Im Unterschied zum Zyklotron bewegen sich die zu beschleunigenden Teilchenbündel (engl. Fachbegriff: *beams*) nicht auf Spiralbahnen, sondern auf einer **Kreisbahn mit konstantem Radius** (*Beschleunigerring*). Auf dieser fixen Beschleunigungsstrecke werden die Teilchen in mehrfachen Umläufen sukzessiv beschleunigt. Die Beschleunigung erfolgt in kurzen Beschleunigungskapseln, den *Kavitäten*, die über den Umfang des Beschleunigerrings verteilt sind. Während des Beschleunigens steigen die Zentrifugalkräfte mit jedem Umlauf an. Nahe relativistischer Geschwindigkeiten, also Geschwindigkeiten, die vergleichbar sind mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit, steigt der relativistische Impuls dramatisch an.

20.52.2 Magnetfelder und elektrische Felder zwingen auf die Kreisbahn

Mit magnetischen Führungsfeldern kompensiert man den Einfluss der Zentrifugalkräfte, um die Teilchenbündel auf ihrer Sollbahn im Ring zu halten. Es ist also eine *Synchronisation* nötig: magnetisches Führungsfeld und elektrisches Beschleunigungsfeld müssen ständig nachgeregelt werden. Dies gilt auch für die Frequenz des elektrischen Wechselfeldes. Erst dann durchlaufen die Teilchen trotz zunehmender Geschwindigkeit die Beschleunigungsstrecke im Synchrotron ringförmig.

20.52.3 'Raus aus dem Karussell, 'rein ins Experiment

Erreichen die Teilchen ihre maximale bzw. angestrebte Geschwindigkeit, können sie aus dem Ring zu Experimentierorten abgeleitet werden (z. B. Beschuss statischer Targets). In *Collider-Experimenten* bringt man Teilchenstrahlen (die möglicherweise aus verschiedenen Beschleunigerringen entstammen) auf Kollisionskurs: dies vervielfacht die 'Kollisionsenergie' (Fachbegriff: Schwerpunktsenergie, engl. *com energy*) und ermöglicht so die Produktion neuartiger, schwerer Teilchen im Kollisionsprozess.

20.53 Synchrotronstrahlung

Die Synchrotronstrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die in speziellen Teilchenbeschleunigern, den Synchrotrons, erstmals beobachtet wurde. Sie entsteht immer dann, wenn **elektrisch geladene Teilchen in einem Magnetfeld beschleunigt** werden. Die Beschleunigung kann eine Richtungsänderung bei konstanter Bahngeschwindigkeit sein, eine nur betragsmäßige Änderung der Geschwindigkeit bei konstanter Richtung oder beides. Im Ruhesystem der beschleunigten Ladung beobachtet man **keine** Synchrotronemission.

20.53.1 Synchrotronstrahlung in der Astrophysik

Synchrotronstrahlung ist demzufolge **nichtthermisch** und von großer Relevanz in der Astrophysik, weil es zahlreiche kosmische Quellen gibt, wo sich elektrische Ladungen vor dem Hintergrund eines

interplanetaren (Beispiel Jupiter), interstellaren (Beispiel Sonne) oder intergalaktischen Magnetfeldes (Beispiel AGN-Jets) bewegen.

20.53.2 Polarisation und typische, emittierende Teilchen

Synchrotronstrahlung ist immer **linear polarisiert**. Die Polarisierung dient als wesentlicher Hinweis für Astronomen, dass die beobachtete Strahlung Synchrotronstrahlung ist. Die relevanten Teilchenspezies in Astro- und Teilchenphysik in Bezug auf Synchrotronemission sind **Elektron** und **Proton**. Dadurch dass das Elektron etwa 2000 leichter ist als das Proton, spielt die **elektronische Synchrotronstrahlung** die dominante Rolle in der Physik.

20.53.3 relativistische Effekte

Denn diese Teilchen können viel leichter relativistische Geschwindigkeiten erreichen (sie sind weniger träge), also Geschwindigkeiten, wo Effekte der Speziellen Relativitätstheorie wichtig werden. Während bei kleinen Geschwindigkeiten die abgestrahlten Photonen eine *Larmor-Verteilung* zeigen, wird bei relativistischen Geschwindigkeiten der Strahlungskegel scharf in Bewegungsrichtung gebündelt (*relativistische Kollimation*). Diesen Effekt kennt man auch als **Beaming**.

20.53.4 Wie Synchrotronstrahlung Magnetfelder verrät

Synchrotronstrahlung hat unter anderem deshalb einen so hohen Stellenwert in der Astronomie, weil ihre Eigenschaften als Indikator (engl. *tracer*) für Magnetfelder in Betrag *und* Richtung dienen. Auf diese Weise können Astronomen kosmische Magnetfelder messen, auch über astronomische Distanzen. Dieses Verfahren wird beispielsweise bei der Vermessung des **galaktischen Dynamos** angewendet. Dieses Phänomen bezeichnet das 'Aufziehen', also eine Verstärkung, galaktischer Hintergrundmagnetfelder durch die galaktische Rotation. Solche Messungen stecken den Parameterbereich ab, um magnetohydrodynamische Simulationen des interstellaren Mediums (ISM) zu bewerkstelligen. Dies liefert letztendlich Erkenntnisse über Galaxiendynamik, Dynamik der Spiralarme und der Interarm-Regionen sowie der globalen Galaxienstruktur.

20.53.5 SSC: Synchrotron-Selbst-Comptonisierung

Ein besonders wichtiger Effekt in der Astrophysik ist die **Synchrotron-Selbst-Comptonisierung** (engl. *synchrotron self-Compton*, **SSC**). Hierbei wird niederenergetische ('weiche') Synchrotronstrahlung durch Comptonisierung, also inverse Compton-Streuung, in hochenergetische ('harte') Synchrotronstrahlung verwandelt. Im mikroskopischen Bild, werden die weichen Photonen an den heißen Plasmateilchen gestreut und nehmen dabei Energie vom Plasmateilchen auf. Die ausgehenden Photonen haben also nach dem Streuakt höhere Energien. Dieser Vorgang kühlt das Plasma, weil kinetische Energie des Plasmas ('Wärme') in Strahlungsenergie umgewandelt wird. Zur Synchrotronemission sind Magnetfelder des kosmischen Hintergrunds oder einer benachbarten Magnetosphäre eines kosmischen Objekts nötig. Als heißes Reservoir für die Comptonisierung dient das emittierende Elektronengas selbst.

20.53.6 SSA: Synchrotron-Selbstabsorption

Die **Synchrotron-Selbstabsorption** (engl. *synchrotron self-absorption*, **SSA**) ist hingegen ein Effekt, bei dem bei einer bestimmten Photonenfrequenz (engl. *turnover frequency*) der Absorptionskoeffizient der Synchrotronstrahlung dramatisch ansteigt (*Twiss* 1954, *Le Roux* 1961, *McCray* 1969, *Wardzinski & Zdziarski* 2000). Das Elektronengas wirkt dann auf die Synchrotronstrahlung, die im Gas selbst erzeugt wird absorbierend, so dass die Strahlungsintensität bei der kritischen Frequenz einbricht. Für Synchrotronphotonen mit Frequenzen oberhalb dieser kritischen Frequenz ist das Gas jedoch durchlässig (*optisch dünn*, siehe auch optische Tiefe) und die SSA schlägt nicht zu.

20.53.7 Das machen SSC und SSA mit Spektren kosmischer Quellen

SSC und SSA beeinflussen das Profil von Synchrotronspektren kosmischer Quellen nachhaltig. Besonders relevant sind die Mechanismen bei kompakten Quellen. Typischerweise entsteht zunächst ein spektraler 'Buckel' im Radiobereich (engl. *radio bump*) aus der initiierten Synchrotronstrahlung. SSA bewirkt einen Einbruch im Spektrum unterhalb der kritischen Frequenz, wo die optische Tiefe für Synchrotronstrahlung dramatisch ansteigt. SSC hingegen generiert einen zweiten spektralen Buckel oberhalb des Radiobuckels, im hochenergetischen Spektralbereich. Synchrotronspektren zeigen daher typischerweise zwei 'Buckel' (engl. *double-humped*), was beispielsweise gut bei den Spektren der Blazare zu sehen ist.

Anwendung finden SSA und SSC auch bei dem Jet der Radiogalaxie **Centaurus A**. Diese Quelle zeigt Radiosynchrotronemission und SSC-Röntgenemission, wie die Daten von VLBI und Chandra belegen.

Auch das Zentrum der Milchstraße, das **Galaktische Zentrum** zeigt diese Phänomene. Die kompakte Radioquelle Sgr A*, die man mit dem Galaktischen Zentrum assoziiert, zeigt einen Synchrotronbuckel von thermischen Elektronen im Radiobereich (Maximum bei etwa 1 THz). Deren Comptonisierung erzeugt einen Röntgenbuckel (etwa bei 10^{17} Hz). Ein zweiter Radiobuckel, der Submillimeter-Exzess, weist darauf hin, dass die Quelle sehr kompakt ist. Mittlerweile weiß man, dass es sich um ein rotierendes (!) supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3 Millionen Sonnenmassen handelt.

20.53.8 Weiteres im Wissensportal

- ◇ Web-Artikel: Das größte Schwarze Loch der Milchstraße

20.54 Synchrozyklotron

Das Synchrozyklotron ist eine spezielle Architektur eines Teilchenbeschleunigers, die auf den Kreisbeschleuniger zurückgeht. Von der Bauweise her handelt es sich also um ein Zyklotron, das jedoch einen besonderen **Synchronisationsprozess** erfordert: Bei relativistisch schneller Bewegung der Teilchenstrahlen im Zyklotron erhöht sich der relativistische Impuls der Teilchen dramatisch und muss durch synchrone Abstimmung von Magnetfeld und Spannungsfrequenz ausgeglichen werden. Dieser präzisen Justierung verdankt dieser Beschleunigertypus den Namen. In Synchrotronbeschleunigern wurde die Synchrotronstrahlung entdeckt, also Strahlung, die beschleunigte elektrische Ladungen in Magnetfeldern emittieren. Weil sich die Teilchen typischerweise relativistisch schnell bewegen, ist diese Strahlung scharf in Bewegungsrichtung gebündelt (*relativistische Kollimation*, *Beaming*).

21 Lexikon T

21.1 Tachyon

Tachyonen (grch. *tachys*: 'schnell') sind hypothetische Teilchen (engl. auch *FTL particle* genannt für *Faster-Than-Light particle*), die sich schneller bewegen können als mit Lichtgeschwindigkeit! Dies ist nach der Speziellen Relativitätstheorie **nicht explizit verboten**, nur das Überschreiten der Vakuumlichtgeschwindigkeit c (knapp 300 000 km/s) ist nicht möglich. Tachyonen hingegen sollen *von Anfang an* eine Geschwindigkeit größer als c besitzen.

21.1.1 Tachyonen - gefangen in einer anderen Welt?

Dies ist theoretisch dann möglich, wenn Tachyonen eine **imaginäre Masse** besitzen, $m^2 < 0$. Sinkt ihre Geschwindigkeit jedoch ab und wird vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit, so wächst ihre Energie gegen unendlich, so dass sie die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nie unterschreiten können. Somit dringen Tachyonen - sollten sie existieren - nie in den Bereich der Unterlichtgeschwindigkeit ein. Betrachtet man den **Lichtkegel**, ein übliches Raum-Zeit-Diagramm der Relativitätstheorie, so bewegen sich die Tachyonen auf **raumartigen** Geodäten, während sich Photonen auf lichtartigen (Nullgeodäten) und Materie auf zeitartigen Geodäten bewegen.

21.1.2 Tachyonen vertauschen Ursache und Wirkung

Tachyonen widersprechen dem **Kausalitätsprinzip**! Zwischen Ereignissen mit *raumartigen Abstand* kann es gemäß Einstein keinen Signalaustausch geben. Würden Tachyonen tatsächlich existieren, so wäre es möglich, dass die Wirkung zeitlich **vor** der Ursache käme. Das würde die Physik, im Speziellen die Thermodynamik (Stichwort: thermodynamischer Zeitpfeil auf der Grundlage des 2. Hauptsatzes), in ernst zu nehmende Schwierigkeiten bringen. Außerdem wäre eine Reihe unlösbarer Paradoxa möglich. Aus diesen Gründen wird die Existenz solcher Teilchen und die Wahrhaftigkeit von Theorien, die sie postulieren oder ableiten, von den meisten Physikern negiert.

21.1.3 Tachyonen in nicht-supersymmetrischen Stringtheorien

In den Stringtheorien treten Tachyonen auf, wenn man auf die Supersymmetrie zwischen Bosonen und Fermionen verzichtet. Erst die Superstringtheorie garantiert, dass keine Tachyonen involviert sind und gewährleistet die Erhaltung des wertvollen und bisher immer verifizierten **Kausalitätsprinzips** ('Ursache kommt vor der Wirkung'). Andererseits bieten nicht-supersymmetrische Stringtheorien interessante Phänomene, wie die **Tachyonen-Kondensation**. In bosonischen Stringtheorien kann ein skalares Teilchen bzw. Feld auf diese Weise einen tachyonischen Zustand annehmen.

21.1.4 Tachyonen verboten?

Die experimentelle Suche nach Tachyonen, nach **Cerenkov-Strahlung**, die bei Tachyonenabbremsung bei der Propagation durch dichte Medien erwartet wird oder das negative (!) Massenquadrat in Energiebilanzen verschiedener Reaktionen waren bisher erfolglos. Allerdings ist die Existenz von Tachyonen auch nicht vollständig widerlegt worden. Trotzdem gibt es gute Gründe (wie hier dargestellt), weshalb sie *nicht existieren dürfen*, ohne die Physik in eine Krise zu stürzen.

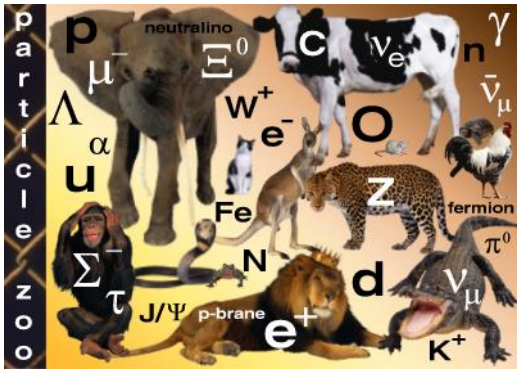

Abbildung 21.1: Der Teilchenzoo.

21.2 Tagbogen

Der Tagbogen wird unter den Jahreszeiten erläutert.

21.3 Tardyon

Als Tardyonen bezeichnet man alle Teilchen, die langsamer sind als Photonen im gleichen Medium. Die Geschwindigkeit der Tardyonen ist damit kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c, die etwa 300 000 km/s beträgt. Der Begriff Luxon fasst alle Teilchen zusammen, die sich mit c bewegen. Auf der 'anderen Seite der Lichtbarriere' findet man die (hypothetischen) Tachyonen.

21.4 Teilchen

Die kaum zu überschauende Zahl der Teilchen in der physik könnte man als 'Teilchenzoo' bezeichnen (siehe Grafik 21.1). Eine augenzwinkernde Bezeichnung, sprachlich gesehen eine Metapher ist: ebenso bunt und vielfältig wie die Fauna im Zoo ist, sind Zahl und Eigenschaften der Teilchen. Im strengeren Sinne unterscheiden Physiker **Elementarteilchen**, die keine weitere Substruktur haben, von zusammengesetzten Teilchen. Weiterhin gibt es zahlreiche Termini, die Teilchen unter einem bestimmten Charakteristikum zusammenfassen.

21.4.1 Welle und Teilchen

Die **echten Elementarteilchen** in der Teilchenphysik sind die Leptonen und die Quarks. Sie sind nach allem, was wir heute wissen und was das Standardmodell der Teilchenphysik aussagt, *punktförmig*. Diese Punktförmigkeit mag der ein oder andere Zeitgenosse mit Widerwillen zur Kenntnis nehmen; letztendlich ist sie eine Eigenschaft im Teilchenbild. Die Quantentheorie entlarvte die Teilchen als Wolf, der manchmal im Schafspelz daherkommt und manchmal nicht: der **Welle-Teilchen-Dualismus** besagt, dass man Teilchen auch als Welle beschreiben kann. Mit der Welle wird auch die Aussage zur Punktförmigkeit hinfällig, denn Wellen sind ausgedehnte Gebilde.

21.4.2 Hadronen, Mesonen, Baryonen, Nukleonen - alles nicht ohne

Der Baukasten aus elementaren Quarks und Leptonen bringt nun die Vielfalt des Teilchenzoos mit sich. Die sechs Quarks können als Bausteine für zusammengesetzte Teilchen dienen. Diese Hauptgruppe nennt man die Hadronen. Hadronen werden in Untergruppen klassifiziert: Exakt zwei Quarks setzen sich zu Mesonen zusammen. Baryonen hingegen bestehen immer aus genau drei Quarks.

Die Nukleonen (Kernteilchen) sind die beiden Teilchentypen im Atomkern, Proton und Neutron (und deren Antiteilchen). Beide gehören zu den wohl bekanntesten Baryonen.

Die Mesonen werden weiter unterteilt, nach bestimmten Teilcheneigenschaften, also nach **Quantenzahlen**. Die bekanntesten Mesonen sind die Pionen und die Kaonen, aber es gibt noch weit exotischere Teilchen, wie charmante (die nennt man wirklich so!) Mesonen (die c-Quarks enthalten) oder seltsame Mesonen (die s-Quarks enthalten), das J/Psi-Teilchen, Charmonium, Bottomium etc.

21.4.3 weitere Teilcheneigenschaften

Diese Teilchen kann man durch Quantenzahlen wie Spin, Isospin, schwachen Isospin, Parität, elektrische Ladung, Farbladung, schwache Ladung, Hyperladung, Seltsamkeit etc. sehr gut voneinander unterscheiden.

21.4.4 Hyperonen sind seltsam

Bei den Hyperonen handelt es sich um besonders schwere, seltsame Baryonen, die demnach vollkommen neue Konstituenten aufweisen, als die gewöhnliche Materie, nämlich seltsame Quarks (*s-Quarks*). Daneben gibt es noch Delta-Baryonen und Bottom-Baryonen (enthalten b-Quarks).

21.4.5 Die drei Leptonenfamilien e, μ, τ

Lässt man von Quarkmaterie ab und wendet sich der zweiten fundamentalen Elementarteilchenklasse zu, den Leptonen, so findet man auch hier Unterklassen. Sie werden in **drei Generationen** unterteilt. Es handelt sich um die Elektron-, die Myon- und die Taufamilie. Die bekanntesten Leptonen sind wohl das Elektron und dessen Antiteilchen, das Positron. Daneben kennt man die Myonen, die im Prinzip 'schwere Elektronen' sind und die Tauonen (Tau-Teilchen), die noch schwerer sind. Die Trichotomie (Dreiteilung) kann mithilfe des *schwachen Isospins* gruppentheoretisch erklärt werden. Die drei Familien wurden auch experimentell anhand des Zerfalls des neutralen Z-Bosons mit einer 95%igen Sicherheit verifiziert. Denn das Z-Teilchen kann in ein Paar zweier Leptonen zerfallen, nämlich Lepton und Antilepton. Im Experiment wurden *nur drei* Zerfallskanäle gefunden: Elektron und Positron, Myon und Antimyon, Tauon und Antitauon. Das ist der wichtigste, experimentelle Nachweis für die drei Leptonengattungen.

21.4.6 Fast ein Nichts von Teilchen: Neutrinos

Die Neutrinos zählen ebenfalls zu den Leptonen und können in die drei Familien eingeordnet werden: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino. Zwischen diesen Familien können sie sogar wechseln und sich ineinander umwandeln, man spricht von **Neutrinooszillation**. Diesem Prozess unterliegen die Neutrinos, die von der Sonne kommen und im Sonneninnern als Nebenprodukt bei der thermonuklearen Fusion (genauer: pp-Kette) entstehen.

21.4.7 Teilchenhochzeiten

Auch Leptonen können sich paaren: Bei sehr tiefen Temperaturen finden sich in bestimmten Festkörpern, den **Supraleitern**, zwei Elektronen zusammen. Sie bilden einen gebundenen Zustand, den man nach einem der Pioniere der Supraleitung *Cooper-Paare* nennt. Der Zusammenschluss dieser zwei Fermionen ist von bosonischer Natur und ändert schlagartig die Leitungseigenschaften des Materials. Ein Analog zur Supraleitung der Elektronen ist die Supraleitung der Quarks, die so genannte Farbsupraleitung. Hier paaren sich fermionische Quarks zu bosonischen Diquarks. Bei hohen Dichten wird dieser Materiezustand relevant und wird im Zusammenhang mit Neutronensternen diskutiert. Die Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie würde sich durch die Quarkpaarung verändern.

21.4.8 Kraftteilchen und Standardmodell

In den Quantenfeldtheorien kennt man die **Eichbosonen**, bosonische Teilchen, die die jeweilige Wechselwirkung (elektromagnetisch, gravitativ, stark, schwach) vermitteln. Dies sind

- ◇ das masselose, elektrisch neutrale Photon der QED,
- ◇ die massebehafteten, geladenen W-Bosonen und das elektrisch neutrale Z-Boson der schwachen Wechselwirkung,
- ◇ die acht masselosen, farbgeladenen Gluonen der QCD
- ◇ und das nur hypothetische, also nicht nachgewiesene Graviton der Quantengravitation (beispielsweise in den Stringtheorien).

Zusammengezählt sind das $1 + 3 + 8 + 1 = 13$ Eichbosonen, von deren Existenz die Physiker ausgehen. Im Standardmodell der Teilchenphysik gibt es noch ein weiteres wichtiges Teilchen, das ebenfalls noch nicht experimentell verifiziert werden konnte: das Higgs-Teilchen. Es ist besonders massereich ist und daher noch nicht in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen worden. Die Teilchenphysiker hoffen mit jeder neuen Beschleunigergeneration auf die Verifikation (ab 2007: LHC am CERN). Das Higgs-Teilchen ist erforderlich, um aus masselosen Eichbosonen massebehaftete zu machen, wie im Falle der W-Teilchen und des Z-Teilchens. Das Higgs-Boson gehört wiederum zur Klasse der *Nambu-Goldstone-Bosonen*, die immer an einer spontanen Symmetriebrechung beteiligt sind. Die Zahl der Eichbosonen wird in den Großen Vereinheitlichten Theorien signifikant erweitert: hier leitet man weitere 12 X-Bosonen ab, die natürlich ob des immens hohen Energieregimes ($E \sim 10^{16}$ GeV) weit von einem experimentellen Nachweis entfernt sind.

21.4.9 Nach diesem Antipasti: Antiteilchen und Antimaterie

Die **Antiteilchen** wurden bereits angesprochen. Zu jedem Teilchen gibt es das korrespondierende Antiteilchen mit *invertierter elektrischer Ladung*. Ist das Teilchen sein eigenes Anti-Teilchen nennt man es *Majorana-Teilchen*. Es ist möglich, die Konstituenten zusammengesetzter Teilchen ohne Ausnahme zu invertieren. Auf diese Weise kann man Antimaterie herstellen, die jedoch von der umgebenden gewöhnlichen Materie gut abgeschirmt werden muss, damit sie nicht ausschließlich in elektromagnetische Energie (Gammastrahlen) zerstrahlt. Dieser Prozess heißt Paarvernichtung oder Paarannihilation. Am CERN ist es 1995 gelungen Antiwasserstoff herzustellen: ein positiv geladenes Positron ('Antielektron') bildet ein Atom mit einem negativ geladenen Antiproton als Atomkern.

21.4.10 Atome & Moleküle

Dies leitet zum sicherlich bekanntesten Teilchenverbund über: dem **Atom**. Die Atomisten um *Demokrit* (460 - 371 v.Chr.) bezeichneten in der antiken Philosophie die unteilbare (grch. *atomos*) Einheit der Materie als Atome. Die Physik konnte erst im 20. Jahrhundert belegen, dass das, was als Atome bezeichnet wurde, keineswegs so elementar war, wie angenommen. Der Pionier war *Ernest Rutherford*, der 1911 in seinen Streuversuchen von α-Teilchen an Goldfolie zeigen konnte, dass Atome aus einem kleinen, dichten Atomkern und einer umgebenden Elektronenhülle bestehen. Die darauf folgende, Jahrzehnte andauernde Ausarbeitung der Quantentheorie zeigte schließlich, dass die Elektronen nicht als massive Punktteilchen den Atomkern umkreisen (*Bohrsches Atommodell*), sondern die Elektronen in 'Wolken' (präzise: dem Absolutquadrat der **Wellenfunktion** des Elektrons) um den Atomkern 'verschmiert' sind (*Orbitalmodell*). Miteinander verbundene Atome, die **Moleküle**, verdanken ihre Existenz chemischen Bindungen, die ebenfalls quantentheoretisch verstanden werden können. Die damit assoziierten Gebiete der Atom- und Molekülphysik sind das Orbital-Modell, die Hybridisierung, die Elektronenbindung, die Hartree-Fock-Theorie, die homöopolare Bindung etc.

21.4.11 α-, β- und γ-Teilchen

In der **Radioaktivität** kennt man *Alpha-Teilchen*, die mit dem Alpha-Zerfall assoziiert sind, *Beta-Teilchen*, die mit dem Beta-Zerfall zusammenhängen und Gamma-Strahlen, die bei Gamma-Zerfällen emittiert werden. Alle diese Teilchen senden radioaktive Atomkerne (*Radionuklide*) aus. Die Bezeichnung mit den Anfangsbuchstaben des griechischen Alphabets war zunächst in der Unkenntnis begründet, um welche Teilchen es sich handele. Experimente (die die ionisierende Wirkung der Radioaktivität ausnutzen; Nebel- und Blasenkammer, Ablenkung in elektrischen/magnetischen Feldern, Massenspektrometer etc.) enthüllten die wahre Natur dieser Teilchen:

- ◇ **Alpha-Teilchen** sind Heliumatomkerne, also ein Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen.
- ◇ **Beta-Teilchen** sind je nach Beta-Zerfallstyp Elektronen oder Positronen (die zur Gruppe der Leptonen gehören).
- ◇ **Gamma-Strahlen** sind hochenergetische, elektromagnetische Wellen oberhalb die sich an den Bereich der Röntgenstrahlung anschließen.

21.4.12 Bosonen, Fermionen und statistische Physik

In der **statistischen Physik** unterteilt man sämtliche Teilchen in zwei Gruppen: in Bosonen, Teilchen mit ganzzahligem Spin, und in Fermionen, Teilchen mit halbzahligem Spin. Das Unterscheidungskriterium ist also der **Spin**. Das Spin-Statistik-Theorem grenzt beide Teilchengruppen scharf voneinander ab (identische versus unterscheidbare Teilchen) und postuliert eine jeweils adäquate quantentheoretische Beschreibung. Die Konsequenzen für die Struktur der Materie sind beträchtlich und von fundamentaler Bedeutung für die Physik und den Aufbau der Materie (Periodensystem der Elemente, Bose-Einstein-Kondensate, Quantengase, BCS-Supraleitung, Farbsupraleitung, Stabilität kompakter Objekte durch fermionischen Entartungsdruck uvm.).

21.4.13 Quanten

In der Quantentheorie hat man auch den **Quanten** bestimmte Namen gegebenen und so Teilchengruppen definiert: die **Photonen** wurden bereits besprochen und sind die Quanten des elektromagnetischen Feldes. Der Quantisierungsapparat anderer Wechselwirkungen führt auch auf weitere Quantentypen: Die **Phononen** sind die Schwingungsquanten des Kristallsgitters in der Festkörperphysik. Die **Magnonen** sind die Quanten im Ferromagneten. **Fluxonen** bezeichnen die Flussquanten des magnetischen Flusses in der Theorie der Supraleitung. **Vibronen** sind allgemeine, quantisierte Schwingungsfreiheitsgrade, während **Rotonen** quantisierte Rotationsfreiheitsgrade bezeichnet. Beides wird in der Molekülphysik angewendet, wo ein Molekül seinen Energiezustand durch Austausch (Emission oder Absorption) dieser Quanten ändern kann. Im Prinzip wird jedoch beim banalen Anstoßen eines Fadenpendels eine Vielzahl von Vibronen erzeugt, die das Pendel in einen angeregten Schwingungszustand bringen.

21.4.14 kosmologische Teilchen

In der **Kosmologie** hat man ebenfalls Teilchennamen für Felder eingeführt. Quantentheoretisch betrachtet macht es keinen Sinn, zwischen Teilchen und Feld zu unterscheiden, weil sie 'zwei Seiten derselben Medaille sind'. Einen Grundstein dazu legte der *Welle-Teilchen-Dualismus*.

So wird die Inflation mit dem **Inflaton** verknüpft; ein Skalarfeld in der Theorie der Quintessenzen wird mit dem **Cosmon** identifiziert und die Dunkle Energie bzw. die kosmologische Konstante wird mit dem **Radion** in Verbindung gebracht.

21.4.15 WIMPs

Als WIMPs bezeichnet man alle Teilchen, die - wie die Leptonen auch - nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, aber eine relativ große Masse tragen. Sie sind Kandidaten für die nicht baryonische Dunkle Materie im Universum. Neutrinos gehören nicht zu den WIMPs, weil sie zu leicht sind.

21.4.16 Teilchen als Fäden oder Flächen

Eine Erweiterung des Teilchenbegriffs wurde durch die Stringtheorien etabliert. Sämtliche Teilchen, aber auch andere Objekte, werden hier als schwingfähige Gebilde angesehen. Im eindimensionalen Fall heißen sie **Strings**, im zweidimensionalen Fall sind es die Membranen, kurz **Bran** genannt und im allgemeinen Fall nennt man sie **p-Bran** mit der Dimension p. Verschiedene Teilchen werden dadurch generiert, dass unterschiedliche Schwingungszustände der p-Branen vorliegen: ein Oberton ist gewissermaßen ein neues Teilchen. Ob sich die Stringtheorien bzw. ihr übergeordnetes Konstrukt, die M-Theorie, als leistungsfähige Alternative zur konservativen Teilchenphysik entpuppt, muss noch gezeigt werden. Nach wie vor gelten die Stringtheorien als Schlüssel, um eine Quantengravitation, eine Theorie der Gravitation der starken Felder und kleinen Raumzeit-Skalen, zu formulieren. Mittlerweile hat sie in Form der Loop-Quantengravitation eine konkurrierende Theorie bekommen.

21.4.17 Geschwindigkeit als Kriterium zur Teilchenklassifikation

Eine Teilchenklassifikation anhand ihrer Geschwindigkeit v relativ zur Lichtgeschwindigkeit c im gleichen optischen Medium wurde auch unternommen. Hier kennt man die Tardyonen mit v kleiner c, die Luxonen mit v gleich c und die Tachyonen mit v größer c. Das Auftreten von Tachyonen würde gegen das **Prinzip der Kausalität** (Reihenfolge von Ursache und Wirkung) verstoßen (aber nicht gegen die Spezielle Relativitätstheorie!), daher versuchen Physiker tachyonische Theorien zu vermeiden.

21.4.18 supersymmetrische Teilchen

Als ob dieses Sammelsurium an Teilchen nicht schon genug wäre, denken sich die Physiker in der Supersymmetrie (SUSY) neue Teilchen aus: die **SUSY-Teilchen**. In einer wohl definierten Nomenklatur tauchen hier supersymmetrische Partner zu etablierten Teilchen auf: so spricht man beispielsweise von Squarks, Neutralinos und Higgsinos. Bislang wurde keines dieser SUSY-Teilchen experimentell entdeckt. Daher handelt es sich bei der SUSY bisher nur um eine zusätzliche Theorie, die sich erst noch bewähren muss.

21.4.19 Übung

Sie haben nun eine Reihe von Teilchen kennen gelernt, häufig charakterisiert durch das Suffix *-onen*, z. B. Hadronen, Bosonen, Photonen, Gluonen, Tachyonen, Selektronen, Tauonen und Cosmonen. Klären Sie in Abgrenzung dazu die Begriffe Schoschonen, Kronen und Verschonen.

21.5 Teilchenbeschleuniger

Ein Teilchenbeschleuniger ist eine große Anlage zur Erforschung der **Hochenergie- und Teilchenphysik**. In dieser Forschungsanlage werden geladene Teilchen (Ionen) auf hohe Geschwindigkeiten mittels elektrischer und magnetischer Felder beschleunigt. Ist eine geeignete Geschwindigkeit erreicht, wird mit den Teilchen ein Ziel beschossen. In diesem Zusammenstoß entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen, die mit diversen Messgeräten detektiert werden. Aus der Untersuchung dieser Teilchenreaktionen folgern die Physiker, welche Teilchen am Zusammenstoß beteiligt waren, wie sie sich umgewandelt und welche Kräfte gewirkt haben.

21.5.1 relativistische Effekte

Die Teilchengeschwindigkeiten sind so hoch, nämlich nahe an der Vakuumlichtgeschwindigkeit von rund 300000 km/s, dass die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen: Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion sind tägliches Geschäft der Hochenergiephysiker. Die Längenkontraktion äußert sich darin, dass schwere Ionen, die viele Nukleonen enthalten, in Bewegungsrichtung kontrahiert sind: sie haben dann keine Kugelgestalt mehr, sondern ähneln im Laborsystem eher einem Pfannkuchen! (siehe Abbildung unter Lorentz-Kontraktion)

21.5.2 Felder steuern Teilchenbahnen

Zur Beschleunigung und Führung der Teilchenstrahlen (engl. Fachbegriff *beam*) benutzen die Experimentatoren elektrische und magnetische Felder. Aus diesem Grund müssen die Teilchen im Strahl geladen, also ionisiert (Fachbegriff: *stripped*), sein. Die Lorentz-Kraft $\mathbf{F} = \mathrm{q}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ mit der elektrischen Ladung q, dem Vektor des elektrischen Feldes $\mathbf{E}$, dem Vektor des magnetischen Feldes $\mathbf{B}$ und dem Vektor der Teilchengeschwindigkeit $\mathbf{v}$ (hier in nicht-relativistischer Formulierung) sorgt - bei richtiger Orientierung der Felder - im Wesentlichen im ersten Term für die **Beschleunigung** in Bewegungsrichtung und im zweiten Term für die **Ablenkung**, also die Führung der Teilchenstrahlen. Magnetische *Dipolfelder* nutzt man zur Ablenkung des Strahls, während magnetische *Quadrupolfelder* für dessen Fokussierung sorgen. Ohne Ladung der beschleunigten Spezies verschwinden die Lorentz-Kräfte und weder Führung noch Beschleunigung wären möglich.

21.5.3 Wozu schnelle Teilchen?

Der Sinn von Teilchenbeschleunigern ist es, Teilchen auf hohe kinetische Energien zu beschleunigen und in einer finalen Kollision mit einem Ziel neue Teilchen freizusetzen. Je größer die kinetischen Energien der Teilchenstrahlen, umso komplexere Teilchenschauer (Sekundärteilchen) können die Experimentatoren im Kollisionsereignis erzeugen, in der Regel entstehen dabei völlig neue Teilchenspezies.

Man kann sagen, dass Teilchenbeschleuniger die modernste Form eines Mikroskops ist. Weil die Längenskala deutlich kleiner ist und in den subatomaren Bereich hinein geht. Die charakteristische Skala liegt im Bereich von Femtometern (10^{-13} cm), daher könnte man Teilchenbeschleuniger '**Femtoskope**' nennen. Mit Teilchenbeschleunigern kann man die Vielfalt der Teilchen, den 'Teilchenzoo', experimentell untersuchen.

21.5.4 Aufbau eines Teilchenbeschleunigers

Teilchenbeschleuniger sind im Prinzip lange, evakuierte Röhren (Fachbegriff: *Kavitäten*), in denen sich Teilchenstrahlen ausbreiten. Ohne Vakuum wäre die Beschleunigung durch vorzeitige Kollisionen nicht möglich. Die Physiker benutzen zwei Methoden, um Teilchen miteinander kollidieren zu lassen: Der Experimentator schießt entweder die Teilchenbündel auf ein statisches Ziel (engl. *target*); oder benutzt eine spezielle Bauweise von Teilchenbeschleunigern, den *Collider*, in dem er zwei Teilchenbündel separat beschleunigt und sie schließlich auf Kollisionskurs bringt. Collider haben den Vorteil, dass die **Schwerpunktsenergie** (engl. *center-of-mass energy*, kurz *com energy*) deutlich größer ist, weil sich die kinetischen Energien *beider* Teilchenbündel addieren.

Es gibt inzwischen diverse **Beschleunigerarchitekturen** mit unterschiedlichen Größen, Geometrien, Effizienzen und Kosten. Die ersten Beschleuniger waren Linearbeschleuniger (engl. *linear accelerator*, kurz LINAC), bei denen die Beschleunigungsstrecke eine Gerade ist. In Kreisbeschleunigern (Zyklotron), Synchrozyklotron und Synchrotron sind die Beschleunigungsstrecken gekrümmt (Spiral- oder Kreisbahn). Der Vorteil ist die **mehrfache Beschleunigung** des Beams in mehrfachen Umläufen; der Nachteil ist die Ablenkung des Beams aus der Sollbahn durch Zentrifugalkräfte. Dies gleichen die Physiker mit (immer stärker werdenden) magnetischen Führungsfeldern aus.

21.5.5 CERN - Die bekannteste Teilchenbeschleunigeranlage der Welt

Das Akronym CERN steht für *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, was im Deutschen **Europäische Organisation für Kernforschung** genannt wird (wörtlich übersetzt eigentlich: Europäischer Rat für Kernforschung). CERN ist das größte und bekannteste Teilchenphysiklabor der Welt. Es wurde bereits 1954 gegründet, hat derzeit 20 Mitgliedstaaten und beschäftigt knapp 3000 Menschen der unterschiedlichsten Berufe. Am CERN wurde 1989 das Internet von *Tim Berners-Lee* erfunden!

Moderne Teilchenbeschleunigungsanlagen wie CERN sind große Komplexe, die aus vielen LINACs und Synchrotrons bestehen. Mit Spannung erwarten die Forscher und die Weltöffentlichkeit die Fertigstellung des neuen Beschleunigers namens *Large Hadron Collider* (**LHC**) Ende 2007. Aufregend wird die Inbetriebnahme des LHC in jedem Fall werden, wie die unten genannten, brisanten Forschungsthemen nahe legen. Neben den Ionenkollisionsexperimenten produziert man CERN auch

- ◇ Neutronenstrahlen zur Strukturanalyse,
- ◇ Neutrinostrahlen, die durch das *Gran-Sasso-Massiv* bis nach Rom geschossen werden, um dort mit Neutrinodetektionsexperimenten den Strahl zu untersuchen (Stichwort: Neutrino-Oszillation)
- ◇ Antiprotonenstrahlen, die auf so genannten Dezelerationsstrecken abgebremst werden, um **Antiwasserstoffatome**, eine Form von Antimaterie, herzustellen.
- ◇ uvm.

21.5.6 Teilchenstrahlen

Gemäß der Teilchenspezies, die beschleunigt werden, kann man **leptonische Beschleuniger** und **hadronische Beschleuniger** unterscheiden. Leptonische Teilchenbündel bestehen vornehmlich aus Elektronen und Positronen (die Antiteilchen der Elektronen), während hadronische Teilchenspezies in der Regel schwere Ionen (typischerweise gestripptes Gold oder Blei) sind.

21.5.7 Erforschung fundamentaler Naturkräfte

Teilchenbeschleuniger sind die Laboratorien der Hochenergiephysik und sind diejenige experimentelle Anordnung, um die **vier fundamentalen Wechselwirkungen der Physik**, nämlich schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung, elektromagnetische und gravitative Wechselwirkung zu studieren. Die Quantenfeldtheorien machen viele Aussagen, die in Teilchenbeschleunigern verifiziert oder falsifiziert werden können. Das Unifikationsbestreben bei hohen Energien wurde erfolgreich bei der elektroschwachen Theorie und den Großen Vereinheitlichten Theorien umgesetzt. Die **Entdeckung des Z-Teilchens** 1973 am CERN durch *Donald Perkins* und Kollegen war eine wissenschaftliche Sensation, wurde es doch von den Theoretikern *Weinberg, Salam* und *Glashow* prognostiziert (Nobelpreis 1979). Erst zehn Jahre nach der Entdeckung des Z-Teilchens, 1983, wurden schließlich auch die beiden **W-Teilchen am CERN entdeckt**: Am Synchrotron schossen *Carlo Rubbia* und *Simon Van der Meer* Protonen auf Antiprotonen und entdeckten die verbleibenden 'Weakonen'.

21.5.8 Brisante Forschungsthemen

Die wichtigsten Forschungsgebiete der Hochenergiephysik haben auch astrophysikalische Relevanz, weil der Kosmos auf natürliche Weise die höchsten Energien produziert (siehe z. B. kosmische Strahlung, Blazare oder Big Bang).

Eine wichtige Entdeckung steht im Rahmen des Standardmodells noch aus: die Hochenergiephysiker versuchen das **Higgs-Boson** zu entdecken. Die Teilchenbeschleuniger der neusten Generation sind an der kritischen Energieschwelle, um dieses schwere Teilchen produzieren zu können. Hier entbrennt ein Wettlauf zwischen den Forschern der USA (Fermilab) und Europa (CERN). Das Higgs-Teilchen erklärt Vorgänge im frühen Universum. Im Higgs-Mechanismus werden die Teilchen mit Masse ausstattet.

Fieberhaft wird auch nach experimentellen Signaturen der **Supersymmetrie** gesucht. Bisher konnte keines der geforderten SUSY-Teilchen in Teilchenbeschleunigern nachgewiesen werden. Dieser Aspekt ist auch von großem Interesse für Kosmologen, weil diese Teilchen eventuell zur Dunklen Materie im Kosmos beitragen.

Ein anderes Forschungsgebiet befasst sich mit dem intensiven Studium des **Quark-Gluonen-Plasmas** (QGP). Mittlerweile konnte dieser Zustand aus freien Quarks und Gluonen im Experiment hergestellt werden. Dieses Forschungsthema interessiert Astrophysiker hinsichtlich der Frage nach der Zustandsgleichung der Materie in Neutronensternen und Quarksternen.

In den hochenergetischen Stößen versuchen die Physiker auch Quanteneffekten der Gravitation auf die Spur zu kommen. Teilchenbeschleuniger erweisen sich als Testlaboratorien für die Vorstellungen, die auf Modellen der **Quantengravitationen** beruhen. Die Stringtheorien mit ihren Extradimensionen können getestet, die Grenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie ausgelotet und die Anregung von Gravitonen überprüft werden. Sollte die Planck-Skala tatsächlich durch vorhandene Extradimensionen reduziert werden, so kann die so genannte *TeV-Quantengravitation* bereits mit den neusten Teilchenbeschleunigern untersucht werden.

Für die Kosmologie hat die Beschleunigerphysik auch insofern eine Bedeutung, weil vergleichbare physikalische Zustände wie im **Urknall** im Teilchenphysiklabor erzeugt werden könnten. Die Hoffnung ist, dass mit immer besseren Beschleunigern immer höhere Schwerpunktsenergien bzw. Energiedichten produziert werden können, um sich stufenweise diesem Bereich zu nähern. Dabei könnten zukünftig möglicherweise Leptoquarks und X-Kraft im GUT-Regime studiert werden.

Eine besonders faszinierende Aussicht ist, dass in besonders energiereichen Kollisionen Schwarze Löcher im irdischen Labor hergestellt werden könnten. Bei Richtigkeit des TeV-Quantengravitationsszenarios stehen wir auch hier an der Schwelle, um den Traum von der **Laborphysik mit Schwarzen Löchern** wahr werden zu lassen. Quantitative Überlegungen vieler Hochenergiephysiker zeigen, dass sie keine Gefahr für die Erde darstellen würden, weil sie um ein Vielfaches kleiner sind als die kosmischen Schwarzen Löcher. Die meisten Wissenschaftler sind sich einig darüber, dass solche Mini-Löcher auf extrem kurzen Zeitskalen (fm/c) durch die Emission von Hawking-Strahlung verdampfen müssen. Eventuell gelingt der Nachweis dieser noch hypothetischen Strahlungsform in Teilchenbeschleunigern. Weitere Einzelheiten zu diesem Thema gibt es in einem Web-Artikel unter Schwarze Löcher in Teilchenbeschleunigern.

21.5.9 Websites der bekanntesten, internationalen und deutschen Teilchenbeschleunigeranlagen

- ◇ CERN in der Schweiz,
- ◇ FERMILAB, *Fermi National Accelerator Laboratory* (USA),
- ◇ RHIC, *Relativistic Heavy Ion Collider* (USA),
- ◇ DESY, *Deutsches Elektronen Synchrotron*, in Hamburg und Zeuthen,
- ◇ GSI, *Gesellschaft für Schwerionenforschung* in Darmstadt,
- ◇ Max-Planck-Institut für Physik in München,
- ◇ Forschungszentrum Karlsruhe,
- ◇ Forschungszentrum Jülich.

21.6 Tensorboson

Bezeichnung für ein Boson mit Spin 2, zum Beispiel ist das hypothetische Graviton ein Spin-2-Teilchen.

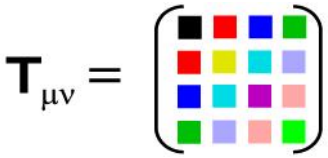

Abbildung 21.2: Tensor: Gestalt und Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe.

21.7 Tensoren

Tensoren sind mathematische Größen, die auf geometrischen Objekten, dem n-dimensionalen Raum oder auf **Mannigfaltigkeiten**, durch ihre Transformationseigenschaften definiert sind. Tensoren sind in vielen Bereichen der mathematischen Physik von großer Wichtigkeit. Die Elastomechanik kennt den **Spannungstensor**, die Hydrodynamik den **Viskositätstensor** und die klassische Mechanik den **Trägheitstensor**. Besonders wichtig werden die Tensoren vor allem in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), einer Gravitationstheorie, die *Albert Einstein* 1916 veröffentlicht hat. Nach einer kurzen Einführung in die Tensorterminologie, die Tensoralgebra und die Tensoranalysis wollen wir uns in diesem Eintrag besonders den Tensoren der ART zuwenden.

