
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

20.1	Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.	1
20.2	Triangulation der scheinbaren Größe aus Distanz und Radius.	3
20.3	Feynman-Diagramm des Beta-Zerfalls.	6
20.4	Schwarzes Loch: Computersimulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Schwarzes Loch.	10
20.5	Schwarze Löcher: Schwarzschild vs. Kerr.	12
20.6	Das Innere Schwarzer Löcher in verschiedenen Theorien.	19
20.7	2D-Schnitt durch Seyfert-Galaxie.	27
20.8	Circinus Galaxie, eine Seyfert-Galaxie Typ-2, beobachtet 2000 mit HST. . . .	28
20.9	Singularität.	29
20.10	Chandra-Röntgenbild des Krebsnebels mit Pulsar.	35
20.11	innere Struktur der Sonne.	38
20.12	SOHO-Bild der Sonnenstürme und Massenausflüsse.	40
20.13	aktuelle Sequenz der Spektraltypen von Sternen.	44
20.14	Bauweise eines Michelson-Interferometers.	48
20.15	Relativistischer Energieerhaltungssatz: 'relativistischer Pythagoras'.	50
20.16	Bosonen vs. Fermionen.	54
20.17	Standardmodell der Teilchenphysik.	57
20.18	Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.	63
20.19	Entstehung oder Vermeidung von Fluoreszenzlinien bei verschiedenen Scheibenmodellen.	65
20.20	Staubtorus: Staubabsorption formt ein Kreuz inmitten von M51, beobachtet mit dem HST.	68
20.21	Sonne im Licht von Helium-II, beobachtet mit SOHO.	72
20.22	Der offene Sternhaufen <i>Pismis 24</i> mit massereichen, jungen Sternen (rechts) und der Emissionsnebel NGC 6357 (links); HST 2006.	76
20.23	Stringtheorie: Punktteilchen, offene und geschlossene Strings.	79
20.24	duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.	81
20.25	Querschnitt durch die Morphologie eines AGN.	88
20.26	SN 1994D beobachtet mit HST.	95
20.27	Chandra-Röntgenbild des Supernovaüberrests Cas A.	97
20.28	SN 1987A beobachtet mit HST.	99
20.29	Die Spiegelwelt der Supersymmetrie.	102
20.30	Symmetriegruppe: unitäre Transformation.	108

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 $N_A = 6.0221 \times 10^{23}$ 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

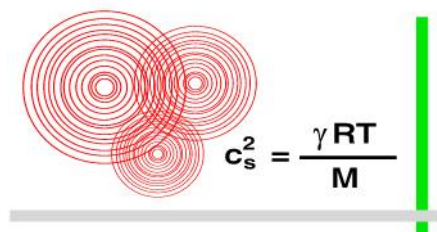


Abbildung 20.1: Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Gasen.

des einatomigen Edelgases Argon wiegt daher 40 g. Ein Mol Sauerstoff, was ein zweiatomiges Gas ist, wiegt $2 \times 16 \text{ g} = 32 \text{ g}$. Ein Mol des Gasgemischs Luft wiegt unter obiger Prämisse gerade $(0.78 \times 28 + 0.21 \times 32 + 0.01 \times 40) \text{ g} = 28.96 \text{ g}$. 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**.

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 Dichtefluktuations, 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.

Triangulation der scheinbaren Größe

Radius R des Objekts
in Abstand d erscheint
unter der scheinbaren
Größe 2φ .

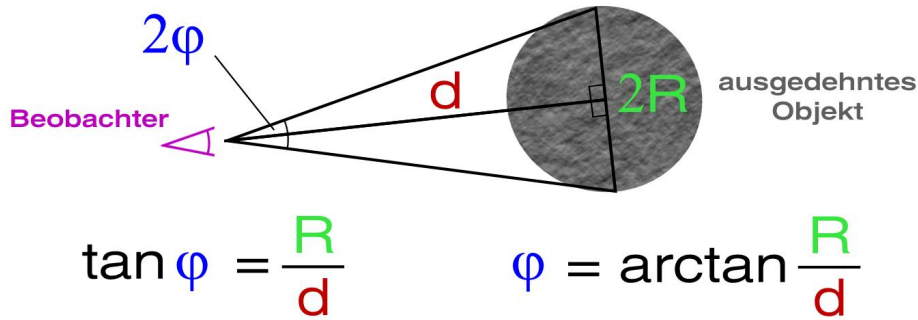


Abbildung 20.2: Triangulation der scheinbaren Größe aus Distanz und Radius.