21.7.1 Tensorstufe und Tensordefinition

Genauso wie Treppen haben Tensoren eine **Stufe**, nur meint es die 'Anzahl ihrer Indizes' (in der Indexschreibweise). Tensoren unterscheiden sich von Stufe zu Stufe durch ihr *Koordinatentransformationsverhalten*. Was damit gemeint ist, kann kaum prosaisch ausgedrückt werden, sondern nur präzise in der mathematischen Sprache, nämlich in Form der folgenden Gleichungen:

$$\mathrm{X}'^{\mu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\nu}} \mathrm{X}^{\nu} \quad \text{contravariant tensor 1. rank}$$

$$\mathrm{X}'_{\mu} = \frac{\partial x^{\nu}}{\partial x'^{\mu}} \mathrm{X}_{\nu} \quad \text{covariant tensor 1. rank}$$

$$\mathrm{Y}'^{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\kappa}} \frac{\partial x'^{\nu}}{\partial x^{\lambda}} \mathrm{Y}^{\kappa\lambda} \quad \text{contravariant tensor 2. rank}$$

$$\mathrm{Y}'_{\mu\nu} = \frac{\partial x^{\kappa}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x^{\lambda}}{\partial x'^{\nu}} \mathrm{Y}_{\kappa\lambda} \quad \text{covariant tensor 2. rank}$$

$$\mathrm{Z}'^{\lambda}_{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\lambda}}{\partial x^{\sigma}} \frac{\partial x^{\kappa}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x^{\rho}}{\partial x'^{\nu}} \mathrm{Z}^{\sigma}_{\kappa\rho} \quad \text{mixed tensor 3. rank}$$

Anhand von Beispielen wird klarer, was gemeint ist: Tensoren 0. Stufe sind **Skalare** ('Zahlen'), Tensoren 1. Stufe sind die **Vektoren**, Tensoren 2. Stufe können als **Matrizen** mit Zeilen und Spalten dargestellt werden, wie man sie aus der Linearen Algebra kennt. Alle diese Gebilde sind **Zahlentupel** ('Anordnungen von Zahlen'), und so ist allgemein ein Tensor der Stufe k in einem n-dimensionalen Raum als ein n^k-Tupel darstellbar.

21.7.2 Beispiel: Tensor 2. Stufe

Physikalische Tensoren in der ART haben häufig 2. Stufe. Daher sind sie immer als **quadratische, symmetrische Matrizen** darstellbar. Die Raumzeit der ART ist vierdimensional ($n = 4$, eine Zeit- und drei Raumdimensionen), so dass Tensoren 2. Stufe als 4×4 - Matrizen darstellbar sind. Schon ein Tensor 2. Stufe besteht deshalb aus $4 \times 4 = 16$ Komponenten. Im einfachsten Fall sind die Komponenten Zahlen (z. B. bei der Minkowski-Metrik), im Allgemeinen aber koordinatenabhängige Variablen (z. B. beim metrischen Tensor der Schwarzschild-Metrik). Auf jeden Fall kann man die

Komponenten als Anordnung aus vier Spalten und vier Zeilen notieren. Eine solche Anordnung hat eine **Hauptdiagonale**, die in der ersten Zeile oben links beginnt, über das zweite Element von links in der zweiten Zeile und das dritte Element von links in der dritten Zeile geht und am rechten Element in der vierten Zeile endet. Die Symmetrie besagt nun, dass man an der Hauptdiagonalen spiegeln kann und somit z. B. das Element unten links mit demjenigen oben rechts übereinstimmen muss. In der Abbildung 21.2 sind farbige Quadrate als Platzhalter für die Tensorkomponenten eingetragen worden. Dabei bedeutet, dass gleiche Farbe den gleichen Tensoreintrag hat. So wird Symmetrie eines Tensors zweiter Stufe unmittelbar anschaulich klar. Denn spiegelt man sorgfältig alle Elemente, so wird klar, dass von den 16 Elementen der symmetrischen Matrix **nur 10** übrig bleiben, die wirklich unabhängig voneinander sind.

21.7.3 kovariante und kontravariante Tensoren

Im *Tensorkalkül* kann man die Stufe eines Tensors verallgemeinern und zwischen **kovarianten** (Index unten), **kontravarianten** (Index oben) und **gemischten** Tensoren (Indizes oben und unten) unterscheiden. Bei gegebenem Tensor unterscheidet sich seine kovariante Form von der kontravarianten darin, dass die *Transformationsmatrizen invertiert* sind.

Was bedeuteten kovariante und kontravariante Tensoren anschaulich? Betrachten wir eine beliebig gekrümmte Mannigfaltigkeit, die in der ART vierdimensional ist, z. B. eine gekrümmte Raumzeit. Vierdimensional heißt, dass wir die Mannigfaltigkeit durch vier Größen parametrisieren können (z. B. Koordinatenzeit, Radius, zwei Winkel in sphärischen Koordinaten). Dabei handelt es sich also um ein mögliches *Koordinatensystem* von vielen. Auf diese Weise kann man die Mannigfaltigkeit eindeutig durch ein **Linienelement** beschreiben. Einfacher vorstellen kann man sich eine zweidimensionale Fläche im dreidimensionalen Raum, z. B. die gekrümmte Fläche eines Globus, den man vor sich ins Zimmer hinstellt. Die zwei Parameter, die die Oberfläche des Globus aufspannen, sind dann beispielsweise zwei Winkel (Längen- und Breitengrad).

Fixieren wir nun einen Punkt P auf dieser Fläche/Mannigfaltigkeit, so kann man sich in jede Koordinatenrichtung durch Bildung der partiellen Ableitung den Tangentenvektor beschaffen. Im Beispiel des Globus zeigen die Tangentenvektoren entlang der Großkreise. Man nennt nun sämtliche kontravariante Vektoren im Punkt den **Tangentialraum** an P. Im Allgemeinen liegt dieser Raum **nicht** mehr *in* der zugrunde gelegten Mannigfaltigkeit. Die Tangentenvektoren im Punkt bilden eine so genannte *kontravariante Basis*. Demgegenüber besteht die *kovariante Basis* aus darauf senkrecht stehenden Vektoren (inverse Jacobi-Matrix). Beide Basen eignen sich zur Darstellung von Tensoren und sind gleichwertig. Der metrische Tensor kann benutzt werden, um von einer Darstellung auf die andere zu transformieren.

21.7.4 Tensorterminologie

In der Tensorterminologie nennt man einen Tensor, der i kontravariante Indizes und j kovariante Indizes hat, einen Tensor vom Typ (i,j), seine Stufe ist i+j, also die Summe aller vorhandenen Indizes. Der Tensor Z in den Gleichungen oben so beispielsweise den Typ (1,2) und ist Stufe 3.

21.7.5 Einsteinsche Summenkonvention

Die Stellung von Indizes kann man je nach Anforderung des tensoralgebraischen Problems durch Multiplikation mit dem **metrischen Tensor** anpassen. Hier einige Beispiele:

$$\begin{aligned} \mathrm{X}_{\mu\nu} &= \mathrm{g}_{\mu\lambda}\mathrm{X}^{\lambda}{}_{\nu}, \\ \mathrm{X}^{\lambda}{}_{\mu\nu} &= \mathrm{g}_{\mu\kappa}\mathrm{X}^{\lambda\kappa}{}_{\nu}, \\ \mathrm{X}^{\lambda\kappa}{}_{\nu} &= \mathrm{g}^{\kappa\mu}\mathrm{X}^{\lambda}{}_{\mu\nu}. \end{aligned}$$

Dabei ist immer die **Einsteinsche Summenkonvention** zu beachten:

Über wiederholt auftretende Indizes wird summiert.

Und zwar durchlaufen üblicherweise griechische Indizes **alle vier Dimensionen** der Mannigfaltigkeit (0,1,2,3; 0: Zeit) und lateinische Indizes **nur die drei Raumdimensionen** (1,2,3). In der Literatur gibt es für die Handhabung der griechischen und lateinischen Buchstaben aber auch Unterschiede, die jedoch zu Beginn vereinbart werden. Die Summenkonvention allerdings ist fundamental und erspart die aufwendige Notation mit Summensymbolen.

21.7.6 Kontraktion oder Verjüngung

Die Stufe eines Tensors kann man auch erniedrigen: dies nennt man *Kontraktion*. Darüber hinaus existiert im Tensorkalkül auch ein *indexfreier* Zugang, der in der Anwendung auf ein konkretes Problem weniger praktisch ist.

21.7.7 Weshalb brauchte Einstein Tensoren?

Die Verwendung von **Tensoren in der ART** ist kein Zufall, denn gemäß des **Prinzips der Kovarianz** müssen die relativistischen Gleichungen *notwendigerweise tensoriell* sein. Die Transformationsgesetze der Tensoren (siehe erste Abbildung) lassen schnell erkennen weshalb: Angenommen zwei Tensoren stimmen in einem bestimmten Koordinatensystem (ohne Beschränkung der Allgemeinheit im ungestrichenen System) überein. Dann zeigen die Transformationsgesetze sofort, dass auch die Tensoren im gestrichenen System übereinstimmen! D.h. die Tensoren stimmen dann auch *in jedem beliebigen anderen Koordinatensystem* überein!

Tensorgleichungen sind koordinatenunabhängig.

Die Wahl eines Koordinatensystems erleichtert nur konkrete Rechnungen. In der Praxis sind Tensorgleichungen eine sehr kompakte Notation in der mathematischen Physik, aber für konkrete Rechnungen muss man meist ein bestimmtes Koordinatensystem (man könnte auch sagen: einen Beobachter, eine Tetrade) auswählen.

21.7.8 Tensoren vs. Tensorfeld

Im allgemeinen Sprachgebrauch der Physiker werden Tensoren synonym mit den **Tensorfeldern** gebraucht. Der subtile, semantische Unterschied besteht darin, dass Tensorfelder auf einem Gebiet definiert sind, in der ART auf einer vierdimensionalen Mannigfaltigkeit. Die Unterscheidung ist die konsequente Verallgemeinerung von Vektor und Vektorfeld der Vektoranalysis. So sind Tensorfelder Zuordnungen von Tensoren gleichen Typs zu jedem Punkt der Mannigfaltigkeit, ebenso wie bei einem Vektorfeld jedem Punkt eines Gebietes ein Vektor zugeordnet wird (Beispiel: Geschwindigkeitsfeld in der Hydrodynamik).

21.7.9 kompakte Gleichungen mittels Tensorschreibweise

Ebenso wie die Vektoren eine sehr kompakte Formulierung in der Newtonschen Theorie der Gravitation erlauben, gestatten die Tensoren der ART eine sehr kompakte, tiefsinnige Darstellung der Einsteinschen Gravitationstheorie: ein ganzer Satz von Differentialgleichungen (zehn gekoppelte, nichtlineare, partielle Differentialgleichungen) kann so als **eine Gleichung** geschrieben werden, die einen tiefen, physikalischen Gehalt birgt: die **Einsteinschen Feldgleichungen** offenbaren eine direkte Verbindung von Raumkrümmung, repräsentiert durch den Einstein-Tensor, und Energie bzw. Materie, repräsentiert durch den Energie-Impuls-Tensor!

21.7.10 physikalische Tensornamen in der ART

Tensoren in der relativistischen Physik haben maximal 4. Stufe, wie der Riemannsche Krümmungstensor und Weyl-Tensor. Viele Tensoren können physikalisch anschaulich interpretiert werden. Näheres ist bei den einzelnen Tensoren selbst nachzulesen:

- ◇ Einstein-Tensor
- ◇ Energie-Impuls-Tensor
- ◇ Killing-Tensor
- ◇ Maxwell-Tensor
- ◇ metrischer Tensor
- ◇ Ricci-Tensor
- ◇ Riemann-Tensor
- ◇ Torsionstensor
- ◇ Weyl-Tensor

21.8 Tetraden

Als Tetrade bezeichnet man ein **Vierbein** in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), das aus einem zeitlichen und drei räumlichen Einheitsvektoren aufgespannt wird. Diese lokalen Lorentzsysteme stellen geeignete Bezugssysteme dar, um die allgemein relativistische Physik zu beschreiben. Anstelle von Tetrade kann man auch anschaulicher von einem Beobachter sprechen.

21.8.1 Beispiel: Tetrade beim Kerr-Loch

Ein besonders bekanntes Bezugssystem bei rotierenden Schwarzen Löchern (Kerr-Lösung) ist der ZAMO (*zero angular momentum observer*), dessen Bezugssystem auch LNRF (*locally non-rotating frame*) heißt. Die physikalischen Gesetze werden aus der Sicht dieser speziellen Beobachter formuliert und erhalten so eine einfache Gestalt. Es ist ein grundsätzliches Problem in der relativistischen Physik, eine geeignete Tetrade/einen geeigneten Beobachter zu finden, die/der die Lösung des Problems vereinfacht.

21.8.2 Nulltetraden

Wichtig ist der Fall, wenn die aufspannenden Vektoren **Nullvektoren** (siehe Geodäten) sind. Die Tetrade heißt dann **Nulltetrade**. Der **Newman-Penrose-Formalismus** nutzt exzessiv dieses Tetradenkalkül aus, um zahlreiche Anwendungen, wie z. B. Gravitationswellen zu untersuchen. Eine wesentliche Anwendung der Nulltetraden ist die Ableitung der Kerr-Lösung aus einer **komplexen Transformation**.

Im Tetradenkalkül nutzt man die Tetradenvektoren als Basis, die einen Zusammenhang zwischen **Tetradenmetrik** und metrischen Tensor herstellen. Die Metrik kann dann in Summen von Produkten aus Nulltetradenvektoren zerlegt werden. Bei Verwendung von komplexen Nullvektoren folgt das Linienelement der Kerr-Metrik aus der Summe dieser Produkte. Das Linienelement ds^2 ist gerade die wesentliche Größe, die eine vierdimensionale Mannigfaltigkeit - die so genannte Raumzeit - eindeutig festlegt und aus der man als gleichwertige Darstellung den metrischen Tensor ableiten kann.

21.9 Tetraquark

Über die Entdeckung von Tetraquarks wurde kurze Zeit nach dem Nachweis von Pentaquarks im Jahr 2003 gemutmaßt. Beides sind Teilchen, die aus mehr als drei Quarks (Baryonen) bestehen: das Tetraquark aus vier und das Pentaquark aus fünf Quarks.

21.9.1 Mehr-Quark-Systeme

Der experimentelle Nachweis von Mehr-Quark-Systemen war eine kleine Sensation in der Teilchenphysik, weil man bislang nur Mesonen (Zwei-Quark-Systeme) und Baryonen (Drei-Quark-Systeme) kannte. Das Standardmodell der Teilchenphysik verbietet solche Mehr-Quark-Systeme nicht. Es wurde sogar schon vor zwei Jahrzehnten darüber spekuliert und beispielsweise 1997 in theoretisch enger gefasste Form gebracht (*Diakonov, Petrov & Polyakov*, hep-ph/9703373), welche Eigenschaften (Quantenzahlen) bestimmte Mehr-Quark-Systeme haben sollten.

21.9.2 das erste Tetraquark?

Die erste **baryonische Resonanz** wurde Mitte 2003 von der BABAR-Kollaboration entdeckt (*Aubert et al.*, hep-ex/0304021). Sie trägt die Bezeichnung **Ds(2317)** und ist assoziiert mit einem Teilchen der Masse von 2.32 GeV. Diese Beobachtung folgt aus hochenergetischen Stößen von Elektronen mit ihren Antiteilchen, den Positronen (*Paarannihilation*). Bis heute ist es nicht klar, ob es sich bei Ds(2317) um ein Meson handelt, das aus einem c-Quark und einem anti-s-Quark besteht oder ob man tatsächlich das **erste Tetraquark** entdeckt hat.

21.9.3 noch ein Tetraquark?

Die Belle-Kollaboration um *Choi et al.* konnte nur wenige Monate nach der Entdeckung des Pentaquarks Theta$^+$ und des mutmaßlichen Tetraquarks Ds(2317) die baryonische Resonanz **X(3872)** nachweisen (hep-ex/0309032). Auch hier gibt es ähnliche Spekulationen wie bei Ds(2317), ob es sich um ein Meson handelt, das aus einem c-Quark und einem anti-c-Quark (*Charmonium*, wie z. B. J/Psi) zusammengesetzt ist oder ob es auch ein Tetraquark ist. Ein neues Papier legt die Eigenschaften von X(3872) dar (*Choi et al.* 2004, hep-ex/0405014). Das 'X' in der Bezeichnung der Resonanz trägt der Unkenntnis über die Natur des Teilchens Rechnung. In jedem Fall eröffnen die Mehr-Quark-Systeme ein spannendes, neues Teilgebiet der Teilchenphysik.

21.10 TeVeS

Das Akronym TeVeS steht für ***Te**nsor-**Ve**ktor-**S**kalar-Gravitationstheorie*. Es handelt sich dabei um eine alternative Gravitationstheorie, einem Konkurrenten zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART). In den 1980er Jahren wurde zunächst eine Alternative zur Newtonschen Gravitation vorgeschlagen, die unter der Bezeichnung **MOND** bekannt geworden ist. Aus den Versuchen, diese Ansätze relativistisch kovariant zu machen, erwuchs 2004 TeVeS. Diese neue Theorie wird zurzeit ständig weiterentwickelt und getestet. Mehr Einzelheiten gibt es unter dem Lexikoneintrag MOND.

21.11 Thermodynamik

Die Thermodynamik (auch *Wärmelehre*) ist eine sehr alte, klassische Disziplin der Physik, die phänomenologisch makroskopische Größen, wie Temperatur, Dichte, Druck, Entropie etc. zueinander in Beziehung setzt.

Im Rahmen der **statistischen Physik** ist eine Verbindung des Mikrokosmos und des Makrokosmos möglich, indem man statistische Ensembles von Teilchen betrachtet und die Gesetze der Quantenstatistik berücksichtigt. Das Spin-Statistik-Theorem fordert eine fundamentale Unterscheidung von Teilchen in Bosonen und Fermionen. Wichtige Anwendungen sind Zustandsgleichungen von Gasen wie die Quantengase (Bosegas und Fermigas) oder auch Bose-Einstein-Kondensation und Supraleitung.

21.11.1 Thermodynamik Schwarzer Löcher

Wichtig im Zusammenhang mit Schwarzen Löchern wird die Thermodynamik, weil sich eine analoge Behandlung zu den thermodynamischen Hauptsätzen herausgestellt hat, wenn man entsprechende Größen der Theorie Schwarzer Löcher mit den klassischen thermodynamischen Größen identifiziert. Diese Analoga haben *Bardeen, Carter & Hawking* 1973 gefunden. Eine wesentliche Größe, die man studieren kann, ist die **Fläche des Ereignishorizontes**, die mit der Masse des Schwarzen Loches ansteigt und mit der Rotation des Loches abfällt. Eine bemerkenswerte Eigenschaft ist, dass, wenn zwei Schwarze Löcher verschmelzen, die Fläche des neuen Horizontes größer ist, als die Summe der Flächeninhalte der einzelnen, kollidierenden Schwarzen Löcher, ähnlich der Dreiecksungleichung aus der Geometrie. Dieses Phänomen kann man mit dem **Konzept der Entropie** aus der Thermodynamik in Verbindung bringen: Nach dem **Zweiten Hauptsatz** der Thermodynamik steigt die Entropie (Maß für Unordnung in einem System, fehlende Information) immer an! Genauso verhält es sich mit der Fläche des Horizontes:

$$\delta A_{\mathrm{H}} \geq 0,$$

d.h. die Bekenstein-Hawking-Entropie ist proportional zur Fläche des Horizontes und hängt sonst nur von Naturkonstanten ab! Das Analogon zur thermodynamischen Temperatur ist die so genannte **Oberflächengravitation**, eine Größe, die ein Maß für die Stärke des Gravitationsfeldes am Horizont ist. Ein FIDO würde in der Nähe des Loches eine divergierende Kraft messen. Renormiert man diese Kraft, so erhält man die Oberflächengravitation. Eine kurze Rechnung zeigt, dass Oberflächengravitation und Rotation konstant auf dem Horizont sind, d. h. unabhängig vom Polarwinkel:

$$g_{\mathrm{H}} = \text{const für } r = r_{\mathrm{H}}.$$

Dies ist der **Nullte Hauptsatz**. Die Formulierung des **Ersten Hauptsatzes** gewinnt man, indem man die intensiven Zustandsgrößen Oberflächengravitation und Rotation mit den entsprechenden extensiven Größen Oberfläche und Drehimpuls verknüpft, die schließlich die Gesamtenergie des Systems, also die Masse des Schwarzen Loches liefern:

$$dM_{\mathrm{H}} = T_{\mathrm{H}} dS_{\mathrm{H}} + \Omega_{\mathrm{H}} dJ_{\mathrm{H}}.$$

Das Analogon zum klassischen Temperaturbegriff heißt in der Theorie Schwarzer Löcher Hawking-Temperatur.

Schließlich lautet das Pendant zum **Dritten Hauptsatz**, die Unerreichbarkeit des **absoluten Nullpunkts** (bei exakt null Kelvin), dass bei Schwarzen Löchern die Oberflächengravitation nie Null werden kann:

$$g_{\mathrm{H}} = 0 \text{ nicht möglich.}$$

Die thermische Strahlung von Schwarzen Körpern besitzt ihr Pendant in der Hawking-Strahlung. *Hawking* konnte 1974 zeigen, dass die Oberflächengravitation der thermodynamischen Temperatur entspricht und eine ähnliche Formulierung wie für Plancksche Strahler möglich ist.

21.11.2 Bedeutung für die Astrophysik

Wenn auch viele Aspekte dieser Betrachtung sehr theoretisch anmuten, so besitzt sie dennoch eine unmittelbare Relevanz für die Astronomie: Schwarze Löcher verfügen neben er Akkretionsenergie über einen zweiten Energiekanal: Etwa 30% der Gesamtenergie stecken in der Rotation! Ein Abbau dieser Rotationsenergie (ähnlich wie bei Pulsaren) liefert nochmals eine vergleichbare Leuchtkraft wie die Akkretionsleistung. Für Aktive Galaktische Kerne (AGN), die im Innern ein supermassereiches Schwarzes Loch beherbergen, bedeutet dies, dass eine **Zweiteilung** vorliegen sollte: die eine Klasse gewinnt Energie aus der Akkretion (*radio-leise Objekte*), die andere gewinnt auch Energie aus der Rotation (*radio-laute Objekte*), die in Jets umgewandelt wird! Die Beobachtung kann diese These stützen.

21.11.3 Literatur

◇ *Bardeen, J.M.*, *Carter, B.* & *Hawking, S.W.*: The Four Laws of Black Holes Mechanics, Commun. Math. Phys. 31, 161, 1973

21.12 thermonukleare Fusion

Warum geben die Sterne am Himmel Licht ab? Diese scheinbar banale Frage - eine der Urfragen der Astronomie - hat es in sich und wird in diesem Abschnitt beantwortet.

Eine Definition des Begriffs *Stern* im engeren Sinne ist, dass ein Stern aus der Verschmelzung von Atomkernen Strahlungsenergie gewinnt. Der Fachgriff für diesen Prozess lautet *thermonukleare Fusion*. Der Wortbestandteil *thermo*, grch. 'Wärme' deutet darauf hin, dass hohe Temperaturen benötigt werden. *Nuklear* leitet sich vom lateinischen Wort *nucleus*, dt. 'Kern', ab. Es handelt sich nämlich um einen kernphysikalischen Vorgang. Schließlich kommt das Wort *Fusion* ebenfalls aus dem Lateinischen und bedeutet 'Gießen, Schmelzen'. Unter Hitzeeinwirkung werden demnach Atomkerne verschmolzen. Ein Fachbegriff, der dasselbe meint wie thermonukleare Fusion, lautet stellare Nukleosynthese.

21.12.1 Je schwerer der Stern, umso schwerer die erzeugten Elemente

Das heiße Innere von Sternen ist für die Fusion ein ideales Milieu. Schon in der Sonne, einem verhältnismäßig kleinen Stern, werden im Zentrum etwa 15 Mio. Grad erreicht. Die verschiedenen thermonuklearen Fusionsprozesse wurden ab etwa 1930 vor allem von den Pionieren der Stellarphysik *H.A. Bethe*, *C.F. von Weizsäcker* und *E.E. Salpeter* entdeckt. Aus den **Strukturgleichungen der Sterne**, die einen Stern gastheoretisch beschreiben, folgt: Je massereicher der Stern ist, umso heißer ist sein Inneres. Die zur Fusion von Atomkernen benötigte Energie steigt mit der Schwere der Atomkerne (Atommasse) an. Das bedeutet in Verbindung mit dem zuvor Gesagten, dass massereichere Sterne schwerere Elemente fusionieren können.

21.12.2 Fusion mikroskopisch betrachtet

In der **nuklearen Astrophysik** unterscheidet man verschiedene Energieumwandlungsreaktionen, die wesentlich von der Temperatur abhängen. Mikrophysikalisch kann man sich die Fusionsprozesse folgendermaßen vergegenwärtigen: Für die Verschmelzung von positiv geladenen Atomkernen muss man den *Coulomb-Wall* der sich abstoßenden elektrischen Ladungen überwinden. Die dafür nötige Energie steigt mit der Ladungszahl. Thermische Energie auf der Mikroebene kann man sich als Teilchenbewegungen vorstellen, die klassisch mit der *Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung* beschrieben werden. Diese Verteilung besagt schlichtweg, wie viele Teilchen es zu jeder Geschwindigkeit gibt. Das Maximum dieser Verteilung steigt mit der Temperatur, d. h. heißere Gase enthalten im Mittel schnellere Teilchen. Es ist daher klar, dass für die Verschmelzung schwererer Teilchen eine höhere Gastemperatur (**Zündtemperatur**) nötig ist. Deshalb steigen die Zündtemperaturen mit den zu fusionierenden, schwerer werdenden Elementen (Wasserstoff H, Helium He, Kohlenstoff C, Sauerstoff O etc.) an. Ist das Objekt zu massearm, unterbleiben thermonukleare Fusionsreaktionen. Diese Objekte sind eher planetenartig und werden in der Astronomie Braune Zwerge genannt.

21.12.3 Es ist nicht alles Feuer, das brennt

Mit Anleihen aus der Poesie spricht man bisweilen vom 'nuklearen Feuer', was eine Assoziation zur chemischen Verbrennung auslöst. Sogar Astronomen sprechen vom **Brennen** (engl. *burning*) im Innern von Sternen. Fakt ist, dass diese Redeweise streng genommen falsch ist. Eine chemische Verbrennung ist eine Reaktion unter Beteiligung von Sauerstoff - das ist mitnichten bei der thermonuklearen Fusion der Fall. (Dass es Astronomen nicht immer so genau mit der Chemie nehmen, zeigt auch die Verwendung des Begriffs Metall.)

21.12.4 Übersicht aller thermonuklearen Fusionreaktionen

Wasserstoffbrennen

Das *Wasserstoffbrennen* oder auch pp-Reaktion genannt, die im Temperaturbereich zwischen **1 und 15 Millionen Kelvin** abläuft. Für diese Zündtemperatur ist eine Sternmasse von **mindestens 0.08 Sonnenmassen** nötig. Das ist gerade die Massengrenze, die den Unterschied zwischen Stern und Braunem Zwerg ausmacht.

$$\begin{array}{lcll} {}^1\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} & \rightarrow & {}^2\mathrm{H} + e^+ + \nu_e + 1.44\ \mathrm{MeV} & (14\ \mathrm{Mrd.\ Jahre}) \\ {}^2\mathrm{H} + {}^1\mathrm{H} & \rightarrow & {}^3\mathrm{He} + \gamma + 5.49\ \mathrm{MeV} & (6\ \mathrm{Sekunden}) \end{array}$$

(Die Zeitangaben sind mittlere Zeiten für das Eintreffen der jeweiligen Reaktion.)

Die erste Reaktion ist die Fusion aus zwei Protonen (daher die Bezeichnung pp), wo bereits eine Energie von 1.44 MeV und Elementarteilchen (Positron und Elektron-Neutrino) frei werden. Diese Fusion startet erst ab einer Zündtemperatur von 10 Million Kelvin. Hierbei wird schwerer Wasserstoff, Deuterium ^{2}H, freigesetzt. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop, das im Atomkern ein Proton und ein Neutron hat.

An der zweiten Reaktion ist anstelle des einfachsten Wasserstoffisotops ^{1}H (nur ein Proton im Atomkern) Deuterium beteiligt. Hier liegt die Zündtemperatur wesentlich niedriger, bei nur 1 Million Kelvin. In der letzten Reaktion der pp-Kette verwandelt sich das Heliumisotop He-3 in das schwerere Isotop He-4, wobei wiederum einfache Wasserstoffkerne für die Primärreaktion gebildet werden:

$$^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2\ {}^1\mathrm{H} + 12.85\ \mathrm{MeV}\ (1\ \mathrm{Mio.\ Jahre})$$

Diesmal sogar 12.85 MeV frei werden. Die freiwerdende Energie überträgt sich entweder als **kinetische Energie** auf die neu gebildeten Teilchen (und erhöht damit die mittlere Gastemperatur) oder wird als Strahlung freigesetzt. Neutrinos sind schwach wechselwirkende Teilchen mit kleiner Masse, die daher das Sonnenplasma verlassen und somit kühlen können. Die Energiebilanz der pp-Reaktion liefert 26.2 MeV = 4.2×10^{-12} J pro Heliumkern. Die 'Asche' dieser Fusionsreaktionen ist demnach Helium.

Wasserstoffbrennen ist die **wichtigste thermonukleare Reaktion in der Sonne**, die eher ein leichter Stern ist. Nur im Zentrum erreicht die Sonne besagte Temperatur von etwa 15 Millionen Kelvin, so dass auch nur dort die pp-Reaktion abläuft. Nebenbei gesagt, erzeugt demnach die Sonne in ihrem Innern **Antimaterie** (nämlich z. B. das Positron, das Antiteilchen des Elektrons), das jedoch kurz nach der Entstehung mit einem Elektron annihiliert, also zu Gammastrahlen zerstrahlt. Weiter außen befinden sich die *Wasserstoffkonvektionszonen*, wo das heiße Plasma der Sonne in vertikaler Richtung 'umgewälzt' wird, und so die Wärme an die Sonnenoberfläche befördert. Hierbei entsteht die typische **Granulation** der Sonne, eine körnige Struktur mit Konvektionszellen von etwa 100000 km Ausdehnung. Zum anderen findet *Strahlungstransport* von innen nach außen statt, so dass die Strahlung schließlich in der Photosphäre die Sonne verlässt.

CNO-Zykus

Die nächste, wesentliche Fusionsreaktionskette ist der **Bethe-Weizsäcker-** oder CNO-Zykus, benannt nach den wesentlichen, beteiligten Elementen Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O). Dieser Kernprozess läuft neben der pp-Reaktion **oberhalb von 10 Millionen Kelvin** ab.

Schwerere Kerne wie Kohlenstoff unterliegen **Resonanzreaktionen**, weil die kinetische Energie eingefangener Nukleonen (hier Wasserstoff) gerade der Anregungsenergie eines schwereren Kerns entspricht. Die Reaktionen dieses Zyklus sind komplexer und vielfältiger. In der Summe werden hier jedoch auch vier Protonen zu Helium-4 (Atomkern mit zwei Protonen und zwei Neutronen) fusioniert: Auch im CNO-Zyklus wird aus Wasserstoff Helium. Kohlenstoff (genauer *C-12*) übernimmt in der Reaktionskette die Rolle eines '*nuklearen Katalysators*', weil es an den Reaktionen immer beteiligt ist und verbraucht wird, aber zum Ende des Zyklus wieder in der Ausgangsmenge vorhanden ist. Die

anderen Elemente Stickstoff und Sauerstoff tauchen im Zyklus als Zwischenprodukte auf, verschwinden aber wieder in der endgültigen Bilanz. Ein ganzer Zyklus besteht aus folgenden Reaktionen:

$$
\begin{array}{lcll}
^{12}\mathrm{C} + ^{1}\mathrm{H} & \rightarrow & ^{13}\mathrm{N} + \gamma + 1.95\ \mathrm{MeV} & (1\ \text{Mio. Jahre}) \\
^{13}\mathrm{N} & \rightarrow & ^{13}\mathrm{C} + e^{+} + \nu_e + 2.22\ \mathrm{MeV} & (14\ \text{Minuten}) \\
^{13}\mathrm{C} + ^{1}\mathrm{H} & \rightarrow & ^{14}\mathrm{N} + \gamma + 7.54\ \mathrm{MeV} & (300000\ \text{Jahre}) \\
^{14}\mathrm{N} + ^{1}\mathrm{H} & \rightarrow & ^{15}\mathrm{O} + \gamma + 7.35\ \mathrm{MeV} & (320\ \text{Mio. Jahre}) \\
^{15}\mathrm{O} & \rightarrow & ^{15}\mathrm{N} + e^{+} + \nu_e + 2.71\ \mathrm{MeV} & (82\ \text{Sekunden}) \\
^{15}\mathrm{N} + ^{1}\mathrm{H} & \rightarrow & ^{12}\mathrm{C} + ^{4}\mathrm{He} + 4.96\ \mathrm{MeV} & (10000\ \text{Jahre})
\end{array}
$$

Der CNO-Zyklus ist bei der Sonne nicht besonders relevant und spielt erst bei massereicheren Sternen eine bedeutendere Rolle.

Die Energiebilanz ist exotherm, so dass auch hier etwa 25 MeV $= 4 \times 10^{-12}$ J pro Heliumkern frei werden. Endprodukt dieser Fusionskette ist also im Wesentlichen **Kohlenstoff**.

Heliumbrennen

Die nächste Brennstufe ist das *Heliumbrennen*, besser gesagt der **Triple-Alpha-Prozess** oder *Salpeter-Prozess*, benannt nach drei α-Teilchen (Helium-4-Kerne), die für diesen Reaktionszyklus nötig sind. Er läuft **oberhalb von etwa 100 Millionen Kelvin bzw. 0.25 Sonnenmassen** ab, jedoch **nur bei sehr hohen Plasmadichten** ab. Hier wird Kohlenstoff 'gebrütet', und zwar nach folgendem Schema:

$$
\begin{array}{lcll}
^{4}\mathrm{He} + ^{4}\mathrm{He} & \rightarrow & ^{8}\mathrm{Be} + \gamma - 0.096\ \mathrm{MeV} & (\text{endotherm!}) \\
^{8}\mathrm{Be} + ^{4}\mathrm{He} & \rightarrow & ^{12}\mathrm{C} + 2\,\gamma + 7.4\ \mathrm{MeV} &
\end{array}
$$

Das Übergangsprodukt Beryllium (*Be*) ist sehr instabil. Wegen der geringen Lebensdauer (10^{-16} Sekunden) dieser Substanz ist die Wahrscheinlichkeit der zweiten Reaktion nur 1:10^{9}! Bei der zweiten Reaktion handelt es sich um einen *Resonanzeinfang*, bei dem zunächst der instabile Übergangskern (*Compoundkern*) O^{+} entsteht, der aber rasch zu C-12 und zwei Gammaquanten zerfällt. Die Energiebilanz beträgt 7.3 MeV pro gebildeten Kohlenstoffkern. 'Asche' dieser Prozesse ist ebenfalls Kohlenstoff.

Bei der primordialen Nukleosynthese im frühen Universum konnte über diesen Prozess **kein Kohlenstoff** gebildet worden sein, weil das Universum einfach noch **nicht dicht genug** war.

Kohlenstoffbrennen

Eine weitere Brennstufe ist der C-Prozess oder das *Kohlenstoffbrennen*, der ab einer Temperatur von **etwa 500 Millionen Kelvin** zündet. Ab einer Masse von **vier Sonnenmassen** ist der Stern so schwer, dass die Kohlenstoffkerne die Coulomb-Barriere überwinden können und zu zahlreichen schwereren Elementen fusionieren (fünf Kanäle, d. h. fünf mögliche Reaktionsgleichungen):

$$
\begin{array}{lcll}
^{12}\mathrm{C} + ^{12}\mathrm{C} & \rightarrow & ^{24}\mathrm{Mg} + \gamma + 13.93\ \mathrm{MeV} & \\
^{12}\mathrm{C} + ^{12}\mathrm{C} & \rightarrow & ^{23}\mathrm{Na} + \mathrm{p} + 2.24\ \mathrm{MeV} & \\
^{12}\mathrm{C} + ^{12}\mathrm{C} & \rightarrow & ^{20}\mathrm{Ne} + ^{4}\mathrm{He} + 4.62\ \mathrm{MeV} & \\
^{12}\mathrm{C} + ^{12}\mathrm{C} & \rightarrow & ^{23}\mathrm{Mg} + \mathrm{n} - 2.61\ \mathrm{MeV} & (\text{endotherm!}) \\
^{12}\mathrm{C} + ^{12}\mathrm{C} & \rightarrow & ^{16}\mathrm{O} + 2\ ^{4}\mathrm{He} - 0.114\ \mathrm{MeV} & (\text{endotherm!})
\end{array}
$$

Sauerstoffbrennen

Nun schließt sich der **O-Prozess** oder das *Sauerstoffbrennen* an, der oberhalb einer Temperatur von **etwa 10 Milliarden Kelvin** abläuft. Dabei fusionieren Kerne des Sauerstoffisotops O-16 zu

verschiedenen, schwereren Elementen:

$$
\begin{aligned}
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{32}\mathrm{S} + \gamma + 16.54\ \mathrm{MeV} \\
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{31}\mathrm{P} + \mathrm{p} + 7.68\ \mathrm{MeV} \\
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{28}\mathrm{Si} + {}^{4}\mathrm{He} + 9.59\ \mathrm{MeV} \\
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{31}\mathrm{S} + \mathrm{n} + 1.46\ \mathrm{MeV} \\
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{16}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{24}\mathrm{Mg} + 2\ {}^{4}\mathrm{He} - 0.393\ \mathrm{MeV} \quad (\text{endotherm!})
\end{aligned}
$$

Die Energiebilanz ist zwar noch positiv, aber sukzessive mit der Fusion schwererer Elemente abnehmend.

Siliziumbrennen

Das *Siliziumbrennen* ist schließlich diejenige Fusionsreaktion, die die schwersten Elemente im Innern eines Sterns hervorbringen kann: nämlich Eisen (*Fe*) und Nickel (*Ni*). Die beteiligten Reaktionen sind die Folgenden:

$$
\begin{aligned}
{}^{28}\mathrm{Si} + {}^{28}\mathrm{Si} &\rightarrow {}^{56}\mathrm{Ni} + \gamma \\
{}^{56}\mathrm{Ni} &\rightarrow {}^{56}\mathrm{Co} + e^{+} + \nu_e \quad (\beta^{+}\text{–Zerfall}) \\
{}^{56}\mathrm{Co} &\rightarrow {}^{56}\mathrm{Fe} + 2\,e^{+} + 2\,\nu_e \quad (\beta^{+}\text{–Zerfall})
\end{aligned}
$$

Daneben hat sich durch die anderen Fusionsprozesse eine große Menge an Strahlung - ein signifikantes **Photonenbad**, wie Physiker sagen - gebildet, so dass sich andere Elemente auch über **Photodisintegration** bilden können:

$$
\begin{aligned}
{}^{28}\mathrm{Si} + \gamma &\rightarrow {}^{27}\mathrm{Al} + \mathrm{p} - 11.58\ \mathrm{MeV} \\
{}^{28}\mathrm{Si} + \gamma &\rightarrow {}^{24}\mathrm{Mg} + {}^{4}\mathrm{He} - 9.98\ \mathrm{MeV}
\end{aligned}
$$

21.12.5 Eisenbrennen is nich

Mit dem Siliziumbrennen enden die thermonuklearen Brennprozesse, weil die Energiebilanz aus der **Fusion von Eisen nicht mehr positiv** ist: Die Reaktionen sind dann ausschließlich endotherm! Die kernphysikalische Ursache dafür ist, dass Eisen die **größte Bindungsenergie pro Nukleon** hat und daher Fusionsreaktionen ausreichender Energiezufuhr benötigen. Für so schwere Kerne ist die **Fission** (Spaltung) der geeignete Prozess, um eine positive Energiebilanz zu erhalten. Diese Spaltprozesse schwerer Kerne finden im Innern von irdischen Kernreaktoren statt.

21.12.6 Woher kommt mein Goldkettchen?

Vom Juwelier, klar. Interessanter ist diese Frage in einem astronomischen Kontext: Wenn Eisen nicht fusioniert werden kann, woher kommt dann die Vielzahl schwerer Elemente *nach Eisen*, z. B. Schwermetalle wie Blei, Gold und Platin, Lathanoide, Actinoide, schwere Radionuklide etc.?

Sie werden einerseits in bestimmten Entwicklungsphasen von Roten Riesensternen erzeugt. Die so genannte AGB-Phase (AGB: *Asymptotic Giant Branch*, dt. *asymptotischer Riesenast*) ist im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne einzuordnen. AGB-Sterne erzeugen die schweren Elemente in den **s-Prozessen**. Dabei werden auf der Zeitskala von Jahren Neutronen von den Atomkernen im Stern eingefangen und zu schweren Elementen bis zum Element Wismut (*Bi*, Ordnungszahl 83). Die Langsamkeit (engl. ***s**lowness*) dieses Prozesses gab ihm den Namen.

Andererseits können auf deutlich kürzeren Zeitskalen von Millisekunden in den **r-Prozessen** (engl. ***r**apid neutron capture*) ebenfalls Neutronen eingefangen werden. Dieser Prozess ist besonders relevant am Ende der Entwicklung massereicher Sterne, wenn sie in katastrophalen Sternexplosionen, den Supernovae oder sogar als Hypernovae, ihr Dasein als 'normaler' Stern beenden. Die auslaufende Schockfront in der Explosion kann dabei so hohe Neutronendichten im interstellaren Medium erzeugen, dass der r-Prozess stattfindet. Typischerweise fangen mittelschwere Kerne in wenigen Sekunden bis Minuten mehrere hundert Neutronen ein! Die so neu gebildeten Kerne sind mit Neutronen stark übersättigt und in der Regel instabil: Sie zerfallen daher radioaktiv in α-, β- oder γ-Zerfällen.

Auf diese Weise bilden sich verschiedenste Elemente (gemäß den so genannten *Soddy-Fajans-Verschiebungsgesetzen*), vor allem die schwereren Elemente mit Ordnungszahlen größer 26. Supernovae haben nahe am kollabierenden Sternkern ein neutronenreiches Milieu, das durch **Kernphotospaltung** des Eisens entsteht:

$$^{56}\mathrm{Fe} + \gamma \rightarrow 13\ ^{4}\mathrm{He} + 4\,\mathrm{n}$$

Durch die Neutronenanlagerungsprozesse formieren sich bevorzugt Atomkerne mit abgeschlossenen Neutronenschalen: Dies sind Kerne mit **magischen Neutronenzahlen**, wie 50, 82, 126,...

21.12.7 Die Sternenzwiebel

Da im Sterninnern der Temperaturgradient von innen nach außen abnimmt, brennen in massereichen Sternen in verschiedenen Schichten unterschiedliche Elemente, was man als **Schalenbrennen** bezeichnet. Daraus resultiert das prominente **Zwiebelschalenmodell**, wonach wie im Innern einer Zwiebel eine Blätterung unterschiedlicher fusionierter Elemente entsteht. Schwere Sterne haben deshalb im Innern einen **Eisenkern**, der den Gravitationskollaps am Ende der stellaren Entwicklung als Neutronenstern oder Quarkstern 'überleben' kann oder - bei sehr hohen Restmassen des Vorläufersterns - zu einem stellaren Schwarzen Loch kollabiert. Aktuell werden alternativ zum Schwarzen Loch die Gravasterne und Holosterne erforscht. Über sie ist noch relativ wenig bekannt, und es ist nicht klar, welchen kompakten Endzustand die Natur für die massereichsten Sterne vorsieht. Das klassische Schwarze Loch (Schwarzschild-Lösung, Kerr-Lösung) wird derzeit favorisiert.

21.12.8 Die Sonne auf die Erde holen

Das Fusionsfeuer brannte bereits auf der Erde. Für die Dauer von **etwa zwei Sekunden** gelang es, die *kontrollierte Fusion* von Wasserstoff in Gang zu halten. Viel früher wurde die *unkontrollierte Fusion* in der Wasserstoffbombe umgesetzt - mit fatalen Folgen.

Kernfusion soll kontrolliert und zum Wohl der Menschheit genutzt werden. Die hoffnungsvolle Eigenschaft der *Fusionskraftwerke* ist, dass sie äußerst effiziente Energieressourcen sind und der Brennstoff in ausreichender Menge - nämlich gebunden im Wasser - zur Verfügung steht. Das multinationale **ITER-Projekt** wird derzeit in Südfrankreich auf den Weg gebracht, um die Machbarkeit der Energieressource Fusion zu klären. Sollte das Gelingen, wären unsere Energieprobleme auf der Erde gelöst!

21.13 Tiefenfeldbeobachtung

Dieser Begriff ist eine deutsche Übersetzung des wesentlich gebräuchlicheren Fachwortes Deep Fields - siehe dort für eine detaillierte Erklärung.

21.14 Tierkreis

Der Tierkreis (*Zodiak*; von grch. 'zodiakos kyklos') ist eine Bezeichnung für zwölf bestimmte Sternbilder, die weder dem Südhimmel, noch dem Nordhimmel zugeordnet werden können. Sie sind sowohl von nördlichen, als auch von südlichen Breiten sichtbar - jedoch nicht alle zur gleichen Zeit.

21.14.1 Und so heißen sie

Die Tierkreiszeichen, das sind Steinbock (*Capricornus*), Wassermann (*Aquarius*), Fische (*Pisces*), Widder (*Aries*), Stier (*Taurus*), Zwillinge (*Gemini*), Krebs (*Cancer*), Löwe (*Leo*), Jungfrau (*Virgo*), Waage (*Libra*), Skorpion (*Scorpius*) und Schütze (*Sagittarius*).

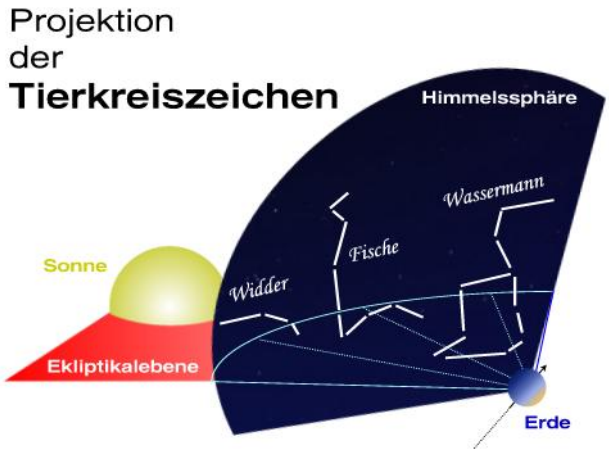

Abbildung 21.3: Ausschnitt des Tierkreises von der Erde aus betrachtet.

21.14.2 Was zeichnet den Tierkreis aus?

Das Besondere am Tierkreis ist seine relative Orientierung zur Bahnebene der Erde, der **Ekliptik**. Wenn wir als irdische Beobachter **entlang dieser Ebene** schauen, so sehen wir Sterne, die Teil sind von bestimmten Sternbildern. Dies sind gerade die Tierkreiszeichen! Abbildung 21.3 illustriert, wie man sich diese Anordnung von Erde, Ekliptik und Tierkreiszeichen geometrisch vorstellen muss: Der Beobachter kann nie alle zwölf Tierkreiszeichen gleichzeitig sehen, weil sie sich in einem Bogen um den Globus schlingen. Tagsüber, wenn die anderen Tierkreiszeichen auftauchen, die man nachts nicht sehen konnte, werden sie von der Sonne überstrahlt. Aber im Wechsel der Jahreszeiten darf der irdische Beobachter schließlich stolz behaupten, alle Tierkreiszeichen gesehen zu haben - falls er das Jahr über fleißig geschaut hat.

21.14.3 Ein 13. Tierkreiszeichen?

Wenn man wirklich genau entlang der Bahnebene schaut, entdeckt man auch Sterne, die nicht zu den zwölf genannten gehören, sondern zu einem Sternbild namens **Schlangenträger** (*Ophiuchus*). Der Schlangenträger befindet sich zwischen den Tierkreiszeichen Schütze und Skorpion. Er hat es leider nicht geschafft, zum elitären Kreis der zwölf Tierkreiszeichen zu gehören. Ein hypothetischer Grund für diesen Ausschluss könnte der Folgende sein: Auf die Frage '*Und was bist Du für ein Sternzeichen?*' wollte niemand mit '*Schlangenträger*' antworten.

Der Schlangenträger trägt tatsächlich eine Schlange, die ebenfalls ein Sternbild mit der internationalen Bezeichnung *Serpens* ist. In der griechischen Mythologie ist der Schlangenträger *Äskulap* (Asclepios, Aesculapius), der griechische und römische Gott der Heilkunst. Er wird symbolisiert durch eine Schlange, die sich um einen Stab windet. Dieses Symbol ist uns heute noch sehr gut aus der Medizin oder von dem Zeichen für Apotheken bekannt. Das ist ein schönes Beispiel dafür, wie tief verwurzelt die Astronomie in unserer Kultur und unserem Alltag ist.

21.14.4 Astrologie & Horoskope

Ein anderes Beispiel für die Verbindung von Astronomie und Alltag ist der Tierkreis selbst. In Gestalt des **Horoskops** sind uns die Tierkreiszeichen sehr vertraut. Unser Geburtstag legt unser **Sternzeichen** fest, weil sich die Sonne zum Zeitpunkt der Geburt in einem der zwölf Tierkreiszeichen befand. Denn auch die Sonne befindet sich immer in der Ekliptikalebene - genau wie die Planeten (siehe Abbildung oben).

Die **Astrologie**, die *Sterndeutung*, befasst sich gerade mit dem Einfluss der Himmelskörper im Sonnensystem auf das Schicksal eines jeden Menschen. Die Astrologie ist jedoch *keine* Naturwissenschaft, sondern eine rein empirische Disziplin. Es gibt sicherlich Einflüsse der Himmelskörper auf die Erde und allem, was sich auf ihr befindet, z. B. über die Gravitation. Jedoch ist der Einfluss der kosmischen Körper auf ein spezifisches, menschliches Wesen und die Persönlichkeit nicht naturwissenschaftlich zu begründen.

21.14.5 Licht im Tierkreis

Auch das **Zodiakallicht** ist nach dem Tierkreis benannt, weil dieses Licht seinen Ursprung in der Ekliptikalebene hat.

21.14.6 Buchtipp für mythologisch Interessierte

- ◇ *Fasching, G.*: Sternbilder und ihre Mythen, Springer-Verlag (1993); meine Rezension

21.15 TNO

Das Akronym TNO steht für **Trans-Neptunische Objekte** (engl. *trans-Neptunian objects*). Es bezeichnet planetenartige Himmelskörper jenseits der Plutobahn. Der seit 2006 zu Zwergplaneten zählende Pluto ist der TNO-Prototyp. Siehe auch Planet.

21.16 Topologie

Die Topologie ist ein Teilgebiet der Mathematik (grch. *τόπος*, *topos*: Ort). Sie hat die Klassifizierung von geometrischen Objekten nach ihren **Verknüpfungen** (engl. *connections*) in sich selbst und zu anderen geometrischen Objekten zum Gegenstand. Sie behandelt hingegen **nicht** die Form, Größe oder Krümmung von geometrischen Körpern. Objekte haben gleiche Topologie, wenn man sie kontinuierlich ineinander nur durch Deformationen überführen kann. Sie dürfen bei dieser Transformation nicht zerrissen oder neu miteinander verknüpft werden.

21.16.1 Klarheit durch Beispiele

Das klingt nun bis hierhin sehr abstrakt und missverständlich, wird aber anhand von Beispielen klar: Kugel, Ellipsoid, Zylinder und Quader gehören derselben topologischen Klasse an, weil man sie durch Drücken und Verbiegen ineinander überführen kann. Verbiegt man nun den Zylinder zu einem offenen Ring und schließt seine Flächen einander an, entsteht **etwas topologisch Neues**: der schlauchförmige Torus. Die Verknüpfungen wurden geändert und der Torus besitzt nun ein Loch wie ein Fahrradschlauch. Diese neue Eigenschaft fehlt dem Zylinder, aus dem der Torus hervorging. Deshalb sind Zylinder und Torus topologisch verschieden.

21.16.2 Aufgabe der Topologie

Die Topologie teilt Punktmengen (Kurven, Flächen, Räume) gemäß ihrer Verknüpfungseigenschaften in topologische Klassen. Wesentliche Attribute sind die Begriffe **offen** und **geschlossen**, die man sich leicht am Torus klarmachen kann.

21.16.3 Topologie in der Astronomie

In der modernen Kosmologie stellt sich die Frage nach der **Topologie des Universums**. Die Formulierung der relativistischen Kosmologie basiert auf der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). In den Friedmann-Weltmodellen kann man verschiedene Universen klassifizieren, die

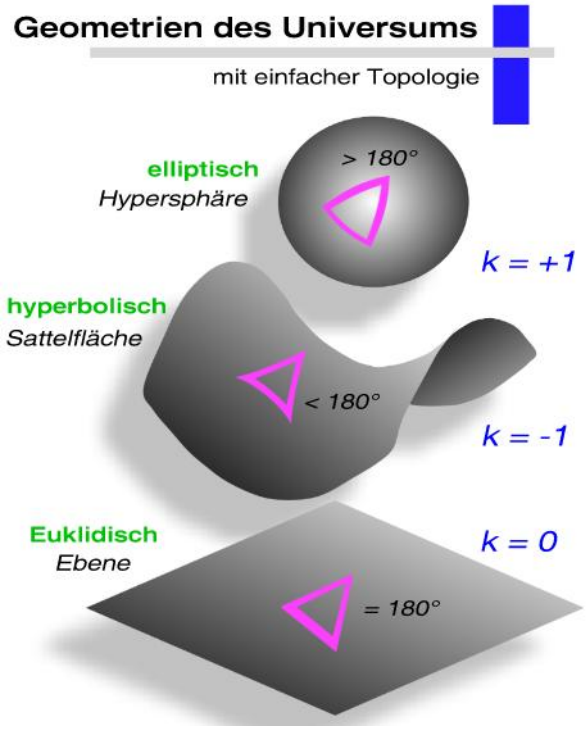

Abbildung 21.4: Topologie: 2D-Analoga der drei Geometrien des Universums mit simpler Topologie.

sich im Krümmungsparameter, der kosmologischen Konstante und vorhandenen Energieformen (Dichteparametern) unterscheiden. In den FLRW-Modellen ist die globale Krümmung des Universums konstant, wie bei einer Kugeloberfläche. Das legt dem Riemannschen Krümmungstensor Beschränkungen auf. Sämtliche Krümmungseigenschaften des Universums werden dann vom Krümmungsparameter k absorbiert. Er entscheidet über die **Geometrie des Universums**:

- $k = -1$ hyperbolische Geometrie (oder *Bolyai-Lobatschewski-Geometrie*)
- $k = 0$ Euklidische Geometrie
- $k = +1$ elliptische Geometrie (oder *Riemannsche Geometrie*)

Die Euklidische Geometrie ist im Prinzip die Geometrie, die man aus der Schulmathematik kennt. Es ist die **ebene Geometrie**, in der das *Parallelenaxiom* (Euklids 5. Axiom) gilt. Unter dieser Voraussetzung beträgt die Winkelsumme im Dreieck exakt 180°. In der **sphärischen Geometrie**, wo man Dreiecke auf Kugeloberflächen beschreiben kann, gilt das nicht mehr; hier liegt die Winkelsumme zwischen 180° und 540° (*sphärischer Exzess*). Auf einer **Sattelfläche**, die eine negative Krümmung aufweist, ist hingegen die Winkelsumme eines Dreiecks kleiner als 180°. Die Abbildung 21.4 illustriert nun die zweidimensionalen Analoga zur Geometrie mit jeweiliger Krümmung. Die dargestellten Flächen stellen **nur *eine* topologische Variante** von vielen dar.

21.16.4 Wissen aus der Hintergrundstrahlung

Die astronomische Beobachtung fixiert kosmologische Parameter, wie die Hubble-Konstante, die Beiträge einzelner Energieformen des Universums (baryonische Materie, Dunkle Materie, Dunkle Energie) und eben auch den Krümmungsparameter des Universums. Bei der Messung wird sehr genau die Intensitätsverteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung am gesamten Himmel analysiert. Die

Hintergrundstrahlung stellt eine Art 'Urstrahlung' dar, die als erste elektromagnetische Emission den Kosmos durchflutete, als dieser weniger dicht und damit transparent genug war. Ihre Isotropie und Form eines Planck-Strahlers (mit einer Temperatur von knapp 3 Kelvin, daher auch Drei-Kelvin-Strahlung) bezeugen den Urknall. Die Hintergrundstrahlung wurde in der Rekombinationsära bei einer Rotverschiebung von $z = 1100$ ausgesandt. Sie enthält **zahlreiche Strukturinformationen des Universums** in Form von Anisotropien, also geringfügigen Intensitätsschwankungen, die in jeder Raumrichtung anders sind. Eine Messung dieser Unregelmäßigkeiten (deshalb übrigens der Akronymbestandteil *anisotropy probe* in WMAP) der Hintergrundstrahlung im Bereich von Mikrokelvin kommt daher einer Bestimmung von Dichteschwankungen gleich, die sich wellenförmig im Universum ausgebreitet haben. Sie befinden sich wie ein Abdruck in der kosmischen Hintergrundstrahlung, als geringfügige Abweichung vom Planck-Strahler. Jede dieser Dichtewellen weist **Obertöne** auf, genauso wie eine schwingende Klavier- oder Gitarrensaite. Die relative Gewichtung der einzelnen Obertöne ist charakteristisch für die Saite und legen ihre physikalischen Eigenschaften fest. Diesen Umstand macht man sich in der experimentellen Kosmologie zunutze, um aus der relativen Gewichtung der Obertöne die Eigenschaften des Universums zu messen.

mathematische Randbemerkung zu Multipolen

Die Strahlungsverteilung wird dabei durch geeignete Funktionen angenähert, die auf einer Kugeloberfläche (nämlich der komplett beobachtbaren Himmelssphäre) definiert sind. Die **Kugelflächenfunktionen** (engl. *spherical harmonics*) sind eine geeignete Basis, um beliebige Verteilungen auf einer Kugelfläche wiederzugeben. Denn sie bilden ein vollständiges, orthonormales System (VONS) auf der Sphäre. D.h. so wie man jeden beliebigen 3er-Vektor in die kartesischen Einheitsvektoren (e_x, e_y, e_z) zerlegen kann, kann man jede beliebige Verteilung auf einer Kugelsphäre in unterschiedlich gewichtete Kugelflächenfunktionen zerlegen. In der Physik heißen die Obertöne **Multipole**. Sie werden eindeutig durch die Wellenzahl l charakterisiert. Die niedrigen Multipol-Ordnungen, kleine Werte von l, haben Namen bekommen: $l = 0$ nennt man den Monopol ($2^0 = 1$), $l = 1$ den Dipol ($2^1 = 2$), $l = 2$ den Quadrupol ($2^2 = 4$), $l = 3$ den Oktupol ($2^3 = 8$), $l = 4$ den Hexadekapol ($2^4 = 16$) etc.

Die Daten des Mikrowellen-Satelliten **WMAP** (*Wilkison Microwave Anisotropy Probe*) geben die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung sehr präzise wieder. Die einzelnen Gewichte der Obertöne (mit bestimmten Wert von l) sind also sehr gut bekannt.

Ergebnis: das Universum ist flach

Daraus kann man den Satz kosmologischer Parameter inklusive Krümmungsparameter ableiten und findet ziemlich genau einen Wert von $k = 0$. Die Diagnose lautet also, dass wir in einem **flachen Universum** leben. Damit ist die Geometrie festgelegt: Sie ist Euklidisch. Aber die Relativitätstheorie lässt die **Frage nach der Topologie** noch offen. Sie ist *nicht* durch Einsteins Feldgleichungen festgelegt. Oft wird dieser topologische Aspekt der Kosmologie vernachlässigt und unterschätzt - auch von Kosmologen.

Man kann zu den genannten k-abhängigen Geometrien geometrische Figuren assoziieren: Für $k = +1$ stellt sich heraus, dass man es mit einer Verallgemeinerung der zweidimensionalen Kugelsphäre zu tun hat: der dreidimensionalen Sphäre oder **Hypersphäre**. Für $k = 0$ findet man das bekannte Linienelement der Euklidischen 3-Metrik. Diesen Raum kann man sich vorstellen, wie eine **unendlich ausgedehnte, ebene Fläche** in der Form eines Blatts Papier. Für k = -1 findet man einen **dreidimensionalen Hyperboloid**. Dieser kann *nicht* mehr in einen Euklidischen Raum eingebettet werden, aber in einen Minkowski-Raum der Signatur +2 (also $-+++$, siehe dazu Metrik). Das Volumen des Hyperboloids ist unendlich.

21.16.5 Bedeutung der kosmischen Topologie

Mit der Topologie verbindet sich die spannende Frage, ob das **Universum geschlossen** (endlich) oder **offen** (unendlich) ist. Man kann mathematisch zeigen, dass unterschiedliche Topologien im Allgemeinen verschiedene Volumina haben. Ein einfaches Beispiel ist der Torus. Er hat endliches Volumen und eine **räumlich geschlossene Topologie**. Schneidet man ihn entlang seiner Symmetrieachse auf und verbiegt das schlauchförmige Gebilde, so erhält man einen Zylinder (Umkehrung des Beispiels vom Beginn dieses Eintrags). Dieser könnte nun ebenso ein unendliches Volumen haben, wenn er sich unendlich weit entlang seiner Symmetrieachse erstreckte. Dann hätte er eine **räumlich offene Topologie**.

21.16.6 Wie misst man die Topologie des Universums?

Zu jedem Wert des Krümmungsparameters k existiert eine unendliche Anzahl möglicher Topologien! Räume positiver Krümmung, $k = +1$, sind alle geschlossen. Für andere Werte von k sind sowohl geschlossene, als auch offene Topologien möglich. Ein erstes Kriterium ist die Endlichkeit bzw. Unendlichkeit des Volumens des Universums. In einem unendlich ausgedehnten Universum sollten alle Wellenzahlen l vertreten sein.

21.16.7 Das Universum - ein Fußball?

Die Diagnose von WMAP ist jedoch, dass besonders lange Dichtewellen fehlen! Dies spricht demnach für ein endliches Universum. Der Astrophysiker *Jean-Pierre Luminet* und sein Team gingen nun den direkten Weg und leiteten die Topologie aus den gemessenen Obertönen ab. Das Resultat ist das geschlossene, elliptische **Dodekaeder-Universum**. Die charakteristischen Intensitäten von Quadrupol und Oktupol, sowie den kleinskaligen Temperaturschwankungen deutlich höherer Ordnungen ($l = 900$), kann man dieses Universum zuordnen. Das Dodekaeder-Universum setzt sich aus 120 Pentagon-Dodekaedern zusammen, die eine Hypersphäre bilden. Die Hypersphäre ist die 3D-Oberfläche einer 4D-Kugel. Das Pentagon-Dodekaeder ist ein fußballähnliches Gebilde, dass sich aus 12 Pentagonen (Fünfecken) zusammensetzt. Es gehört zu den fünf **Platonischen Körpern**, konvexen, geometrischen Körpern, die sich aus regelmäßigen Polygonen (Vielecken) konstituieren. Die Verhältnisse im Dodekaeder-Universum sind etwas komplexer. Dort erzeugen 120 Pentagon-Dodekaeder die Hypersphäre. Im Dodekaeder-Modell wurde also **kein flaches Universum** angenommen, sondern $k = +1$, ein 3D-Analog zur 2D-Kugeloberfäche. Diese Geometrie wurde von *Luminet et al.* vorgeschlagen, weil sie bisher **von WMAP-Daten nicht ausgeschlossen** werden kann. Die Abweichung vom flachen Universum ist allerdings gering: der totale Dichteparameter beträgt im Dodekaeder-Universum etwa 1.013. Erst noch genauere Messungen mit dem Mikrowellen-Satelliten **PLANCK** (geplanter Start Juli 2008) werden erlauben, die Dodekaeder-Topologie des Universums zu bestätigen oder zu widerlegen. Vielleicht etabliert sich dann endgültig das alternative Euklidische Universum.

21.16.8 Das Universum - doch eher ein Schultüte?

Es sind jedoch nach wie vor auch hier unterschiedliche Topologien möglich. Im Jahr 2004 kam eine weitere nicht triviale Topologie hinzu, die auch die WMAP/COBE-Beobachtungen erklären kann: Das hyperbolische Horn-Universum von *Aurich et al.* Leben wir vielleicht in einer riesigen, verbogenen 'Schultüte'?

21.16.9 verrückte Effekte bei komplizierteren Topologien

Unterschiedliche Topologien führen zu ganz erstaunlichen Eigenschaften des Universums. Nehmen wir einmal vereinfachend an, unser Universum sei ein 3D-Würfel, also endlichen Volumens. Nun möge die Topologie so festgelegt sein, dass immer, wenn ein Objekt das Universum an einer Berandungsfläche des sechsseitigen Würfels verlässt, es an dessen gegenüberliegenden Berandungsfläche eintreten möge.

Das Universum wäre gar nicht so leicht als eines endlichen Volumens zu erkennen. Lichtstrahlen würden das kubische Universum an einer Seite verlassen und auf der anderen wieder hineinkommen. Die Folgen wären '**kosmische Fata Morganen**' oder 'Phantombilder'. Es ist vergleichbar mit dem Effekt von Gravitationslinsen, nur dass die Trugbilder durch unterschiedliche topologische Anschlussbedingungen (*Identifikationen*) resultieren. Dies kann man deshalb als '**topologisches Linsen**' bezeichnen.

21.16.10 Wie bemerkt man topologische Linsen?

Auf solche Weise könnte das Universum tatsächlich kleiner sein, als man bei einfachen Topologien annimmt. Wir lebten in einer riesigen optischen Täuschung! Die Trugbilder wären gar nicht so einfach zu entlarven, weil die Strahlung aus unterschiedlichen Entfernungen (verschiedene Rotverschiebung z) über unterschiedliche Lichtwege (verschiedene Extinktionen des intergalaktischen Mediums) zu uns gelänge. Die Bilder ein und desselben beobachteten kosmischen Objektes könnten unterschiedliche Farbe, Form und Orientierung - unterschiedliche spektrale Eigenschaften - haben, die **perfekte Täuschung**!

Gravitationslinsen haben Beobachter bereits in vielfältiger Weise verifiziert (Abell-Katalog). Möglicherweise findet man bald Kandidatenobjekte, die aus topologischem Linsen folgten. Ihre Unterscheidung von Gravitationslinsen dürfte dabei sicher eine Hürde darstellen. Die Diskussion topologischer Aspekte des Universums zeigt, dass die beobachtende Kosmologie hier einer großen Herausforderung gegenübersteht. Die Frage nach der offenen oder geschlossenen Topologie des Universums, nach Unendlichkeit versus Endlichkeit muss vertagt werden.

21.16.11 Literatur und Webtipps

- ◇ Publikation: *Luminet et al.* 2003, Papier zum Dodekaeder-Universum, astro-ph/0310253 (erschienen in Nature 425, 593, 2003)
- ◇ Software: Computergraphik in gekrümmten Räumen, eignet sich zur Visualisierung des Dodekaeder-Universums (kostenfrei!)
- ◇ Buch: *Hubert Goenner*, Einführung in die Kosmologie (1994), Spektrum Akademischer Verlag
- ◇ Buch: *Kip S. Thorne*, Black holes and time warps: Einstein's outrageous legacy (1994), Papermac London
- ◇ Website: Mikrowellen-Satellit Planck

21.17 topologische Defekte

Topologische Defekte sind Phänomene, die immer mit der **spontanen Brechung einer Symmetrie** zusammenhängen. Diese findet man in ganz unterschiedlichen Teilbereichen der Physik, wie der Festkörperphysik, Teilchenphysik und Kosmologie. Als alternative, deutsche Bezeichnung verwendet man auch 'Fehlstellen'.

21.17.1 Einsatzbereiche des Higgs-Mechanismus

In der theoretischen Physik beschreibt man spontane Symmetriebrechungen mit dem **Higgs-Mechanismus**. Im Speziellen suchen die Teilchenphysiker nach dem letzten Teilchen des Standardmodells, dem Higgs-Teilchen, dass gerade die Symmetrie der X-Kraft bricht. Daraus gehen die drei uns vertrauten Naturkräfte hervor: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung (Gravitation gab es schon vorher in Koexistenz mit der X-Kraft).

Der Higgs-Mechanismus kann jedoch auch auf andere spontane Symmetriebrechungen angewendet werden. Je nach Ansatz für das Skalarfeld, finden sich unterschiedliche Topologien für die **Vakuum-Mannigfaltigkeit**. So generieren

- ◇ eindimensionale, reelle Higgs-Felder **Vertizes** (Punkte);
- ◇ dreidimensionale, reelle Higgs-Felder **Domänengrenzflächen** (Domänenwände, *domain walls*);
- ◇ komplexe Higgs-Felder **eindimensionale Vertex-Linien**, die im kosmologischen Kontext kosmische Strings heißen;
- ◇ und vierdimensionale, komplexe Higgs-Felder **Texturen**.

21.17.2 Defekte zeigen volle Symmetrie!

Das Faszinierende an topologischen Defekten ist, dass *in ihrem Innern die Symmetrie erhalten* geblieben ist, die außerhalb der Defekte gebrochen ist. So sollte in Defekten, die mit der Brechung der GUT-Symmetrie einhergingen, die X-Kraft mit der Gravitation vorherrschen.

21.17.3 Defekte beeinflussen Kosmologie?

Der kosmologische Einfluss von topologischen Defekten wurde erstmals von *Tom Kibble* im Jahre 1976 untersucht (**Kibble-Mechanismus**). Sie mögen von kosmologischer Relevanz sein, weil sie eine wesentliche Rolle in der Entstehung der **großräumigen Strukturen** im Universum (engl. *large-scale structure*) gespielt haben könnten. In der Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung sollten sie als Anisotropien gemessen werden können.

Bislang gibt es **keinerlei Beobachtungsevidenz** für die Existenz kosmischer topologischer Defekte wie Domänenwänden oder kosmischen Strings, weder in den COBE- noch in den WMAP-Daten. Aber die Beobachtungsdaten beschränken Eigenschaften topologischer Defekte, und selbst falls es sie definitiv nicht geben sollte, gibt es wichtige Implikationen: Topologische Defekte könnten durch die Symmetriebrechung einerseits entstanden sein und aufgrund ihres negativen w-Parameters die Inflation getrieben haben (nämlich zu Beginn der Inflationsära, auf der GUT-Skala von 10^{16} GeV bzw. 10^{29} Kelvin). Andererseits könnten sie aber auch im Zuge der Expansion und der damit verbundenen Ausdünnung zerstört worden sein. Das ergibt das interessante Szenario, dass das (zumindest unser) Universum ein **Autoregulativum** sei, das sich durch die Erzeugung topologischer Defekte aufbläht und der Kondensation von Materie an topologischen Defekten vielleicht wieder zusammenziehen könne, wenn die kritische Dichte (siehe Friedmann-Weltmodell) überschritten werde.

21.17.4 Spekulationen um ein Netzwerk kosmischer Strings

So postuliert man bei den kosmischen Strings ein ganzes, interagierendes Netzwerk, das durch die so genannte *Interkommutation* (Austausch von Stringteilen) sich ständig neu formierte, aber durch die Dissipation der in den Strings enthaltenen Feldenergie auch langsam zerfiel.

Für kosmische topologische Defekte kann man einen eos-Parameter von w = -2/3 ableiten. Damit kommen sie als eine mögliche Quelle der Dunklen Energien in Betracht, die die kosmische Repulsion vorantreiben. Anmerkung: Nur die Phantom-Energie unterbietet diesen negativen w-Parameter und endet in einem Extrem der Ausdehnung: dem Big Rip.

Topologische Defekte könnten auch eine Quelle kosmischer Strahlung im UHE-Bereich sein. In Frage kommen zum Beispiel **Hybrid-Defekte** aus Monopol und Kosmischem String oder **magnetische Monopole**, die in intergalaktischen Magnetfeldern beschleunigt werden. Dies würde den GZK-cutoff verhindern und seine bisherige Nicht-Verifikation erklären.

21.17.5 spekulativ: kosmische Strings zünden GRBs?

Eine alternatives (nicht konservatives) Modell zur Beschreibung von Gamma Ray Bursts (GRBs) sieht ebenfalls einen Zusammenhang zu kosmischen Strings. In ihrer supraleitenden Erweiterung geht man davon aus, dass es zur gebündelten, kurzzeitigen Emission hochenergetischer, elektromagnetischer Strahlung kommen muss. Eine anschauliche Erklärung ist, dass sich kosmische Strings auf dem Hintergrund interstellarer und intergalaktischer Magnetfelder bewegen und dabei Photonen emittieren.

An den 'Spitzen' (*cusps*) der Strings muss diese Emission besonders hochenergetisch sein. Dieses alternative GRB-Modell hat jedoch keinen nennenswerten Zulauf unter den Astrophysikern erhalten.

Ebenso kann man auch eine niederenergetische, aber scharf gebündelte Strahlungsemission an den *cusps* ansetzen. Diese Photonen werden über Compton-Streuung (vergleiche Comptonisierung) noch weicher, übertragen aber ihre Energie auf das Plasma in der Umgebung. Dabei können so hohe Lorentz-Faktoren erreicht werden, dass sich eine Schockwelle ausbilden kann. Dann läuft die Argumentation analog zum klassischen Feuerball-Modell der GRBs (siehe dazu unter GRBs). Offensichtlich scheint dieses Modell nicht in Widerspruch zu den Beobachtungen zu sein. Die gemessene Häufigkeit der GRBs und deren räumliche Verteilung muss mit der theoretisch erwarteten kosmischen Verteilung des (supraleitenden) String-Netzwerks verglichen werden.

21.17.6 Literaturquellen

- ◇ *Y.V. Dumin*, hep-ph/0308184 (2003),
- ◇ *A. Gangui*, astro-ph/0303504 (2003),
- ◇ *M. Sakellariadou*, hep-ph/0212365 (2002),
- ◇ *T.W.B. Kibble*, cond-mat/0111082 (2001), und sein erstes Papier zum Thema *Topology of cosmic domains and strings*, *J. Phys. A9*, 1387 (1976)
- ◇ *V. Berezinsky, B. Hnatyk & A. Vilenkin*, astro-ph/0001213 (2000),

21.18 Torsionstensor

Der Torsionstensor ist allgemein definiert als die Differenz zweier metrischer Zusammenhänge, die gerade vertauschte kovariante Indizes haben:

$$T^{\lambda}_{\mu\nu} = \Gamma^{\lambda}_{\mu\nu} - \Gamma^{\lambda}_{\nu\mu}.$$

Ist diese Differenz endlich, also verschieden von null, so ist eine Torsion ('Verdrillung') der Mannigfaltigkeit vorhanden.

21.18.1 ART ist torsionsfrei

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) entsprechen die metrischen Zusammenhänge gerade den Christoffel-Symbolen (oder *Levi-Civita-Zusammenhänge*, Γs in der Gleichung). Gravitationstheorien, die auf dem **Äquivalenzprinzip** basieren sind, haben **symmetrische** Christoffel-Symbole. Demzufolge verschwindet der Torsionstensor in der ART, und Relativisten sprechen dann von **Torsionsfreiheit** der Theorie.

21.18.2 Tensoreigenschaften

Der Torsionstensor ist ein Tensor vom Typ (1,2), also ein Tensor dritter Stufe, während die Christoffel-Symbole selbst **keine Tensoren** sind. Der Torsionstensor darf nicht mit dem Energie-Impuls-Tensor verwechselt werden, der ebenfalls mit dem Buchstaben T bezeichnet wird. Die unterschiedlichen Tensorstufen mögen als Unterscheidungskriterium dienen. Normalerweise besteht in der ART auch deshalb keine Verwechslungsgefahr, weil der Torsionstensor kaum betrachtet wird, weil er verschwindet.

21.18.3 Hat die Gravitation eine Torsion?

Die Differentialgeometrie kennt sicher Mannigfaltigkeiten, wo das nicht der Fall ist, sie finden aber keine Anwendung in der Relativitätstheorie.

Es gibt aber auch Forscher, die versuchen eine **Gravitationstheorie mit Torsion** aufzuziehen. Diese Gravitation ist komplizierter, weil neue Zusatzterme auftauchen, die in der ART verschwinden. Bisher gibt für eine Gravitation mit Torsion keine Anhaltspunkte in der Natur.

21.19 Trägheit

Die Trägheit ist eine Eigenschaft von **Massen**. Trägheit bedeutet, dass jeder Körper versucht in seinem Bewegungszustand zu verharren und einer Bewegungsänderung einen Widerstand entgegensetzt: Ruhende Objekte setzen einer Bewegung Widerstand entgegen; bewegte Objekte setzen der Abbremsung oder Ablenkung einen Widerstand entgegen. Das ist gerade die Aussage des *Trägheitsgesetzes*, dem ersten der drei Newtonschen Gesetze. Aber warum ist das so, dass Massen träge sind?

21.19.1 Newtonsche Gravitationskraft

Massen ziehen sich über Gravitationskräfte an. Dies konnte schon der englische Physiker und Mathematiker *Sir Isaac Newton* im 17. Jahrhundert mit seinem **Newtonschen Gravitationsgesetz** belegen. Die Gleichung für die **Gravitationskraft** lautet:

$$F = \mathrm{G}\ \frac{Mm}{r^2}.$$

Hierin sind G die Gravitationskonstante mit einem Zahlenwert von $6.672 \times 10^{-11}\ \mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$, M und m zwei Massen, die sich in einem Abstand r befinden mögen. Die Kraft hat den typischen Abfall mit r^{-2} (wie das Coulomb-Gesetz der Elektrostatik). Physiker sprechen auch von einem **1/r-Potential**. Die Kraft ist gerade der negative Gradient dieses Potentials.

21.19.2 Der lange Arm der Schwerkraft

Diese gravitative Wechselwirkung hat eine **unendliche Reichweite**. Für große Zahlenwerte von r wird die Gravitationskraft zwar sehr klein, bleibt aber endlich. Vor allem kann die Gravitationskraft nicht nur Ladungen anderer Polarität abgeschirmt werden: es gibt keine 'negativen Massen'! Das ist der wesentliche Unterschied zwischen Gravitation und elektromagnetischer Kraft. Die unendliche Reichweite spiegelt sich auch darin wider, dass das (hypothetische) Graviton der Quantenfeldtheorien **Ruhemasse null** habe.

Diese lange Reichweite hat zur Konsequenz, dass sich letztendlich *alle Massen* im Universum (theoretisch) spüren. Man kann deshalb sagen, dass die träge Eigenschaft einzelner Massen eine Folge davon ist, dass sie mit allen anderen Massen in Wechselwirkung steht.

21.19.3 Gravitationskraft braucht Zeit zum Ausbreiten

Die Wechselwirkung ist aber **nicht instantan**, wie Newton annahm, sondern breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit, der **Vakuumlichtgeschwindigkeit** c, aus. So breiten sich Gravitationswellen, wie sie in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) beschrieben werden, mit Lichtgeschwindigkeit aus.

21.19.4 Äquivalenzprinzip

Das Äquivalenzprinzip fordert, dass **träge und schwere Masse äquivalent** seien. Man kann also in einem abgeschlossenen Kasten nicht entscheiden, ob er sich ruhend in einem Gravitationsfeld befindet oder durch eine konstante Kraft gleichmäßig beschleunigt wird. Das Prinzip ist einer der Pfeiler der ART.

21.19.5 Trägheitskräfte

Als Trägheitskräfte (engl. *inertial forces*) bezeichnet man Kräfte, die auftreten, wenn ein Bezugssystem beschleunigt wird. So sind Zentrifugalkraft und Corioliskraft zwei Trägheitskräfte, die in rotierenden Bezugssystemen (die nicht inertial sind) auftreten. Trägheitskräfte nennt man auch *Scheinkräfte*, weil ihr Auftreten vom Bezugssystem abhängt. Trägheitskräfte korrigieren gewissermaßen die Newtonsche

bzw. relativistische Mechanik, wie sie aus verschiedenen Systemen betrachtet wird: Das eine System sei ein Inertialsystem und habe einen inertialen Beobachter darin. Das andere System rotiere und ist deshalb ein Nicht-Inertialsystem mit einem rotierenden, nicht-inertialen Beobachter. Der rotierende Beobachter spürt nun Trägheitskräfte, beispielsweise wenn er in einem Karussell sitzt und ihn die Zentrifugalkraft nach außen drängt. Aber der inertiale Beobachter, der beispielsweise von außen das Karussell betrachtet, spürt keine Trägheitskräfte. Aus seiner Sicht versuchen die Trägheitskräfte die Bewegung des nicht-inertialen Beobachters inertial, nämlich geradlinig, zu machen.

21.20 transient

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

21.20.1 Definition von transient

Das Attribut *transient* bezeichnet eine Helligkeitsvariation, die **nur gelegentlich und unregelmäßig auftritt**. Dieser Helligkeitsvariation kann **keine Periodendauer** zugeordnet werden.

21.20.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation. Das kann im Extremfall dazu führen, dass beispielsweise die Transienz einer Quelle in eine Persistenz umschlägt.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. Transiente Phänomene sind typischerweise kurzzeitig und dauern Minuten bis Tage. Der Begriff wird vor allem in der Stellarphysik gebraucht.

21.20.3 Beispiele

In der Astronomie sind z. B. die Helligkeitsvariationen von einigen Veränderlichen sowie Novae, von einigen Röntgendoppelsternen (z. B. *soft X-ray transients*, SXTs) und von bestimmten X-ray burstern transient.

21.20.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, quasi-periodisch und persistent.

21.21 Transit

Bei der Bedeckung der Sonne durch einen inneren Planeten (Merkur, Venus) oder einen anderen Himmelskörper (z. B. Kometen) oder auch bei der Bedeckung eines Sterns durch einen extrasolaren Planeten sprechen Astronomen von einem **Transit**, im Deutschen auch *Durchgang* genannt. Dabei nimmt die Helligkeit der Sonne bzw. des Sterns für einige Zeit ab.

21.21.1 Praktisch! Das passiert auch extragalaktisch

Dieses Phänomen tritt im Prinzip auch bei weit entfernten (galaktischen oder extragalaktischen) **Doppelsternsystemen** auf, z. B. bei Röntgendoppelsternen. Bei geeigneter Orientierung zum irdischen Beobachter kommt es vor, dass sich der eine Stern vor den anderen schiebt und dabei die Gesamthelligkeit beider Sterne abnimmt. Solche Systeme heißen **Bedeckungsveränderliche** - Transit ist dann kein gebräuchlicher Ausdruck.

21.21.2 Eklipsen

Transits sind zu unterscheiden von den Eklipsen (Sonnen- und Mondfinsternisse). In gewisser Weise ist eine Sonnenfinsternis ein extremer Transit, bei dem die Mondscheibe die Sonnenscheibe abdeckt.

21.22 Triple-Alpha-Prozess

Der Triple-Alpha-Prozess oder auch *Salpeter-Prozess*, meist **Heliumbrennen** genannt, ist ein wichtiger Mechanismus zur Energieumwandlung (Energie'gewinnung') aus thermonuklearer Fusion (siehe dort für Details) in massearmen bis mittelschweren Sternen. Eine wichtige Voraussetzung ist eine **hohe Gasdichte**. Die Bezeichnung 'Triple-Alpha' bezieht sich auf die **drei** beteiligten Helium-4-Kerne (**α-Teilchen**, siehe auch α-Zerfall) in diesem Prozess.

21.23 T Tauri Sterne

T Tauri Sterne sind ein Typus von jungen, stellaren Objekten, den YSOs. Es handelt sich um junge Sterne (nur 10^5 bis 10^7 Jahre alt), die sich zu 'normalen Sternen' entwickeln. Im normalen Stadium werden sie dann zu Hauptreihensternen, die demnach die Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms bevölkern.

21.23.1 T Tauris flackern

Sie bewegen sich noch senkrecht zur Hauptreihe, d. h. variieren in der Helligkeit, was durch den Akkretionsprozess verursacht wird. Durch Akkretion können diese Protosterne einen protostellaren Jet speisen. Dann tritt die Umgebung des T Tauri Sterns als Herbig-Haro-Objekt in Erscheinung.

21.23.2 T Tauris blasen

T Tauri Sterne beginnen gerade durch **starke Sternenwinde** ihre Umgebung 'leerzufegen'. Dabei wird die **akkretierende Staubscheibe** nach und nach abgebaut. Dieser Prozess des Staubabbaus wird auch durch die **Planetenbildung** in der protoplanetaren Scheibe (engl. *protoplanetary disk*, kurz **Proplyd** genannt) unterstützt. Unter dem Eintrag Ekliptik gibt es Details dazu und zur Entstehung der Sonne nachzulesen.

21.23.3 Linien schwächeln

Am Ende steht ein entwickelter T Tauri Stern, ein so genannter *Weak-lined T Tauri Star*, also ein T Tauri Stern mit schwachen Emissionslinien. Die starken Wasserstoff- und Kalziumemissionslinien, wie man sie von klassischen T Tauri Sternen kennt, sind durch den Verlust des Staubes nur noch sehr schwach.

21.23.4 Spektraltyp, Prototyp

Vom Spektraltypus her belegen T Tauri Sterne den untere Bereich der Spektralsequenz: G, K und M. Der Prototyp *T Tauri* im Sternbild *Taurus* (dt. Stier) hat Spektraltyp G5e und wurde als Klasse veränderlicher Sterne 1945 von dem US-Astronomen *A. Joy* etabliert.

21.24 Tunneleffekt

Dieser Effekt ist nur durch die **Quantentheorie** zu erklären und besitzt **kein klassisches Analogon**. Deshalb bereitet der Tunneleffekt - wie viele Aspekte der Quantenwelt - häufig Verständnisprobleme. Eines sei vorweggenommen: der Tunneleffekt hat nichts mit dem Tunnelblick zu tun.

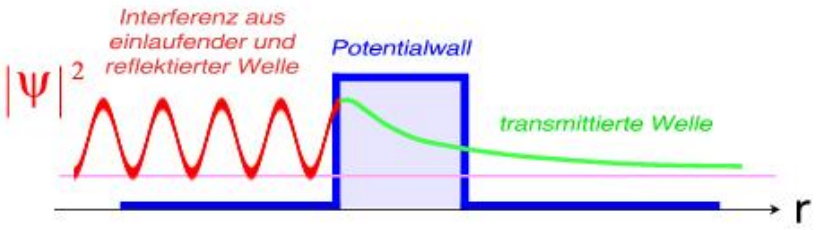

Abbildung 21.5: Tunneln einer Welle durch einen Potentialwall.

21.24.1 Wellenfunktion und Aufenthaltswahrscheinlichkeit

In der quantentheoretischen Beschreibung stellt man Teilchen als **Wellenfunktion** dar. Die Lösungen der fundamentalen **Schrödinger-Gleichung** des Problems liefern die möglichen *Energiezustände* (oder Eigenfunktionen, repräsentiert durch die Wellenfunktionen) und die *Energieeigenwerte* (das **Spektrum**). Die Energie eines Quantensystems ist **nicht kontinuierlich**, sondern in diskreten Portionen, den Energiequanten, gepackt. Die Absolutquadrate der Wellenfunktionen sind von besonderer Relevanz, weil sie die **Aufenthaltswahrscheinlichkeiten** des beschriebenen Teilchens in einem Raumbereich angeben. Das typische Beispiel sind die **Orbitalwolken** des Wasserstoffproblems, die gerade die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen angeben.

21.24.2 endliche Wahrscheinlichkeit an verbotenen Orten

Wenn man nun die Schrödinger-Gleichung für verschiedene Bereiche eines **Potentials** (beispielsweise einer Stufenfunktion, wo das Potential von null auf einen konstanten Wert springt) löst, stellt man fest dass die Wellenfunktion bzw. deren **Absolutquadrat im *klassisch verbotenen Bereich endlich* werden kann!**. Was bedeutet das anschaulich? Das Diagramm 21.5 zeigt eine Wellenfunktion (rot) links von einem Potentialwall, die sich von links nach rechts ausbreiten möge. Die Koordinate r parametrisiert den Ort der Welle (hier: eindimensionales Problem). Ein vergleichbares, klassisches (unquantisiertes) Problem wäre beispielsweise eine von links einlaufende Wasserwelle, die auf ein Hindernis rechts, z. B. einen Deich, trifft. Der Potentialwall entspricht dem Deich. Klassisch ist klar: Wenn die Wasserwelle zuwenig kinetische Energie mitbringt, bleibt das Gebiet jenseits des Deichs trocken. Ein quantenmechanisches Teilchen jedoch schafft es über den Deich bzw. durch die Potentialstufe! Das Teilchen **tunnelt** durch die Barriere, wie Physiker sagen. Jenseits der Barriere kommt ein Teil der Wellenfunktion (grün) an. Es ist nur ein abgeschwächter Teil der ursprünglichen Amplitude der Welle, weil die Schrödinger-Gleichung in der Barriere eine exponentielle Dämpfung diktiert. Doch Fakt ist, dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit (= Absolutquadrat $—\Psi—^2$) jenseits der Barriere größer als Null ist. Im Allgemeinen berechnen Quantenphysiker Transmissionswahrscheinlichkeiten und -koeffizienten, die es dem Teilchen erlauben, einen Potentialwall zu passieren. Dabei kommt umso weniger von der Welle auf der anderen, klassisch verbotenen Seite an, je dicker das Hindernis ist.

Weiterhin gibt es auch Reflexionskoeffizienten, weil ja der andere Teil der Welle am Hindernis reflektiert wird - so wie es uns klassisch vertraut ist: Die Wasserwelle prallt auf den Deich und läuft wieder zurück nach links. Die Überlagerung der einlaufenden (links nach rechts) und reflektierten Welle (rechts nach links) ergibt gerade die hier dargestellte, variierende Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Dieses Interferenzmuster ist typisch für quantenmechanische Kastenprobleme (vergleiche auch Casimir-Effekt).

21.24.3 Beispiel 1: α-Zerfall

Das traditionelle Anwendungsbeispiel des Tunneleffekts ist der α-Zerfall. Die Alphateilchen dieser Form der Radioaktivität stammen aus dem Atomkern bestimmter Nuklide und sind nichts anderes als Heliumatomkerne (Verbund aus zwei Protonen und zwei Neutronen). Die Alphateilchen tunneln durch das klassisch unüberwindbare Coulombpotential und können so den Kern (der dann Alpha-Strahler heißt) verlassen.

21.24.4 Beispiel 2: Elektronenmikroskopie

Ein weiteres Beispiel, das sogar spektakuläre Anwendung gefunden hat ist das **Rastertunnelelektronenmikroskop**. Mit diesem Mikroskop, das die Beobachtung (bzw. besser gesagt Abtastung) einer Oberfläche nicht mit Lichtteilchen sondern mit Elektronen ermöglicht, kann man noch kleinere Strukturen abbilden, sogar Atome! Die Funktionsweise beruht darauf, dass eine haarfeine, positiv geladene Nadel (Anode) eine Materialoberfläche im Vakuum abtastet. Dabei können Elektronen, des Materials, die sich im klassisch verbotenen Bereich aufhalten (siehe oben: Aufenthaltswahrscheinlichkeit ungleich null) mit der positiv geladenen Elektrode abgesaugt werden: es fließt ein so genannter **Tunnelstrom**. Die Verstärkung und Visualisierung dieses Stroms offenbart dann kleinste Strukturen im Bereich von Nanometern (ein Milliardstel Meter), wie Molekülanordnungen und sogar einzelne Atome!

22 Lexikon U

22.1 ULIRG

Das Akronym ULIRGs steht für ***U**ltra-**L**uminous **I**nfra**R**ed **G**alaxies*. Gelegentlich wird das R auch unterschlagen und man liest von ULIGs. Diese Galaxien zeichnen sich also durch eine **extreme Infrarothelligkeit** aus, die im fernen Infrarot (engl. *far infra-red*, **FIR**) etwa 10^{12} Sonnenleuchtkräfte und mehr beträgt. Dabei entspricht die Leuchtkraft der Sonne etwa 4×10^{26} Watt oder 4×10^{33} erg! Mit LIRG/LIG werden Infrarotgalaxien bezeichnet, die eine Leuchtkraft von wenigen Größenordnungen unterhalb derjenigen von ULIRGs/ULIGs haben.

22.1.1 Woher kommt diese extreme Infrarothelligkeit?

Modell 1: Starburst

Das erste Modell erklärt die Infrarothelligkeit durch eine **erhöhte Sternentstehungsaktivität** (engl. *starburst activity*), also eine hohe Bildungsrate von massereichen Sternen in der Galaxie. Nun mag man sich fragen, warum plötzlich Sterne vermehrt entstehen. Der Grund dafür ist die **Verschmelzung von Galaxien**. Im Speziellen vermuten die Astronomen, dass gasreiche Spiralgalaxien zusammenstoßen. Die Vermischung und Verdichtung von Gas in den kollidierenden Galaxien leitet eine verstärkte und schnelle Entstehung von Sternen ein. Alle Sterne zusammen erhöhen die Infrarothelligkeit der verschmelzenden Galaxien insgesamt.

Modell 2: AGN

Während des Galaxienzusammenstoßes verliert das Gasgemisch Drehimpuls infolge *dynamischer Reibung*, d. h. die Gasmassen ziehen sich gegenseitig an und 'bremsen sich aus'. Das Gas wird dabei von der Sternpopulation in den Galaxien 'entkoppelt' und fließt in den Zentralbereich der verschmelzenden Galaxien. Das sind ideale Voraussetzungen zum Zünden eines Aktiven Galaktischen Kerns (AGN). Im Standardmodell der AGN wird durch **Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch** im Zentrum der Galaxie eine gigantische Leuchtkraft erzeugt. Mittels Interferometerbeobachtungen im Bereich der Millimeterstrahlung konnte die Gasmasse innerhalb von 0.5 kpc um das Zentrum der hellsten Infrarotgalaxien zu 10 Mrd. Sonnenmassen bestimmt werden. Das sind riesige Gaskonzentrationen!

22.1.2 zwei erfolgreiche Infrarotsatelliten

Der 1983 gestartete *Infrared Astronomical Satellite* (**IRAS**, *Soifer et al.* 1987) und das 1995 gestartete *Infrared Space Observatory* (**ISO**, *Kessler et al.* 1996) haben das Verständnis der mysteriösen Infrarotgalaxien gewaltig nach vorne gebracht. Der IRAS-Survey wurde bei Wellenlängen von 12, 25, 60 und 100 Mikrometern (engl. *micron*) durchgeführt und deckte 96% des Himmels ab (Fachbegriff: *all-sky survey*)! ISO ist mit zwei Spektrometern ausgestattet, die zwischen 2.4-45 und 43-197 Mikrometern beobachten.

22.1.3 Status der (U)LIRG-Forschung

Bei den größten Infrarotleuchtkräften sind ULIRGs die dominierenden Objekte: Sie treten dann in vergleichbarer Zahl wie die Seyfert-Galaxien auf und sind sogar zahlreicher als die Quasare.