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 anspruchsvoller

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.

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

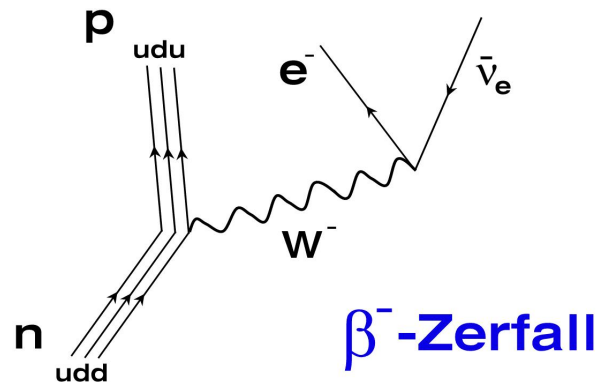


Abbildung 20.3: Feynman-Diagramm des Beta-Zerfalls.

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-Elektronen-Neutrinos (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 (H_2O). 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 ($2 \times 0 + 1 = 1$) Spinzustand. Die Teilchenphysiker sagen dazu *Spinsingulett*. Ist hingegen $S = 1/2$, so gibt es $2 \times 1/2 + 1 = 2$ Zustände; dies ist das *Spindublett*. $S = 1$ generiert $2 \times 1 + 1 = 3$ 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 Isospinsingulets** 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.

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 Gravitationsfeldes, 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 *Ruhemasse* null, d. h. im Bezugssystem, das sich mit dem Licht bewegt, hat Licht keine Masse.)

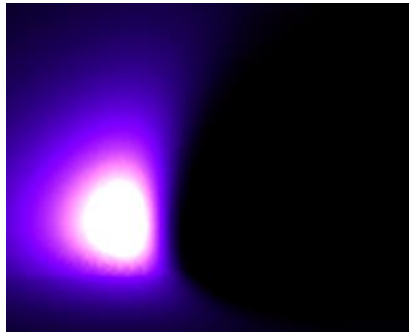


Abbildung 20.4: Schwarzes Loch: Computersimulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Schwarzes Loch.

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. $a = J/Mc$ 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-Nordström-Lösung (1918). Ein Reissner-Nordström-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-Nordström- 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!

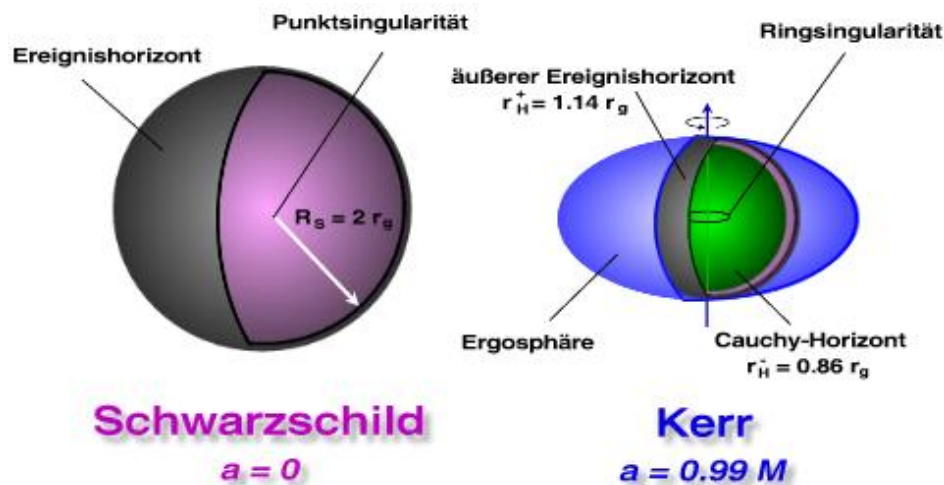


Abbildung 20.5: Schwarze Löcher: Schwarzschild vs. Kerr.