Die Analyse eines speziellen Samples aus 15 ULIRGs ergab, dass 70-80% der Galaxien durch die Entstehung massereicher Sterne angetrieben werden, wohingegen 20-30% davon durch einen AGN erklärt werden können. Indikator für AGN-Aktivität ist dabei die Stärke der spektroskopischen Signatur von polyaromatischen Kohlenwasserstoffen (PAHs). In etwa der Hälfte der ULIRGs im Sample laufen beide Prozessen gleichzeitig ab, und zwar in der etwa ein bis zwei kpc durchmessenden zirkumnuklearen Scheibe (*Genzel et al.* 1998).

Es zeigte sich auf der Grundlage der neuen Infrarotbeobachtungen, dass **LIGs/ULIRGs generell AGN und Starburst-Aktivität** zeigen. Die anfänglich favorisierte Trennung von Starburst vs. AGN ist nicht mehr haltbar und ULIRGs sind komplexer als ursprünglich gedacht (*Genzel & Cesarsky* 2000).

22.1.4 ULIRGs zeigen auch Röntgenaktivität!

Astronomen konnten nachweisen, dass ULIRGs auch am anderen Ende des Spektrums sehr auffällig sind: sie zeigen **Röntgenleuchtkräfte** bis zu 10^{42} erg/s (entsprechend 10^{11} Sonnenleuchtkräften). Dies fanden die Astronomen beim **ULIRG NGC 6240** durch Beobachtungen mit dem deutschen Röntgenobservatorium *ROSAT* (*Komossa et al.* 1998). Außerdem wurde bei dieser Beobachtung ein Komplex verschiedener **Fe-Kα-Linien** entdeckt. Diese Eisenlinien sind gerade ein Charakteristikum für AGN. Die Linien liegen (für neutrales Eisen) bei einer Ruheenergie von etwa 6.4 keV und entstehen durch *Fluoreszenz* in ionisiertem Eisen. Sie sind außerordentlich wichtig bei der Diagnostik von AGN, um Parameter des Systems aus Schwarzem Loch und Akkretionsscheibe abzuleiten. Eine gute Auflösung dieser Linien ermöglicht die Bestimmung von wesentlichen Parametern, wie Neigung (*Inklination*) der Scheibe, der Rotation des Loches (Kerr-Parameter) und des Geschwindigkeitsfeldes des Plasmas in der Umgebung des Loches.

22.1.5 Tanz zweier superschwerer Löcher

Spätere Beobachtungen an NGC 6240 deckten weitere faszinierende Fakten auf: Mit dem US-amerikanischen Röntgensatelliten *Chandra*, das räumliche Strukturen sehr gut aufzulösen vermag, gelang der Nachweis eines **doppelt-aktiven Kerns** in NGC 6240 (*Komossa et al.* 2003). Mit anderen Worten: im Zentrum von NGC 6240 tummeln sich **zwei supermassereiche Schwarze Löcher**, die umeinander tanzen. Genau das würde man als Folge der oben beschriebenen Galaxienkollision auch erwarten. NGC 6240 gehört zu den besten Kandidaten eines 'Binär-Lochs'.

Von solchen 'Lochzwillingen' wissen Relativisten, dass sie wie die stellaren Analoga (umkreisende stellare Schwarze Löcher, Hulse-Taylor-Pulsar) intensive Gravitationswellen abstrahlen - vor allem, wenn sich die beiden Löcher sehr nahe kommen. Durch den Energieverlust des Systems infolge Abstrahlung der Gravitationswellen sollten die beiden gigantischen Löcher irgendwann einmal verschmelzen. Die Gravitationswellenforscher erwarten dann eine intensive Abstrahlung der Gravitationswellen (engl. *gravitational wave burst*). Sie hoffen, dass das *bald direkt beobachtbar* sein wird.

22.1.6 weitere ULIRGs

Andere ULIRGs sind IRAS 05189-2524, die einen (Compton-dünnen) 1.9 Seyfertkern aufweist, UGC 5101 mit zirkumnuklearen Scheibe heftigster Sternentstehung und ULIRG 00029-1424 mit einer kosmologischen Rotverschiebung von $z = 0.44$.

22.1.7 wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ Soifer et al. 1987, *ApJ* **320**, 238: The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function
- ◇ Soifer, Neugebauer & Houck 1987, *ARA& A* **25**, 187: The IRAS view of the extragalactic sky
- ◇ Sanders & Mirabel 1996, *ARA& A* **34**, 749: Luminous Infrared Galaxies

◇ Kessler et al. 1996, *A& A* **315**, 27: The Infrared Space Observatory (ISO) mission.

◇ Genzel et al. 1998, *ApJ* **498**, 579: What powers ultraluminous IRAS galaxies?

◇ Komossa, Schulz & Greiner 1998, *A& A* **334**, 110: ROSAT HRI discovery of luminous extended X-ray emission in NGC 6240

◇ Genzel & Cesarsky 2000, *ARA& A* **38**, 761: Extragalactic Results from the Infrared Space Observatory

◇ Komossa et al. 2003, *ApJ* **582**, 15: Discovery of a Binary Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy NGC 6240 Using Chandra

22.2 ULX

ULX ist ein Akronym für ***u**ltra**l**uminous **X**-ray source* und bezeichnet damit eine **ultraleuchtkräftige Röntgenquelle**. Das Attribut 'ultra-' weist darauf hin, dass es sich um Quellen mit *ungewöhnlich hoher Röntgenleuchtkraft* handeln muss. ULXs haben ihrer Definition nach Röntgenleuchtkräfte von $L_X = 10^{39}$ bis 10^{41} erg/s im Band zwischen 0.2 und 10 keV.

Dass diese Röntgenleuchtkräfte gigantisch sind, erkennt man beim Vergleich mit der Röntgenleuchtkraft der Sonne: selbst im Maximum schafft sie nur knapp 5×10^{27} erg/s. Das ist billionenfach schwächer (12 Größenordnungen!) als beim schwächsten ULX!

22.2.1 Wo gibt's denn sowas?

ULXs wurden sowohl in der Milchstraße, als auch in zahlreichen extragalaktischen Systemen beobachtet.

22.2.2 Was leuchtet denn da?

Eine sehr schnelle Abschätzung kann mit dem *Eddington-Kriterium* durchgeführt werden. Unter der Annahme, dass das Leuchten durch **Akkretion** erzeugt wird, setzt die Eddington-Leuchtkraft die beobachtete Leuchtkraft in Bezug zur Masse des aufsammelnden Objekts. Auf dieser Basis lassen sich schon sehr interessante Schlüsse auf Eigenschaften der ULXs ziehen.

Szenario 1: Ein super-Eddington-Akkretor

Nehmen wir an, der ULX strahle mit einer Leuchtkraft von 10^{39} erg/s. Nehmen wir weiterhin an, dass die Masse des Materieaufsammlers (*Akkretor*) 1.4 Sonnenmassen betrage (das ist gerade die Chandrasekhar-Masse). Dann folgern wir mit der Eddington-Relation, dass der ULX unter diesen Voraussetzungen eine **super-Eddington-Quelle** sein muss. Mit anderen Worten: Der ULX würde extrem effizient Materie aufsammeln.

Szenario 2: Ein intermediate-mass black hole

Bleiben wir weiterhin bei der angenommenen ULX-Leuchtkraft von 10^{39} erg/s. Lässt sich das auch anders auf der Basis des Eddington-Arguments verstehen? Ja, denn der Akkretor könnte auch massereicher sein. Akkretiert der ULX gerade am Eddington-Limit, so können wir mit der ersten Gleichung unter dem Eintrag Eddington-Leuchtkraft sofort seine Masse ausrechnen. Wir erhalten bei 10^{39} erg/s exakt **7.7 Sonnenmassen**. Für das obere Ende der ULX-Leuchtkräfte erhalten wir sogar **770 Sonnenmassen**. Sollte der Akkretor sogar sehr ineffizient Materie aufsammeln und als sub-Eddington-Quelle z. B. nur durch ADAF-Akkretion angetrieben werden, so müsste die Akkretormasse noch **weit größer als 1000 Sonnenmassen** sein.

Was könnte das für ein Objekt sein? Diese Massen sind gerade für die leuchtkräftigsten ULXs zu hoch, als dass es ein massereicher Stern sein könnte. Es wurde daher vorgeschlagen, dass akkretierende,

mittelschwere Schwarze Löcher (engl. *intermediate-mass black holes*, **IMBHs**) ULXs erklären könnten. Diese Annahme ist nicht ohne Reiz, weil diese 'Mittelgewichte' die klaffende Lücke zwischen den 'Fliegengewichten' (stellare Schwarze Löcher) und den 'Schwergewichten' (supermassereiche Schwarze Löcher) füllen würden. Szenario 2 wird gestützt von IMBHs, die auch in Kugelsternhaufen und jungen Sternhaufen vermutet werden.

Die Signatur eines IMBHs ist eine **kalte** Akkretionsscheibe mit Temperaturen von kT $\sim$ 100 bis 200 eV. Das folgt aus der Theorie der Standardakkretionsscheiben, deren Temperatur *antiproportional* zur Akkretormasse ist. Kurz: Hohe Lochmasse macht eine kalte Scheibe.

22.2.3 Geschichtlicher Abriss

- ◇ ULXs werden seit mehr als zwanzig Jahren beobachtet - allerdings hießen sie Anfang der 1980er Jahre nicht ULXs: *Palumbo et al.* (1985) berichteten, dass sie sowohl in der Spiralgalaxie M51, als auch in deren Begleitgalaxie NGC5195 helle Röntgenquellen (10^{39} bis 10^{40} erg/s) mit dem Einstein-Observatorium identifizieren konnten. In beiden Fällen sind diese Objekte nicht mit dem Kern ihrer Wirtsgalaxie assoziiert. Im Falle von M51 wurde eine Quelle mit etwa zehn Sonnenmassen abgeleitet.
- ◇ 1993 schlugen *Fabian & Ward* sogar einen Akkretor mit etwa hundert Sonnenmassen vor, den sie mit einem ULX in der Zwerggalaxie NGC5408 in Verbindung brachten.
- ◇ In einem wichtigen Papier zu ULXs wird auf der Grundlage von ROSAT-Daten die Existenz von IMBHs von 100 bis 10000 Sonnenmassen gefordert (*Colbert & Mushotzky* 1999). Die Quellen in diesem Sample sind konsistent damit, dass sie viel Materie in kurzer Zeit akkretieren (so genannter *high state*, siehe Bild unter Akkretion).
- ◇ Eine statistische Analyse von ROSAT-Daten ergab, dass eine von fünf Galaxien mindestens einen ULX enthalte (*Roberts & Warwick* 2000).
- ◇ 2001 wurde ein ULX in der Galaxie M82 mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra entdeckt, der unter dem Eintrag mittelschwere Schwarze Löcher detailliert beschrieben wird. Bei diesem hellsten aller ULXs sprechen Astronomen gelegentlich auch von einem HLX, einer *hyperluminous X-ray source*.

22.2.4 Kritik an der Definition

Die Definition eines ULXs nur mit *einem einzigen* Parameter, der Röntgenleuchtkraft, kann leicht dazu führen, dass die ULX-Population eine Mischung aus Quellen sehr unterschiedlicher Physik ist.

22.2.5 Einige Fakten

Eine Bedeckung wäre zu erwarten, falls sich die Quelle des ULX in einem Doppelsternsystem befindet, das gerade so zum irdischen Beobachter geneigt ist, dass der Begleiter vor dem ULX vorüberzieht. Doch bislang wurde **keine einzige Bedeckung** bei ULXs beobachtet.

In der Umgebung des ULX könnten sich Supernovaremnants befinden, die sich bildeten, als der ULX geboren wurde. Die Supernovaüberreste strahlen im Radiobereich, aber auch optisch. Die energiereiche Strahlung der ULXs ionisiert den expandierenden Nebel um die Zentralquelle, so dass dann der Nebel optisch beobachtbar ist. Dieser Vorgang ist ganz ähnlich bei den Planetarischen Nebeln - nur sitzt dort kein ULX, sondern ein Weißer Zwerg der 'nur' UV-Strahlung emittiert.

ULX-Spektren ähneln sehr denjenigen von galaktischen Röntgendoppelsternen. Doch einige zeigen besonders weiche, thermische Röntgenstrahlung (kT $\sim$ 50 bis 100 eV). Diese spezielle Klasse von Röntgenquellen heißt **superweiche Röntgenquellen** (engl. *supersoft X-ray sources*, **SSS**). Superweiche ULXs wurden sowohl in der Milchstraße, als auch in den Magellanischen Wolken und der Antennengalaxie entdeckt.

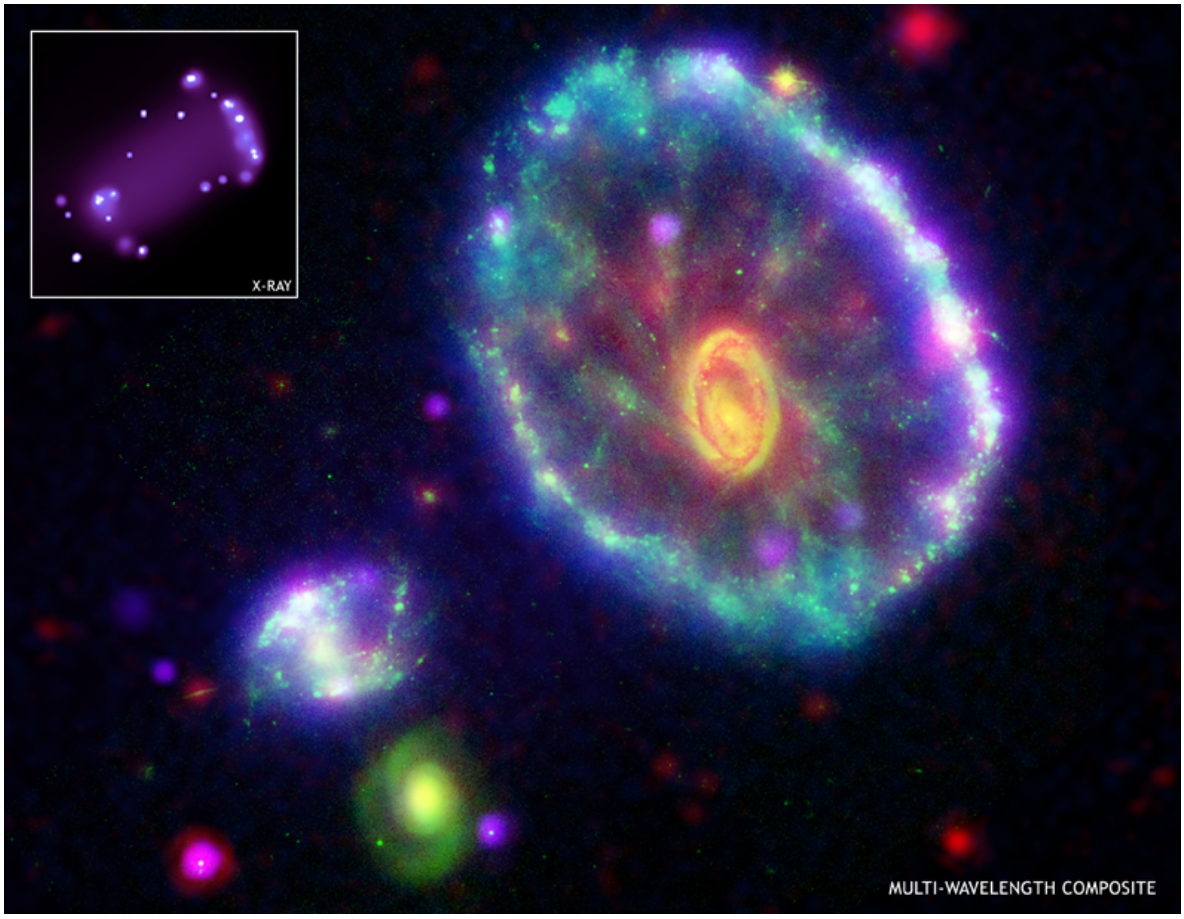

Abbildung 22.1: Multiwellenlängen-Beobachtungsfoto der Cartwheel-Galaxie von 2006.

22.2.6 Alternative: Mikroblazare

Ähnlich wie bei den Mikroblazaren und Blazaren versuchten Astronomen, die extreme ULX-Strahlung durch **Blauverschiebung** (*beaming*) zu erklären (*Reynolds et al.* 1997). Mit diesem Ansatz würden stellare Schwarze Löcher als ULX-Population ausreichen, und die nötigen Lorentz-Faktoren der Jets lägen bei etwa 5 (*Körding et al.* 2002). In diesem Fall hat das ULX-Modell eine Vorzugsrichtung, nämlich die Ausbreitungsrichtung des Jets und wird daher als *anisotropes Modell* klassifiziert. Die oben beschriebenen Akkretionsmodelle mit IMBHs sind dagegen *isotrop*. Die Jets würden außerdem mit bis zu 30% zur weichen Röntgenstrahlung beitragen.

Beobachtungen im Fall von M82 X-1 sprechen *gegen* das Beaming-Modell, weil hier Quasi-periodische Oszillationen (QPO) und eine relativistisch verbreiterte Eisenlinie (*Strohmayer & Mushotzky* 2003) entdeckt wurden.

Wie im Lexikoneintrag mittelschwere Schwarze Löcher exemplarisch an M82 X-1 erläutert wird, sprechen mittlerweile auch Computersimulationen der Haufendynamik für die Bildung von IMBHs (*Zwart et al.* 2004).

22.2.7 ULXs mögen eine jugendliche Umgebung

Es herrscht Einigkeit darüber, dass ULXs viel häufiger **mit Systemen hoher Sternentstehung assoziiert** sind. So wurden in den irregulären, sich in einem Verschmelzungsprozess befindlichen

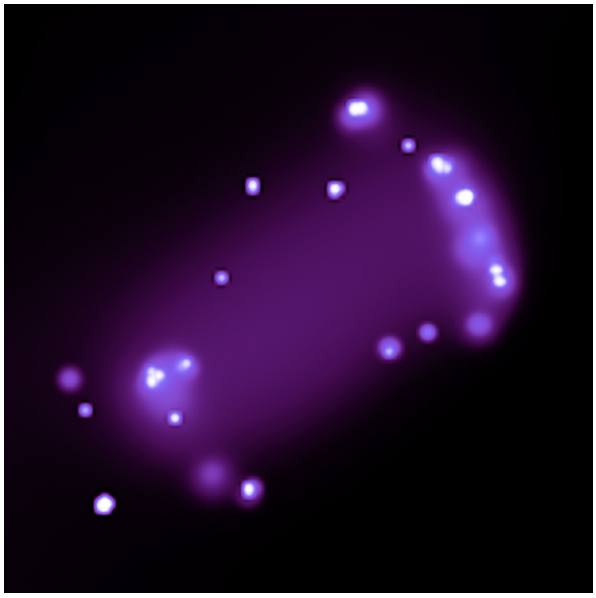

Abbildung 22.2: Vergößerung des Chandra-Beobachtungsfotos der Cartwheel-Galaxie von 2006.

Antennengalaxien neun ULXs und in der Wagenrad-Galaxie (engl. *Cartwheel Galaxy*) im sternbildenden Ring sogar 20 ULXs entdeckt! Die beeindruckende Schönheit der etwa 400 Mio. Lichtjahre entfernten Wagenrad-Galaxie zeigt das Beobachtungsfoto 22.1 (Credit: NASA/JPL/CXC, *Appleton et al.*; *Wolter & Trinchieri et al.* 2006). Das Foto ist Falschfarbenbild, das sich aus unterschiedlichen Wellenlängenbereichen zusammensetzt: Violett ist Röntgenstrahlung, blau ist Ultraviolettstrahlung, grün ist optisches Licht und schließlich ist rot Wärmestrahlung. Auch bei der Wagenrad-Galaxie ist die Sternentstehung die Konsequenz einer Galaxienkollision: die kleinere Galaxie links unten stieß mit einer größeren Galaxien zusammen. Daraus ging die eigentümliche Wagenrad-Struktur hervor. Das kleine Bild links oben zeigt nur die Röntgenstrahlung. Einige Punktquellen, die mit ULXs auf dem ausgeprägten, sternbildenden Ring in Verbindung gebracht werden, sind dort gut sichtbar.

22.2.8 Status der ULX-Forschung auf dem Symposium der Internationalen Astronomischen Gesellschaft 2005

Im Sommer 2005 trafen sich Astronomen aus der ganzen Welt, um über hochenergetische, kosmische Quellen zu sprechen. Auch über die ultraleuchtkräftigen Röntgenquellen wurde kontrovers diskutiert. Hier sollen wesentliche Resultate kurz vorgestellt werden, die im Konferenzband der Internationalen Astronomischen Gesellschaft (s. u. Quellenangaben) nachzulesen sind:

- ◇ Eine Beobachtung des **ULX Holmberg II X-1** mit XMM-Newton ergab, dass die Spektren besser mit einem stellaren Schwarzen Loch von 10 bis 100 Sonnenmassen modelliert werden können. Es gibt zwar auch Anzeichen für eine weiche Komponente der Röntgenstrahlung, d. h. für eine kalte Scheibe, doch die zeitlichen Variabilitäten schließen ein Loch schwerer als 100 Sonnenmassen aus. Außerdem legen die Modellanpassungen die Existenz einer optisch dicken Korona nahe (*Roberts et al.* 2005).
- ◇ Die optischen Beobachtungen an dem **ULX NGC 1313 X-2** gestatten es mithilfe der optischen Spektrallinie He-II bei 468.6 nm die Lochmasse kinematisch zu bestimmen. Auch hier spricht das Resultat eher für ein stellares Schwarzes Loch (*Pakull et al.* 2005).

- ◇ **NGC 253 ULX1** ist ein so genannter rekurrierender (d.h wiederkehrenden) ULX. Röntgenbeobachtungen mit ROSAT und XMM an diesem Objekt lassen sich am besten mit Bremsstrahlung erklären und weisen auf ein Schwarzes Loch mit mehr (aber nicht viel mehr) als 11 Sonnenmassen hin (*Bauer & Pietsch* 2005).
- ◇ Wie sind die IMBHs in ULXs entstanden? Ein Szenario wurde vorgestellt, demzufolge sie das Überbleibsel von Sternen der Population III sind, also sehr massereichen Sternen, die sich als die ersten im Kosmos gebildet haben. Die **Pop-III-IMBHs** überdauern die kosmologische Entwicklung bis ins lokale Universum und wachsen dabei gegebenenfalls durch das Aufsammeln von Materie. Wenn sie schließlich durch eine dichte Molekülwolke oder eine Sternentstehungsregion wandern, zündet der ULX durch Akkretion und wird für uns sichtbar (*Mii & Totani* 2005).

22.2.9 Fazit

Die Natur der ULXs ist noch unklar, doch eine Reihe guter Modelle liegt vor, die mit astronomischen Beobachtungen getestet werden können. Zurzeit sprechen sowohl Beobachtungen, als auch Computersimulationen in der Tat für die akkretierenden, mittelschweren Schwarzen Löcher. Die Jets stellarer Schwarzer Löcher oder exotische Akkretionszustände stellarer Schwarzer Löcher werden weniger favorisiert. Doch auch akkretierende, stellare Schwarze Löcher erklären in vielen Fällen die Beobachtungen. In dieser Hinsicht herrscht unter Astronomen sicherlich noch **keine Einigkeit**.

Ein guter Ausweg aus diesem Dilemma könnte das folgende Szenario sein: Vielleicht sind die hellsten der ULXs eine homogene Klasse und assoziiert mit IMBHs, während die leuchtschwächeren ULXs nur durch stellare Schwarze Löcher angetrieben werden. **Dann wären ULXs beides**, stellare und mittelschwere, aktive Schwarze Löcher, die durch eine schärfere Definition des ULX-Begriffs separiert werden könnten.

22.2.10 Quellen & wissenschaftliche Veröffentlichungen

- ◇ *Ward, M.*: Ultra-luminous X-ray Sources, proceedings to IAUS 230, 271, 2005
- ◇ *Roberts et al..*: New Insights into ultraluminous X-ray sources from deep XMM-Newton observations, proceedings to IAUS 230, 288, 2005
- ◇ *Pakull et al.*: Ultra-luminous X-ray Sources: Bubbles and Optical Counterparts, proceedings to IAUS 230, 293, 2005
- ◇ *Bauer & Pietsch*: The recurrent ultra-luminous X-ray transient NGC 253 ULX1, proceedings to IAUS 230, 298, 2005
- ◇ *Mii & Totani*: Ultra-Luminous X-ray Sources: Evidence for Very Efficient Formation of Population III Stars Contributing to the Cosmic Near-Infrared Background Excess?, proceedings to IAUS 230, 304, 2005
- ◇ *Colbert & Mushotzky*: The nature of accreting black holes in nearby galaxy nuclei, ApJ 519, 89, 1999
- ◇ *Fabbiano, G.*: X-rays from Normal Galaxies, ARA& A 27, 87, 1989

22.3 Unifikation

Unifikation ist eine mächtige Strategie im Denken generell und in der Physik im Speziellen. Unter dem Eintrag Vereinheitlichung, dem Synonym für Unifikation, wird die historische Entwicklung des Unifikationsbestrebens in der theoretischen Physik nachskizziert, die Vereinheitlichung selbst kritisch hinterfragt und ihre Grenzen aufgezeigt.

22.4 Unitarität

Unitarität, Spezialität und Orthogonalität sind bestimmte Eigenschaften von Transformationsmatrizen, oder allgemein gesprochen, von mathematischen Operatoren. Operatoren sind von besonderer Wichtigkeit für die Mathematik und Physik, vor allem in der Quantentheorie: Sie sind diejenigen mathematischen Objekte, die in Form von **Operatorgleichungen** (z. B. der *Schrödingergleichung* der Quantenmechanik) die Dynamik von Quantensystemen beschreiben.

22.4.1 unitäre Transformationen

Unitäre Transformationen können Gruppen oder Symmetriegruppen bilden. Deshalb behandelt man sie in der Gruppentheorie, die besonders relevant für die Teilchenphysik ist. Die (Matrizen-)Eigenschaften Unitarität, Orthogonalität und Spezialität dienen dann einer **Klassifikation dieser Gruppen**. Ein unitärer Operator U erüllt folgende Eigenschaft

$$U^+ = U^{-1}.$$

Unitarität ist eine wichtige Eigenschaft physikalischer Operatoren, weil anschaulich gesprochen eine unitäre Transformation die Physik nicht ändert. Deshalb ist z. B. der Hamilton-Operator, der die Energie-Zustände und -eigenwerte eines Quantensystems diktiert unitär. In der Quantenmechanik (QM) und den Quantenfeldtheorien (QFT) ist Unitarität eine **Zeittranslationssymmetrie der Dynamik**. Mit der Allgemeinen Relativitätstheorie muss der Zeitbegriff neu gedeutet werden. Hier ist die Aufrechterhaltung der Zeittranslationssymmetrie deutlich erschwert. Es besteht daher nicht notwendig die Forderung nach Unitarität einer Quantengravitation, beispielsweise der Loop-Quantengravitation (LQG).

22.4.2 Lesehinweis

Nähere Beschreibungen zu diesen Aspekten befinden sich unter dem Eintrag Symmetriegruppe.

22.5 Universum

Ein Synonym für die Gesamtheit der Welt, den Kosmos oder das Weltall. Damit verbirgt sich hinter dem Universum alles, was wir kennen, erfassen und wahrnehmen können, aber sicher auch Dinge, die wir (noch) nicht kennen. Tja, wie könnte man etwas so Komplexes wie das Universum in wenigen Sätzen in einem Lexikon beschreiben? Der Detailreichtum dieser wunderbaren, komplexen Welt sprengt sicher jede Enzyklopädie. Wir nehmen natürlich - wie an allen Stellen des Lexikons - die Perspektive des Sternenfreundes bzw. Astrophysikers ein und fragen nach der Beschaffenheit und dem Ursprung des Universums aus der Sicht des Naturwissenschaftlers.

22.5.1 Kosmogonie & Kosmologie

Von dieser sicher beschränken Perspektive muss zunächst zwischen zwei besonderen Teilgebieten der Astronomie unterschieden werden: Die **Kosmogonie** beschäftigt sich im engeren Sinne mit der *Entstehung des Universums*, wohingegen die **Kosmologie** den Zustand, die Entwicklung, die Geometrie und die Topologie des Universums untersucht. Meist wird der Begriff Kosmologie lapidar als Oberbegriff verwendet.

22.5.2 mathematische Beschreibung des Kosmos als Ganzes

Anfang des 20. Jahrhundert wurden die mathematischen Mittel gefunden, um den Kosmos als Ganzes zu beschreiben: Einsteins **Allgemeine Relativitätstheorie**, eine Theorie der Gravitation, stellt in Gestalt der Einsteinschen Feldgleichungen ein mächtiges Werkzeug zur Verfügung, das sogar den ganzen Kosmos beschreibt. In gewissem Sinne haben wir die viel zitierte 'Weltformel' bereits gefunden!

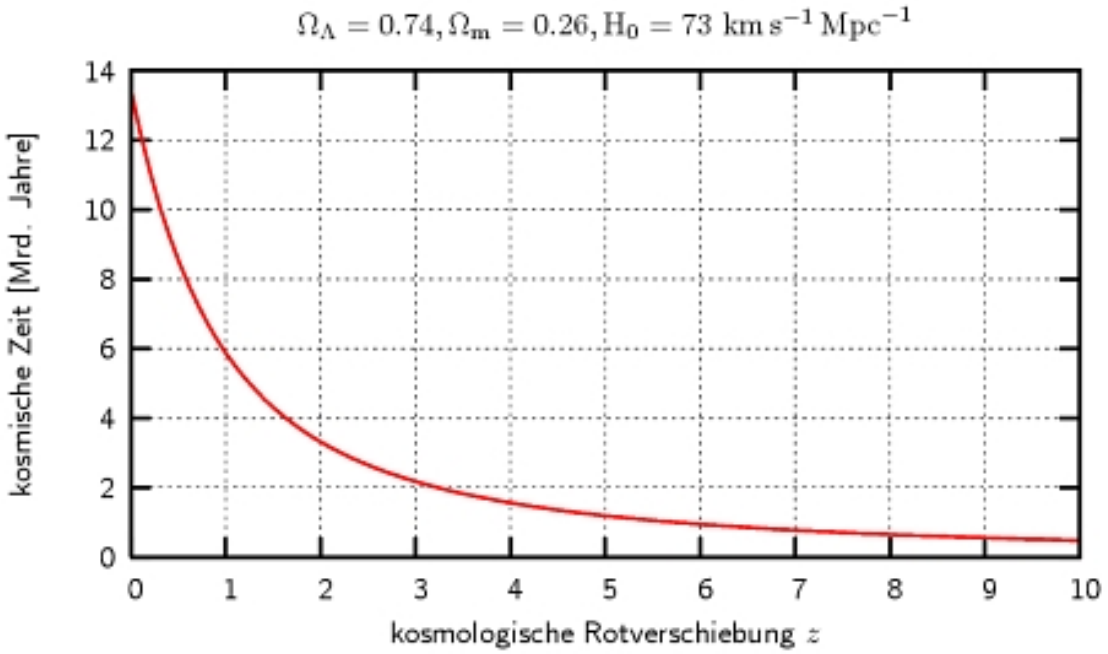

Abbildung 22.3: Beziehung zwischen kosmischer Zeit und Rotverschiebung im Universum.

Die Feldgleichung der ART vereint alle möglichen Modelle für Universen in sich, sowohl ein statisches Universum, als auch dynamische Universen. Bemüht man die ART zur Beschreibung der Welt und macht gewisse physikalisch plausible und empirisch begründete Annahmen wie das kosmologische Prinzip, so verwandeln sich Einsteins Feldgleichungen in die Friedmann-Gleichungen. Deren Lösungen heißen **Friedmann-Weltmodelle** oder **FLRW-Universen**, die von gewissen Parametern und vor allem von im Kosmos vorhandenen Energieformen abhängen. All diese Energieformen bestimmen die Dynamik der gesamten Raumzeit des Universums, oder weltlicher ausgedrückt, sein Schicksal.

22.5.3 Satz kosmologischer Parameter

Entwicklung und Zukunft des Universums werden von einem Satz kosmologischer Parameter bestimmt, wie die Friedmannsche Kosmologie enthüllte. Bei Festlegung von kosmologischen Parametern, wie der Dunklen Energie, der Dunklen Materie, der baryonische Materie, dem Hubble-Parameter und dem Krümmungsparameter folgt zwingend, wie es mit dem Universum weitergeht.

Im Rahmen der **experimentellen Kosmologie** werden verschiedene Methoden benutzt, um den Zahlenwerten der kosmologischen Parameter auf die Spur zu kommen - in der Theorie sind sie frei und müssen deshalb empirisch ermittelt werden. Neben weit entfernten, explodierenden Sternen (Supernovae Typ Ia), der Zusammensetzung der Materie aufgrund der Nukleosynthese, der Verteilung und Anzahl von Galaxien in Galaxienhaufen verrät vor allem die beobachtete, kosmische Hintergrundstrahlung den Satz kosmologischer Parameter (am besten verwendet man alle Methoden gemeinsam). So wissen die Astronomen auf der Basis aktueller Messungen des Mikrowellen-Satelliten **WMAP** (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), der gerade die Hintergrundstrahlung exakt ausmisst, dass unser Universum nicht immer da war: Es hat ein **Alter von 13.7 Milliarden Jahren** (Fehler von nur 1%). Das Alter bezeichnet man auch als **kosmische Zeit** (engl. *cosmic time*). Das ist im Vergleich zum Alter der Erde, etwa 4.5 Milliarden Jahre, nicht unbedingt viel mehr. Dieses Alter ist mit bekannten kosmologischen Parametern reproduzierbar, wie Abbildung 22.3 demonstriert.

22.5.4 Der Anfang

Dreht man das Rad der Zeit zurück und betrachtet dabei das FLRW-Universum mit den aus der Beobachtung bestimmten kosmologischen Parametern, so stellt man mit Erstaunen fest, dass es einen beliebig kleinen und heißen Anfang des Universums gab. Dieser Anfangszustand ist mit dem berühmten Wort Urknall gemeint. Ursprünglich war das Wort abwertend gemeint: der Kosmologe *Fred Hoyle* erfand den Begiff und verbreitete ihn erstmals in einem Radiointerview. Er wollte die Hypothese des hot Big Bang eigentlich in Misskredit bringen. Das Gegenteil trat ein: Die 'Urknalltheorie' als Hypothese vom Anfang der Welt hat sich seither als Dauerbrenner bewährt, ist konsistent mit den meisten astronomischen Beobachtungen und gehört daher auch zum *scientific mainstream*, zur herrschenden Lehrmeinung. Der Pionier der Urknall-Idee war eigentlich der Theoretiker und Priester *Abbé Georges Lemaître*: Er sprach lange vor Hoyle allerdings von der 'Geburt des Raumes'.

22.5.5 rasante Entwicklung von Strukturen

Die ersten Sterne haben sich bereits 200 Millionen Jahre nach dem Urknall gebildet! Das ist astronomisch und auch erdgeschichtlich betrachtet eine unglaublich kurze Zeitspanne. Diese Beobachtung stellt die Kosmologie vor ernst zu nehmende Herausforderungen, weil sie erklären muss, wie in solch kurzer Zeit Elementarteilchen, Materie und schließlich Sterne sowie Galaxien entstehen konnten.

22.5.6 kosmische Geometrie, Topologie und das Konkordanz-Modell

Die Geometrie ist entweder ein flaches, offenes oder geschlossenes, Euklidisches Universum ($k = 0$) oder ein geschlossenes Dodekaeder-Universum (positive Krümmung, $k = +1$)oder ein geschlossenes Horn-Universum (negative Krümmung ($k = -1$). Bisher sind all diese Modelle mit Beobachtungsdaten verträglich! Favorisiert wird von den meisten Wissenschaftlern das erste Szenario, das auch unter der Bezeichnung **flaches ΛCDM-Modell** läuft. Dies meint ein flaches Universum ($k = 0$), das von einer Dunklen Energie in Gestalt der kosmologischen Konstante Λ und der kalten Dunklen Materie (engl. *cold dark matter* = CDM) dominiert wird. Eine andere gebräuchliche Betitelung anstelle von flaches ΛCDM-Modell ist kosmologisches Standardmodell oder kosmologisches Konkordanz-Modell.

22.5.7 Multiversum

Während man früher an **ein Universum** glaubte, wird in vielen modernen, kosmologischen Modellen (Branenkosmologie, Ekpyrotisches Modell, Zyklisches Universum) die Existenz vieler Universen diskutiert. In der **Quantenkosmologie** spricht man sogar von **Multiversen**, die sich in großer Zahl bilden können und wieder vergehen. Diese Viele-Welten-Theorie ist eine Anleihe aus der Quantentheorie, wo virtuelle Teilchen aufgrund der Unschärferelation entstehen und vergehen und unter Umständen real werden. Mit dem **Ekpyrotischen Modell** wurde der Begriff vom Paralleluniversum salonfähig gemacht, der bis dahin eher in Science-Fiction-Literatur zu finden war. Dennoch: Bislang existieren Multiversen nur in der Vorstellung so manchen Forschers - es gibt keinerlei Evidenzen für ein Multiversum.

22.5.8 kosmische Topologie: eine aktuelle Herausforderung

Die Frage, ob das Universum offen/unendlich oder geschlossen/endlich ist, ist letztendlich eine **topologische Frage**. Sie ist bisher nicht zufrieden stellend beantwortet worden, sondern Kosmologen argumentieren meist mit Einfachheit (*Ockhams Rasierklinge*). Eine genaue Prüfung der Argumente ergibt: Ein **multi-verbundenes Universum** (engl. *multi-connected Universe*) ist noch nicht vom Tisch.

Erschwerend kommt hinzu, dass es im Allgemeinen *unendlich viele* Topologien zu einem festen Krümmungsparameter gibt! Die Allgemeine Relativitätstheorie legt im Rahmen der **relativistischen Kosmologie** die Topologie des Universums *nicht* fest. Sie muss auf der Basis mathematischer

Überlegungen vorgeschlagen werden und auf Konsistenz mit der Beobachtung (Stichwort: 'topologische Trugbilder', siehe dazu unter Eintrag Topologie), insbesondere der kosmischen Hintergrundstrahlung, überprüft werden. Deshalb könnte das geschlossene Dodekaeder-Universum tatsächlich in der Natur realisiert sein. Sollte sich dieses Szenario als falsch herausstellen, so sind auch bei Verifikation des Euklidischen Universums unendliche oder endliche Varianten möglich - je nach Topologie.

22.6 Unruh-Effekt

Dieser Effekt ist benannt nach dem Relativisten *William G. Unruh*. Es geht dabei um die Frage, wie im Rahmen der Relativitätstheorie ein *beschleunigter* Beobachter das Minkowski-Vakuum wahrnimmt.

22.6.1 rechnerischer Ansatz und Ergebnis

Dazu wird wie in der Berechnung der Hawking-Strahlung ein masseloses Skalarfeld auf dem Hintergrund der flachen Minkowski-Raumzeit betrachtet und die kovariante Klein-Gordon-Gleichung (eine Wellengleichung für das Skalarfeld) formuliert. Das Feld ist quantisiert, die Raumzeit nicht. In diesem Sinne ist der Zugang semi-klassisch.

Es bietet sich an, für die Beschreibung *Rindler-Koordinaten* (Rindler-Metrik) zu verwenden, die mit Sinus und Kosinus Hyperbolikus verknüpft sind und an die Struktur des Lichtkegels angepasst sind. In diesen Koordinaten wird die Wellengleichung reformuliert und das Skalarfeld in so genannte *Rindler-Moden* entwickelt. Analog zu Hawkings Ansatz wertet man nun den **Vakuumerwartungswert** für das Minkowski-Vakuum aus. Dieser **verschwindet nicht**, sondern zeigt eine auffällige Ähnlichkeit zur **Planck-Kurve** eines thermischen Strahlers. Man nennt die Teilchen, die der beschleunigte Beobachter im Vakuum detektiert **Beschleunigungsstrahlung** oder **Unruh-Strahlung** (in Analogie zur Hawking-Strahlung).

22.6.2 zwei Seiten einer Medaille: Unruh-Strahlung und Hawking-Strahlung

Die Messung des Vakuums bei der Beschleunigung erfolgt mithilfe eines **Unruh-DeWitt-Detektors**, der an das zu messende Skalarfeld koppelt. Ein beschleunigter Beobachter sieht das Minkowski-Vakuum als ein **Quantenfeld im thermischen Gleichgewicht**. Dieser Unruh-Effekt ist das Analogon zum Hawking-Effekt, ersterer gilt in flachen Raumzeiten ('ohne Gravitation'), letzterer in gekrümmten ('mit Gravitation'). Die Verwandtschaft der Effekte gilt aufgrund des **Äquivalenzprinzips**, denn ein frei fallender Beobachter (FFO) in einer gekrümmten Raumzeit ist einem beschleunigten Beobachter in einer flachen Raumzeit völlig gleichwertig, d. h. äquivalent.

22.6.3 Teilchen oder nicht Teilchen, das ist hier die Frage

Die Implikationen dieses Sachverhalts sind immens. Sie münden in eine **Relativität des Teilchenbegriffs**: Es hängt vom Bezugssystem ab, ob ein Beobachter ein reales Teilchen oder ein virtuelles Teilchen (Quantenvakuum) sieht!

22.6.4 Historische Aspekte

Unruh bezog sich 1975 zunächst auf die Verdampfung (Evaporation) Schwarzer Löcher und behandelte erst 1984 zusammen mit *Robert W. Wald* das Problem des beschleunigten Beobachters in der Abhandlung *What happens when an accelerated observer detects a Rindler particle?*.

22.6.5 Lesehinweis

Thomas Müller: Gravitation und Quantentheorie, Diplomarbeit (pdf), Universität Tübingen (2001)

22.7 Urknall

Das Urknall-Modell ist sicher das populärste, kosmologische Modell und auch dasjenige, das am stärksten von astronomischen Beobachtungen gestützt wird. Im englischsprachigen Raum ist der Begriff Big Bang für den Urknall sehr gebräuchlich.

22.7.1 Geschichtliches

Der Terminus *Big Bang* stammt von dem Kosmologen *Sir Fred Hoyle* (1915 - 2001), der ihn 1949 eigentlich als Pejoration für das Modell eingeführte, denn Hoyle war Gegner des Urknall-Modells. Der Pionier des Urknall-Modells ist aus heutiger Sicht der belgische Astronom *Abbé Georges Lemaître* (1894 - 1966). Er fand nahezu zeitgleich, aber unabhängig voneinander, mit dem russischen Mathematiker *Alexandr A. Friedmann* **dynamische** Modelle für das Universum: die Friedmann-Weltmodelle. Solche Modelluniversen können expandieren oder kollabieren, sogar im Wechsel (oszillieren). *Lemaître* unternahm eine Extrapolation eines sich ausdehnenden Weltalls in die Vergangenheit zu kleinen kosmischen Radien hin. Dabei entdeckte er ein beliebig kleines Universum, was er als die '**Geburt des Raumes**' bezeichnete (Artikel im Fachmagazin *Nature*, 1931).

22.7.2 Was ist nun der Urknall?

Heutzutage spricht man weniger von einer 'Geburt des Raumes', sondern benutzt Hoyles griffiges Wort Urknall. Physikalisch gesehen ist der Urknall der Beginn des Universums aus einem unendlich heißen, unendlich dichten und unendlich kleinen Zustand, der so genannten **Urknallsingularität**. Die Singularität ist eine unausweichliche Konsequenz von Friedmanns und Lemaîtres Rechnungen. Erkenntnistheoretisch und philosophisch betrachtet ist das eine faszinierende und brisante Aussage:

Der Kosmos hatte einen Anfang!

Dass das keineswegs selbstverständlich ist, bemerkt man z. B. daran, dass in den Anfängen der relativistischen Kosmologie ein statisches Universum (etabliert von Einstein) eindeutig favorisiert wurde. Es war einfach unvorstellbar, dass das Universum eine Dynamik haben könne, geschweige denn einen Anfang!

22.7.3 Urknall - sprachlicher Kunst- oder Fehlgriff?

Analysiert man das Wort Urknall daraufhin, ob es ein physikalisch betrachtet gut gewählter Begriff für das Modell ist, so schließt man, das der Wortbestandteil *Ur* gut passt (wie wir sehen werden): der Urknall geschah tatsächlich vor Urzeiten. Kritischer ist der zweite Wortbestandteil *Knall* zu sehen: Knall ist ein akustisches Phänomen, die extrem schnelle Ausbreitung einer Schallwelle. Beim Urknall hat es eigentlich gar nicht geknallt, und erst recht gab es (nach allem, was wir heute zu wissen glauben) keine Zuhörer. Denn im Urknall kam der Raum auf die Welt, und wie es sich für einen Neugeborenen gehört, fing er gleich an zu wachsen. Die physikalisch vielleicht treffendere Bezeichnung '*Urausdehnung*' ist eben sprachlich nicht so gelungen. Manchmal tun Leute, die Böses wollen, eben Gutes.

1. Zeuge des Urknalls: Galaxienbewegung

Astronomen unterscheiden generell zwei Arten der Galaxienbewegungen: Einerseits gibt es einen rein kinematischen Effekt: alle Galaxien haben eine **Eigenbewegung** (*Pekuliarbewegung*), die sogar wie im Falle der Andromedagalaxie auf uns zu gerichtet sein kann (und in einer Blauverschiebung der Strahlung der Andromedagalaxie resultiert). Dies ist jedoch nur ein *lokaler Effekt*, d. h. solche Eigenbewegungen sind nur wichtig, wenn die betreffende Galaxie der Milchstraße relativ nahe ist. Die physikalische Ursache für die Eigenbewegung ist die gegenseitige, gravitative Anziehung der Galaxien und Galaxienhaufen untereinander (siehe auch Gezeitenkräfte).

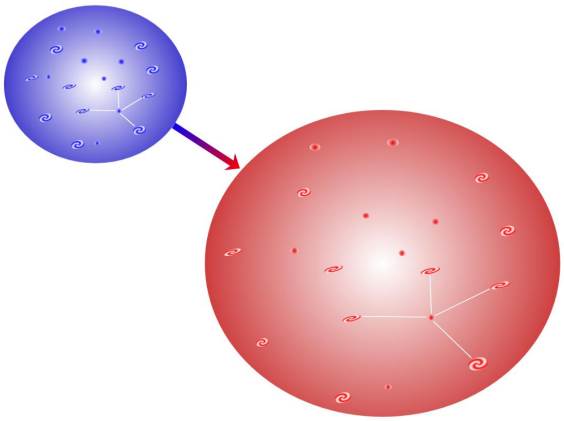

Abbildung 22.4: Urknall: Expansion und Abkühlung des Universums.

Andererseits gibt es eine Galaxienbewegung, die kosmologisch gesehen, also bei großen Distanzen, klar dominiert. Diese Bewegung wird diktiert von der globalen Raumzeit, die das Universum als Ganzes beschreibt (siehe Grafik 22.4). Eine solche Beschreibung ist mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie möglich, und sie führt auf die Friedmann-Weltmodelle. Diese Modelle besagen, dass das Universum von allem geformt und dynamisch kontrolliert wird, was sich in ihm befindet. Die kosmischen Zutaten sind baryonische Materie, Dunkle Materie und Dunkle Energie. Die Dunkle Energie wird zu späten Entwicklungsphasen des Universums wichtig und bestimmt besonders dann seine Dynamik: die Dunkle Energie in Form einer kosmologischen Konstante zieht den Kosmos auseinander und treibt eine (sogar beschleunigte!) Expansion. Die Galaxien und Galaxienhaufen als Teil des Kosmos müssen diese Bewegung mitmachen, weil sie ja in den sich ausdehnenden Raum eingebettet sind. Diese **globale Bewegung aller Galaxien** ist eine Fluchtbewegung, weil die Ausdehnung in alle Richtungen gleichermaßen erfolgt. Astronomen bezeichnen dieses Phänomen als Hubble-Effekt, der 1929 astronomisch entdeckt wurde. Mit dieser sich ausdehnenden Raumzeit, dem 'Hubble-Strom', werden alle Galaxien und Körper des Universums mitbewegt.

2. Zeuge des Urknalls: kosmische Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung ist das älteste Signal, das Menschen in der Natur jemals gemessen haben! Es handelt sich um Wärmestrahlung, die uns aus der Tiefe des Alls von allen Seiten gleichförmig erreicht. Dem nahezu perfekten Schwarzkörperspektrum kann eine Temperatur von nur etwa drei Kelvin zugeordnet werden. Die Strahlung wird in der Kosmologie so interpretiert, dass sie das Relikt des **expandierenden Feuerballs** ist, der durch den Urknall auseinander getrieben wurde. Es gab einen heißen Anfang. Mit der Zeit dehnte sich der Feuerball aus und kühlte auf die niedrige, beobachtete Temperatur ab. Diese Interpretation wird gestützt von der beobachteten **Isotropie** der kosmischen Hintergrundstrahlung: sie kommt gleichermaßen aus allen Richtungen. Die komplette Verteilung der Hintergrundstrahlung (engl. *Cosmic Background Radiation*, CBR oder *Cosmic Microwave Background*, CMB) am Himmel bezeugt den heißen Zustand des frühen Universums vor mehr als 13 Milliarden Jahren.

Bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ befand sich das Universum in der Rekombinationsära. In dieser Entwicklungsphase bildeten sich die Atome und die Strahlung löste sich gerade von der Materie, weil der Streuquerschnitt für Photonen drastisch abnahm. Anders gesagt: Das Universum wurde durchsichtig! Im lokalen Universum ($z = 0$) sind in jedem Kubikzentimeter noch **412 Photonen** der Hintergrundstrahlung enthalten. Die 3K-Strahlung ist der wichtigste Beweis für einen Urknall, den Gegner dieses Modells erst erklären müssten.

3. Zeuge des Urknalls: weit entfernte Sternexplosionen

Eine weitere Stütze der Urknalltheorie sind extrem weit entfernte Weiße Zwerge, die ein Techtelmechtel mit ihrem Begleitstern eingehen. Die Liaison endet für den Zwerg nicht nur unglücklich, sondern tödlich. Was passiert physikalisch? Nun, wie das so ist mit den Beziehungen, ist am Anfang noch alles sehr romantisch: Der Nachbarstern macht dem Zwerg Geschenke und füttert ihn liebevoll mit Materie. Allerdings vertragen Zwerge nicht so viel. Sie können durch diesen Massenzufluss nicht beliebig wachsen: bei Überschreiten der kritischen Chandrasekhar-Masse wird der Zwerg instabil und explodiert in einer **Supernova Typ Ia**. Eine in der Tat Aufsehen erregende Scheidung! Da die Chandrasekhar-Grenze beinahe fundamental ist, weil sie nur von der Zusammensetzung des Sterns abhängt, läuft die Explosion für alle Weißen Zwerge im Kosmos mehr oder weniger gleich ab. Sie zündet mit einer immer ähnlichen Explosionsenergie und ist daher eine sehr gute Standardkerzen in der Astronomie.

Damit sind sie **ideale Entfernungsindikatoren** und eignen sich für Kosmologen bestens zur Vermessung des Universums und zur Bestimmung der kosmologischen Parameter. Auch die mittlerweile in großer Zahl beobachteten Supernovae sind mit dem Urknall vereinbar.

4. Zeuge des Urknalls: Häufigkeit der ersten Elemente im Kosmos

Die leichten, chemischen Elemente, Wasserstoff, Helium und Lithium, betraten die kosmische Bühne bereits **vor den Sternen**. Das Universum war in seiner Frühphase heiß genug, um selbst Elemente durch thermonukleare Fusion zu erzeugen. Diese 'Reaktorphase' endete jäh, als das Universum infolge der Ausdehnung zu kalt wurde. Dieser Vorgang der Elementherstellung des Universums selbst heißt in der Astronomie **primordiale Nukleosynthese**. Die gemessene Verteilung der primordialen Elemente passt hervorragend zum Modell vom heißen Urknall.

5. Zeuge des Urknalls: Verteilung und Anzahl der Galaxien

Die Art und Weise wie sich Galaxien großräumig anordnen und zu Galaxienhaufen zusammenfinden kann ebenfalls astronomisch sehr genau kartiert werden. Es zeigt sich, dass sich die Modelle für **Galaxienhaufen** dazu eignen, um aus Vergleich von Beobachtung und Theorie die kosmologischen Parameter zu bestimmen.

Die Astronomen benutzen dazu Tiefenfeldbeobachtungen, in der Fachsprache Deep Fields genannt. Langbelichtete Fotos vieler Himmelsbereiche liefern die Daten tausender Galaxien - u. a. auch ihre räumliche Verteilung und ihre Häufigkeit. Die Astronomen stellen das in Form von *Leuchtkraftfunktionen* dar, deren Kurvenprofile empfindlich sind für die kosmologischen Parameter. Eine große Unsicherheit steckt bei diesen Untersuchungen in der Masse des Galaxienhaufens, die 20 bis 30% betragen kann. Die Beobachtungen der Cluster werden mit hydrodynamischen und N-Körper-Simulationen verglichen. Die Struktur der Haufen kann auf so genannte *power ratios* abgebildet werden - das sind im Prinzip verschiedene Multipole, die die mehr oder weniger kugelige Form der Haufen parametrisieren. Betrachtet man die Galaxienhaufen in verschiedenen Rotverschiebungsintervallen, so sind auch kosmologische Entwicklungsstudien möglich. Auch das Wachstum der Strukturen hängt von dem Satz kosmologischer Parameter ab und kann so eingeschränkt werden. Derartige Untersuchungen werden im Röntgenbereich auch am MPE durchgeführt (Gruppe um *Hans Böhringer*). Die Untersuchungen an Haufen mit $z > 1$ haben 2007 begonnen. Das wichtige Resultat lautet: Die Analysen mit Galaxienhaufen ergeben den gleichen Satz kosmologischer Parameter und decken sich so mit der Hypothese eines Urknalls.

22.7.4 Urknall + Inflation

Das klassische Modell vom Urknall wurde aufgrund bestimmter Unzulänglichkeiten (Homogenitätsproblem, Flachheitsproblem, Horizontproblem, Fehlen magnetischer Monopole) durch die **Inflation** von *Alan H. Guth* 1981 ergänzt. An den Urknall schloss sich eine kurze Phase überlichtschneller Expansion an.

22.7.5 Grenzen der Urknalltheorie

Probleme bereitet das klassische Urknall-Modell, weil es in einem **singulären Anfangszustand** unendlicher Dichte und Temperatur startet. Diese Urknall-Singularität ist wesensverwandt mit den Krümmungssingularitäten der Schwarzen Löcher in Einsteins Theorie. Hier gelten nicht mehr die Gesetze der Physik bzw. versagt jegliche physikalische Beschreibung, weshalb man sie gerne vermeiden würde.

Seit einigen Jahrzehnten arbeiten Gravitationsforscher an neuen Gravitationstheorien, die versuchen, über Einsteins Theorie hinauszugehen und das Gravitationsfeld zu quantisieren. Ein Beispiel für eine solche Quantengravitation ist die Loop-Quantengravitation (LQG). Berechnungen im Rahmen der LGQ zeigen, dass in der Tat die Urknall-Singularität zum Verschwinden gebracht werden kann (*Bojowald*, Gen. Rel. Grav. 35, 1877, 2003; als ePrint: gr-qc/0305069 sowie der Vortrag astro-ph/0309478). Noch steht diese Grundlagenforschung am Anfang und die LQG hat sich noch nicht als Gravitationstheorie bewährt. Die Konsequenz dieses interessanten Ergebnisses ist, dass der Versuch unternommen werden muss, die Anfänge des Kosmos loopquantentheoretisch zu verstehen. Decken sich die Vorhersagen der neuen Theorie mit Beobachtungen, so ist eine neue, mächtige, physikalische Theorie entdeckt worden.

Ein weiteres Problem ist das Folgende: Paradoxerweise erklärt das Urknall-Modell nicht den Urknall selbst, sondern nur dessen Folgen! Eine **erste Erklärung des Urknalls** weist ein kosmologisches Modell auf, das man als Ekpyrotisches Modell bzw. Zyklisches Universum kennt. Dieses Modell vermeidet auch die Anfangssingularität und erklärt, warum sie uns als solche erscheint. Mit diesen avantgardistischen Modellen begann ein neuer Sektor der Kosmologie: die Branen-Kosmologie. Branen erfordern jedoch weitere räumliche Dimensionen (Extradimensionen) neben den bekannten dreien. Bislang ist es nicht gelungen, diese Zusatzdimensionen nachzuweisen. Insofern sind die Branen-Modelle und auch die Ekpyrosis noch spekulativ.

22.7.6 Der Tag ohne Gestern

Es macht mittlerweile tatsächlich Sinn, die Frage zu stellen, was **vor** dem Urknall war. Lange Zeit war diese Frage verpönt, weil - so die Aussage - mit dem Urknall auch erst die Zeit 'geboren' wurde. Es gab deshalb 'kein Davor'. Das ist richtig. Allerdings hat mit dem Urknall nur '*unsere* Zeit', d. h. die kosmische Zeit unseres Universums begonnen. Über die kosmische Zeit eines anderen Universums - z. B. eines anderen Branenkosmos - wird keine Aussage gemacht. Es darf also durchaus spekuliert werden. Ob unser Universum und wir selbst aus der Kollision von Branen oder einer mikroskopischen Blase des Quantenschaums hervorgegangen sind, ist derzeit nicht zu beurteilen. Es wird auch mittels astronomischer Beobachtungen schwierig nachzuweisen sein, weil das für Strahlung undurchlässige Urplasma vor der Rekombinationsepoche einen Blick in den frühen Kosmos verwehrt. Vielleicht können Astronomen mithilfe der **Gravitationswellenastronomie** (siehe Gravitationswellen) tiefer in die Frühphasen des dichten Kosmos geschaut werden - doch dazu muss zunächst die *direkte* Messung von Gravitationswellen gelingen. Auch wenn der Urknall ein 'Tag ohne Gestern' gewesen sein mag, ist jedoch klar, dass Theoretiker daran arbeiten zu erklären, was den Urknall bewirkt hat.

23 Lexikon V

23.1 Vakuum

Das Vakuum wird historisch bedingt oft mit dem 'luftleeren Raum' gleich gesetzt. Möchte ein Experimentator oder Laborant ein Vakuum herstellen, bedient er sich einer Vakuumpumpe. Dieses Gerät saugt aus einem Behälter den Inhalt ab, vor allem darin enthaltene Luft. Selbst die besten Vakuumpumpen vermögen nicht alle Teilchen und Moleküle zu entfernen: ein Rest bleibt immer. Die Präparation eines **idealen Vakuums** ist also kein leichtes Unterfangen. Geht das überhaupt? Was ist eigentlich ein ideales Vakuum?

23.1.1 Quantenfluktuationen und Nullpunktsschwingung

Seit der Entwicklung der Quantentheorie in der modernen Physik des 20. Jahrhunderts ist klar, dass es ein ideales Vakuum im Sinne von 'Abwesenheit von Teilchen' nicht gibt! Das Quantenvakuum ist angefüllt mit **virtuellen Teilchen**, die im Rahmen der Heisenbergschen Unschärfe sich für kurze Zeit Energie 'aus dem Nichts' leihen können. Diesen Sachverhalt nennen Physiker auch **Vakuum- oder Nullpunktsfluktuationen**. Anschaulich kann man sich diese Fluktuationen mit einem 'Quantenpendel' vergegenwärtigen: Wir stellen uns ein schwingfähiges Gebilde vor, beispielsweise das Pendel einer Uhr. In der Quantenwelt wird solch ein Pendel durch den quantenmechanischen, harmonischen Oszillator beschrieben. Wie die Lösung des zugehörigen *quantenmechanischen Eigenwertproblems* zeigt, weist das Quantenpendel eine Nullpunktsschwingung auf. Dieses Phänomen überträgt sich in analoger Weise auf die Quantenfeldtheorien (QFTs). Die QFTs sind diejenigen Theorien, die zur Beschreibung der Elementarteilchenphysik verwendet werden und die in ihrer Gesamtheit auf das Standardmodell der Teilchenphysik führen.

23.1.2 Vakuum in Einsteins Theorie

Das Vakuum hat also eine komplizierte Struktur. Vom Standpunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) kann man ein **relativistisches Vakuum** sehr eindeutig formulieren: Hier muss der Energie-Impuls-Tensor verschwinden. Die rechte Seite der Einsteinschen Feldgleichungen ist also null und die Aufgabe besteht darin, nun Lösungen zu finden, für die der Einstein-Tensor verschwindet. Diese Lösungen nennt man **Vakuum-Raumzeiten** oder Vakuumlösungen der ART. Ein triviales Beispiel einer Vakuum-Raumzeit ist die Minkowski-Metrik, die die fundamentale, flache Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) ist. Etwa komplizierter sind die Vakuum-Lösungen in der ART, die gekrümmt sind. Hierzu gehören die Schwarzschild-Lösung oder die Kerr-Lösung, die bestimmte Schwarze Löcher mathematisch beschreiben.

In der relativistischen Kosmologie kennt man ebenfalls Vakuum-Raumzeiten, wie die **materiefreie de-Sitter-Lösung**. Freilich ist diese Raumzeit ohne Sinn für ein reales Universum, weil dieses doch Materie, z. B. uns selbst, enthält. Eine neue Form von regulären Raumzeiten greift jedoch auf die de-Sitter-Raumzeit zurück: die Gravasterne, die man zu der Klasse der Vakuumsterne zählt. Das de-Sitter-Vakuum besteht nicht aus baryonischer Materie, sondern aus Dunkler Energie. Diese Energieform stellt nahezu den gesamten Teil der Masse des Gravasterns. Und: Die Anti-de-Sitter-Raumzeiten haben an Bedeutung in der modernen Feldtheorie gewonnen, siehe AdS/CFT-Korrespondenz.

23.1.3 Dunkle Energie & Quantenvakuum

Dunkle Energie ist eine rätselhafte Substanz und füllt anscheinend unser ganzes Universum aus. Sie ist mit 74% der dominante Anteil an allen darin enthaltenen Energieformen (baryonische Materie, Dunkle Materie und eben Dunkle Energie). Sie wirkt sich antigravitativ aus und ist dafür verantwortlich, dass das Universum expandiert. Dunkle Energie 'bläst' die Robertson-Walker-Metrik auf. Es war ein nahe liegender Ansatz, die Dunkle Energie als eine Manifestation des Quantenvakuums zu interpretieren: Das Universum ist in allen Bereichen angefüllt mit dem Quantenvakuum. Die entsprechende Energiedichte ist zwar sehr gering, wird jedoch zu späten Epochen des Kosmos dynamisch relevant. Wir leben im so genannten Dunkle Energie dominierten Kosmos (Rotverschiebung $z \sim 0$). Im frühen Universum hingegen war die die Dunkle Energie dynamisch irrelevant, denn die Energiedichten von Strahlung und Materie bestimmten hier die Dynamik. Die Interpretation der Dunklen Energie als Quantenvakuum birgt jedoch ein schwer wiegendes quantitatives Problem: Die Energiedichte des Quantenvakuums liegt mit 10^{92} g/cm^3 etwa **120 Größenordnungen** über dem astronomisch beobachteten Wert von unter 10^{-29} g/cm^3! Diese gravierende Inkonsistenz brachte Alternativen auf den Plan: Dunkle Energie könnte ein leichtes Teilchen sein, z. B. das Cosmon, das Radion oder eine andere Form von Quintessenz. Diese Ansätze werden aktuell in der Kosmologie verfolgt, sind aber hypothetisch. Die astronomischen Beobachtungen legen derzeit nahe, dass die Dunkle Energie im Kosmos am besten mit Einsteins kosmologischer Konstante Λ assoziiert werden kann.

23.2 Vakuumstern

Ein Oberbegriff für stellare Objekte, deren Inneres im Prinzip leer ist. Die spannende Frage ist, was '**Leere**' physikalisch eigentlich ist - dazu gleich mehr. Das Äußere des Vakuumsterns muss eine irgendwie geartete, aber wohldefinierte Berandung sein, zum Beispiel eine Materieschale, eine Oberfläche. Die Stabilität im Sinne des **hydrostatischen Gleichgewichts** muss natürlich ebenfalls gewährleistet sein.

23.2.1 Gravasterne

Die Gravasterne zählen zu den Vakuumsternen. Ihr Inneres ist dem dem Sinne ein Vakuum, weil es frei von gewöhnlicher, baryonischer Materie ist; allerdings ist es angefüllt mit Dunkler Energie. Sie entfaltet eine **antigravitative Wirkung** und stützt eine dünne Haut ultrarelativistischer Materie stützt. Anmerkung: Der Begriff ultrarelativistisch meint, dass die Schallgeschwindigkeit in der Schalenmaterie gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Die Materiehaut schließt sich außen an die Vakuumblase ('de-Sitter-Blase') an.

Inzwischen wurden neuere Gravasternlösungen mit anderen Vakuumkernen vorgeschlagen: Die Dunkle Energie im Innern des Gravastern könnte (zumindest in der theoretischen Beschreibung) auch in Form von Phantom-Energie vorliegen (Diplomarbeit *M. Vigelius*, Landessternwarte Heidelberg 2004) oder auch als so genanntes Chaplygin-Gas (*Bilic, Tupper & Viollier* JCAP 0602, 013, 2006).

23.2.2 Holosterne

Die Holosterne dürfen auch zur Klasse der Vakuumsterne gezählt werden. Im Gegensatz zu den Gravasternen enthalten sie als Vakuumkern radiale, fraktionierte Strings.

23.2.3 Zum Vakuum im Vakuumstern

Der Terminus 'Vakuum' bezieht sich also lediglich auf eine gewisse Materielosigkeit im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Dann verschwindet nämlich der Energie-Impuls-Tensor, das Lambda-Glied verschwindet jedoch im Innern von Gravasternen nicht.

In einem absoluten Sinne gibt es ohnehin kein Vakuum, **keine absolute Leere**, sondern nur ein Quantenvakuum: Virtuelle Teilchenpaare und Nullpunktsfluktuationen füllen jeden Raumbereich aus. Hier beginnt jedoch die Domäne der Quantentheorie und der Quantengravitation wie der Stringtheorien oder Loop-Quantengravitation. Sie können eine neue Wahl für den Energie-Impuls-Tensor der ART inspirieren oder völlig neue Konzepte motivieren. Das führt auf Alternativen zum Konzept des klassischen Schwarzen Lochs der ART.

23.3 Vektorboson

Oberbegriff für Bosonen mit Spin 1. So sind zum Beispiel die Photonen, die Gluonen und die Weakonen Vektorbosonen.

23.4 Velapulsar

Vor 11000 Jahren explodierte ein Stern im Sternbild *Vela* (dt. *Segel* am Südhimmel) in einer Supernova. Wie bei allen Sternexplosionen breitete sich dabei eine Stoßwelle im interstellaren Medium aus. Die Überbleibsel dieser Explosion sind ein Supernovaremnant und ein rotierender Neutronenstern, ein Pulsar, der in diesem speziellen Fall *Velapulsar* getauft wurde.

Das Foto 23.1 zeigt eine etwa 100 Lichtjahre durchmessende, farbenprächtige Region um das Explosionszentrum (Credit: Digitized Sky Survey, ESA/ESO/NASA, *Davide De Martin*, Skyfactory, 2007). Die Supernova ist längst verloschen - doch die sich ausbreitende, nicht ganz kugelsymmetrische Schockfront ist deutlich um die Bildmitte herum sichtbar. An dieser Position befindet sich auch etwa der Velapulsar.

Die längliche Struktur links unten, nahe am Bildrand, ist der *Bleistift-Nebel* (engl. *Pencil Nebula*) mit der internationalen Katalogbezeichnung NGC 2736. Er ist Teil des Vela-Supernovaremnants.

23.4.1 Lesehinweis

Siehe zu diesem Begriff unter Pulsar.

23.5 Veränderliche

Der Begriff Veränderliche (engl. *variables*) meint in der Astronomie und Astrophysik veränderliche Sterne, die dadurch ausgezeichnet sind, dass sich ihre Helligkeit (nicht unbedingt die Leuchtkraft!) ändert.

23.5.1 Was ist die Zeitskala der Variationen?

Daneben können sich auch andere Zustandsgrößen des Sterns ändern. Typische Zeitskalen der Helligkeitsvariationen sind im Bereich von **Sekunden bis Monaten** und hängen vom jeweiligen Mechanismus ab, der die Variabilität hervorruft. Die Sternentwicklung, wie sie im Hertzsprung-Russell-Diagramm anhand von Entwicklungspfaden illustriert werden kann, lehrt, dass *alle* Sterne im Laufe ihrer Entwicklung Helligkeitsveränderungen unterliegen. Veränderliche Sterne zeigen jedoch Variabilitäten auf wesentlich kürzeren Zeitskalen als der Entwicklungszeitskala.

23.5.2 Beobachtungsmethode bei Veränderlichen

Die Beobachtung, Auswertung und Bestimmung von Veränderlichen geschieht mittels **Lichtkurven**, einer Auftragung der Helligkeit über der Zeit. Achtung! Helligkeit und Leuchtkraft sind nicht dasselbe: Helligkeit ist eine direkt beobachtbare Größe; Leuchtkraft ist so etwas wie die 'Helligkeit vor Ort des Sterns' und folgt erst mit bekannter Entfernung (siehe Distanzmodul) oder mit einem Sternmodell.

Abbildung 23.1: Explosionsregion um den Velapulsar 2007.

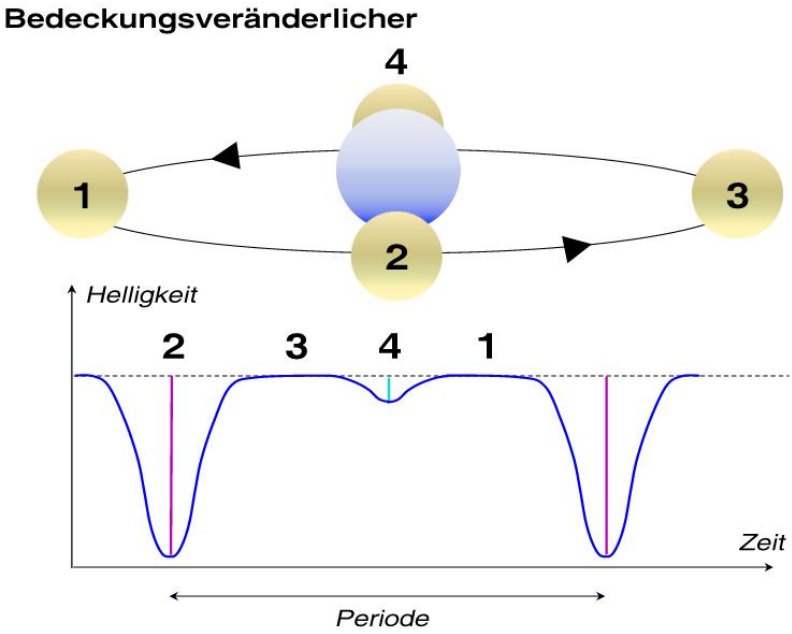

Abbildung 23.2: Geometrie und Lichtkurve der Algolveränderlichen.

Bei optischen Veränderlichen sind die Profiastronomen auf die Amateurastronomen angewiesen, weil die längerfristigen Beobachtungen ein und desselben Veränderlichen sehr zeitaufwendig ist. Das ist angesichts der teueren Beobachtungszeit an modernen Groß- oder satellitengestützten Teleskopen kaum mit Profiinstrumenten zu leisten.

23.5.3 Klassifizierung der Veränderliche - Kriterium: Zeit

Grob unterteilt man die Gruppe der Veränderlichen in **Eruptivveränderliche** und **regelmäßige Veränderliche**. Die erste Gruppe zeigt nur einmalige oder sporadische Helligkeitsausbrüche, während die zweite Gruppe periodisch wiederkehrende Helligkeitsvariationen zeigt. Die Gamma Ray Bursts, Novae, Supernovae und Hypernovae können zu den Eruptivveränderlichen gezählt werden. Klassische Eruptivveränderliche sind T Tauri Sterne, UV-Ceti-Sterne und RW-Aurigae-Sterne.

Die regelmäßigen Veränderlichen, sind sehr zahlreich und erhalten ihren Namen in der Regel nach dem **Prototyp** eines Sterns, bei dem das Phänomen zuerst beobachtet wurde. Hier kennt man beispielsweise die Algol-Veränderlichen (Prototyp im Sternbild *Perseus*), Mira-Veränderlichen (Prototyp im Sternbild *Cetus*, dt. *Walfisch*), Cepheiden oder *Delta-Cephei-Sterne* (Prototyp im Sternbild *Cepheus*), RR Lyrae Sterne (Prototyp im Sternbild *Lyra*, dt. *Leier*), *Delta-Scuti-Sterne* (Zwerg-Cepheiden), aber auch die Pulsare.

23.5.4 Klassifizierung der Veränderliche - Kriterium: Physik

Im Weiteren entscheidet man veränderliche Sterne nach dem **physikalischen Mechanismus**, der für die Helligkeitsvariation verantwortlich ist. Eine banale Ursache für die Helligkeitsvariabilität ist die Bedeckung durch einen anderen Stern, ein Prozess der in Doppel- oder Mehrfachsternsystemen anzutreffen ist. Diese Gruppe von Veränderlichen heißt **Bedeckungsveränderliche**. Betrachten wir ein Doppelsternsystem (*Binär*), wo zwei Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen und mit dieser Umlaufbewegung eine Ebene aufspannen. Natürlich hängt die Bedeckung von der Position des Beobachters ab, weil unter kleinen Neigungen (Inklinationen) zur Senkrechten (Normalen)

dieser Ebene keine Bedeckung, kein *Durchgang* (Transit) durch eine Sternscheibe, stattfindet. Bei hohen Inklinationen allerdings kann ein Stern den anderen verfinstern: die Helligkeit nimmt ab (nicht jedoch die Leuchtkraft des bedeckten Sterns!). Weil die Sterne eines Binärs sich auf Ellipsen in festen Umlaufzeiten umkreisen (Kepler-Gesetze), sind die Bedeckungsveränderliche auch regelmäßige Veränderliche. Sie sind aber keine intrinsischen Veränderliche, deren Helligkeitsvariation an einer physikalischen Zustandsänderung des Stern festgemacht werden könnte. Die historisch zuerst entdeckten Bedeckungsveränderliche waren die Algol-Veränderliche oder Algol-Sterne im Jahr 1670. Das Bild 23.2 illustriert Geometrie, Orientierung und den typischen Verlauf der Lichtkurve von Algol-Veränderlichen.

Pulsationsveränderliche sind ebenfalls regelmäßige Veränderliche, deren Variabilität tatsächlich mit einer Zustandsänderung des Sterns verbunden ist: einer Pulsation, das heißt einem Wechsel von Ausdehnung und Zusammenziehung des 'Plasmaballs' in radialer oder nichtradialer Richtung. Die bekanntesten Pulsationsveränderliche sind die Cepheiden und dessen Verwandte wie die RR Lyrae Sterne (Haufenveränderliche) und Delta-Scuti-Sterne. Die regelmäßige Helligkeitsvariation besitzt hier eine Abhängigkeit von der Pulsationsperiode, die durch Sternmodelle erklärt werden kann. Alle diese cepheidenartigen Sterne liegen im Hertzsprung-Russell-Diagramm auf dem *Instabilitätsast*. Bei Pulsaren hingegen pulsiert *nicht* die physische Sterngröße, sondern die regelmäßige Variabilität kommt durch Rotation einer räumlich gerichteten Strahlungsemission zustande - es ist ein so genannter Leuchtturmeffekt.

Mira-Veränderliche oder Mira-Sterne sind regelmäßige Pulsationsveränderliche mit außerordentlich langen Perioden von hundert bis zu tausend Tagen. Es handelt sich um Rote Riesensterne, deren Helligkeit variiert, weil sie eine instabile Brennphase auf dem *Asymptotischen Riesenast* (engl. *Asymptotic Giant Branch*, AGB) durchlaufen - siehe auch AGB-Sterne.

Die **Kataklysmischen Veränderliche** (engl. *Cataclysmic Variables*, **CVs**) sind hingegen Doppelsternsysteme, bei denen eine Komponente ein kompaktes Objekt, nämlich ein Weißer Zwerg ist und ein Massentransfer von einem normalen Begleitstern (meist ein Riesenstern) stattfindet. Diese Akkretion auf die kompakte Komponente geschieht entweder dann, wenn die Oberfläche des normalen Sterns bis zum inneren Lagrange-Punkt (verschwindende Gesamtgravitationskraft) des Systems oder darüber hinaus reicht (*Roche lobe overflow*, siehe auch Roche-Volumen). Oder aber der Sternenwind, der vom normalen Stern oder Riesenstern abgeblasen wird, fällt auf die kompakte Komponente (*Windakkretion*). Typischerweise sind CVs kleine Binärsysteme, wo die Umlaufzeiten wenige Stunden betragen. Bei der Akkretion wird Röntgenstrahlung emittiert. In der theoretischen Astrophysik beschreibt man diese Systeme mit den Gleichungen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik.

23.6 Vereinheitlichung

Vereinheitlichung oder *Unifikation* ist eine erfolgreiche Strategie, die in der modernen Physik verfolgt wird. Physiker versuchen verschiedene Phänomene in der Natur einheitlich zu beschreiben. Diese Strategie als Leitprinzip ist ästhetisch und pragmatisch, denn sehr viele unterschiedliche Sachverhalte können mit demselben Apparat formuliert werden. Letztlich offenbart dies eine **tiefe Einsicht in die Natur**, weil es zeigt, dass Vieles nach immer wiederkehrenden Prinzipien funktioniert. Man kann sagen, dass **Selbstähnlichkeit** ein fundamentales Naturgesetz ist. Dies ist auch die Basis für *Interdisziplinarität*, denn selbstähnliche Prinzipien können so fachübergreifend ausgetauscht werden. Der Betrachter empfindet dies als ästhetisch. Warum das so ist, ist eher eine philosophische und psychologische Frage ('*Finde schön, was so ist wie Du.*').

23.6.1 Etappenziele der Vereinheitlichung in der Physik

Newton

Die Vereinheitlichung der Physik zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte der Physik: Als erste Vereinheitlichung wird heute, wenn auch trivial erscheinend, die **Newtonsche Gravitationstheorie** angesehen. Im 17. Jahrhundert gelang es dem englischen Physiker,

Mathematiker und Astronom *Sir Isaac Newton* irdische Kräfte (fallende Körper) und kosmische Kräfte (Planetenbewegung) zu vereinheitlichen und als wesensgleich anzuerkennen. Vor dem Hintergrund seiner Zeit ist das eine enorme gedankliche Leistung, weil er die menschliche Erfahrungswelt 'Erde' mit der göttlichen Welt 'Himmel' gleichsetzte. Die Entwicklung des adäquaten mathematischen Formalismus (zeitgleich, aber unabhängig voneinander mit dem deutschen Mathematiker *Gottfried Wilhelm Leibniz*), der Infinitesimalrechnung, war eine weitere seiner herausragenden Leistungen.

Maxwell

Im 19. Jahrhundert folgte dann die zweite große Vereinheitlichung der Physik in Form des **Elektromagnetismus** durch *James Clerk Maxwell*. Elektrische und magnetische Phänomene konnten in Gestalt der Maxwell-Gleichungen zusammengefasst werden. Magnetische und elektrische Felder können auf der Grundlage dieser Theorie ineinander verwandelt werden und die Unterscheidung ihres Wesens ist hinfällig. Aus den Maxwell-Gleichungen folgt auch, dass (Licht oder allgemeiner gesprochen Strahlung) eine elektromagnetische Welle ist, die sich auch im Vakuum ausbreiten kann.

Einstein

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die **Relativitätstheorie** von *Albert Einstein* entwickelt. In dieser Theorie wurden die physikalischen Begriffe *Masse* und *Energie* vereinheitlicht. In der berühmten Gleichung $E = mc^2$ kommt dies zum Ausdruck. Gleichwohl vereinheitlichte die Einsteinsche Theorie *Raum* und *Zeit* zur *Raumzeit*.

Kaluza & Klein

Die **Kaluza-Klein-Theorie** wurde ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts, kurz nach der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelt (ART). Einsteins ART wurde hier mit Maxwells Elektrodynamik verknüpft - Schönheitsfehler: die Kaluza-Klein-Theorie erfordert eine räumliche Extradimension. Die Erfolge der Quantentheorie ließen die Kaluza-Klein-Theorie in Vergessenheit geraten. Erst Ende des 20. Jahrhunderts erinnerten sich die Stringtheoretiker an diese äußerst interessante 5D-Feldtheorie, die viele Aspekte (wie die Kompaktifizierung) birgt, die heute wieder als bedeutsam erachtet werden.

Planck & Kollegen

Ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die **Quantentheorie** ausgearbeitet. Die Quantenelektrodynamik (QED) kann als quantisierte Weiterentwicklung der klassischen Elektrodynamik Maxwells verstanden werden. Das Austauschquant dieser elektromagnetischen Wechselwirkung, das Vektorboson, ist das Photon. Aus heutiger Sicht ist die QED die erste Quantenfeldtheorie (QFT) gewesen, die entwickelt wurde. Später ist es gelungen, auch die anderen fundamentalen Wechselwirkungen in der Natur (bis auf die Gravitation) unter einheitlicher Perspektive durch Austauschteilchen (*intermediäre Bosonen*) zu beschreiben, die zwischen verallgemeinerten Ladungen (elektrische Ladung, schwache Ladung, Farbladung, Masse als gravitative Ladung) vermitteln. Durch den Austausch intermediärer Bosonen 'spüren' (generalisierte) Ladungsträger Kräfte.

23.6.2 Vereinheitlichungen von Quantenfeldtheorien

Die erste Vereinheitlichung von Quantenfeldtheorien war die **elektroschwache Theorie**. Die Konzepte der QED konnten mit denjenigen der schwachen Wechselwirkung vereinheitlicht werden. Die Physiker *Sheldon Lee Glashow*, *Steven Weinberg* und *Abdus Salam* konnten so in der elektroschwachen Theorie neue Teilchen und deren nicht verschwindenden Ruhemassen vorhersagen! Dabei handelte es sich um die beiden W- und das Z-Teilchen, die intermediären Bosonen der schwachen Wechselwirkung, die auch tatsächlich entdeckt wurden - ein unglaublicher Erfolg der Unifikation.

Die Erfolge des Vereinheitlichungsgedankens spornten weiter an, auch die anderen Wechselwirkungen in eine einheitliche Formulierung einzubetten. Den Physikern gelang es, auch die starke Wechselwirkung als dritte Kraft mit der elektroschwachen Theorie zu 'verheiraten': das Resultat sind die **Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT)**. Die zentrale Aussage der GUT ist, dass ab Energien von 10^{16} GeV die schwache, starke und elektromagnetische Wechselwirkung wesensgleich sind: Teilchenphysiker nennen sie die X-Kraft. Eine Konsequenz der GUT ist auch, dass es keinen Unterschied mehr gibt zwischen Quarks und Leptonen, den fundamentalen Konstituenten der Materie! In der Kosmologie sind die Astrophysiker von der Gültigkeit des berühmten Urknall-Modells überzeugt. Die GUT-Ära herrschte nach diesen Ideen kurz nach der Inflationsära vor. Als das Universum etwa 10^{-36} Sekunden alt und etwa 10^{27} Kelvin heiß war, verschwand die X-Kraft und die Symmetriebrechung splitterte sie auf.

Elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung versammeln sich unter der Bezeichnung **Standardmodell der Teilchenphysik**. Bis auf das Higgs-Boson wurden alle Teilchen dieses 'Teilchenzoos' experimentell gefunden! Im neuen Teilchenbeschleuniger *Large Hadron Collider* am CERN, der Ende 2007 in Betrieb genommen wird, setzen die Forscher große Hoffnungen auch das letzte Teilchen des Standardmodells zu entdecken.

23.6.3 Eichtheorien

Die Quantenfeldtheorien etablierten eine neue Sprache für alle Wechselwirkungen. Die intermediären Bosonen sind **Eichbosonen** (Eichfelder) und können in eine Eichtheorie (engl. *gauge theory*) eingebettet werden. Eine Theorie bzw. eine Wechselwirkung ist eindeutig durch die Angabe ihrer **Lagrangedichte** oder alternativ des **Wirkungsfunktionals** festgelegt. Mathematisch folgt daraus eindeutig die Feldgleichung der Theorie. Die Feldgleichung wird als Bewegungsgleichung **dynamischer Felder**, der Naturkräfte in Quantenform, verstanden.

23.6.4 ultimative Vereinheitlichung zur Theorie von Allem

Bisher ist es allerdings nicht gelungen, die Gravitation konsistent mit den anderen drei quantisierten Kräften zu beschreiben. Der Apparat der Quantenfeldtheorien versagt bei der Schwerkraft. Dennoch gibt es bereits einen Namen für das entsprechende Austauschteilchen der Gravitation: das Graviton. Die **Vereinigte Theorie** (engl. *Unified Theory*, UT) oder **Theorie von Allem** (engl. *Theory Of Everything*, TOE), die die Gravitation in quantisierter Form in die GUT einbindet, wird nach wie vor gesucht. Unter der Bezeichnung **Quantengravitation** werden diejenigen Theorien zusammengefasst, die den Versuch unternehmen, das Gravitationsfeld zu quantisieren. Bisher werden dafür ausschließlich die **Stringtheorien** favorisiert. Allerdings ist es den Stringtheoretikern noch nicht gelungen, stringtheoretische Aspekte in überzeugender Weise mit dem wohl verifizierten Standardmodell zu harmonisieren, z. B. Massen von beobachteten Teilchen aus der Theorie abzuleiten. Eine besondere heiße Spur, die einen Durchbruch in der physikalischen Forschung verspricht, ist die **AdS/CFT-Korrespondenz**. Sie konnte zu einer **Dualität von Eichung und Gravitation** verallgemeinert werden. Diese Aspekte werden zurzeit intensiv erforscht.

Mittlerweile wird eine weitere Möglichkeit verfolgt: Sie heißt **Loop-Quantengravitation** (LQG). Die LQG leistet weniger als die Stringtheorien, weil sie nur versucht die Gravitation zu quantisieren, aber elektromagnetische, starke und schwache Kraft gar nicht berücksichtigt. Aber das, was die LQG leistet, klingt sehr viel versprechend. Die LQG basiert auf den Konzepten, die Einsteins Theorie diktiert: Kovarianz und Diffeomorphismusinvarianz. Besonders attraktiv ist die LQG dadurch, dass ihr eine überzeugende Quantisierung der Raumzeit in so genannte Wilson-Loops gelingt. Auf der Planck-Skala resultiert eine körnige Struktur in Volumenquanten. In gewisser Weise ist es für die Forscher beruhigend auf mindestens zwei Quantengravitationen bauen zu können, doch muss sich irgendwann eine Möglichkeit der Falsifikation oder Verifikation (*Bewährung*) bieten.

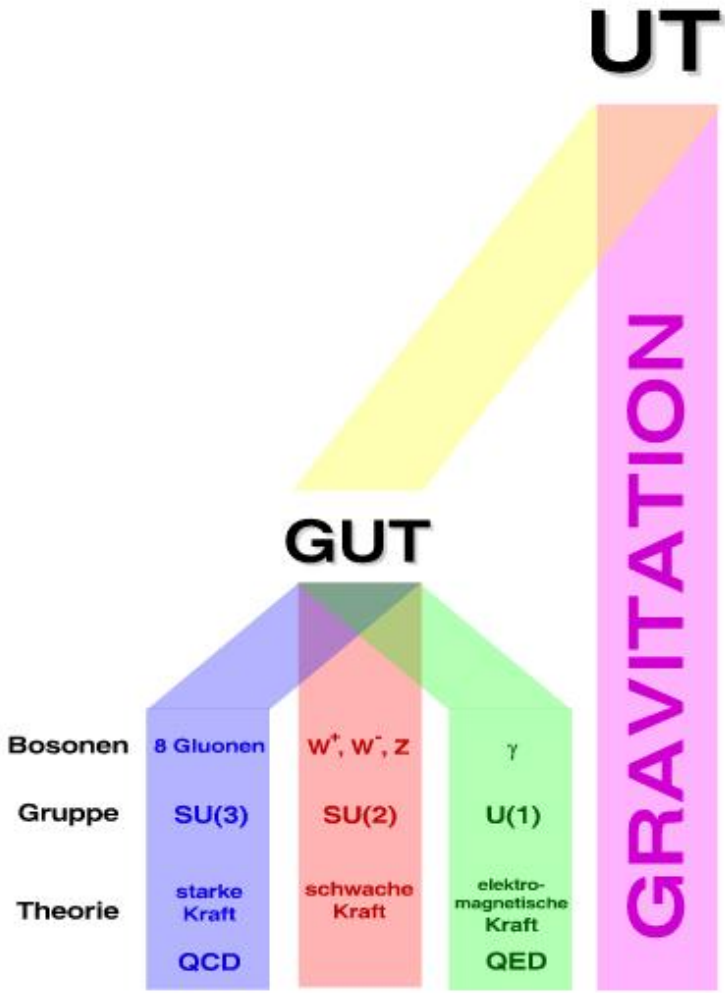

Abbildung 23.3: Vereinheitlichung: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).

23.6.5 Was tun mit der Weltformel?

Es bleibt abschließend die Frage nach der **Praktikabilität von Vereinheitlichung**. Man kann folgende Fragen stellen: Wie weit geht Vereinheitlichung? Wie nützlich ist Vereinheitlichung? Was tun mit der **Weltformel**? Die Zusammenstellung vieler physikalischer Theorien hat gezeigt, dass es nicht unbedingt sinnvoll sein kann, die Gleichungen einer mächtigen, unifizierten Theorie auf alltägliche Problemstellungen der Physik anzuwenden. So wird z. B. die aufwendigere, relativistische Rechnung nur dort praktiziert, wo relativistische Effekte maßgeblich werden. Ansonsten reicht die Newtonsche Theorie. So verlieren alte Theorien auch nicht an Gehalt oder Wichtigkeit. Schon gar nicht kann man davon sprechen, dass alte Theorien 'falsch' seien. Das ist wissenschaftstheoretisch betrachtet Blödsinn! *Jede* Theorie hat eben ihren beschränkten Anwendbarkeitsbereich.

Weltformel ist ein plakativer Begriff für den 'heiligen Gral der Teilchenphysik': eine Unifikation aller Naturkräfte. Wie hier dargelegt, haben die Physiker eine solche Theorie noch nicht gefunden. Mit Fug und Recht darf man bereits die **Feldgleichung von Einsteins ART als Weltformel** bezeichnen - sie ist zwar nicht quantisiert und berücksichtigt auch nicht die anderen Naturkräfte, aber sie beschreibt die *Welt als Ganzes* im Rahmen der relativistischen Kosmologie sehr erfolgreich (siehe Friedmann-Weltmodell).

Geht man wie die Teilchenphysiker weiter, so deuten die Erfolge der Unifikationen in den Quantenfeldtheorien in der Tat so etwas wie eine Weltformel im Sinne der UT an. Nehmen wir an, wir hätten die UT in Form einer Lagrangedichte, oder äquivalent einer Feldgleichung, vorliegen. Der Nutzen dieser Weltformel wäre nur von **erkenntnistheoretischer Natur**. *In Praxi* muss diese kompakte Formulierung auf das vorliegende Problem 'herunter gebrochen' werden - dann handelt man sich wohl alle Komplexität der untergeordneten Theorien wieder ein und hat de facto naturwissenschaftlich vermutlich nichts gewonnen. Vielleicht hat man auf einer anderen Geistesebene etwas gewonnen: In der Vereinheitlichung zur Weltformel mag es zu einer Vereinheitlichung mit ganz neuem Charakter kommen: der **Vereinheitlichung von Physik und Philosophie**.

23.7 Viele-Welten-Theorie

Die Existenz vieler Welten ist eine Folge der alternativen **Interpretation des quantenmechanischen Messprozesses** und stammt von *H. Everett* (1957). Sie besagt, dass mit jeder Messung einer quantenmechanischen Messgröße (*Observablen*) eine Aufspaltung in alle möglichen Realisierungen der Messgröße, also in viele Welten, stattfindet. Eingebettet in den Formalismus der Quantenkosmologie verspricht diese Deutung die Existenz von Paralleluniversen. Dies wurde natürlich bisher nicht nachgewiesen - weder direkt, noch indirekt.

Die Kopenhagener Deutung (ursprünglich von *Max Born* 1925/26) ist eine andere Interpretation, die nicht so weit geht, wie die 'Viele-Welten-Theorie'. Es ist wohl sprachlich nicht angebracht, hier von einer Theorie zu sprechen; angemessen ist vielmehr die Bezeichnung 'Viele-Welten-Hypothese'.

23.8 VLA

Das *Very Large Array*, kurz VLA, ist eine Anordnung aus 27 einzelnen Radioteleskopen mit je 25 Metern Durchmesser und 230 Tonnen Gewicht. Eine der Radioantennen zeigt das Foto 23.4. Alle Antennen sind auf dem Beobachtungsgelände in der Form eines riesigen Ypsilons angeordnet. Mit diesem Array können interferometrisch hochaufgelöste Radiobeobachtungen durchgeführt werden. Das VLA gehört zum *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) und steht in Socorro, New Mexico, USA. Die 27 Antennen können über ein Verfahren der Apertursynthese zu einem Riesenteleskop mit einem Äquivalentdurchmesser von 130 Metern zusammengeschaltet werden. Die Auflösung im Radiobereich bei der höchsten Frequenz von 43 GHz kann so bis zu 0.04 Bogensekunden oder **40 Millibogensekunden** (mas) betragen. Dies würde einer Detektion eines Golfballes in 150 Kilometern Entfernung entsprechen! Leider emittieren sie normalerweise keine Radiowellen - es sei denn thermische Radiowellen bei geeigneter Temperatur des Balls.

Abbildung 23.4: Eine Radioantenne des Very Large Arrays in Socorro 2006.