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:

Solche 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 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 eines 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 Schlüsselement 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 ($\text{Fe K}\alpha$). 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 Himmelsphäre 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 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



Abbildung 20.6: Das Innere Schwarzer Löcher in verschiedenen Theorien.

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

$$g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g^{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g^{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g^{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g^{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/(1 - 2M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1 - 2M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(r \sin \theta)^2 \end{pmatrix},$$

und in kovarianter Form

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{\phi\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(1 - 2M/r) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(1 - 2M/r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2 \theta \end{pmatrix}.$$

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 $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ und der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299\,792.458 \text{ km/s}$.

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 Horisonradius 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 'weicheeren' 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

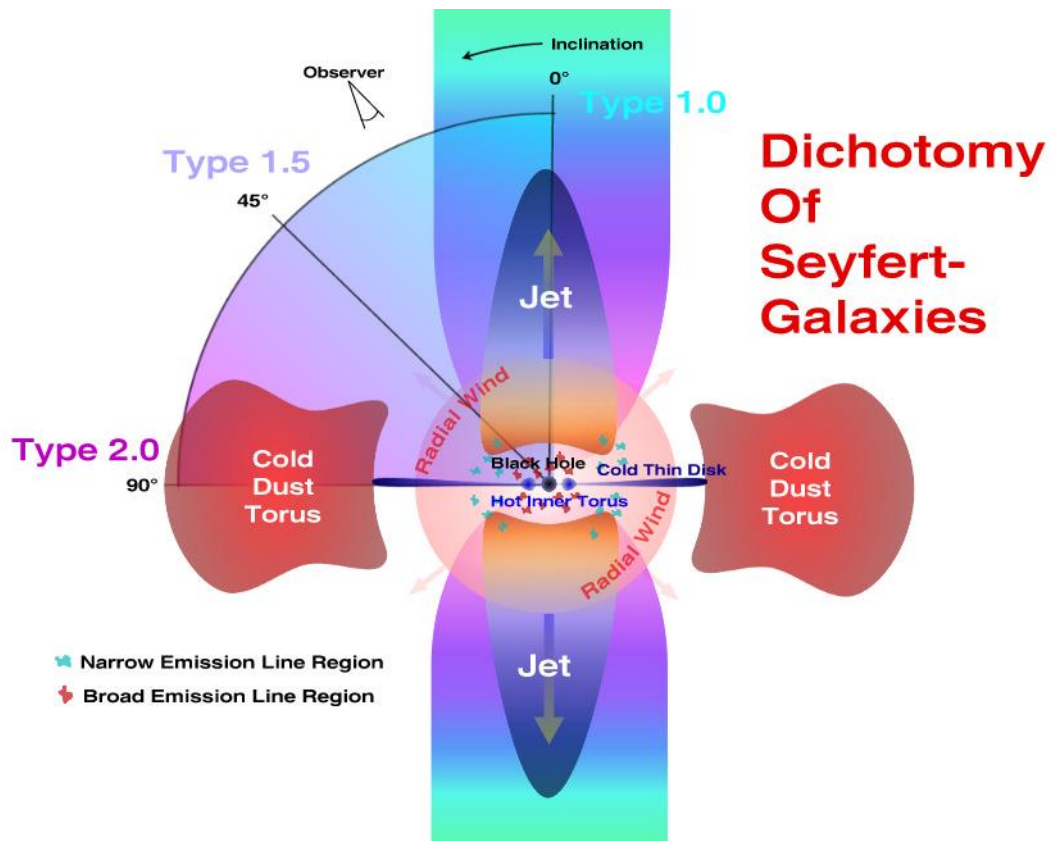


Abbildung 20.7: 2D-Schnitt durch Seyfert-Galaxie.

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 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.