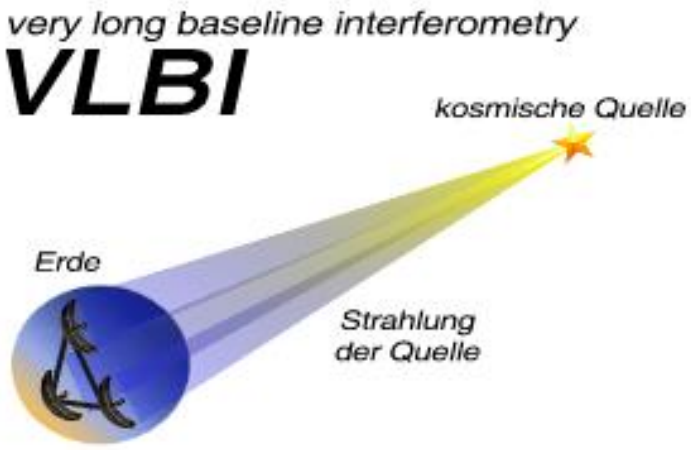

Abbildung 23.5: Prinzip der interkontinentalen Interferometrie.

Mit dem VLA wurden viele Durchbrüche in der astronomischen Beobachtung erzielt, z. B. die **erste Beobachtung eines Einstein-Rings** 1988.

23.9 VLBI

Diese Abkürzung steht für *Very Long Baseline Interferometry*, also Interferometrie mit sehr langen Basislinien (einige tausend Kilometer) und ist ein Verfahren der Apertursynthese in der **Radioastronomie**. Dabei schalten die Radioastronomen verschiedene Radioteleskope, die auf die gleiche Radioquelle ausgerichtet sind, **transkontinental**, d. h. weltweit, zusammen (siehe Grafik 23.5). Unter dem Fachbegriff *Basislinie* verstehen die Astronomen dabei den räumlichen Abstand der Teleskope ('Luftlinie').

23.9.1 Anforderung: präzise und synchronisierte Uhren

Dabei müssen die Teleskope sehr genau synchronisiert sein, damit die Beobachtungsinformation gleichen Zeiten zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund steht bei jedem Teleskop eine Atomuhr, damit das Zeitmaß der an der Interferometrie teilnehmenden Teleskope genau abgeglichen werden kann.

23.9.2 Wozu der Aufwand?

Der Sinn dieser sehr aufwendigen Interferometrie ist es, das räumliche **Auflösungsvermögen** enorm zu steigern, um eine Quelle genauer zu vermessen. Winzige Strukturen können mit dieser Technologie abgebildet werden. Die Beobachtungsfotos werden mit den Erwartungen aus theoretischen Rechnungen und Computersimulationen verglichen.

23.9.3 Beobachtungskandidaten

Mit solchen VLBI-Beobachtungen konnte das Zentrum der Milchstraße radioastronomisch sehr genau kartiert werden. Dort wurde eine helle Radiopunktquelle gefunden, die die Radioastronomen Sgr A* genannt haben. Es ist das Zentrum unserer Heimatgalaxie, und die Astronomen sind davon überzeugt, dass dort ein supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen sitzt (Arbeiten der Genzel-Gruppe am MPE, siehe auch Web-Artikel Das größte Schwarze Loch der Milchstraße). Astronomen erwarten, dass mittels Radio-VLBI die Schwärze des Loches, die aufgrund der starken Gravitationsrotverschiebung entsteht, in etwa fünf Jahren nachgewiesen wird!

Eine weitere Quelle, die von großem Interesse für die Radioastronomen ist, ist der Aktive Galaktische Kern M87. VLBI mit Millimeterradiowellen erreichen räumliche Auflösungen, die in der Entfernung von M87 (16 Mpc) nur wenige zehn Schwarzschild-Radien betragen! Das ist ein Forschungsgebiet der VLBI-Gruppe am MPI für Radioastronomie in Bonn. Damit ist es möglich die unmittelbare Umgebung des supermassereichen Schwarzen Loches in M87 zu studieren, und dabei zu beobachten, wie es den relativistischen Jet herausschießt. Diese Untersuchungen sind bedeutsam für die Physik der aktiven Galaxie (AGN) und die relativistische Magnetohydrodynamik, weil die Astrophysiker herausfinden wollen, ob AGN-Jets durch den Blandford-Payne-Mechanismus oder den Blandford-Znajek-Mechanismus (oder einer Kombination aus beidem) erzeugt werden.

23.9.4 Weblinks

- ◇ Infrarot-/Submillimeter-Gruppe am MPE
- ◇ VLBI-Gruppe am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn

23.10 VLT

Hinter dieser Abkürzung verbirgt sich eines der leistungsstärksten, optischen Teleskope überhaupt, das *Very Large Telescope*. Es handelt sich um vier Einzelteleskope der 8-Meter-Klasse, die sich auf dem Berg *Cerro Paranal* (2635 Meter) in der Atacama Wüste im Norden Chiles (Südamerika) befinden. Ein Foto dieses auch landschaftlich reizvollen Ortes der modernen Astronomie ist in Abbildung 23.6 zu sehen (Credit: ESO/VLT 1999). Das VLT wird von der Europäischen Südsternwarte (*European Southern Observatory*, ESO) betrieben und hat vor allem die Zielsetzung **optische Interferometrie** nach dem Vorbild des VLA im Radiobereich durchzuführen. Diese Methode, VLTI für *Very Large Telescope Interferometer* genannt, ermöglicht dann auch im Optischen bzw. Infraroten eine Auflösung, die sogar besser ist als die des Weltraumteleskops Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST). Dieser Nachweis konnte u. a. mit der Infrarotkamera NICMOS erbracht werden. Derzeit wird der Nahinfrarot-Spektrograph SINFONI intensiv und erfolgreich benutzt.

Die vier Einzelteleskope (*Unit Telescopes*, UT1 bis UT4) tragen Namen in der Mapuche-Sprache der Indios:

Abbildung 23.6: Das Very Large Telescope auf dem Paranal 1999.

- ◇ UT1: ANTU ('Sonne'),
- ◇ UT2: KUEYEN ('Mond'),
- ◇ UT3: MELIPAL ('Kreuz des Südens') und
- ◇ UT4: YEPUN ('Venus').

Viele deutsche Forschungsinstitute sind an zahlreichen Projekten am VLT beteiligt. So hat die Landessternwarte Heidelberg beispielsweise in Kollaboration die Spektrographen *Focal Optical Reducer Spectrograph* FORS 1 und FORS 2 beigesteuert. Mit diesen Instrumenten wurde Deep Fields aufgenommen, also extrem lang belichtete Aufnahmen von dunklen Himmelsarealen. Wie bei den *Hubble Deep Fields* (HDF) zeigen die *FORS Deep Fields* (FDF) eine Fülle extragalaktischer Systeme. Mit diesen Galaxien werden Statistiken erstellt, die der Kosmologie zugute kommen.

23.11 VLTI

Eine Methode der Apertursynthese, angewendet im Optischen am VLT. Das Akronym bedeutet *Very Large Telescope Interferometer* und besteht aus den vier Einzelteleskopen UT1 bis UT4 mit 8.2 Metern Durchmesser und kleineren Hilfsteleskopen (*Auxiliary Telescopes*, ATs) mit je 1.8 Meter Durchmesser auf der Plattform des Bergs *Cerro Paranal*. Die Längen der Basislinien betragen etwa 200 Meter. Wenn das Verfahren funktioniert, ist eine optische Auflösung im Bereich von Millibogensekunden (mas) möglich! Bisher funktioniert VLTI nur mit zwei 8.2 Meter Einzelteleskopen und wurde an hellen Sternen (Sirius und α *Hydrae*) getestet.

23.11.1 Weblink

- ◇ VLTI-Website der ESO

23.12 Voids

Voids sind großskalige Leer- oder Hohlräume im Universum.

23.12.1 Riesenlöcher im All? Wer sagt das?

Beobachtungen (vergleiche Kosmographie), wie z. B. 2dF, und hydrodynamische bzw. magnetohydrodynamische Simulationen auf Hochleistungsrechnern (*Supercomputern*) zeigen, dass das Universum großräumig nicht homogen ist, sondern eine **Wabenstruktur** besitzt. Die Voids sind gerade das leere Innere der Waben und mit etwa 50 bis 100 Mpc Durchmesser gehören sie zu den **größten Inhomogenitätsstrukturen** überhaupt. Die mittlere Dichte der Galaxienverteilung sinkt auf etwa 20% des üblichen Werts ab! Auf den Wabenrändern sitzen Galaxien, Galaxienhaufen und Galaxiensuperhaufen. Letztere finden sich an den Knoten angrenzender Waben.

23.12.2 Schwerkraft strukturiert den Kosmos

In der Kosmologie sind die Forscher u. a. am Zustandekommen der großskaligen Struktur des Universums (engl. *large-scale structure*, **LSS**) interessiert. Die Ausbildung von 'Lücken' in Form von Voids kann man durch folgenden Entwurf verstehen: Die Materie im Universum besteht aus baryonischer (eigentlich besser gesagt: hadronischer) Materie und vor allem aus der Dunklen Materie. Dunkle Materie gibt es etwa fünfmal häufiger als gewöhnliche, baryonische Materie. Zu Beginn sei dieses Materiekonglomerat homogen verteilt. Die Massen ziehen sich nun untereinander an, stoßen sich aber nie ab. Das ist ein tiefgründiger Wesenunterschied zwischen gravitativer und elektromagnetischer Kraft! Es gibt eben keine 'negativen Massenladungen'. Die homogene Verteilung wird deshalb über lange Zeiträume völlig umstrukturiert. Das Phänomen sich anziehender Massen

bezeichnen die Astrophysiker als **gravitative Instabilität**. Zu jedem gegebenen Satz von lokaler Massendichte, Temperatur und Mischung von Atomsorten gehört eine bestimmte Jeans-Masse. Wird sie überschritten, kollabiert die Massenansammlung. Daraus können Riesenmolekülwolken und schließlich Sterne entstehen. Die Molekülwolken sind sehr massereich und **fragmentieren** zu Monolithen kleinerer Masse.

Typischerweise zeigen sich fadenförmige Strukturen, die **Filamente**, die die Wabenwände konstituieren können. Das Einwirken der gravitativen Instabilität über lange Zeit dünnt demnach Gebiete aus, die abseits der Filamente sind. Daraus formieren sich die Voids.

23.12.3 Achtung, Verwechslungsgefahr!

Voids sind nicht gleich Voids. Es gibt folgenden Bedeutungsunterschied: Die Voids der Quantenkosmologie bezeichnen Vakuum-Universen, also eine Art quantenmechanischen Grundzustand. Aus diesen gewinnt man formal durch Anwendung eines Erzeugungsoperators andere Universen.

23.13 VSOP

Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme (VSOP) ist das wohl ehrgeizigste Verfahren der Apertursynthese im Bereich der Radiowellenlängen. Es handelt sich um eine Kollaboration des *Institute of Space and Astronautical Science* (ISAS) und des *National Astronomical Observatory* (NAO) in Japan.

Dabei soll das Konzept des VLBI auf den Weltraum ausgedehnt werden, indem **weltraumgestützte Radioantennen** die Basislinien des Interferometers enorm vergrößern, nämlich auf Ausdehnungen in der Größenordnung der dreifachen Basislängen, die erdgebunden möglich sind!

Bereits am 12. Februar 1997 wurde der erste VSOP-Satellit HALCA gestartet und eine 8-Meter-Radioantenne erfolgreich im Erdorbit ausgesetzt (Apogäum 21 000 km, Perigäum 560 km). VSOP-Beobachtungen wurden in Verbindung mit irdischen Radioteleskopen auch schon durchgeführt. Die Beobachtungsfrequenzen liegen bei 1.6 GHz (18cm), 5 GHz (6cm) und 22 GHz (1.3cm).

24 Lexikon W

24.1 Walker-Penrose-Theorem

Dieses Theorem nach *A.G. Walker* und *R. Penrose* aus dem Jahr 1970 besagt, dass in einer Typ-D Raumzeit ein symmetrischer, konformer Killing-Tensor zweiter Stufe existiert. Dies ist in der theoretischen Astrophysik deshalb von Belang, weil **alle** Typen Schwarzer Löcher Typ-D sind (siehe dazu Petrov-Klassifikation). Die zweifache Verjüngung des Killing-Tensors ist erhalten! Diese Erhaltungsgröße ist wiederum mit der Carter-Konstante assoziiert. *Brandon Carter* fand 1968 den kompletten Satz von Photonenimpulsen im ZAMO für die Kerr-Geometrie. Seine Arbeit ist die Grundlage von Ray Tracing bei rotierenden Schwarzen Löchern.

24.2 Weakonen

Eine nicht so häufig verwendete Bezeichnung für die **drei Eichbosonen** der schwachen Wechselwirkung: den beiden elektrisch positiv bzw. negativ geladenen W-Zeilchen $\mathbf{W}^-$ sowie $\mathbf{W}^+$ und dem elektrisch neutralen Z-Teilchen $\mathbf{Z}^0$.

24.3 Weinberg-Winkel

Der Weinberg-Winkel ist eine **elementare Naturkonstante** und verknüpft die elektrische Elementarladung e mit der schwachen Elementarladung g.

24.3.1 Weinberge sind doch recht steil...?

Das Quadrat vom Sinus des Weinberg-Winkels entspricht (ohne so genannte Strahlungskorrekturen, also dem Austausch virtueller Teilchen) gerade dem Quadrat des Verhältnisses von elektrischer zu schwacher Elementarladung

$$\sin^2 \theta_{\mathrm{W}} = \left(\frac{e}{g}\right)^2 = 1 - \frac{m_{\mathrm{W}}^2}{m_{\mathrm{Z}}^2}.$$

Mithilfe der Massen der Austauschteilchen der schwachen Kraft, dem Z-Teilchen und den W-Teilchen (Weakonen), folgt der Weinberg-Winkel experimentell. Er wird allerdings *nicht* vom Standardmodell der Teilchenphysik theoretisch vorhergesagt!

24.3.2 alternativer Zugang über elektroschwache Theorie

Der Weinberg-Winkel hängt auch mit der Feinstrukturkonstanten und der Fermi-Konstanten zusammen und kann so alternativ bestimmt werden. In der elektroschwachen Theorie, einer unifizierten Theorie aus und elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung gibt der Weinberg-Winkel die 'Mischung' zwischen Photon und Z-Teilchen an.

24.4 Weiße Löcher

Weiße Löcher sind salopp gesagt das Gegenteil von Schwarzen Löchern: eine sichtbare **Singularität**! Die Einsteinschen Feldgleichungen sind symmetrisch in der Zeit (*zeitumkehr-invariant*), d. h. eine

Zeitumkehrtransformation einer Lösung der Feldgleichungen ist wieder eine Lösung! Ein nicht rotierendes Weißes Loch entspricht der avancierten Eddington-Finkelstein-Lösung eines Schwarzschild-Loches.

24.4.1 Klingt recht technisch. Wie sieht das Teil aus?

Eine zeitliche Umkehrung eines Schwarzen Loches sähe so aus, dass aus dieser Raumzeitregion ständig Materie und Strahlung herausfließen würde! Selbstverständlich wurden diese Objekte nie von Astronomen beobachtet, aber eine interessante Frage ist es doch, ob es mehr ist als eine 'mathematische Spielerei'.

24.4.2 Nackich is nich

Diese sichtbaren - Relativisten sagen auch *nackte* - Singularitäten (engl. *naked singularities*), sind nach der **kosmischen Zensur** (engl. *cosmic censorship*) von *Roger Penrose* verboten: Sie müssen nach diesem Theorem durch einen Ereignishorizont verhüllt sein. Wäre das nicht der Fall, würden Akausalitäten auftreten.

24.4.3 Tunnel in eine andere Welt?

Die Spekulation geht sogar noch weiter: Die Allgemeine Relativitätstheorie gestattet es, Raumzeiten 'aneinanderzukleben', weil die Topologie durch die Feldgleichung nicht festgelegt ist. So ist es möglich, ein System aus einem Schwarzen und einem Weißen Loch zu 'basteln'. Die Theoretiker nennen dieses Gebilde Einstein-Rosen-Brücke oder Wurmloch. Dieses Objekt würde auf der einen Seite der Raumzeit Materie und Strahlung verschlucken, durch einen engen Raumzeitkanal transportieren und auf der Seite des Weißen Loches wieder ausstoßen. Ein solch abenteuerliches Gebilde könnte als Kanal zwischen flachen Raumzeiten oder gar Universen dienen. Die Brücke besteht im Rahmen der Theorie zwischen den beiden punktförmigen, zentralen Singularitäten.

24.4.4 Wie im Flugzeug: Reise durch's Wurmloch wird eng

Die enormen Gezeitenkräfte würden jedoch alles, was den Kanal passieren würde zerreißen, weshalb eine Reise durch Wurmlöcher, wie sie in SF-Romanen geschildert werden, alles andere als angenehm wäre. Die Gezeitenkräfte sind zwar bei supermassereichen Schwarzen Löchern wesentlich geringer als bei den stellaren Schwarzen Löchern, doch spätestens, wenn das einfallende Objekt die punktförmige Singularität passiert, wird es zerquetscht. Darüber hinaus zeigen Berechnungen, dass diese Brücken äußerst instabil wären und nach kurzer Zeit verschwinden würden. Eine Reise durch ein Wurmloch wäre nach allem, was die Theorie an halbwegs wissenschaftlichen Spekulationen erlaubt, eine Reise ins Ungewisse - vermutlich in den Tod.

24.4.5 Bislang Fehlanzeige

Bisher wurde von keinem beobachteten kosmischen Objekt die Vermutung geäußert, dass es sich dabei um ein Weißes Loch handeln könnte. Immerhin sollten diese 'umgekehrten Schwarzen Löcher' viel deutlicher in Erscheinung treten als ihre dunklen Zwillingsbrüder. Daher gelten sie nach wie vor als hochgradig spekulativ!

24.5 Weiße Zwerge

Weiße Zwerge (engl. *white dwarfs*, WD) sind kompakte Objekte, die sich am Ende der Entwicklung von Sternen mit etwa einer Sonnenmasse bilden.

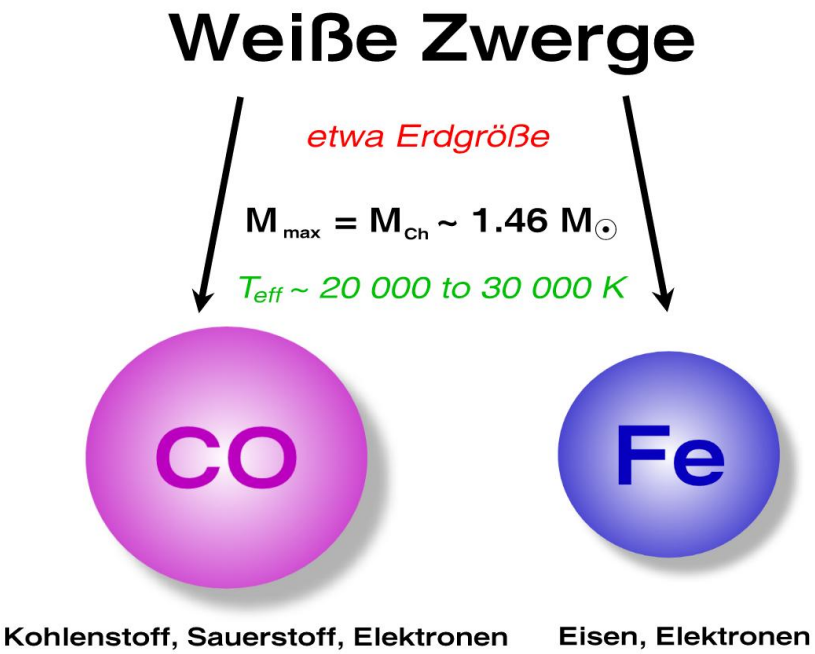

Abbildung 24.1: Zwei Klassen Weißer Zwerge.

24.5.1 Eigenschaften

Sie haben in etwa die Größe der Erde (Größenordnung 5000 km), vereinigen aber eine gesamte Sonnenmasse in sich! Daher ist ihre mittlere Dichte mit etwa 10^6 g/cm^3 beträchtlich. Ihre Oberflächentemperatur (siehe auch Effektivtemperatur) beträgt etwa 20000 bis 30000 Kelvin, weshalb sie maximal im Ultraviolett strahlen (zu sehen anhand Gleichung im *Wienschen Verschiebungsgesetz* in den Einträgen Planckscher Strahler sowie Spektraltyp).

24.5.2 Entstehung Weißer Zwerge

Weiße Zwerge bilden sich, wenn der Vorläuferstern seine äußeren Hüllen nach dem Rote-Riesen-Stadium als **planetarischen Nebel** abgestoßen hat, aus der Restmasse. Die kritische Obergrenze ist die **Chandrasekhar-Masse** von 1.46 Sonnenmassen (*Chandrasekhar*, 1930). Diese Grenzmasse ist *unabhängig* von Zentraldichte und Radius und hängt nur von der Zusammensetzung des Weißen Zwergs ab. Rechnerisch gewinnt man die Massengrenze aus der **Masse-Radius-Beziehung eines Polytropen** und der numerischen Lösung der so genannten **Lane-Emden-Gleichung**. In diese Gleichung gehen lediglich die Zustandsgleichung des Polytropen, Annahme hydrostatischen Gleichgewichts und die Poisson-Gleichung des Gravitationsfeldes ein.

24.5.3 Was bewahrt den Zwerg vor dem Kollaps?

Stabilität erhalten die Weißen Zwerge vom fermionischen **Entartungsdruck der Elektronen**, die dem Pauli-Prinzip unterliegen und sich daher nicht beliebig nahe kommen können. Der Entartungsdruck skaliert nur mit der Massendichte (Potenzgesetz mit Potenz 5/3, nicht relativistisch, oder 4/3, relativistisch) und wird daher besonders relevant bei hohen Dichten. Doch bei zu starken Gravitationsdrücken kann auch der Entartungsdruck nichts mehr stabilisieren.

24.5.4 Eine 1a Supernova

Das geschieht, wenn der Zwerg zuviel Masse bekommt, z. B. von einem nahen Begleitstern. In der Natur beobachten Astronomen den Fall in Doppelsternsystemen, dass Materie eines Sterns zum benachbarten Weißen Zwerg überfließt. Der Zwerg nimmt durch Akkretion immer mehr Sternplasma des Begleiters auf. Oberhalb der Chandrasekhar-Masse werden Weiße Zwerge instabil. Die katastrophale Folge ist die Explosion des Weißen Zwergs in einer Supernova vom Typ Ia (thermonukleare Supernova) - **von ihm bleibt nichts übrig!** Anmerkung: Schwerere Sterne hingegen kollabieren zu einem Neutronenstern, Quarkstern oder stellaren Schwarzen Loch. Die damit verbundene Explosion ist eine Supernova Typ II bzw eine Hypernova.

24.5.5 zwei Zwergtypen: CO & Fe

Die Daten des Astrometrie-Satelliten *Hipparcos* belegen, dass man unter den Weißen Zwergen zwei Typen nach ihrer Zusammensetzung unterscheiden kann: **CO-Weiße Zwerge** und **Fe-Weiße Zwerge**. Letztere sind noch kleiner (siehe Grafik 24.1). CO-Weiße Zwerge gehen aus massearmen Sternen hervor und enthalten Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O). Fe-Weiße Zwerge dagegen sind Relikte massereicher Sterne. Massereiche Sterne erzeugen in nuklearen Fusionsprozessen schwerere Elemente bis Eisen (Fe).

24.5.6 Hier 'brennt' nichts mehr

In Weißen Zwergen läuft **keine thermonukleare Fusion mehr** ab, so dass sie lediglich nur noch auskühlen. Bei angenommenen 20 Millionen Kelvin im Innern strahlen sie immer noch 10 Milliarden Jahre lang, also der Zeitskala des Alters des Universums! Oder wie es die Astrophysiker gerne formulieren:

Die Kelvin-Helmholtz-Zeitskala liegt in der Größenordnung der Hubble-Zeit.

Danach werden sie zunächst **Rote Zwerge** (Oberflächentemperatur etwa 3000 K) und schließlich **Schwarze Zwerge** und somit Form baryonischer Dunkler Materie. Die geringe Leuchtkraft decken Weiße Zwerge aus noch gespeicherter thermischer Energie.

24.5.7 berühmte Weiße Zwerge

Bekannte Vertreter sind der Begleiter von *Sirius* im Sternbild *Großer Hund* (internat. *Canis Major*), **Sirius B**, der 1914 entdeckt wurde. Er hat etwa eine Sonnenmasse, eine Oberflächentemperatur von 27000 K (Vergleich Sonne: ca. 6000 K), eine Leuchtkraft von nur 0.002 Sonnenleuchtkräften und umläuft den Hauptstern Sirius A in 50 Jahren. 1844 hat *Bessel* Sirius B aufgrund periodisch schwankender Eigenbewegungen von Sirius A vorhergesagt. *Clark* hat ihn 1862 zufällig entdeckt!

Astronomen kennen derzeit etwa 600 Weiße Zwerge. Weitere sind **Procyon B** im Sternbild *Kleiner Hund* (internat.: *Canis Minor*), **40 Eri B** im Sternbild *Eridanus*, **EG 50**, **GD 140** und **Stein 2051**.

24.5.8 CVs

Eine spezielle Form von Doppelsternen, die immer einen Weißen Zwerg als kompakte Komponente haben, sind die kataklysmischen Veränderliche.

24.5.9 Sonne wird zum Weißen Zwerg werden

Nach dem Stadium eines Roten Riesen in einigen Milliarden Jahren wird unsere Sonne das Schicksal ereilen, dass sie zum Weißen Zwerg von etwa einer halben Sonnenmasse wird, eingebettet in einen farbenprächtigen Planetarischen Nebel. Die Erde wird also keinen Kältetod erleiden, sondern die Ozeane werden durch die enorme Hitze des aufgeblähten Roten Riesen verdampfen!

24.6 Wellenfunktion

Die Wellenfunktion, üblicherweise symbolisiert durch den griechischen Buchstaben Ψ, beschreibt in der Quantentheorie ein mikroskopisches Teilchen.

24.6.1 Von der klassischen Mechanik zur Quantenmechanik

In der klassischen Mechanik bestimmt man Teilchenbahnen, indem man das Bewegungsproblem, nämlich die *Bewegungsgleichung*, löst. Das Resultat ist eine Teilchenbahn, die von bestimmten Einstellparametern abhängen mag, aber wohl definiert und diskret ist.

In der Quantenmechanik löst nun die Wellenfunktion das Konzept der Teilchenbahn ab (sie muss aber noch geeignet interpretiert werden, dazu später) und löst ebenfalls eine quantenmechanische Bewegungsgleichung: die berühmte *Schrödinger-Gleichung*. Wie wir sehen werden ist dann die Bahn des quantenmechanischen Teilchens, des Quants, nicht mehr so gut bestimmt.

24.6.2 Eigenschaften der Wellenfunktion

Da die Wellenfunktionen quantenmechanische Teilchen beschreiben, müssen sie auch alle Eigenschaften von Teilchen enthalten können. Die Quantenphysiker nennen diese Eigenschaften Quantenzahlen und meinen damit z. B. die Masse des Teilchens, die elektrische Ladung, den Spin und den Isospin. Weiterhin hängt die Wellenfunktion von den Raumkoordinaten und der Zeit ab:

$$\Psi = \Psi(\vec{r}, t).$$

24.6.3 Wahrscheinlichkeitswelle

Die Wellenfunktion ist eine skalare Verteilungsfunktion bestimmter Amplitude (Wellenamplitude), die im Allgemeinen vom Ort und der Zeit abhängt und außerdem durch die Teilcheneigenschaften parametrisiert ist. Ein quantenmechanisches Problem gilt als gelöst, wenn der charakteristische Verlauf der Wellenfunktion in den Koordinaten bekannt ist. Das klassische Punktteilchen ist nicht mehr an einem bestimmten Punkt in Raum und Zeit lokalisiert, sondern in Form der Wellenfunktion 'verschmiert'. Dabei ist nicht die Wellenfunktion selbst von Bedeutung, sondern ihr **Absolutquadrat**. Denn die Wellenfunktion kann auch komplexwertig sein. Absolutquadrate sind reellwertig. Anmerkung: Ein Absolutquadrat berechnet man immer dadurch, dass man eine gegebene komplexe Größe mit der zugehörigen komplex konjugierten Größe (symbolisiert mit einem zusätzlichen Stern) multipliziert:

$$|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*.$$

Diese Verteilung des Absolutquadrats (nicht der Wellenfunktion selbst!) wird als **Wahrscheinlichkeitsverteilung** interpretiert. Eine höhere Wahrscheinlichkeit das Quant anzutreffen wird dort erwartet, wo das Absolutquadrat größer ist.

24.6.4 Welle-Teilchen-Dualismus

In der Quantenphysik können sich Teilchen als Welle oder als Teilchen verhalten, d. h. in dem einen Experiment eignen sich die Welleneigenschaften zur Klärung der Beobachtung; in einem anderen eignen sich die Teilchen- oder Korpuskulareigenschaften. Dieses Phänomen heißt **Welle-Teilchen-Dualismus** und ist charakteristisch für Quanten. Dieser Dualismus gilt somit beispielsweise für Licht, genauer gesagt für Photonen, aber auch für Elektronen, für das Neutrino oder für den Atomkern.

24.6.5 Mikrowelt ist prinzipiell verschwommen

Hinzu kommt eine weitere Komplikation in der Quantenwelt: Es ist für quantenmechanische Beobachter nicht möglich, gewisse Eigenschaften eine Quants gleichzeitig zu messen: Ein Quantenbeobachter kann

entweder den Ort oder den Impuls (die Geschwindigkeit) eines Quants messen. Ein Quantenbeobachter kann aber auch nur entweder die Energie oder die Zeit messen. Diese Unschärfen werden in der **Heisenbergschen Unschärferelation** zusammengefasst.

24.6.6 Zum quantenmechanischen Messprozess

Was mit der Wellenfunktion beim *quantenmechanischen Messprozess* geschieht, wird im Eintrag Kopenhagener Deutung erläutert. Die Interpretation birgt grundlegende Konsequenzen für unser Weltverständnis.

24.7 Weylsches Postulat

Dieses Postulat wurde 1923 von *H. Weyl* entworfen und besagt, dass sich die Galaxien im Universum wie 'Elementarteilchen' in einer Flüssigkeit bewegen sollen. Ein den Raum durchdringendes Substrat kann in diesem Sinne als eine ideale **Flüssigkeit** angesehen werden, weil sich die Geodäten nur einem singulären Punkt in der Vergangenheit (und evt. auch Zukunft) schneiden. Die Materie (Galaxien) besitzt daher in jedem Punkt der Raumzeit eine eindeutige Geschwindigkeit.

24.8 Weyl-Tensor

Der Weyl-Tensor oder auch konforme Tensor genannt wurde benannt nach dem deutschen Mathematiker *Hermann Klaus Hugo Weyl* (1885 - 1955). Dieser Tensor 4. Stufe ist relativ kompliziert und kann zunächst für beliebige Dimensionen n allgemein notiert werden. In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) gilt $n = 4$, weil Raumzeiten durch eine Zeitdimension und drei Raumdimensionen charakterisiert sind.

24.8.1 Berechnung des Weyl-Tensors

Anhand der Definitionsgleichung sieht man unmittelbar, dass der Weyl-Tensor ein recht kompliziertes Gebilde ist, das schon bei einfachen Raumzeiten nur mit einigem Aufwand zu berechnen ist

$$\begin{aligned} C_{\kappa\lambda\mu\nu} &= R_{\kappa\lambda\mu\nu} - g_{\kappa[\mu}R_{\nu]\lambda} + g_{\lambda[\mu}R_{\nu]\kappa} - \frac{1}{3}g_{\kappa[\nu}g_{\mu]\lambda}R \\ &= R_{\kappa\lambda\mu\nu} + \frac{1}{2}\left(g_{\kappa\nu}R_{\mu\lambda} - g_{\kappa\mu}R_{\nu\lambda} + g_{\lambda\mu}R_{\nu\kappa} - g_{\lambda\nu}R_{\mu\kappa}\right) + \frac{1}{6}\left(g_{\kappa\mu}g_{\nu\lambda} - g_{\kappa\nu}g_{\mu\lambda}\right)R. \end{aligned}$$

Es sei denn man nutzt so genannte computer-algebraische Systeme, die Tensorrechnungen am Computer bequem und schnell erlauben.

Die Gleichung zeigt auch, dass sich der Weyl-Tensor aus dem Riemann-Tensor (Krümmungstensor; R mit vier Indizes), dem Ricci-Tensor (R mit zwei Indizes) und dem Ricci-Skalar (R ohne Indizes) berechnen lässt.

24.8.2 Symmetrien

Neben den Symmetrien des Riemann-Tensors besitzt der Weyl-Tensor eine zusätzliche Symmetrie: er ist **spurfrei**, das heißt die Summe seiner Diagonalelemente verschwindet. Die Diskussion seiner Symmetrieeigenschaften lässt eine Klassifikation der Vakuum-Raumzeiten zu, die unter der Petrov-Klassifikation bekannt ist.

24.8.3 Indikator der Krümmungseigenschaften

Physikalisch ist der Weyl-Tensor besonders von Bedeutung, weil er sich zur Untersuchung der Krümmungseigenschaften von Raumzeiten eignet. Aus Riemann-Tensor und Weyl-Tensor lassen

sich **Riemannsche und Weylsche Invarianten** bestimmen, die *nicht* vom Koordinatensystem abhängen. Dazu gehört auch der Kretschmann-Skalar. Eine Diskussion solcher Größen macht klar, wo die Krümmung besonders stark oder besonders schwach ist. Das erleichtert das Auffinden von Krümmungssingularitäten und die Charakterisierung als asymptotisch flache Raumzeit.

24.9 Wheeler-DeWitt-Gleichung

Die zeitabhängige Schrödinger-Gleichung der Quantentheorie beschreibt eindeutig die Dynamik der Wellenfunktion, also deren zeitliche Entwicklung. Lösungen der Schrödinger-Gleichung verraten also den Zustand des Quantensystems zu einem Zeitpunkt t und an einem Ort $\mathbf{r}$ (Vektor).

24.9.1 von Schrödinger zu Wheeler-DeWitt

Eine relativistische Formulierung der stationären Schrödinger-Gleichung kennt man als die **Wheeler-DeWitt-Gleichung**. Sie ist Gegenstand der **Quantenkosmologie**. Man erhält diese Gleichung, wenn man die Relativitätstheorie in *Hamiltonsche Form* umschreibt. Sie lautet:

$$\hat{\mathcal{H}}\left({}^3\hat{\gamma}_{ij}, {}^3\hat{\pi}, \hat{F}, \hat{\pi}_F\right)\Psi\left({}^3\gamma_{ij}, F\right) = 0.$$

Dieser Zugang ist bereits in der klassischen Mechanik bekannt, besitzt jedoch eine so allgemeine Formulierung, dass man ihn auch auf andere Theorien übertragen kann. Wichtig ist die Anmerkung, dass die Wheeler-DeWitt-Gleichung *nicht* kovariant ist. Das verwundert an sich nicht, wenn man berücksichtigt, dass die Schrödinger-Gleichung im Rahmen der **nicht-relativistischen** Quantenmechanik abgeleitet wird. Die Verletzung der Kovarianz manifestiert sich darin, dass bestimmte raumartige Hyperflächen ausgezeichnet sind. Außerdem gilt die Wheeler-DeWitt-Gleichung nur punktweise. Deshalb sind etwaige Renormierungsverfahren erforderlich.

Technisch muss man die Raum-Zeit-Symmetrie der Allgemeinen Relativitätstheorie wieder aufbrechen und in Raum und Zeit separieren. Diese als ADM-Formalismus (nach den Relativisten *Arnowitt*, *Deser* und *Misner*) bekannte Technik zeichnet raumartige Hyperflächen aus, deren Blätterung (*Foliation*) den Ablauf der Zeit darstellt: von einer Hyperfläche auf die andere ändert sich der kanonische Zeitparameter. Im üblichen Hamiltonschen Formalismus berechnet man nun die generalisierten kanonischen Impulse und die kanonisch konjugierte Variable aus den Ableitungen der Lagrange-Dichte. Integration liefert schließlich die Hamilton-Funktion. Sie ist der wesentliche Operator der Wheeler-DeWitt-Gleichung, die formal der (stationären) Schrödinger-Gleichung (zum Energieeigenwert null) sehr ähnelt. Die Wellenfunktion wird nun allerdings als die '**Wellenfunktion des Universums**' bezeichnet. Sie ist auf einem unendlich-dimensionalen **Superraum** der Raumzeit-Geometrien und aller Materiefelder definiert.

24.9.2 So geht's weiter: Randbedingungen fixieren

An diese hyperbolische, partielle Differentialgleichung muss man nun Randbedingungen stellen, wie beispielsweise *Vilenkin* und *Linde* vorschlugen. Sie leiteten eine Analogie zum quantenmechanischen Tunneleffekt ab, das man '*Quantentunneln aus dem (bzw. in das) Nichts*' nannte. Dies erklärte sich daraus, weil ein Wahrscheinlichkeitsstrom (mit der üblichen quantenmechanischen Definition) aus dem (bzw. in den) Superraum hinaus fließt.

Hartle und *Hawking* gaben eine alternative Randbedingung an, die '*no-boundary-condition*'. Hier ist der Rand der vierdimensionalen Mannigfaltigkeit de facto immer derselbe. Das Problem dieses Zugangs über Pfadintegrale liegt darin, dass die Wellenfunktion des Universums dann *nicht eindeutig* festgelegt werden kann, weil eine Auswertung des Pfadintegrals in der komplexen Ebene zu verschiedenen Ergebnissen führt, je nachdem welchem Integrationsweg man folgt.

24.9.3 Erzeugung und Vernichtung ganzer Universen!

In der Quantenkosmologie gibt es auch den vertrauten Apparat der **kanonischen Quantisierung**. So kann man Vielteilchenzustände, **Baby-Universen** genannt, aus Vakuumzuständen, **voids** genannt, durch Anwendung von Erzeugungsoperatoren erzeugen. Allerdings wird die zugehörige Wheeler-DeWitt-Gleichung noch komplexer und sogar nicht-linear, weil Wechselwirkungen zwischen diesen Zuständen berücksichtigt werden müssen. Die quantenmechanische Teilchenerzeugung und -vernichtung entspricht in dieser Anwendung auf den Kosmos der **Erzeugung und Vernichtung von Universen**! Der erkenntnistheoretische Inhalt dieser Theorie ist immens.

24.9.4 Der zeitliche Aspekt

Die Wheeler-DeWitt-Gleichung ist in ihrer fundamentalen Formulierung **unabhängig vom Parameter *Zeit***! Es gibt zwar einen Zeitparameter, der die Foliation der Raumzeit in Hyperflächen bestimmt. Die Foliation ist jedoch vollkommen willkürlich! Daher ist auch der resultierende Zeitbegriff nicht eindeutig. Es muss nun untersucht werden, ob die Quantentheorien verschiedener Foliationen ('Eichungen') **unitär äquivalent** sind. Träfe dies zu, wäre die gewählte Foliation irrelevant. Erst spezielle Lösungen der Wheeler-DeWitt-Gleichung (wenn man den lokalen Beobachter wieder einführen muss) leiten wieder auf einen Ordnungsparameter, den man mit der Zeit identifizieren kann. Dies führte in der Vergangenheit zu der Frage nach einer '**Physik ohne Zeit**'.

24.9.5 Lesehinweis

- ◇ Web-Essay: Was ist Zeit?

24.10 Wiensche Strahlungsformel

Siehe im Zusammenhang unter Planckscher Strahler.

24.11 Wilson-Loop

Die Wilson-Loops, verkürzt auch einfach *Loops* genannt, sind **Basiszustände**, die zur Beschreibung von beliebigen Quantenzuständen in der Quantenchromodynamik (*Yang-Mills-Theorie*, SU(2)-Gruppe) und der Loop-Quantengravitation verwendet werden. Sie konstituieren den Hilbert-Raum, der gerade der Zustandsraum der jeweiligen Theorie ist, um die Eigenschaften eines Quantensystems zu beschreiben.

24.11.1 Warum Loop?

Die Bezeichnung *Loop*, dt. Schleifen, rührt daher, weil man in der Theorie einen (Parallel-)Transport physikalischer Größen entlang einer schleifenförmigen, geschlossen Bahn auf einer Metrik betrachtet. Der Operator, der diesen Transport bewerkstelligt, heißt **Holonomie-Operator** und erfüllt die Eigenschaften einer mathematischen Gruppe. Holonomie kennt man in der Teilchenphysik als *Wu-Yang-Phasenfaktor*, man kann dieses Konzept mit den Methoden der Mathematik (Funktionalanalysis, Differentialgeometrie, Gruppentheorie, Kategorietheorie) verallgemeinern.

Der Holonomie-Operator (wie die meisten Operatoren in der Quantentheorie) kann als Matrix dargestellt werden. Besonders relevant ist die **Spur** des Holonomie-Operators, also die Summe aller Werte auf der Matrixdiagonalen. Es zeigt sich, dass der Holonomie-Operator unverändert bleibt, wenn man **lokale Eichtransformationen** durchführt. Theoretiker stellen fest: Die Spur ist *eichinvariant*. Das führt zur Erhaltung der lokalen Eichsymmetrie. Hier gibt es den wesentlichen Anknüpfungspunkt zu den Eichtheorien: Denn die Eichtheorie kann dann durch ihre Holonomien dargestellt werden. Die Holonomien enthalten so die gesamte Information über die Dynamik der Theorie.

*Es ist anzunehmen, dass **alle Felder in der Natur** (nicht nur Yang-Mills- und Gravitationsfeld) im Loop-Formalismus dargestellt werden können.*

24.11.2 Geometrie als fundamentales Prinzip

Die Eichtheorien können so **geometrisch interpretiert** werden (*Gambini & Trias*, 1981 und 1986; Buch von *Gambini & Pullin* mit dem Titel *Loops, Knots, Gauge Theories and Quantum Gravity*, 2000).

In der Loop-Quantengravitation, die sogar nach den Loops benannt wurde, wurde später eine neue Basis gefunden, die mathematische Vorteile hat: die Spin-Netzwerke.

24.12 WIMP

WIMP ist ein Akronym und steht für ***W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**article*, also ein *schwach wechselwirkendes, massereiches Teilchen.*

24.12.1 Fliegengewicht Neutrino ist kein WIMP

Das Neutrino zählt nicht zu den WIMPs, weil es zu leicht ist. Dennoch hat das Neutrino eine **endliche** Ruhemasse. Neutrinos werden typischerweise beim Beta-Zerfall von einem *Radionuklid* emittiert. Anfangs war man sich nicht sicher, ob sie Masse tragen oder nicht. Dies konnte jedoch experimentell mit *Superkamiokande* in Japan verifiziert werden.

24.12.2 Was sind die WIMPs?

WIMPs sind massereich und die Forscher kennen *in der Theorie* viele davon. Vor allem durch die Supersymmetrie (SUSY) wird der 'WIMP-Zoo' bereichert. Von den WIMPs erhoffen sich die Astronomen eine Lösung des Missing-mass-Problems, weil eine signifikante Anzahl WIMPs die Masse des Universums beträchtlich erhöhen könnte (supersymmetrische Dunkle Materie: **DM-SUSY**).

24.12.3 Wo sind die WIMPs?

Offensichtlich ist das gemäß WMAP-Daten nicht in der Natur realisiert. Das **Neutralino**, ein SUSY-Teilchen, ist mit anderen Teilchen ein solcher Kandidat. Weil WIMPs neben der gravitativen nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen, gestaltet sich ihr Nachweis und damit die Abschätzung ihrer Gesamtzahl im Universum außerordentlich schwierig! In unterirdischen Experimenten (Minen, Tunnel etc.) versucht man Störeinflüsse wie die kosmische Strahlung abzuschirmen.

Alternativ lassen sich diese Teilchen indirekt nachweisen: Sollten die WIMPs der SUSY irgendwo im Universum existieren, so könnten sie sich dadurch bemerkbar machen, dass sie mit ihrem Antiteilchen zerstrahlen. Bei diesem **Annihilationsprozess** wird die Ruheenergie von WIMP und Anti-WIMP in Form eines Photons frei. Bei den hohen Massen der WIMPs liegt die Strahlung im energiereichsten Bereich des elektromagnetisches Spektrums: im **TeV-Bereich**, also bei einigen Billionen Elektronenvolt! Für diesen Spektralbereich gibt es auch Beobachtungsteleskope, z. B. **HESS** (*High Energy Stereoscopic System*) in Namibia.

24.13 Wolf-Rayet-Stern

24.13.1 Charakteristika

Die WR-Sterne sind besonders massereiche Sterne und sind auf der Massenskala im Bereich zwischen 20 und 100 Sonnenmassen zu finden. Diese Sterne sind sehr heiß (einige 10 000 K an der Oberfläche) und in der Regel vom Spektraltyp O oder B (OB-Sterne). WR-Sterne wurden nach den französischen

Astronomen *Charles Joseph Etienne Wolf* (1827 - 1918) und *Georges-Antoine-Pons Rayet* (1839 - 1906) benannt. Solche Riesensterne verraten sich in den Spektren von Galaxien beispielsweise durch eine starke Helium-II-Linie bei 164 nm (FUV, fernes Ultraviolett).

24.13.2 Windige Typen

Außerdem zeigen WR-Sterne breite Emissionslinien, was auf hohe Geschwindigkeiten in den Sternatmosphären schließen lässt: Von der Oberfläche dieser Sterngiganten strömen große Mengen Sternmaterie mit hoher Geschwindigkeit in die Weite des Alls: WR-Sterne produzieren heftige **Sternwinde**, die strahlungsgetrieben sind. Das Licht des Sterns bläst sozusagen die Hülle weg. Die dabei erreichten Windgeschwindigkeiten sind sehr hoch und betragen (in großer Entfernung) je nach Stern 400-5500 km/s, also fast bis zu 20 Mio. Stundenkilometern! Die Sternenwinde treten im UV als charakteristische, so genannte *P-Cygni-Profile* in Erscheinung. WR-Sterne werden immer leichter, dadurch dass der Sternwind Materie wegträgt. Die durchschnittlichen Massenverlustraten betragen etwa 1 bis 5×10^{-5} Sonnenmassen pro Jahr (*Abbott et al. 1986*). Die 'stärksten Bläser' haben demnach in nur 20000 Jahren eine Masse so groß wie die unseres Heimatgestirns verloren!

24.13.3 Unterklassen der WR-Sterne

Astronomen unterteilen Wolf-Rayet-Sterne nach ihren spektralen Eigenschaften in zwei wichtige Klassen:

- ◇ **WN-Sterne** sind mit starken Linien von Stickstoff (Elementsymbol N) ausgestattet. Außerdem enthalten sie große Mengen Helium (He), aber wenig Wasserstoff (H).
- ◇ **WC-Sterne** zeigen hingegen kräftige Emissionslinien von Kohlenstoff (chemisches Elementsymbol C) und von Sauerstoff (O), aber keinen Wasserstoff mehr.