Abbildung 20.8: Circinus Galaxie, eine Seyfert-Galaxie Typ-2, beobachtet 2000 mit HST.

- ◇ **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.
- ◇ 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

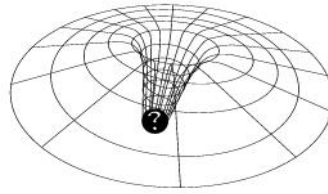


Abbildung 20.9: Singularität.

'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 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! Anwarter 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 Rechnungen 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 Holosternen 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 Wurm Löcher). 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.

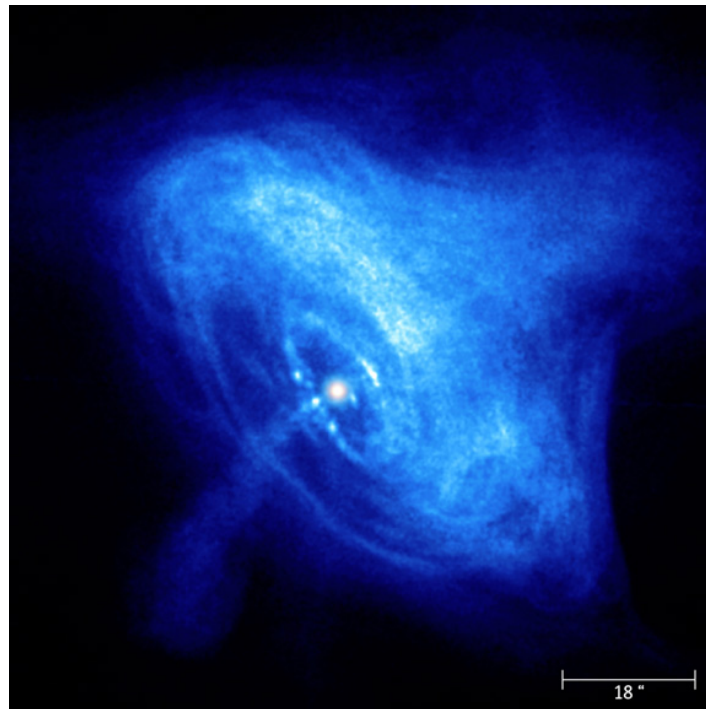


Abbildung 20.10: Chandra-Röntgenbild des Krebsnebels mit Pulsar.

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 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 Gravitation 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 Mondschaten 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.