Die Existenz dieser schweren Elemente (N, O) in der Sternatmosphäre legt nahe, dass sich WR-Sterne in einem fortgeschrittenen Stadium der Sternentwicklung befinden, weil die fusionierten Elemente aus der Zentralregion nun bereits in der Sternhülle zu finden sind. Im Rahmen der Sternentwicklung ist bekannt, dass WR-Sterne Nachkommen von massereichen O-Sternen (siehe Spektraltyp O) mit Anfangsmassen ab etwa 20 Sonnenmassen sind (z. B. *Cappa et al. 2004*, astro-ph/0401571). Weiterhin wird angenommen, dass WR-Sterne durch das Stadium eines WN-Sterns laufen, um dann WC-Sterne zu werden (*Woosley et al. 2002*). Die WC-Sterne enden schließlich im Gravitationskollaps und sind favorisierte Kandidaten für besonders spektakuläre Sternexplosionen. Es können dabei unterschiedliche Formen von Sternexplosionen auftreten: WR-Sterne können in Supernovae Typ Ib oder Typ Ic explodieren oder sogar als Hypernova, die sogar die Supernovae in der Energiefreisetzung übertreffen. Bei der Explosion als Hypernova sind kollabierende Wolf-Rayet-Sterne mit den langzeitigen Gamma Ray Bursts assoziiert.

Es gibt - wie bei allen Sternen - zahlreiche weitere Terminologien bei WR-Sternen, die mit besonderen Eigenschaften des Sterns (beispielsweise *e*: starke Emissionslinien) oder der Einordnung innerhalb des Spektraltyps zusammenhängen, z. B. WN2, WC8, etc. Bekannte Vertreter von WR-Sternen sind die Objekte WR 98a, WR 104, WR 105, WR 134 und WR 135. Der Vertreter WR 135 ist beispielsweise sehr variabel und weist einen 'klumpigen' Wind auf. Weitere individuelle Eigenschaften einiger WR-Sterne werden in oben erwähnten Cappa-Papier beschrieben.

24.13.4 WR-Galaxien

In der Astronomie gibt es Galaxien mit einer besonders starken Sternentstehungsrate, die so genannten *Starburst-Galaxien*. In kurzer Zeit entstehen hier besonders viele Sterne, die typischerweise besonders massereich und leuchtkräftig sind. Wie bereits beschreiben entwickeln sich diese OB-Sterne zu WR-Sternen. Eine besondere Klasse der Starburst-Galaxien sind nun die **Wolf-Rayet-Galaxien** (WR-Galaxien). Astronomen erkennen sie anhand eines breiten Emissionsbuckels bei 464 bis 469 nm im

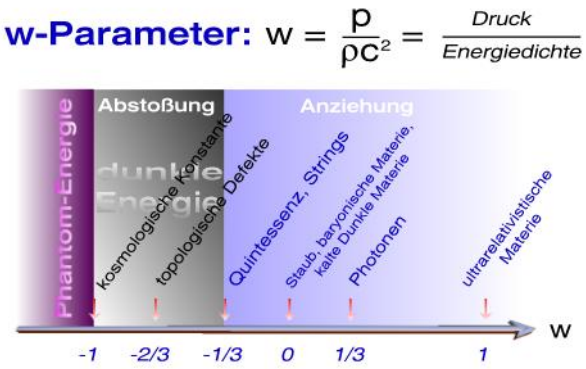

Abbildung 24.2: w-Parameter für verschiedene kosmische Materie- und Energieformen.

Spektrum (s. z. B. *Leitherer 2004*, astro-ph/0408485). Einige Vertreter dieser Starburst-Galaxien sind: NGC 1614, NGC 2798 und NGC 3125.

24.14 w-Parameter

In der modernen Kosmologie führt man den w-Parameter (auch eos-Parameter genannt) ein, um Zustandsgleichungen (engl. *equation of state*, eos) unterschiedlicher Materie- und Energieformen zu vergleichen. Der w-Parameter ist gerade der Quotient aus Druck und Energiedichte (siehe Gleichung in Grafik 24.2).

24.14.1 Zahlenbeispiele

Die Abbildung 24.2 stellt außerdem den w-Parameter von verschiedenen Energieformen vergleichend gegenüber. Generell gilt, dass ein Parameter w kleiner als -1/3 eine **kosmische Beschleunigung** hervorruft. Solche Zustandsgleichungen erfüllen alle Formen Dunkler Energie.

Die ultrarelativistische Materie befindet sich ganz rechts im Diagramm und hat den höchsten w-Parameter, $w = 1$. Bei einer solch exotischen Materieform entspricht die Schallgeschwindigkeit der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Diese Materie gibt es z. B. in der Schale des Gravasternmodells. Die elektromagnetische Strahlung hat ebenfalls einen positiven w-Parameter, $w = 1/3$, und wirkt damit anziehend für den Kosmos. Die Photonen liefern kosmologisch betrachtet nur einen marginalen Beitrag im lokalen Kosmos. Gewöhnliche Materie, Staub und kalte Dunkle Materie haben einen verschwindenden w-Parameter, $w = 0$. Wie die Messdaten des Mikrowellensatelliten WMAP belegen ist die gewöhnliche Materie kosmologisch unerheblich, weil sie viel seltener ist als andere Energieformen ($\sim$ 4%). Den bei weitem größten Anteil hat die **Dunkle Energie**, die für 'kosmische Abstoßung' (*Repulsion*) sorgt: sie treibt das Universum auseinander und wirkt gewissermaßen antigravitativ. Als zeitlich unveränderliche kosmologische Konstante hat sie den *fixen* Wert von $w = -1$.

24.14.2 Tücken der Vakuuminterpretation

Was ist die physikalische Ursache dieser kosmologischen Konstante? Eine nahe liegende Interpretation ist, dass das Vakuum des Weltalls sich auf ganz großen Skalen als Lambda bemerkbar macht, weil aufgrund der Quantentheorie das Vakuum ja nie ganz leer ist. Diese Vakuuminterpretation der kosmologischen Konstante stellt die Physiker jedoch vor das schwerwiegendste Skalenproblem der Physik: die berechnete Energiedichte des kosmischen Vakuums weicht von dem beobachteten Wert um **120 Größenordnungen** ab! In dieser Diskrepanz sehen viele Kosmologen einen klaren Modifikationsbedarf in dieser Interpretation.

24.14.3 Ausweg Quintessenz?

Aus diesen Gründen verlor die kosmologische Konstante ihre Konstanz und wurde dynamisch: die Quintessenz-Modelle kamen zum Zuge. Hier hatten erste Modelle einen w-Parameter von $w = -1/3$. Für die kosmischen topologischen Defekte, die sich im frühen Universum in der Inflationsära bei einer spontanen Symmetriebrechung ausgebildet haben sollen, kann man ableiten, dass sie $w = -2/3$ haben. Auch sie treiben das Universum auseinander.

24.14.4 Extremes Phantom

Die Phantom-Energie unterschreitet den kritischen Wert von $w = -1$. Solche Energieformen verletzen die starke Energiebedingung (engl. *strong energy condition*, SEC). Man spricht auch von einer **super-negativen EOS**. Sie führt dazu, dass die Energiedichte über alle Grenzen mit der Zeit anwachsen kann, was das Universum in endlicher Zeit im Big Rip zerreißen würde! In der Zukunft wartet eine Singularität - keine rosigen Aussichten.

24.14.5 War w immer gleich?

Der w-Parameter kann auch einer zeitlichen Entwicklung unterliegen. Kosmologisch gesehen würde sich dann der w-Parameter von Epoche zu Epoche, von einem zu einem anderen Wert der kosmologischen Rotverschiebung verändern. Mathematisch drückt man das durch die Ableitung von w nach der kosmologischen Rotverschiebung aus und nennt diese Größe w'. Der triviale Fall $w' = 0$ bedeutet demnach eine Konstanz des w-Parameters, weil die Funktion $w(z)$ sich nicht mit z ändert.

Aktuell sprechen die Beobachtungsdaten, wie die Permanenzmessungen an extrem weit entfernten, explodierenden Weißen Zwergen (Supernovae Typ Ia) für eine zeitlich konstante Form von Dunkler Energie (*Riess et al. 2004*). Das verleiht zurzeit Einsteins Lambda die Favoritenrolle - dennoch werden sämtliche Varianten intensiv erforscht.

24.14.6 w-Parameter und Entwicklung mit Rotverschiebung

Phantomenergie, z.B. $w = -1.2$:	$\rho_P \propto a^{0.6} \propto (1+z)^{-0.6}$
kosmologische Konstante, $w = -1$:	$\rho_\Lambda \propto a^0 = const$
topologische Defekte, $w = -2/3$:	$\rho_D \propto a^{-1} \propto (1+z)$
Quintessenz, Strings, $w = -1/3$:	$\rho_Q \propto a^{-2} \propto (1+z)^2$
Baryonen, kalte Dunkle Materie, $w = 0$:	$\rho_S \propto a^{-3} \propto (1+z)^3$
Photonen, $w = 1/3$:	$\rho_\gamma \propto a^{-4} \propto (1+z)^4$
ultrarelativistische Materie, $w = 1$:	$\rho_b \propto a^{-6} \propto (1+z)^6$

Diese Übersicht oben zeigt die Energiedichten ρ der unterschiedlichen Materie- und Energieformen im Kosmos und deren Entwicklung mit der kosmologischen Rotverschiebung z. Das ist nichts anderes, als die **zeitliche Entwicklung der Energiedichten**. Dabei ist $a(z)$ der Skalenfaktor der Kosmologie (auch Weltradius $R(t)$. Technische Anmerkung: Die ganz oben notierte allgemeine Relation folgt aus der Definition des w-Parameters und der thermodynamischen Gleichung für Volumenarbeit $dE = -p\,dV$ durch Integration. Die Beziehung gilt nur, falls die einzelnen Komponenten *nicht miteinander wechselwirken*. Denn falls sich eine Energieform in die andere umwandelt, werden auch die Partialdrücke voneinander abhängig und die Berechnung wird komplizierter.

Interessant ist nun die Betrachtung der Skalierung der jeweiligen Energieform mit der Rotverschiebung z. Wir schauen uns Zeile für Zeile an und erkennen, dass w von oben nach unten größer wird. Entsprechend steigt die Potenz der Rotverschiebung in der Energiedichte an. Das bedeutet: Je größer w, desto größer die Energiedichte im frühen Universum bzw. desto schneller 'dünnt' die Energiedichte mit der kosmologischen Entwicklung aus.

Offensichtlich spielen Energieformen mit einem **kleinen und negativen w-Parameter** in frühen Epochen des Universums (kleines a bzw. großes z) keine wesentliche Rolle: ihre Energiedichten sind

zu Beginn der kosmologischen Entwicklung vernachlässigbar. Das ändert sich mit der Ausdehnung des Kosmos, wenn a anwächst bzw. z kleiner wird: Dann dominieren plötzlich die Formen Dunkler Energie (Phantomenergie, Λ oder Quintessenzen).

Ganz anders bei Energieformen mit **großem und positivem w-Parameter**: sie dominieren klar im frühen Universum, weil ihre Energiedichten bei großem z durch die hohe Potenz groß werden. Das macht klar, weshalb die materiedominierte Ära (Baryonen) und die Strahlungsära (Photonen) im frühen Kosmos angesiedelt sind. Viel später, bei kleinen z-Werten, werden Materie und Strahlung 'ausgedünnt' und dynamisch irrelevant für das expandierende Universum. Das ist direkt an der geringen Energiedichte der kosmischen Hintergrundstrahlung im lokalen Universum ablesbar. Anders formuliert: die kosmische Hintergrundstrahlung (und auch die baryonische Materie) hat in unserer Epoche keinen großen Einfluss mehr auf die Expansion.

Diese kleine Rechnung zeigt auch sehr schön, dass die Energiedichte, die mit der kosmologischen Konstante assoziiert ist, *unabhängig von der kosmologischen Rotverschiebung*, also **zeitlich konstant**, ist.

Die oben genannten Energieformen sind auch diskussionswert unter dem Gesichtspunkt so genannter **Energiebedingungen**. So verletzt beispielsweise die kosmologischen Konstante ($w = -1$) die *starke* Energiebedingung ($w \geq -1/3$).

24.15 Wurmlöcher

Wurmlöcher sind Systeme aus einem Schwarzen und einem Weißen Loch und sehr spekulativ. Nichtsdestotrotz erlaubt die Theorie die Existenz dieser Gebilde, die jedoch noch nie astronomisch beobachtet wurden. Das eine Ende des Wurmlochs, das Weiße Loch, sollte sehr auffällig in Erscheinung treten, weil aus ihm Materie und Strahlung austritt! Es handelt sich um eine **sichtbare Singularität**, die eigentlich nach dem Prinzip der Kosmischen Zensur (*Roger Penrose*) verboten ist. Insofern kollidieren die Objekte mit Theoremen, die die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) vorsieht. Aus diesem Grund und auch in Ermangelung einer astronomischen Beobachtung, die ein Weißes Loch nahe legt, gelten Wurmlöcher eher als gedankliches Konstrukt.

24.15.1 schicker Name in Einsteins Theorie

In der ART heißen Wurmlöcher auch Einstein-Rosen-Brücke und können - falls sie verwandt sind mit der Schwarzschild-Geometrie - mit der Kruskal-Lösung dargestellt werden. Im Allgemeinen beschreiben Theoretiker Wurmlöcher mit dem Ansatz einer sphärisch symmetrischen, statischen Metrik (vergleiche Birkhoff-Theorem). Es ist allerdings nicht klar, wie sinnvoll dieser Zugang ist. Zunächst ist er nur durch seine Einfachheit motiviert.

24.15.2 Exot hält die Tür auf

Um den schmalen Raumzeit-Kanal (engl. *throat*) zwischen Schwarzem und Weißem Loch passieren zu können, ist eine Form '**exotischer Materie**' erforderlich, die betrachtet von bestimmten Beobachtern eine *negative Energiedichte* aufweist (*Morris & Thorne*, 1988). Deshalb sind Wurmlöcher keine Vakuumraumzeiten, sondern bedingen einen nicht verschwindenden Energie-Impuls-Tensor, nämlich denjenigen der exotischen Materie. Exotische Materie verletzt die so genannte gemittelte Null-Energie-Bedingung (engl. *averaged null energy condition*, ANEC). Die Theorie zeigt, das es Wurmloch-Lösungen gibt, die nur eine minimale Menge exotischer Materie erfordern, um passierbar (z. B. für einen Menschen) zu sein (*Visser et al.*, 2003). Möglicherweise bringen schon Quantenfelder (bisher nutzte man Skalarfelder) lokal diese Menge auf (*Hochberg et al.*, 1997).

24.15.3 Topologisches

Die **Topologien der Wurmlöcher** können je nach Lösung sehr unterschiedlich sein. Verschiedene Raumzeiten (Minkowski-Metrik, Robertson-Walker-Metrik etc.) lassen sich 'ankoppeln'.

Bisher lassen sich Wurmlöcher zumindest als interessante Objekte ansehen, die man mit den Mitteln der ART und auch Quantentheorie studieren kann. Ob sie in der Natur existieren ist fragwürdig. Vor allem verwundert, dass man **keinerlei kosmische Kandidaten** beobachtet hat, die nur durch Wurmloch-Lösungen erklärt werden könnten.

24.15.4 Auswahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen

- ◇ *Hochberg et al.*, gr-qc/9701064
- ◇ *Hochberg & Visser*, gr-qc/9704082
- ◇ *Visser & Hochberg*, gr-qc/9710001
- ◇ *Visser et al.*, gr-qc/0301003
- ◇ *Kuhfittig*, gr-qc/0401048
- ◇ *Kardashev et al.*, astro-ph/0610441

25 Lexikon X

25.1 X-Bosonen

Dies sind neue Austauschteilchen (Eichbosonen), die die Teilchenphysiker in den Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) abgeleitet haben. Neben den bekannten zwölf Eichbosonen der QED (das Photon), QCD (acht Gluonen) und schwachen Wechselwirkung (drei 'Weakonen': neutrales Z-Teilchen, positives und negatives W-Teilchen) postuliert die GUT weitere zwölf **Leptoquarks**. Drei davon sind X-Bosonen plus weitere drei Anti-X-Bosonen, die anderen sechs sind Y-Bosonen inklusive deren Antiteilchen. X-Bosonen haben eine elektrische Ladung von 4/3 der Elementarladung. Außerdem sind sie 'schwach geladen' und farbgeladen. Der Spin der X-Bosonen ist 1. Sie gehören also zu den Vektorbosonen. X- und Y-Bosonen sind mit etwa 10^{16} GeV Masse superschwer!

X-Bosonen und Y-Bosonen konstituieren die extrem kurzreichweitige X-Kraft der GUT. Der Austausch von X-Kräften ermöglicht den **Protonenzerfall**.

25.2 X-Kraft

Die unifizierte Kraft zwischen den Teilchen in der Ära der Großen Vereinheitlichten Theorien. In der Frühphase des Universums nur 10^{-36} bis 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall, als das Universum etwa 10^{29} K (entsprechend 10^{16} GeV) heiß war, manifestierten sich elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung als eine *identische Kraft*, die **X-Kraft**. Sie war die einzige Kraft, die neben der Gravitation vorherrschte.

Entsprechend illustriert die Abbildung 25.1, wie die Eichbosonen der jeweiligen Kraft, das Photon, die 'Weakonen' und die Gluonen um die X-Bosonen und Y-Bosonen (den Leptoquarks) ergänzt werden.

25.3 X-ray burster

Dies sind Strahlungsausbrüche im Bereich der Röntgenstrahlung (engl. *X-rays*, X-Strahlen), die unregelmäßig auftreten und ganz verschiedene Ursachen haben können.

Astronomen erwarten helle X-ray bursts, wenn ein ganzer Stern in ein supermassereiches Schwarzes Loch fällt. Die Beobachtung dieses Phänomens in der Röntgenquelle **RX J1242-1119** (Rotverschiebung $z = 0.05$) wurde Anfang 2004 bekannt gegeben (*Komossa et al.*, MPE). Dies wird unter dem Eintrag Gezeitenkräfte im Detail beschrieben.

Auch in den Akkretionsscheiben beobachten die Astronomen Ausbrüche in der Röntgenemission, beispielsweise bei Röntgendoppelsternen (*low-mass X-ray binaries*, LMXBs; *soft X-ray transients*, SXTs), aber auch bei Aktiven Galaktischen Kernen (AGN).

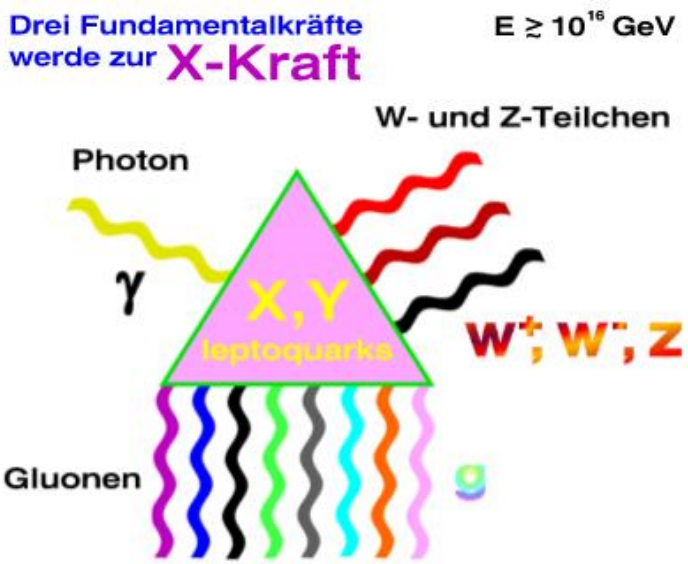

Abbildung 25.1: Vereinheitlichung von drei der vier Naturkräften zur X-Kraft.

26 Lexikon Y

26.1 Y-Bosonen

Y-Bosonen sind hypothetische, bosonische Austauschteilchen (Eichbosonen), die man im Rahmen der Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) abgeleitet hat. Zwölf Eichbosonen sind bisher experimentell nachgewiesen worden: das Photon der Quantenelektrodynamik (QED), die acht Gluonen der Quantenchromodynamik (QCD) und die drei 'Weakonen' der schwachen Wechselwirkung (neutrales Z-Teilchen, positives und negatives W-Teilchen). Gemäß der GUT gibt es weitere zwölf, nämlich die zu den Leptoquarks gehörigen X-Bosonen und Y-Bosonen. Diese Teilchen sind mit etwa 10^{16} GeV extrem schwer. Diese Austauschteilchen der so genannten X-Kraft tragen elektrische Ladung, schwache Ladung und Farbladung. Während die Y-Bosonen eine elektrische Ladung von 1/3 der Elementarladung haben, tragen ihre Antiteilchen, die Anti-Y-Bosonen eine Ladung von -1/3.

26.1.1 Wir sind da - Dank X- und Y-Bosonen!

Mit der Zerfall der X- und Y-Bosonen in der **GUT-Ära** der Kosmologie im frühen Universum unmittelbar nach dem Urknall, kam die **Materie-Antimaterie-Asymmetrie** in die Welt. Diesem geringfügigen Missverhältnis verdanken wir unsere Existenz, sonst wäre in der damaligen Entwicklungsphase des Kosmos alles in Gammastrahlung zerstrahlt!

Der Austausch von X-Kräften ermöglicht den **Zerfall des freien Protons**. Dieser Effekt wurde bisher vergeblich mit aufwendigen Detektoren gesucht. Das Problem ist: Die Zerfallszeit des Protons ist mit 10^{32} Jahren extrem groß.

26.2 Yerkes-Leuchtkraftklassen

Die Yerkes-Leuchtkraftklassen, auch als **Yerkes-** oder **MK-System** bekannt, bezeichnen eine gebräuchliche Einteilung der Sterne nach ihrer Leuchtkraft und ihrem Spektraltyp. Dieses Einteilungsschema geht auf *W.W. Morgan* und *P.C. Keenan* zurück. Danach gibt es die Klassifikation in **Leuchtkraftklassen**:

- **Ia**: Hyperriesen
- **Ib**: Überriesen
- **II**: Helle Riesen
- **III**: Riesen
- **IV**: Unterriesen
- **V**: Hauptreihe
- **VI**: Unterzwerge

Die metaphorische Sprache in *Zwergen* und *Riesen* hat einen realen Bezug: die Sterne innerhalb eines Spektraltyps haben mehr oder weniger dieselbe Temperatur (*Effektivtemperatur*) und unterscheiden sich nur in ihrer physischen Größe, dem **Sternradius**. Bei gleicher Oberflächentemperatur hat ein kleinerer Stern, ein 'Zwerg', auch eine kleinere Leuchtkraft als ein größerer Stern, ein 'Riese'. Der Riese befindet sich daher im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) oben. Die Leuchtkraftklassen liegen also im HRD in horizontalen Streifen übereinander, oben beginnend mit Ia, unten abschließend mit VI.

Das Yerkes-Observatorium der Universität Chicago (Wisconsin) wurde 1897 gegründet und war ebenfalls Namenspate.

26.3 YSO

Hinter dieser gebräuchlichen Abkürzung verbirgt sich das englische Akronym *Young Stellar Object*, also junge stellare Objekte. Zu den YSOs zählen unter anderem die Herbig-Haro Objekte, T Tauri Sterne und ρ Ophiuchi Sterne.

Auch Protosterne, wie die **T Tauri-Sterne**, die in Riesenmolekülwolken sitzen, aus denen sie entstanden sind, bilden Scheiben aus. In diesen Scheiben können Planeten entstehen, weshalb Astronomen sie auch **protoplanetare Scheiben** (engl. *protoplanetary disks*, kurz **Proplyds**) nennen.

26.3.1 Herbig-Haros

Die **Herbig-Haro-Objekte** sind ebenfalls junge Protosterne. Das erste Objekt dieser Art wurde in den 50er Jahren im Orion-Nebel entdeckt. Im Objekt HH46/47, das 1978 von *Bart Bok* entdeckt wurde, sieht man vor einer Dunkelwolke einen 80 Bogensekunden langen Emissionsnebel. Dieser entpuppte sich als **bipolare Ausströmung**, als **stellarer Jet** (Mikro-Jet)! Diese Plasmaströmungen bewegen sich mit mehreren hundert km/s durch das interstellare Medium (ISM). Typische Längenskalen des protostellaren Jets sind 10^{17} bis 10^{19} cm, entsprechend 0.1 bis 10 Lichtjahre. Im Innern der Dunkelwolke sitzt ein Protostern mit etwa 10facher Sonnenleuchtkraft und erzeugt diese Jets. Bei der Erzeugung der Jets spielt auch - wie bei den Makro-Jets der AGN - eine Akkretionsscheibe ('Jet-Scheiben-Symbiose') eine wichtige Rolle: der größte Teil des Akkretionsflusses geht in die Bildung eines neues Sterns, ein geringer Anteil geht in den Ausfluss, der nach Kollimation zum Jet wird. Die YSO-Jets sind **magneto-zentrifugal getrieben**, d. h. sowohl die Magnetohydrodynamik sorgt über Alfvén-Wellen für einen Ausfluss, als auch die Zentrifugalkraft, wenn Teilchen hohen Drehimpuls besitzen.

26.3.2 Jetstudien

Sowohl T Tauri-Sterne, als auch Herbig-Haro-Objekte zeigen stellare Jets, die natürlich viele Größenordnungen kleiner sind als die extragalaktischen Jets der Galaxien. Gerade deshalb sind sie interessante Studienobjekte, um beide Phänomene zu vergleichen.

26.3.3 bekannte Sternentstehungsgebiete

Sternentstehungsregionen mit vielen YSOs sind sehr zahlreich am Himmel. Zu den bekanntesten zählen der **Orionnebel** im Sternbild Orion und ρ **Ophiuchi** im Sternbild Schlangenträger (*Ophiuchus*), einer Molekülwolke in nur 500 Lichtjahren Entfernung.

Bekannte YSO-Quellen sind: HH 1, S233, HH 111, HH 211, DR 21, ASR 49.

26.3.4 Astrochemie

Sehr komplex ist die **Astrochemie** bzw. **Molekülphysik** der YSO-Jets. Die wichtigsten Moleküllinien sind molekularer Wasserstoff H_2 und Kohlenmonoxid CO. Daneben ist die Berücksichtigung atomaren Wasserstoffs HI wesentlich. Diese Linienemission sorgt für die **Kühlung des Jetplasmas** (*Strahlungskühlung*), die in YSO-Jet-Simulationen berücksichtigt werden muss.

26.4 Yukawa-Potential

Dieses Kräftepotential ist benannt nach dem japanischen Physiker *Hideki Yukawa* (1907 - 1981), einem Pionier der **Theorie der Kernkräfte** und der Mesonen.

26.4.1 Yukawas Idee

Er prognostizierte, dass die Kernkräfte, also diejenigen Kräfte, die die Nukleonen zu einem Atomkern kapseln, durch den Austausch von Mesonen vermittelt werden. Die Mesonen sind auch Bosonen, weil sie aus zwei Quarks bestehen. Yukawa sollte recht behalten: dies wurde 1949 mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt.

Die fundamentale Gleichung des Yukawa-Potentials formulierte er 1935. Sie lautet:

$$V(r) \propto \frac{e^{-m_{\mathrm{ex}} r}}{r} = \frac{e^{-r/\lambda_{\mathrm{ex}}}}{r}.$$

Sie enthält die Masse des Austauschteilchens m_{ex} (Index 'ex' für *exchange*, dt. Austausch) oder alternativ dessen Compton-Wellenlänge. Man erkennt direkt an der Gleichung, dass schwerere Austauschteilchen eine kürzere Reichweite haben, weil dann die **exponentielle Dämpfung** stärker ist.

26.4.2 Kernkräfte als Mesonenaustausch

Die Kernkräfte setzen sich aus verschiedenen Anteilen zusammen:

- ◇ Der **Ein-Pion-Austausch** (*One Pion Exchange*, OPE) entspricht der langreichweitigen, anziehenden Komponente.
- ◇ Der **Zwei-Pionen-Austausch** (*Sigma-Meson*) ist verantwortlich für die Potentialmulde.
- ◇ Schließlich trägt *Omega-Meson* zur kurzreichweitigen, anziehenden Komponente der Kernkräfte bei. Alle Beiträge zusammen genommen formen das resultierende Profil der Kernkräfte.

26.4.3 eine weitsichtige Idee

Aber dieses Konzept kann noch viel weitreichender angewendet werden: Die typischen 1/r-Potentiale, wie das **Coulomb-Potential** der elektromagnetischen Wechselwirkung oder das **Newtonsche Gravitationspotential** folgen direkt, wenn man jeweils ein Austauschteilchen der Masse null annimmt. Dies passt bestens in das Standardmodell der Teilchenphysik bzw. den quantenfeldtheoretischen Ansätzen der vier fundamentalen Wechselwirkungen, denn das Photon ebenso wie das Graviton sind masselos und führen über das Yukawa-Profil zu **unendlichen Reichweiten** der jeweiligen Wechselwirkung!

27 Lexikon Z

27.1 ZAMO

ZAMO steht für ***Z**ero **A**ngular **M**omentum **O**bserver* und bezeichnet einen ausgezeichneten Beobachter, der besonders geeignet ist, um die Vorgänge in rotierenden Raumzeiten im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) zu beschreiben. Der ZAMO ist lokal mitbewegter Beobachter und besitzt daher relativ zu seiner lokalen Umgebung keinen Drehimpuls (engl. *zero angular momentum*). Dieser Beobachter wurde von *James Bardeen* (1970) eingeführt. Daher wird der ZAMO bisweilen auch *Bardeen-Beobachter* genannt. Er selbst nannte das System *local non-rotating frame* (LNRF), also lokales, nicht-rotierendes System.

27.1.1 anschauliche Bedeutung des ZAMOs

Der ZAMO eignet sich besonders, wenn man die direkte Umgebung beispielsweise von rotierenden Neutronensternen relativistisch studieren möchte. Insbesondere eignet sich das LNRF bei rotierenden Schwarzen Löchern, die mit der Kerr-Metrik oder allgemeiner Kerr-Newman-Lösung beschrieben werden.

Bardeen führte den ZAMO durch folgendes **Gedankenexperiment** ein: Auf einem Kreis mit konstantem Radius und konstantem Poloidalwinkel, den man sich um die rotierende Gravitationsquelle vorstelle (Symmetrieachse des Systems senkrecht auf Kreisfläche), seien ein Beobachter und viele Spiegel lokalisiert. Die Spiegel habe die Funktion einen Lichtstrahl, den der Beobachter aussendet entlang der Kreislinie zu reflektieren, so dass er nach einiger Zeit wieder beim Beobachter ankomme. Nun kann der Beobachter den Strahl nach links oder nach rechts aussenden. Die Frage ist nun: Für welche Geschwindigkeit des Beobachters kommen linker und rechter Strahl *gleichzeitig* wieder bei ihm an? Antwort: Sie kommen genau dann gleichzeitig an, wenn die lokale Geschwindigkeit des Beobachters relativ zu seiner direkten Umgebung verschwindet, wenn der Beobachter also *mit* der rotierenden Raumzeit rotiert, also wenn er ein ZAMO ist. Alle anderen Beobachter werden unterschiedliche Ankunftszeiten messen.

Der ZAMO hat also eine lokal verschwindende Geschwindigkeit. Seine Weltlinie ist senkrecht auf den raumartigen Hyperflächen mit t = konstant. Aus diesem Grund verschwindet sein Drehimpuls. Man kann das nachrechnen, indem man das Geschwindigkeitsfeld auf das Killing-Vektorfeld projiziert. Dieses System bietet sich für Studium von rotierendem Plasma in axialsymmetrischen und stationären Raumzeiten wie der Kerr-Metrik an. In Boyer-Lindquist-Koordinaten rotiert der ZAMO mit der Winkelfrequenz, die man **Frame-Dragging-Frequenz** nennt (symbolisiert durch ω). Diese Frame-Dragging-Frequenz ist gerade ein Maß dafür, wie schnell die Raumzeit rotiert. Ein Beobachter im Unendlichen (dort wo die Raumzeit asymptotisch flach ist und nicht mehr rotiert) misst die Frame-Dragging-Frequenz als diejenige Winkelgeschwindigkeit, die der ZAMO hat. D.h. lokal rotiert der ZAMO nicht, aus dem Unendlichen betrachtet schon! Jedes Objekt, vorausgesetzt es hat verschwindenden Bahndrehimpuls, z. B. bestimmte Teilchen oder manche Photonen, rotiert aus dem Unendlichen betrachtet mit dieser Frame-Dragging-Frequenz um die stationäre Gravitationsquelle. Den Radius des Kreises aus dem Gedankenexperiment identifiziert man gerade mit dem **Zylinderradius** (in Boyer-Lindquist-Koordinaten symbolisiert durch ω mit Schlange darüber). Bardeen nannte diese Größe *proper circumferential radius*, also soviel wie 'Umfangseigenradius' (der zum Umfang des Kreises gehört).

Damit ist der ZAMO in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) eine Verallgemeinerung der **Minkowski-Beobachter** der Speziellen Relativitätstheorie (SRT). Auf diese Weise konstruiert man in der ART ein lokales Lorentzsystem aus vier Einheitsvektoren, die so genannte **Tetrade**.

Der ZAMO ist gewissermaßen das Pendant zur **geostationären Bahn** von Satelliten: sie stehen über einem festen Punkt der Erdoberfläche, weil sie sich exakt mit der Erde drehen. In sphärischen Koordinaten sind also Radius (r) und Polarwinkel (θ) konstant; nur der Azimutalwinkel (Φ) variiert.

27.2 Zeit

Zeit gehört zu den großen Rätseln der Natur. Es ist ein elementarer Begriff, der sicher nicht leicht zu erklären ist. Eine adäquate Behandlung des Themas 'Zeit' vermag viele Bücher zu füllen. Dieser Lexikoneintrag wird daher nicht einem vollem Verständnis des Zeitbegriffs gerecht werden, aber ein paar Aspekte der **Zeit in der Physik** anreißen.

27.2.1 Zeit in der Physik

In der historischen Retrospektive aus der Sicht des Physikers lässt sich der Zeitbegriff in drei Kategorien fassen, die wir im Folgenden betrachten wollen:

- **absolute Zeit**,
- **relative Zeit**,
- **quantisierte Zeit**.

27.2.2 absolute Zeit

Mit jeder großen physikalischen Theorie erfuhr der Zeitbegriff einen fulminanten und radikalen Bedeutungswandel. Die Ausgangssituation blieb über Jahrtausende bestehen: Zeit wurde als etwas Unveränderliches, Unbeeinflussbares, Stetiges wahrgenommen. **Zeit sei absolut**. *Aristoteles* (384 - 322 v.Chr.) prägte bereits die metaphorische Bezeichnung des **Zeitflusses**.

Auch die Physik *Isaac Newtons* (1643 - 1727) ist noch dominiert von einer absoluten Zeit. Zeit wird als zusätzlicher, aber unbeeinflussbarer Freiheitsgrad neben den räumlichen als **Dimension** akzeptiert. Bewegungsgleichungen diktieren die Dynamik von Körpern. Sie entwickeln sich in der Zeit, die einen äußeren, fixen Bezugsrahmen in der Entwicklung und Veränderung vorgibt. Die **Newtonsche Gravitationstheorie**, die die Bewegung der Planeten, von Gasen und Flüssigkeiten zu beschreiben vermag, war ein denkwürdiger Schritt in der Geschichte der Physik. Zudem stellte Newton und unabhängig von Leibniz den richtigen mathematischen Apparat zur Verfügung, um die Bewegungen zu beschreiben: die *Infinitesimalrechnung*, also Differential- und Integralrechnung.

Die Newtonsche Physik genügt der **Galilei-Invarianz**. Die Newtonschen Gleichungen stimmen deshalb in ihrer Form überein, wenn man sie in gegeneinander gleichförmig geradlinig bewegten Systemen betrachtet. Die Zeit ist dabei *in beiden Systemen dieselbe*. Hierin spiegelt sich ihr absoluter Charakter.

27.2.3 relative Zeit

Im 19. Jahrhundert wurde die Gesetze der Elektrodynamik, des Elektromagnetismus von *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879) gefunden. Elektrische und magnetische Phänomene wurden als wesensgleich erkannt. Nun fiel einem damals 16jährigen Jungen auf, dass sich die Gesetze Newtons und die Gesetze Maxwells nicht vertragen. Es kostete ihn noch ein paar weitere Jahre seines Lebens, dieses Missverhältnis aufzudecken. Im Jahr 1905 veröffentlichte er mit 26 Jahren die Spezielle Relativitätstheorie. Er hieß *Albert Einstein* (1879 - 1955). Das Missverhältnis bestand darin, dass die klassische Elektrodynamik Maxwells lorentzinvariant ist, eine wesensverschiedene Invarianz von der Galilei-Invarianz. In verschiedenen Bezugssystemen, die über eine Galilei-Transformation miteinander in Beziehung stehen, resultieren *unterschiedliche* Formen der Maxwell-Gleichungen. Dies leitete Einstein zu der Überzeugung, nicht die Zeit, sondern die **Vakuumlichtgeschwindigkeit als absolut** anzusehen. Ihre Konstanz wurde auch von dem legendären Michelson-Morley-Experiment

(1881/87) nahe gelegt. In diesem Experiment versuchen die Physiker vergeblich einen *Weltäther* nachzuweisen, auf dem die Lichtwelle 'schwimmen' solle. Die Konsequenzen des Postulats konstanter Lichtgeschwindigkeit sind dramatisch: Die **Zeit erhält einen relativen Charakter** und kann infolge der Zeitdilatation in unterschiedlichen Bezugssystemen verschieden sein. Ebenso wird die **Länge relativ** und unterliegt der Lorentz-Kontraktion. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (publiziert 1916) stellt eine völlig neue Gravitationstheorie dar, die die Newtonsche Theorie ablöste. Mit der neuen Theorie, tauchten auch völlig neue Effekte auf: Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion, die aus der Beschreibung der Welt als **Raumzeit** resultieren. Das dynamische Raum-Zeit-Kontinuum ersetzte den Begriff des Gravitationsfeldes. Die relative Zeit ist also ein **relativistischer Effekt**. Ein Beobachter wird ihren relativen Charakter erst entdecken, wenn die betrachteten Relativgeschwindigkeiten vergleichbar mit der Lichtgeschwindigkeit werden bzw. wenn der Zeitverlauf nahe hoher, kompakter Massen betrachtet wird. Ansonsten sind die relativistischen Effekte zwar vorhanden, aber geradezu unmessbar klein. Die Relativitätstheorie darf aus wissenschaftstheoretischer Sicht als *bewährte Theorie* bezeichnet werden, weil sie sich in zahlreichen Experimenten als erfolgreiche Beschreibung erwiesen hat.

27.2.4 quantisierte Zeit

Fast zeitgleich wurde mit der Relativitätstheorie eine andere Säule der Physik errichtet: die Quantentheorie. Diese Theorie revolutionierte viele wohl etablierte Begriffe der Physik: Determinismus, Messprozess, Teilchen, Welle und Energie erhielten eine neue Definition und Interpretation. Viele physikalische Eigenschaften erwiesen sich als diskontinuierlich, diskret. Sie bestehen aus Quanten. In der speziell relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik *Paul Diracs* findet man eine neue Teilcheneigenschaft, die den Bau und die Erscheinung der Materie dominiert: Spin. Ganzzahliger oder halbzahliger Spin teilt den Teilchenzoo in die zwei großen Gruppen Bosonen und Fermionen. Sie haben grundsätzlich unterschiedliches Verhalten in der Quantenstatistik, was sich im Spin-Statistik-Theorem niederschlägt. Die Bedeutung der Quantentheorie für den Zeitbegriff ist marginaler Natur. An sich impliziert die Quantentheorie selbst keine neuen Zeitbegriffe.

Erst eine Vereinigung der Konzepte der Allgemeinen Relativitätstheorie mit denjenigen der Quantenmechanik führt auf eine neue Natur der Zeit: die **quantisierte Zeit**. Die Theorie, die sich an der 'Verschmelzung beider Säulen der Physik' versucht, heißt Loop-Quantengravitation. In der bildhaften Sprache kann sie als 'Dach der Physik' angesehen werden. Sie nimmt Gesetze der Quantenwelt - wie die *Heisenbergsche Unschärfe* und das Pauli-Prinzip - ebenso ernst, wie die Gesetze der relativistischen Welt - wie Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und Diffeomorphismusinvarianz. Dann *resultiert zwingend*, dass die Zeit in diskrete Portionen auf der Planck-Skala eingeteilt ist. Es gebe **Zeitquanten** einer Länge von 10^{-43} Sekunden. Die Verwendung des Konjunktivs im letzten Satz wurde mit Bedacht gewählt, denn die **Loop-Quantengravitation ist keine bewährte Theorie**. Die Gesetzmäßigkeiten der Wissenschaftstheorie erfordern nun sorgfältige *Hypothesentests*, die die neuen Loop-Konzepte auf eine Bewährungsprobe stellen. Sie kann sich nur bewähren, indem sie *nicht falsifiziert* werden kann. Gelingt dies, darf man von einer quantisierten Zeit sprechen - bislang ist das nur eine elegante Spekulation.

27.2.5 Web-Essay

- ◇ Was ist Zeit?

27.3 Zeitdilatation

Zeitdilatation bezeichnet einen Effekt in Einsteins Relativitätstheorie, bei dem das Zeitmaß gedehnt wird.

Abbildung 27.1: Zeitdilatation in der Speziellen Relativitätstheorie.

27.3.1 Zeitdilatation in der SRT

Dieser Effekt beschreibt in der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) das Phänomen, dass die Zeit in schnell bewegten Systemen langsamer verstreicht als in langsamer bewegten. Anders gesagt: **Bewegte Uhren gehen langsamer.** Ein Zeitintervall wird für bewegte Beobachter gedehnt (*dilatiert*). Dieser Sachverhalt lässt sich rechnerisch mithilfe der Speziellen Lorentz-Transformation nachvollziehen.

Zeitdilatation hängt vom **Lorentz-Faktor** (üblicherweise mit dem griechischen g, γ oder Γ, abgekürzt) ab und wird für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit c besonders groß und für c selbst sogar unendlich!

Mathematisch ist der Lorentz-Faktor das Verhältnis von Koordinatenzeit t zu Eigenzeit τ. Die Gleichung in Abbildung 27.1 beschreibt gerade, dass eine Zeitspanne im Ruhesystem der Bewegung, dem **Eigenzeitintervall**, um den Lorentz-Faktorgedehnt wird (rechte Seite) und dieses Zeitintervall somit ein äußerer Beobachter als ein längeres misst (linke Seite). Man sagt: der Ablauf der Zeit ist im bewegten System langsamer, Zeitintervalle werden gedehnt.

27.3.2 Achtung, Bewegung ist relativ!

Dabei ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Bewegung eines Systems *relativ* ist. Betrachten wir als ein einfaches Beispiel einen Zug, der immer geradeaus mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Physiker sprechen in diesem Fall von einer *gleichförmig geradlinigen Bewegung*. Unter diesen Voraussetzungen ist der Zug ein Inertialsystem in der SRT. Ein Beobachter, der am Gleis stehen möge und den Zug an sich vorbeifahren sieht, bewegt sich gegenüber dem Zug mit der Relativgeschwindigkeit. Es ist nun nicht entscheidbar, ob sich der Zug bewegt (Sicht des Beobachters am Gleis) oder ob sich der Beobachter am Gleis bewegt (Sicht der Zugreisenden). Folglich betrachtet der Beobachter am Gleis Uhren im Zug als dilatiert, und Zugreisende betrachten die Uhr am Gleis als dilatiert! Das ist kein Paradoxon, sondern das **Wesen der Relativitätstheorie**. Im Alltag bemerken wir diesen Effekt nicht, weil er viel zu klein ist. Erst wenn die Relativgeschwindigkeiten vergleichbar sind mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit, wird der Zeitdilatationseffekt der SRT groß.

27.3.3 Längenkontraktion in der SRT

Ein weiterer relativistischer Effekt, der sich allerdings auf die ist **Länge** auswirkt, ist die **Längenkontraktion** oder Lorentz-Kontraktion. Hier misst der äußere Beobachter oder Laborbeobachter kürzere Längen bewegter Objekte. Anders gesagt: **Bewegte Uhren werden gestaucht.**

27.3.4 Zeitdilatation in der ART

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) gibt es die Zeitdilatation auch. Es wird nur etwas komplizierter in der Beschreibung, weil die Raumzeit nicht mehr flach (Minkowski-Metrik), sondern gekrümmt ist. An diesen Dellen in der Raumzeit wird der Zeitablauf verlangsamt. Die Physiker nenne das die **gravitative Zeitdilatation**. Diese hängt mit der Gravitationsrotverschiebung zusammen: es handelt sich lediglich um zwei verschiedene Betrachtungsweisen eines identischen Effekts (Zeit versus Frequenz). Uhren gehen also nahe einer die Raumzeit krümmenden Masse **für einen Außenbeobachter** langsamer als weiter entfernt.

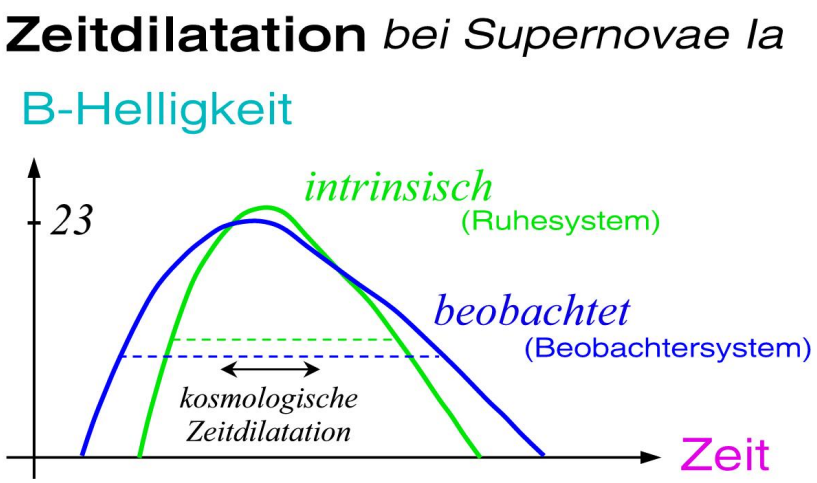

Abbildung 27.2: kosmologische Zeitdilatation in Supernova-Lichtkurven.

Mathematisch formulieren das die Relativisten mit der Lapse-Funktion, die gerade das Verhältnis von Eigenzeit und Koordinatenzeit ist. Bei der Behandlung rotierender Schwarzer Löcher in Boyer-Lindquist-Koordinaten heißt die Lapse-Funktion α. Direkt am Ereignishorizont des Loches bleibt für einen außenstehenden Beobachter die Koordinatenzeit sogar stehen! Dies liegt daran, dass die Lapse-Funktion dort verschwindet. Dieser Effekt ist recht bekannt bei Schwarzen Löchern und heißt auch *freezing effect*, weil durch das Stehenbleiben der Zeit (nur für einen außenstehenden Beobachter!) jede Bewegung 'eingefroren' wird. Anders gesagt: die Rotverschiebung z wird unendlich! Oder: Der Rotverschiebungsfaktor g verschwindet. Ein Beobachter, der hingegen mit einer Uhr in ein Schwarzes Loch hinein fällt, wird sie in seinem System weiterticken sehen. Ein einfallender Beobachter (FFO) wird in **endlicher Zeit** die intrinsische Singularität treffen - falls er nicht zuvor von Gezeitenkräften zerrissen oder Opfer der unendlichen Blauverschiebung am Cauchy-Horizont wird. Innen- und Außenbeobachter erfahren deshalb voneinander abweichende Wirklichkeiten. Die Relativität sorgt so nicht nur für zwei Zeitmaße, sondern auch für **zwei Realitäten**!