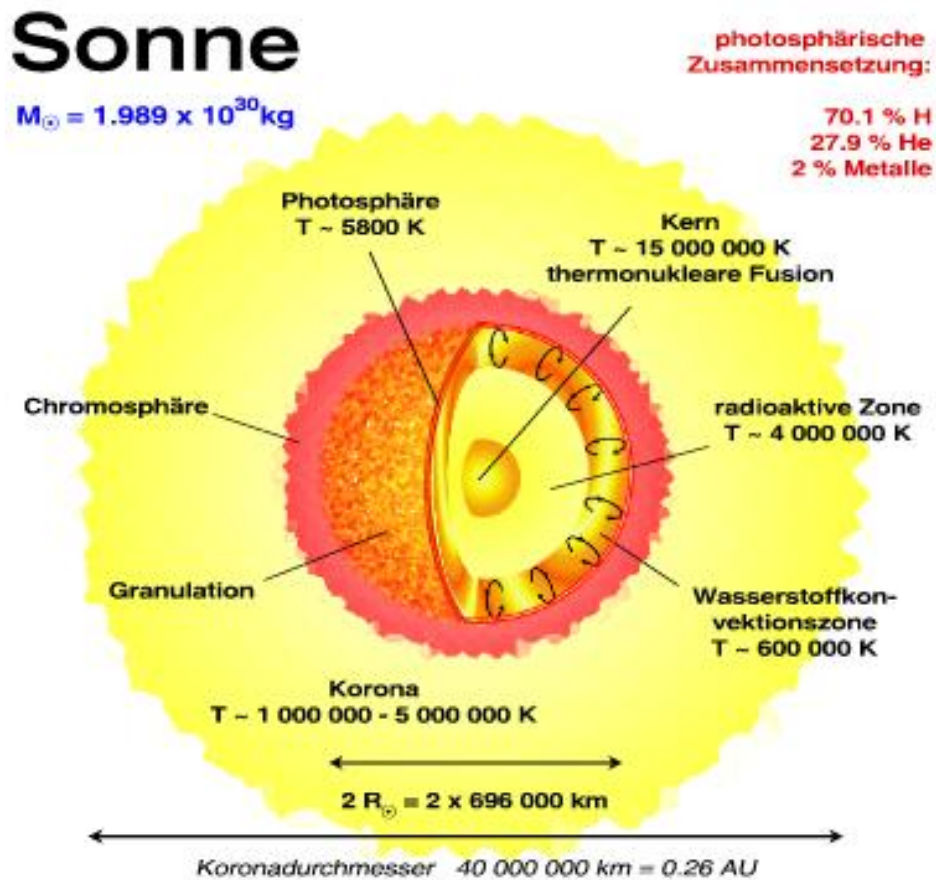


Abbildung 20.11: innere Struktur der Sonne.

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 intergranularem 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 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

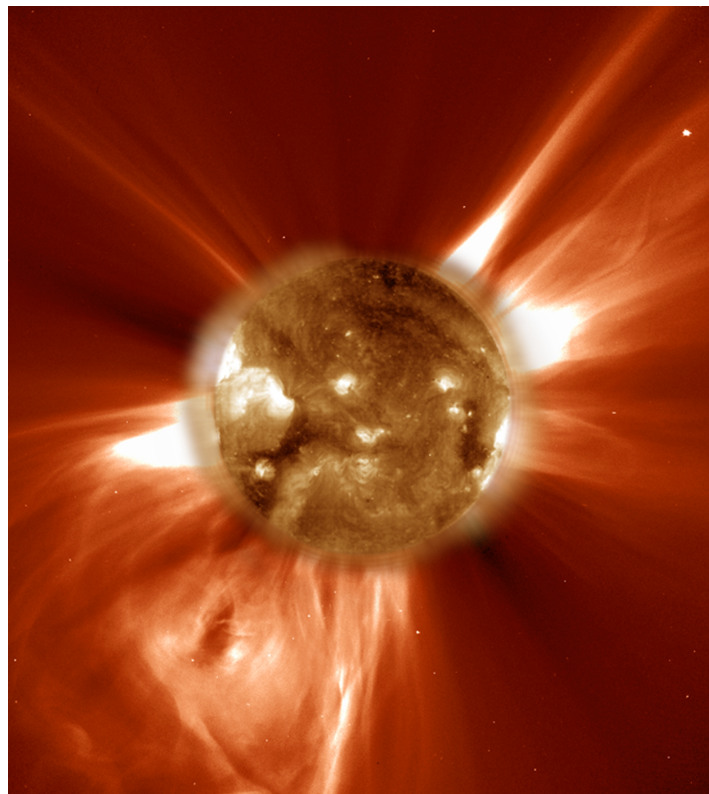


Abbildung 20.12: SOHO-Bild der Sonnenstürme und Massenausflüsse.

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 $H\alpha$ -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} m²
- ◇ Sonnenvolumen: 1.41×10^{27} m³
- ◇ 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 = 3.853×10^{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: $g_{sol} = 274.0 \text{ m/s}^2 = 27.93 \text{ g}$ (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: $v_{esc} = 617.7 \text{ km s}^{-1}$
- ◇ siderische Rotationszeit an mittleren Breiten: $2.1928 \times 10^6 \text{ s} = 23.38 \text{ d}$ (differenzielle Rotation)
- ◇ Inklination der solaren Äquatorebene gegen die Ekliptik: 7 Grad 15 Minuten
- ◇ mittlere Entfernung der Sonne zur Erde: $149.597870 \times 10^6 \text{ km} = 1 \text{ AU}$. 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 Stern gases: 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 **Weißer 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 **Weißer 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*



Abbildung 20.13: aktuelle Sequenz der Spektraltypen von Sternen.