In der Kosmologie tritt ebenfalls der Zeitdilatationseffekt auf, und zwar weil die expandierende Raumzeit eine kosmologische Rotverschiebung bewirkt. Übersetzt man diesen Effekt auf Uhren, so ticken Uhren in der Tiefe des Weltraums langsamer. Das Ganze ist analog zur Gravitationsrotverschiebung zu behandeln, nur dass dieser Effekt der ART auf die Raumzeit des ganzen Universums zu beziehen ist, die durch die Dunkle Energie auseinander gezogen wird wie eine Gummihaut. Dieser Effekt kann als **kosmologische Zeitdilatation** bezeichnet werden.

27.3.5 Experimentell wurde die Zeitdilatation verifiziert

- ◇ Der kosmische Teilchenschauer von schnellen Myonen als Komponente der kosmischen Strahlung ist trotz ihrer kurzen Lebensdauer auf der Erde detektierbar, weil sich durch die Zeitdilatation der SRT ihre Lebensdauer um den Lorentz-Faktor dehnt.
- ◇ Messungen mit Atomuhren, die beispielsweise in Flugzeugen oder Satelliten (*Gravity Probe A*, 1976) mitgenommen wurden belegen, dass auf der Erde die Zeit im Tal (näher am Erdmittelpunkt bzw. Schwerpunkt, also der Quelle der Gravitation) um Sekundenbruchteile langsamer vergeht als auf Bergen. Es klingt bizarr ist aber relativistisch korrekt: Die Bevölkerung in den Bergen und die Besatzung in Flugzeugen altern schneller!
- ◇ Die zuletzt beschriebene kosmologische Zeitdilatation tritt bei den Lichtkurve von Supernovae Typ Ia auf. Eigentlich läuft die Physik dieser Sternexplosionen immer wieder gleich ab und

folglich sollten die Lichtkurven mit der gleichen Zeitskala abklingen. Die Astronomen beobachten jedoch, dass die beobachtete Lichtkurve umso breiter ist, je weiter die Supernova entfernt ist (siehe Abbildung 27.2). Das ist gerade der kosmologische Zeitdilatationseffekt: weit entfernte Sternexplosionen benötigen aus der Sicht irdischer Astronomen mehr Zeit. Die Supernovaforscher müssen diesen Effekt natürlich herausrechnen, um kosmologische Parameter zu bestimmen - das ist heutzutage Routine bei der Auswertung.

27.3.6 zeitlose Welt des Lichts

Besonders seltsam wird die Zeitdilatation im Falle der Photonen. Sie bewegen sich exakt mit der Lichtgeschwindigkeit, deshalb divergiert hier der Lorentz-Faktor ($v = c$). Er wird unendlich, d. h. Zeitintervalle werden im bewegten Photonensystem zu unendlichen Zeiträumen gestreckt. Anders gesagt: Die Photonen altern nicht, sie existieren in einer **zeitlosen Welt**.

27.4 Zodiakallicht

Das Zodiakallicht ist eine Leuchterscheinung, die in Verbindung mit dem **Tierkreis** (grch. *zodiakos kyklos*: Tierkreis) steht. Der Tierkreis besteht aus den zwölf Tierkreiszeichen, die man aus jedem Horoskop kennt. Es handelt sich um ausgezeichnete Sternbilder, die der irdische Beobachter sieht, wenn er mit seinem Blick nur in der Ebene umherschweift, in der die Planeten liegen. Diese Bahnebene ist die **Ekliptik**. Diese geometrische Orientierung ist auch der Grund dafür, weshalb man die Planeten nur in den Tierkreiszeichen und *nie in einem anderen* Sternbild findet.

27.4.1 Woher kommt die interplanetare Materie?

Die Planeten haben sich vor etwa 4.5 Milliarden Jahren aus einer **protoplanetaren Scheibe** entwickelt. Letztlich hat sich die Materie im Sonnensystem vor Urzeiten in einer Scheibe gesammelt, aus der sich auch die Sonne entwickelt hat. Diese stellaren Entwicklungsstadien beobachten Astronomen heute in anderen Systemen, beispielsweise den T Tauri-Sternen, besondere Vertreter von Protosternen.

Nachdem sich aus der protoplanetaren Scheibe auch die Planeten gebildet hatten, blieb ein Rest von interplanetarer Materie in der Ekliptik erhalten. Daneben wird dieses Materiereservoir durch Kometen aufgefüttert: einerseits verliert ihr Kometenkopf (*Koma*) durch *Sublimation* (Übergang von fest nach gasförmig) Materie; andererseits werden die Kometen durch Gezeitenkräfte vor allem vom riesigen Gasplaneten Jupiter zerrissen - ein Teil dieser Kometentrümmer endet als Sternschnuppe in der Erdatmosphäre.

27.4.2 Wie entsteht das Leuchten?

Im Wesentlichen besteht die interplanetare Materie aus Staub bis Korngrößen von etwa 100 Mikrometern Durchmesser, aber auch aus freien Elektronen. Dieser Staub macht sich durch Streuung elektromagnetischer Strahlung bemerkbar: Gerichtete Strahlung wird so diffuser und durch den Energieverlust im Streuakt röter (siehe auch Extinktion). Das Sonnenlicht wird von diesen ekliptikalen Streuzentren beeinflusst. Besonders in den Tropen beobachtet man deshalb kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang eine **dreieckige Leuchterscheinung** in der Nähe des Horizonts: das **Zodiakallicht**.

27.4.3 Wann kann ich das Zodiakallicht beobachten?

In gemäßigten Breiten sieht man es nur unter sehr guten Bedingungen als **Abendhauptlicht** im Frühjahr und als **Morgenhauptlicht** im Herbst. Die visuelle Helligkeit des Zodiakallichts ist vergleichbar mit der des Bandes der Milchstraße.

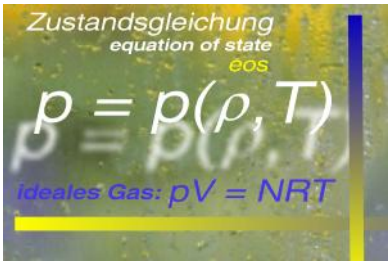

Abbildung 27.3: Mathematische Form von Zustandsgleichungen und ideales Gas.

27.5 Zustandsgleichung

Eine Zustandsgleichung (in der Fachliteratur oft abgekürzt mit *eos* für *equation of state*) ist ein **thermodynamischer Zusammenhang** zwischen thermodynamischen Zustandsgrößen, wie Temperatur T, Druck p und Dichte ρ.

27.5.1 phänomenologische Thermodynamik

In der Thermodynamik (Wärmelehre) untersuchen Physiker und Chemiker unter anderem den Zusammenhang zwischen Zustandsgrößen, indem sie sie in charakteristischen Diagrammen gegeneinander auftragen. Dies geschieht in p-V-, p-T-Diagrammen oder sogar p-V-T-Diagrammen, in denen bestimmte thermodynamische Fixpunkte (**Tripelpunkt**, **kritischer Punkt**) auszumachen oder **Phasenübergänge** abzulesen sind.

Als simple Beispiele mögen die Zustandsgleichung eines **idealen Gases** (dünnes Gas, bei dem die Konstituenten nicht miteinander wechselwirken) oder eines **Van-der-Waals-Gases** (reales Gas mit Berücksichtigung des Eigenvolumens) dienen.

27.5.2 Bezug zur Astrophysik

Ein unmittelbar einsichtiges Beispiel ist die **Stellarphysik**. Die Astronomen beschreiben das Innere eines normalen Sterns oft mit der Zustandsgleichung idealer Gase. Das ist eine Vereinfachung, aber in vielen Fällen funktioniert das sehr gut.

Bei hohen Dichten der Sternmaterie, also bei kompakten Objekten, werden Effekte der Quantentheorie relevant. Astrophysiker benutzen dann Zustandsgleichungen von **Quantengasen**, je nach Zusammensetzung beispielsweise diejenigen eines *Fermigases*, das nur aus Fermionen besteht (z. B. Neutrinogas) oder eines *Bosegases*, das nur aus Bosonen besteht (z. B. Photonengas). Im Innern kompakter Objekte wie Weißen Zwergen, Neutronensternen oder Quarksternen werden die Quanteneffekte wichtig, weil sie die Materie stabilisieren können (*Entartungsdruck* von Elektronen bzw. Neutronen; siehe dazu auch Chandrasekhar-Grenze).

27.5.3 barotrope, polytrope und extreme Zustandsgleichungen

Weiterhin werden in der Astrophysik häufig *barotrope* und polytrope Zustandsgleichungen verwendet. Beides sind vereinfachte Zustandsgleichungen: die barotrope Form ist dadurch gekennzeichnet, dass der **Druck nur von der Dichte abhängt**, während ein Polytrop folgende Form hat (K: Polytropenkonstante, n: Polytropenindex):

$$pV^n = K.$$

Besonders interessant, aber sehr schwierig zu bestimmen, sind Zustandsgleichungen unter extremen Bedingungen, wie beispielsweise bei Materie unter extrem hohen Dichten oder bei sehr hohen bzw.

sehr tiefen Temperaturen. Ein Beispiel dafür ist das Quark-Gluonen-Plasma. Mit ultrarelativistischen Zustandsgleichungen sind solche gemeint, bei denen die Schallgeschwindigkeit im Medium gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit wird. Das passiert z. B. in der dünnen Materieschale von (hypothetischen) Gravasternen.

Die Bestimmung dieser extremen Zustandsgleichungen und die Phasenübergänge der extremen Materie sind Gegenstand der aktuellen Forschung.

27.5.4 Zustandsgleichungen in der Kosmologie

Zustandsgleichungen sind auch von Bedeutung für die Kosmologie, nämlich dann, wenn der Astrophysiker die **Zusammensetzung des Universums** untersuchen und beschreiben will. Die Zustandsgleichung der Dunklen Energie hat sehr seltsame Eigenschaften: ihr negativer Druck klingt 'unphysikalisch', doch er beschreibt gut den antigravitativen Charakter der Dunklen Energie. Die Kosmologen unterscheiden mittlerweile eine Vielzahl verschiedener Formen Dunkler Energie und ordnen sie mithilfe des w-Parameters. Aktuell diskutierte kosmologische Energieformen sind kosmologische Konstante, Quintessenz, topologische Defekte (beispielsweise kosmische Strings), das Cosmon, Phantom-Energie, Spintessenz und Chaplygin-Gas.

27.6 Zustandsgröße

Ursprünglich ein Begriff der Thermodynamik. In der Astronomie sollte man präziser von *stellaren Zustandsgrößen* sprechen. Es handelt sich dabei um Kenngrößen, die einen Stern charakterisieren und ihn - analog zu den Quantenzahlen in der Klassifikation von Teilchen - einer bestimmten Gruppe zuordnen.

27.6.1 Unter welchen Namen werden Sterne eingruppiert?

Die Sterne werden so beispielsweise in Gruppen eingeteilt, die folgende Namen tragen: AGB-Sterne, Bosonensterne, B-Sterne, Braune Zwerge, Cepheiden, Gravasterne, Hauptreihensterne, Herbig-Haro-Objekte, Holosterne, kataklysmische Veränderliche, kompakte Objekte, Leuchtkräftige Blaue Veränderliche, Magnetare, Mikroquasare, Neutronensterne, O-Sterne, Protosterne, Pulsare, Quarksterne, Röntgendoppelsterne, Rote Riesen, Rote Zwerge, RR Lyrae-Sterne, Seltsame Sterne, stellare Schwarze Löcher, Symbiotische Sterne, T Tauri-Sterne, Überriesen, Vakuumsterne, Veränderliche, Weiße Zwerge, Wolf-Rayet-Sterne, Zwerge.

27.6.2 Die wichtigsten stellaren Zustandsgrößen sind:

- ◇ Masse,
- ◇ Leuchtkraft,
- ◇ Spektraltyp,
- ◇ Radius,
- ◇ Effektivtemperatur,
- ◇ Zentraltemperatur,
- ◇ Rotation,
- ◇ mittleres Magnetfeld,
- ◇ mittlere Dichte,
- ◇ Zentraldichte,
- ◇ chemische Zusammensetzung,

- ◇ Helligkeit,
- ◇ Farbe,
- ◇ Alter (Alter null beispielsweise bei Erreichen der Hauptreihe, ZAMS),
- ◇ Variabilität,
- ◇ Maximalgeschwindigkeiten von Sternwinden,
- ◇ Besonderheiten,
- ◇ etc.

Natürlich hängen diese Zustandsgrößen miteinander physikalisch zusammen. Einen engen Zusammenhang gibt es zwischen Effektivtemperatur, Spektraltyp und Farbe. Diese Zustandsgrößen sind mehr oder weniger äquivalent und daher austauschbar. Das erklärt die unterschiedlichen Möglichkeiten, das **Hertzsprung-Russell-Diagramm** der Sterne zu zeichnen.

Leuchtkraft, Effektivtemperatur und Radius haben eine Abhängigkeit voneinander (siehe Gleichung unter Eintrag Effektivtemperatur) und führen auf eine Einteilung in **Yerkes-Leuchtkraftklassen**.

27.6.3 eine tolle Sache: Relationen zwischen Zustandsgrößen

Von besonderer Relevanz in der Stellarphysik sind **Masse-Radius-Relationen**, die man in Sternmodellen unter der Annahme spezieller Zustandsgleichungen für die Sternmaterie ableitet.

Von vergleichbarer Relevanz sind die **Masse-Leuchtkraft-Relationen**. Die schwierig zu bestimmende Sternmasse kann mit dieser Beziehung direkt aus der Leuchtkraft gewonnen werden. Gelingt es einem Astronomen umgekehrt, die Masse eines Sterns durch indirekte Methoden z. B. mittels Kepler-Gesetzen in einem Doppelsternsystem zu bestimmen, so kann er auf der Grundlage dieser Relation sofort angeben, wie hoch seine Leuchtkraft ist. Jüngst wurde dieses Forschungsfeld erschüttert, weil sich herausgestellt hat, dass die übliche Masse-Leuchtkraft-Relation für massearme Sterne nicht mehr gilt (*Close et al.*, Nature 433, 286, 2005). Massearm meint einen Massebereich knapp oberhalb von 0.08 Sonnenmassen, also denjenigen an der 'Schwelle zum Stern'. Diese neuen Messungen wurden mittels hochpräzisen Beobachtungsmethoden der Adaptiven Optik (AO) ermöglicht. Sie besagen, dass bislang die Masse substellarer Objekte wie von Braunen Zwergen und massearmen Sternen unterschätzt wurde (vorausgesetzt die Masse wurde aus der Masse-Leuchtkraft-Relation abgeleitet): In Wahrheit sind sie massereicher.

27.6.4 Wie schwer werden Sterne?

Am massereichen Ende der Sterne gibt es auch neue Messdaten, die den theoretischen Stellarphysikern Kopfzerbrechen bereiten. Hintergrund ist die Frage, wie schwer ein Stern überhaupt werden kann. In der Theorie wurden durchaus Sterne mit bis zu 1000 Sonnenmassen diskutiert. Beobachtet wurden dagegen maximale Massen zwischen 100 und 150 Sonnenmassen. Es gibt bislang keine Einigkeit über einen exakten, theoretischen Wert.

Supersterne wie η *Carinae* oder der *Pistolenstern* (siehe Foto 27.4, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble, Credit: *Don F. Figer*, UCLA, NASA, 1997) - beides Leuchtkräftige Blaue Veränderliche (LBVs) mit enormen Sternwinden - belegen, dass es 'Sterngiganten vom Kaliber 100 Sonnenmassen' auch im nahen Universum gibt.

Aktuell gibt es neue Beobachtungsdaten aus einem jungen Sternhaufen, dem *Arches-Cluster* (*Figer*, Nature 434, 192, 2005; auch als ePrint erhältlich: astro-ph/0503193). Das Resultat ist, dass in dieser dichten Ansammlung von Sternen kein Stern schwerer als 130 Sonnenmassen ist. Daraus folgt allgemein für Sterne, dass ihre **empirische Obergrenze nicht 150 Sonnenmassen überschreitet**. Das zwingt die Theoretiker, die obere Grenzmasse für Sterne genauer anzugeben.

Abbildung 27.4: Superstern im Pistolennebel.

27.6.5 kurze Anmerkungen zu einigen Zustandsgrößen

- ◇ Eine hohe **Rotation** kann starke **Magnetfelder** in Dynamo-Prozessen 'aufziehen'. Dieses Phänomen ist prominent bei schnell rotierenden Neutronensternen (*Pulsar-Magnetosphäre*).
- ◇ Die **mittlere Dichte** ist bei kleinen Objekten (kleinen Radien) oft größer, weil sie kompakter sind.
- ◇ **Sternwinde** können durchaus stark von der Kugel- oder Axialsymmetrie abweichen und sogar 'klumpig' sein.
- ◇ Die **chemische Zusammensetzung** von Sternen kann sehr leicht aus den Sternspektren abgeleitet werden. Dies ist ein Aufgabengebiet der klassischen Astronomie.
- ◇ **Helligkeit** und **Leuchtkraft** müssen klar differenziert werden. Das Entfernungsmodul setzt dabei absolute und scheinbare Helligkeit über die Entfernung miteinander in Beziehung.

27.6.6 Stellarphysik bündelt viele Facetten der Physik

Das Betätigungsfeld der Stellarphysik kann weiterhin in Sternentstehung und Sternentwicklung untergliedert werden. Die stellaren Zustandsgrößen dienen hierbei als wesentliche Charakterisierungs- und Klassifizierungsmerkmale. Wie die Diskussion in diesem Eintrag zeigt, ist der Sternenzoo sehr vielfältig. Die Sternenphysik berührt so sehr unterschiedliche Bereiche der Physik, wie klassische Gasdynamik, Thermodynamik, Atom- und Molekülphysik, Hydrodynamik, Magnetohydrodynamik, Kernphysik, Quantenfeldtheorien und Relativitätstheorie.

27.7 Zwerge

Zwerge (engl *dwarfs*) sind in der Astronomie sehr zahlreich, und es gibt sie in vielen Farben. Schneewittchen hätte seine wahre Freude gehabt! Normalerweise sind mit Zwergen Sterne gemeint. Manchmal sagt man auch *Zwergsterne*, um sie klar von *Zwerggalaxien*, also recht kleinen Galaxien, abzuheben.

27.7.1 Zwergsterne

Die Bezeichnung geht darauf zurück, dass alle stellaren Zwerge in ihrer Ausdehnung viel kleiner sind als andere Sterne. Sie können allerdings recht heiß sein. Trotzdem bleibt ihre Leuchtkraft aufgrund ihrer kleinen physischen Größe eher gering, weshalb sie im fundamentalen Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne im unteren Bereich zu finden sind. In der Terminologie der Yerkes-Leuchtkraftklassen haben Zwerge die römische Ziffer VI.

27.7.2 bunte Zwergenschar!

Astronomen unterscheiden verschiedene Zwerge anhand ihrer **Sternfarben**, die tatsächlich mit den **Emissionscharakteristika** zusammenhängen:

- ◇ Braune Zwerge,
- ◇ Gelbe Zwerge, wie beispielsweise die Sonne,
- ◇ Rote Zwerge,
- ◇ die dunkelste Form, die Schwarzen Zwerge
- ◇ und schließlich die Weißen Zwerge.

27.8 Zwergplanet

Zwergplaneten ist ein neu definierter Begriff für kleine Planeten, wie z. B. Pluto.

27.9 Zwillingsparadoxon

Das Zwillingsparadoxon ist ein Paradoxon, das in der Physik der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) auftritt. Es wird gerne in der *Science-Fiction*-Literatur verwendet.

27.9.1 Worum geht's?

Das Zwillingsparadoxon beschreibt, ein **Gedankenexperiment**, bei dem Zwillinge nach ihrer Geburt getrennt werden und unterschiedliche Wege gehen. Einer verbleibt auf der Erde, während der andere eine Reise in die Tiefen des Universums mit einem Superraumschiff antritt. Das Superraumschiff ermögliche es dem abenteuerlustigen Probanden fast mit Lichtgeschwindigkeit zu fliegen, so dass aufgrund der (speziell relativistischen) Zeitdilatation bei seiner Rückkunft auf der Erde eine um den Lorentz-Faktor (Gamma-Faktor Γ oder γ) gedehnte Zeitspanne vergangen sein müsste. Der auf der Erde verbliebene Zwilling müsste also weit älter sein als sein gereister Zwilling!

Umgekehrt kann mit der gleichen Berechtigung (aufgrund des Relativitätsprinzips) der auf der Erde verbliebene Zwilling behaupten, *er* habe sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, während sein Pendant im Raumschiff in Ruhe verharrte. Somit wäre demzufolge der im Raumschiff gereiste Zwilling wesentlich älter als der auf der Erde!

27.9.2 Das Paradoxon...

Diese scheinbare Austauschbarkeit (Symmetrie) beider Zwillinge ist das Widersinnige am Paradoxon.

27.9.3 ...und seine Auflösung

Das Paradoxon löst sich auf, wenn man berücksichtigt, dass eine wichtige Voraussetzung der SRT verletzt wurde: das Raumschiff war, weil es sich **beschleunigt** bewegt hat, nicht während der gesamten Reise ein Inertialsystem. Die Rollen der Zwillinge sind **nicht** austauschbar, weil der eine auf der Erde relativ in Ruhe verharrte, aber der andere Zwilling bei seinem Raumflug beschleunigen, abbremsen und wieder beschleunigen musste, um zur Erde zurückzukehren.

27.10 Zyklisches Universum

Dieses kosmologische Modell (engl. *Cyclic Universe*) von der Entstehung und Entwicklung des Universums stellt eine Alternative zur Inflation dar, die ihrerseits das klassische Urknall-Modell ergänzt. Die Physiker *Paul Steinhardt* und *Neil Turok* wenden dabei den Formalismus der Stringtheorien an, was aber nicht zwingend ist: eine **vierdimensionale Feldtheorie** würde ebenso die Rechnungen ermöglichen. Sie behaupten, dass unser Universum aus dem **Zusammenprall zweier Universen**, einer **Branen-Kollision**, hervorgegangen sei!

27.10.1 Was ist daran zyklisch?

Diese Kollision soll einen **Urknall** bewirken, so dass das Phänomen Urknall erstmals in kosmologischen Modellen **erklärbar** wird. Die beiden Theoretiker haben das Modell *einer einzelnen* Kollision **Ekpyrotisches Szenario** getauft - in Analogie zum Weltenbrand (*ekpyrosis*) in der Stoischen Lehre der Antike. Die Erweiterung dieses Szenarios ist, dass diese Kollisionen nicht nur einmal, sondern immer wieder im Verlauf von Äonen auftreten. Dann heißt es **Zyklisches Universum**.

27.10.2 Universum & Paralleluniversum

Die String-Kosmologie wird folgendermaßen angewendet: die Raumzeit dieser kosmischen Bühne, auf der sich die Kollision ereigne, sei **fünfdimensional** (5D). Die Stringtheoretiker nennen dieses 5D-Gebilde in der Fachsprache den **Bulk**. Nun gibt es zwei begrenzende **vierdimensionale** (4D) '**Wände**' dieser 5D-Raumzeit: sie heißen die **Branen** (eine Zeit-, drei Raumdimensionen: 3-Bran). Jede dieser Wände repräsentiere ein Universum: das eine sei das Vorläuferuniversum unseres heutigen Universums, das andere sei ein **Paralleluniversum**. Es sei nun denkbar, dass die beiden Universen nur auf der Planck-Skala voneinander entfernt wären, jedoch wären sie über eine weitere, höhere Raumdimension, einer **Extradimensionen**, getrennt!

Nur die Gravitation könne zwischen den Universen vermitteln und durch die fünfdimensionale Raumzeit gelangen. Auf diese Weise könne sich Dunkle Materie des Nachbaruniversums im Unsrigen bemerkbar machen. Materie und Strahlung blieben auf ihr jeweiliges Universum beschränkt.

27.10.3 Radion-Feld lässt Universen schwingen

Die Ursache für die Kollision der Welten (*ekpyrosis*) wird in einem Kraftfeld gesehen, das ohnehin eine entscheidende Rolle im Kosmos zu spielen scheint: **Dunkle Energie**. Diese Energieform ist vorherrschend im beobachteten, späten Universum, wie Messungen (Experimente: BOOMERANG, MAXIMA, COBE, WMAP etc.) nahe legen. Sie übertrumpft sogar die uns vertraute sichtbare, baryonische Materie plus heiße und kalte Dunkle Materie um einen Faktor 2! *Steinhardt* postuliert ein Kraftfeld, das er **Radion** nennt. Es manifestiere sich als **zeitliche variable Dunkle Energie**, also eine neue Form von Quintessenz. Das Radion-Feld existiere in allen Bereichen der 5D-Raumzeit zwischen den beiden 3-Branen. Da das Radionfeld fluktuiert, induziere es Abstandsänderungen der berandenden Universen: Die Branen seien dynamisch, und es bilde sich durch die spezielle Potentialform des Feldes ein Zyklus aus Annäherung, Kollision und Entfernung aus. Diesen zyklischen Ablauf identifiziert man mit dem Begriff des Zyklischen Modells (illustriert im Schema 27.5). Mit jedem Urknall, der einen Anfang eines Universums bedeute, sei damit ein vorangegangener 'Endknall'

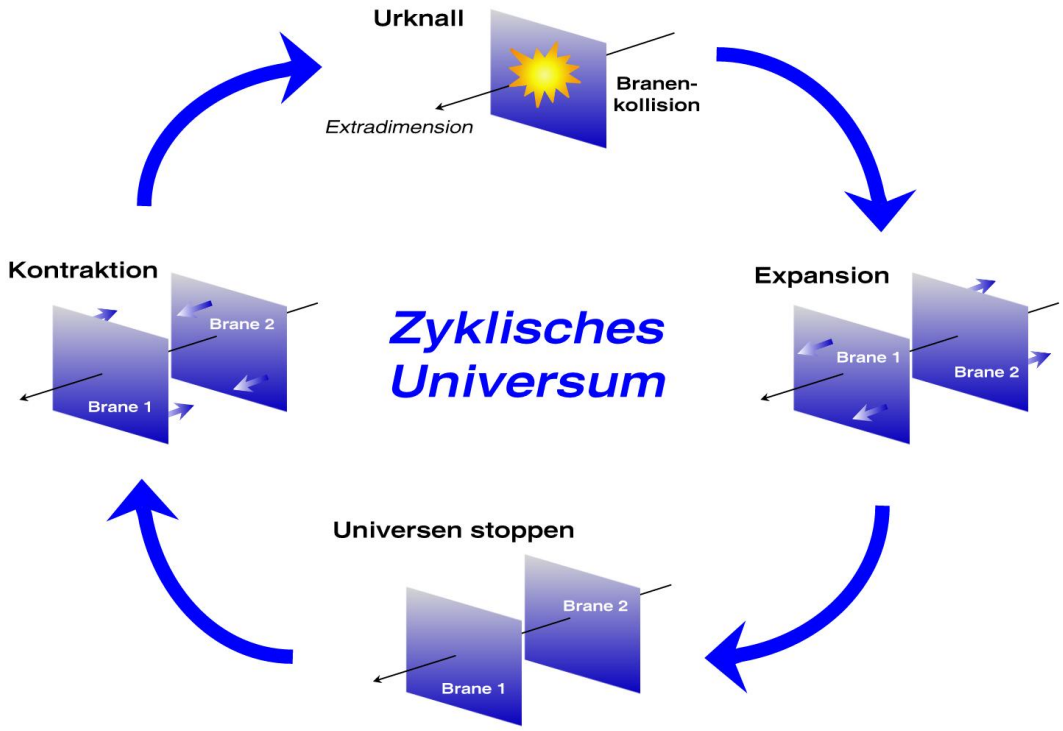

Abbildung 27.5: Stadien im Zyklischen Universum.

assoziiert, der ein bislang existierendes Universum auslösche. Mit der Krümmungssingularität im Urknall sei daher ein verschwindender Abstand der Universen in der fünften Dimension verbunden: **Der Raum kollabiere nur in einer Extradimension!**

27.10.4 immer währender Zyklus?

Dies ist eine ganz wichtige Folgerung des Zyklischen Modells und ein entscheidender Unterschied zur bisherigen Sichtweise des Urknalls, wo der Raum **in allen** Dimensionen kollabiert. Denn das bedeutet für die wesentlichen physikalischen Parameter Temperatur und Dichte, dass sie **endlich blieben** und nicht divergieren. Im Kollaps wurde eine Temperatur von 10^{23} Kelvin abgeleitet. Nach der Kollision laufen die Branen in der fünften Dimension wieder auseinander. *Steinhardt* und *Turok* fanden eine so genannte **Attraktor-Lösung**, die es ermögliche, dass sich die Zyklen beliebig häufig wiederholen.

27.10.5 Bewertung des Modells

Das Zyklische Universum ist ein reizvoller Vorschlag in der modernen, theoretischen Kosmologie. Attraktiv daran ist, dass es die Verhältnisse **vor dem Urknall** modelliert. Die scheinbar naive Frage '*Was war vor dem Urknall?*', die früher mit dem Etikett '*Frage nicht erlaubt.*' abgewiesen wurde, könnte nun mit einem **dynamischen Bulk-Branen-System** beantwortet werden. Wer besonders pfiffig ist, mag dann jedoch weiter fragen: '*Und woher kommt das Bulk-Branen-System?*'

Ähnlich wie bei den Quintessenzen gestattet das Radion-Feld als *dynamische Form* der Dunklen Energie die Lösung der Frage, weshalb die kosmologische Konstante so klein, aber nicht null ist - auch das ist ein Vorteil des Modells.

Aber das Modell ist auch sehr spekulativ: Extradimensionen, die im Zyklischen Modell unbedingt erforderlich sind, wurden bislang nicht experimentell nachgewiesen. Selbst wenn die Forscher sich

irgendwann einmal von der Existenz der Extradimensionen überzeugt haben, bleibt die Frage, wie ein solch abenteuerliches Modell getestet werden soll. Denn für einen experimentellen Test müste Information aus dem Vorläuferzustand in unser jetztiges Universum gelangen. Laut Zyklischem Modell käme dafür als einziger Überträger nur die Gravitation in Frage. Man darf wohl sehr skeptisch sein, wie das im Detail funktionieren soll.

27.10.6 Weitere Informationen

- ◇ Vortrag: *An introduction to Brane World Cosmology* (Stand März 2004).
- ◇ Homepage von Paul J. Steinhardt
- ◇ Veröffentlichungen *Steinhardt*, *Turok* und Kollegen: astro-ph/0112537, astro-ph/0204479, hep-th/0111030, hep-th/0103239, astro-ph/0605173, hep-th/0607164.

27.11 Zyklotron

Der Fachausdruck für einen Teilchenbeschleuniger mit kreisförmiger Beschleunigungsstrecke. Die deutsche Bezeichnung ist Kreisbeschleuniger.

Index

Äquivalenzprinzip, 16
Öffnung, 557

Abbremsparameter, 9
ADAF, 9
ADD-Szenario, 11
ADM-Formalismus, 13
AdS/CFT-Korrespondenz, 14
AGB-Stern, 16
Akkretion, 18
Aktiver Galaktischer Kern, 28
Alfvèn-Geschwindigkeit, 36
Alfvèn-Zahl, 36
Allgemeine Relativitätstheorie, 36
Alpha-Zerfall, 42
AMR, 43
anthropisches Prinzip, 43
Antigravitation, 44
Antimaterie, 45
Apastron, 48
Apertursynthese, 48
Aphel, 49
Apogäum, 50
Astronomie, 50
Astronomische Einheit, 57
asymptotisch flach, 60
Auflösungsvermögen, 60
Axion, 62
AXP, 63

Balbus-Hawley-Instabilität, 65
Bardeen-Beobachter, 65
Baryogenese, 65
Baryonen, 67
baryonische Materie, 67
Bekenstein-Hawking-Entropie, 67
Beobachter, 70
Beta-Zerfall, 71
Bezugssystem, 72
Bianchi-Identitäten, 72
Big Bang, 74
Big Bounce, 75
Big Crunch, 75
Big Rip, 75
Big Whimper, 76
Birkhoff-Theorem, 76
BL Lac Objekt, 83
Blandford-Payne-Szenario, 77
Blandford-Znajek-Mechanismus, 78
Blauverschiebung, 79
Blazar, 81
Bogenminute, 84
Bogensekunde, 84
Bosonen, 84
Bosonenstern, 85
Boyer-Lindquist-Koordinaten, 88
Bran, 90
Brans-Dicke-Theorie, 91
Brauner Zwerg, 92
Brill-Wellen, 93
Bulk, 94

C-Prozess, 111
Carter-Konstante, 97
Casimir-Effekt, 97
Cauchy-Fläche, 99
Cepheiden, 100
Cerenkov-Strahlung, 101
Chandrasekhar-Grenze, 103
Chaplygin-Gas, 105
Chiralität, 107
Christoffel-Symbol, 107
CMB, 108
CNO-Zyklus, 108
Comptonisierung, 109
Cosmon, 111

de-Sitter-Kosmos, 117
Deep Fields, 113
Derricks Theorem, 116
DGP-Szenario, 118
Diffeomorphismus, 119
differenzielle Rotation, 120
Distanzmodul, 121
Dodekaeder-Universum, 122
Doppler-Effekt, 124

Drei-Kelvin-Strahlung, 128
Dunkle Energie, 129
Dunkle Materie, 139

Eddington-Finkelstein-Koordinaten, 145
Eddington-Leuchtkraft, 146
Effektivtemperatur, 148
Eichtheorie, 148
Einstein-Ring, 149
Einstein-Rosen-Brücke, 151
Einstein-Tensor, 151
Eisenlinie, 152
Eklipse, 156
Ekliptik, 157
Ekpyrotisches Modell, 158
Elektromagnetismus, 159
Elektronenvolt, 162
elektroschwache Theorie, 163
Elementarladung, 164
Energie, 165
Energie-Impuls-Tensor, 169
Energiebedingungen, 167
Entfernungsmodul, 169
eos, 170
eos-Parameter, 170
Epizykel, 170
Ereignishorizont, 170
erg, 175
Ergosphäre, 175
eV, 178
Extinktion, 178
Extradimension, 179
extragalaktisch, 185
extrasolar, 186
extraterrestrisch, 186
Exzentrizität, 187

f(R)-Gravitation, 210
Falschfarbenbild, 189
Fanaroff-Riley-Klassifikation, 193
Faraday-Rotation, 194
Farbindex, 196
Farbladung, 196
Farbsupraleitung, 197
Feldgleichungen, 198
Fermi-Beschleunigung, 199
Fermionen, 200
Fermionenstern, 200
Fernparallelismus, 202
Feynman-Diagramm, 203
FFO, 206
FIDO, 206
Flachheitsproblem, 206
FLRW-Kosmologie, 207
Fluchtgeschwindigkeit, 207
Frame-Dragging, 208
Friedmann-Weltmodelle, 212

Galaktischer Schwarz-Loch-Kandidat, 221
Galaxie, 222
Gamma Ray Burst, 225
Gamma-Zerfall, 234
Geodäte, 235
Geometrisierte Einheiten, 237
Geometrodynamik, 237
Gezeitenkräfte, 238
Gezeitenradius, 244
Gluonen, 246
Grad, 248
Granulation, 248
Gravastern, 248
Gravitation, 252
Gravitationskühlung, 268
Gravitationskollaps, 264
Gravitationslinse, 269
Gravitationsradius, 274
Gravitationsrotverschiebung, 275
Gravitationswellen, 277
Gravitomagnetismus, 285
Graviton, 287
GRBR, 289
Große Vereinheitlichte Theorien, 289
Gruppe, 293
GUT, 297
GZK-cutoff, 298

Hadronen, 301
Hadronen-Ära, 301
Hamilton-Jacobi-Formalismus, 301
Harvard-Klassifikation, 302
Hauptreihe, 303
Hawking-Strahlung, 303
Hawking-Temperatur, 307
Helizität, 309
Helligkeit, 310
Herbig-Haro-Objekt, 312
Hertzsprung-Russell-Diagramm, 313
Hierarchieproblem, 314
Higgs-Teilchen, 315
Hilbert-Raum, 320
Hintergrundmetrik, 321
Hintergrundstrahlung, 322
HLX, 326
HMXB, 326
Holostern, 327
Homogenitätsproblem, 332

Horizont, 332
Horizontproblem, 338
Horn-Universum, 338
Hubble-Gesetz, 339
Hubble-Klassifikation, 341
Hubble-Konstante, 347
Hydrodynamik, 347
hydrostatisches Gleichgewicht, 349
Hyperladung, 352
Hypernova, 352
Hyperonen, 355

IC, 357
Inertialsystem, 358
Inflation, 358
Inflaton, 364
intergalaktisch, 365
intermediate-mass black hole, 365
interplanetar, 366
interstellar, 366
Isometrien, 366
Isospin, 367
Isotop, 368
ITER, 369

Jahreszeiten, 371
Jansky, 372
Jeans-Masse, 373
Jet, 373

K-Korrektur, 400
Kaluza-Klein-Theorie, 383
Kaonen, 384
Kataklysmische Veränderliche, 385
Kaup-Grenzmasse, 384
Keine-Haare-Theorem, 386
Kepler-Gesetze, 388
Kerr-de-Sitter-Lösung, 390
Kerr-Lösung, 391
Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung, 396
Kerr-Newman-Lösung, 397
Kerr-Schild-Koordinaten, 398
Killing-Felder, 399
Killing-Tensor, 399
Koinzidenzproblem, 401
Kollapsar, 402
Kompaktes Objekt, 402
Kompaktheit, 406
Kompaktifizierung, 408
Kompaneets-Gleichung, 410
konforme Transformation, 410
Kongruenz, 411
Koordinatensingularität, 411
Kopenhagener Deutung, 412
Korona, 413
Korrespondenzprinzip, 418
Kosmische Strahlung, 419
Kosmische Strings, 420
Kosmographie, 421
Kosmologie, 422
Kosmologische Konstante, 428
kosmologisches Prinzip, 431
kovariante Ableitung, 432
Kovarianzprinzip, 433
Kreisbeschleuniger, 434
Kretschmann-Skalar, 435
Kruskal-Lösung, 436
Kugelsternhaufen, 439

Laborsystem, 441
Ladung, 441
Lagrange-Punkte, 443
Lambda-Universum, 443
Lapse-Funktion, 444
Laserleitstern, 446
Lense-Thirring-Effekt, 447
Leptonen, 449
Leptonen-Ära, 451
Leptoquarks, 452
Leuchtkraft, 452
Leuchtkraftdistanz, 455
Levi-Civita-Zusammenhang, 456
Licht, 456
Lichtjahr, 457
Lichtkurve, 458
Lie-Ableitung, 459
Linearbeschleuniger, 460
LINER, 460
Linienelement, 461
LIRG, 462
LMXB, 462
LNRF, 462
Lokale Gruppe, 463
Loop-Quantengravitation, 464
Lorentz-Faktor, 476
Lorentz-Kontraktion, 482
Lorentz-Transformation, 483
Lorentzgruppe, 479
Lorentzinvarianz, 481
Lundquist-Zahl, 486
Luxon, 487

M-Theorie, 529
Machscher Kegel, 489
Machsches Prinzip, 490
Machzahl, 491

Magnetar, 492
magnetische Rotationsinstabilität, 494
Magnetohydrodynamik, 496
Magnitude, 497
marginal gebundene Bahn, 497
marginal stabile Bahn, 498
Markariangalaxien, 501
Maxwell-Tensor, 501
Membran-Paradigma, 502
Mesonen, 505
Metalle, 505
Metrik, 507
Mikroblazar, 509
Mikrolinse, 509
Mikroquasar, 510
Milchstraße, 512
Minkowski-Metrik, 518
Missing-Mass-Problem, 519
mittelschwere Schwarze Löcher, 521
MOND, 525
Monopolproblem, 528
Morphismus, 528
Myonen, 530

Neutrino, 533
Neutronenreaktionen, 538
Neutronenstern, 538
Newtonsche Gravitation, 548
No-Hair-Theorem, 550
Nova, 550
Nukleon, 553
Nukleosynthese, 554
Nullgeodäte, 555

O-Prozess, 558
Olbers-Paradoxon, 557
Oppenheimer-Volkoff-Grenze, 558
optische Tiefe, 559
Orthogonalität, 561

p-Prozess, 609
Paradoxon, 563
Paralleluniversum, 564
Parsec, 565
partielle Ableitung, 566
Pauli-Prinzip, 567
Penrose-Diagramm, 567
Penrose-Prozess, 571
Pentaquark, 573
Periastron, 574
Perigäum, 574
Perihel, 575
periodisch, 575
persistent, 576
Petrov-Klassifikation, 576
PG1159-Sterne, 577
Phantom-Energie, 578
Photon, 580
Photonenorbit, 584
Photosphäre, 585
Pion, 586
Pioneer-Anomalie, 588
Planck-Ära, 593
Planck-Skala, 599
Planckscher Strahler, 594
Planet, 600
Planetarische Nebel, 602
Poincaré-Transformation, 606
Poincarégruppe, 603
Polytrop, 606
Population, 607
Post-Newtonsche Approximation, 607
Poynting-Fluss, 607
pp-Kette, 608
Prandtl-Zahl, 609
primordiale Schwarze Löcher, 610
Prinzip minimaler gravitativer Kopplung, 612
Protostern, 613
Pseudo-Newtonsche Gravitation, 617
Pulsar, 617
Pulsierendes Universum, 621
Pyknonukleare Reaktionen, 621

QPO, 623
Quant, 623
Quantenchromodynamik, 624
Quantenelektrodynamik, 625
Quantenfeldtheorie, 627
Quantengravitation, 628
Quantenkosmologie, 630
Quantenschaum, 631
Quantensprung, 632
Quantentheorie, 633
Quantenvakuum, 638
Quantenzahlen, 640
Quark-Ära, 641
Quark-Gluonen-Plasma, 642
Quarks, 645
Quarksterne, 647
Quasare, 651
quasi-periodisch, 656
Quasi-periodische Oszillationen, 657
Quelle, 658
Quintessenz, 658

r-Prozess, 710

Röntgendoppelstern, 695
Radioaktivität, 661
Radiogalaxie, 661
Radion, 662
Randall-Sundrum-Modelle, 662
Randverdunklung, 664
Raumzeit, 666
Ray Tracing, 668
Rayleigh-Jeans-Strahlungsformel, 668
Reichweite, 672
Reionisation, 673
Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung, 675
Reissner-Nordstrøm-Lösung, 676
Rekombination, 676
relativistisch, 678
Relativitätsprinzip, 679
Relativitätstheorie, 679
Renormierung, 683
Reverberation Mapping, 684
Reynolds-Zahl, 685
RGB-Bild, 686
Ricci-Tensor, 686
Riemann-Tensor, 686
Ringsingularität, 689
Robertson-Walker-Metrik, 690
Robinson-Theorem, 692
Roche-Volumen, 693
Roter Riese, 699
Roter Zwerg, 702
Rotverschiebung, 702
Rotverschiebungsfaktor, 709
RR Lyrae-Sterne, 711
RRAT, 711
Ruhesystem, 712

s-Prozess, 760
Schallgeschwindigkeit, 713
scheinbare Größe, 714
Schleifen-Quantengravitation, 715
Schwache Wechselwirkung, 716
Schwarzer Körper, 719
Schwarzer Zwerg, 719
Schwarzes Loch, 719
Schwarzschild-de-Sitter-Lösung, 729
Schwarzschild-Lösung, 730
Schwarzschild-Radius, 733
Schwerkraft, 733
Seltsamer Stern, 733
Seltsamkeit, 734
Seyfert-Galaxie, 734
Singularität, 736
skalares Boson, 741
SNR, 741
Soft Gamma-Ray Repeater, 743
Sonne, 743
Spektraltyp, 750
Spezialität, 753
Spezielle Relativitätstheorie, 753
Spin, 756
Spin-Netzwerk, 759
Spin-Statistik Theorem, 759
Spinschaum, 759
Spintessenz, 760
Standardkerzen, 762
Standardmodell, 762
Standardscheibe, 766
Starke Wechselwirkung, 771
Statisches Universum, 771
Staubtorus, 772
Stefan-Boltzmann-Gesetz, 775
stellare Schwarze Löcher, 775
Stern, 777
Sternentstehung, 780
Strange Star, 783
Stringtheorien, 783
Subraum, 791
Supergravitation, 793
supermassereiche Schwarze Löcher, 793
Supernova, 798
Supernovaremnant, 807
Superstringtheorie, 807
Supersymmetrie, 807
Symbiotische Sterne, 809
Symmetrie, 809
Symmetriebrechung, 812
Symmetriegruppe, 813
Synchrotron, 815
Synchrotronstrahlung, 815
Synchrozyklotron, 817

T Tauri Sterne, 849
Tachyon, 819
Tagbogen, 820
Tardyon, 820
Teilchen, 820
Teilchenbeschleuniger, 824
Tensorboson, 827
Tensoren, 828
Tetraden, 831
Tetraquark, 831
TeVeS, 832
Thermodynamik, 832
thermonukleare Fusion, 834
Tiefenfeldbeobachtung, 838
Tierkreis, 838
TNO, 840

Topologie, 840
topologische Defekte, 844
Torsionstensor, 846
Trägheit, 847
transient, 848
Transit, 848
Triple-Alpha-Prozess, 849
Tunneleffekt, 849

ULIRG, 853
ULX, 855
Unifikation, 859
Unitarität, 860
Universum, 860
Unruh-Effekt, 863
Urknall, 864

Vakuum, 869
Vakuumstern, 870
Vektorboson, 871
Velapulsar, 871
Veränderliche, 871
Vereinheitlichung, 874
Viele-Welten-Theorie, 878
VLA, 878
VLBI, 879
VLT, 880
VLTI, 882
Voids, 882
VSOP, 883

w-Parameter, 895
Walker-Penrose-Theorem, 885
Weakonen, 885
Weinberg-Winkel, 885
Weiße Löcher, 885
Weiße Zwerge, 886
Wellenfunktion, 889
Weyl-Tensor, 890
Weylsches Postulat, 890
Wheeler-DeWitt-Gleichung, 891
Wiensche Strahlungsformel, 892
Wilson-Loop, 892
WIMP, 893
Wolf-Rayet-Stern, 893
Wurmlöcher, 897

X-Bosonen, 899
X-Kraft, 899
X-ray burster, 899

Y-Bosonen, 901
Yerkes-Leuchtkraftklassen, 901
YSO, 902
Yukawa-Potential, 902

ZAMO, 905
Zeit, 906
Zeitdilatation, 907
Zodiakallicht, 910
Zustandsgleichung, 911
Zustandsgröße, 912
Zwerge, 914
Zwergplanet, 915
Zwillingsparadoxon, 915
Zyklisches Universum, 916
Zyklotron, 918