(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. 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 'Oh, Be A Fine Girl, Kiss My Lips Tenderly.' (oder ähnlichen) merken kann. Mein Beitrag zu deutschen Merksätzen lautet: 'Ordentliche Bälle Aus Feurigem Gas Können Mehr Leuchten, Tja!'.

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 Moleküllinien 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** (H₂O) und **Methan** (CH₄). 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

MICHELSON INTERFEROMETER

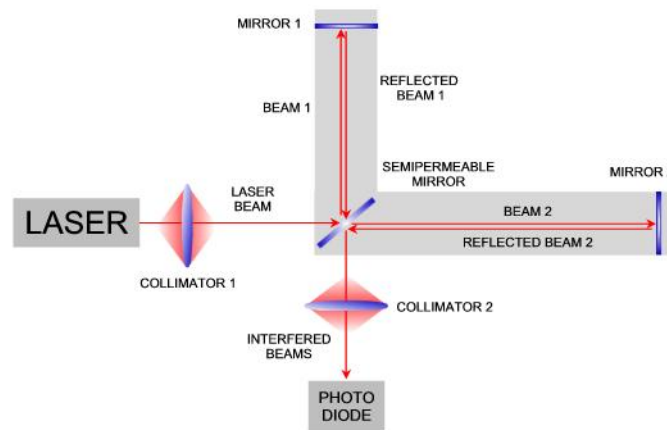


Abbildung 20.14: Bauweise eines Michelson-Interferometers.

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.

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 Messsystem 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 $E = mc^2$

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

relativistischer Pythagoras

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

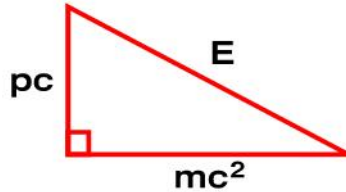


Abbildung 20.15: Relativistischer Energieerhaltungssatz: 'relativistischer Pythagoras'.

mit der relativen Geschwindigkeit v des Körpers und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c)

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

mit

$$\beta = v/c,$$

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: $E = E_0 + E_{\text{kin}} + \dots$. Die kinetische Energie ist der klassisch bekannte Term: $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_0 v^2$. Der erste Term jedoch ist neu: $E_0 = m_0 c^2$ 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.

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 Zeitpunkt selbst (also Koordinatenzeit und den drei räumlichen Koordinaten) abhängen. Die Krümmung kann sich von Zeitpunkt zu Zeitpunkt 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 $\mathbf{S}$ 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 S_z (der Projektion des Spinoperators $\mathbf{S}$ auf die z-Achse) darstellen, wobei die diskreten Eigenwerte gerade die Produkte aus Planckschem Wirkungsquantum $\hbar$ geteilt durch 2π und der magnetischen Quantenzahl m sind. m kann bei einem Teilchenspin S die Werte $-S, -S+1, -S+2, \dots, +S$ 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 sprunghaft seine Knoten-Linien-Struktur. Darin sehen die Loop-Theoretiker Änderungen des

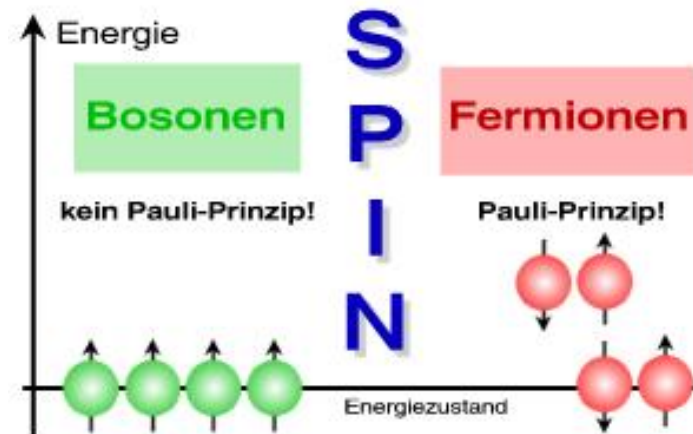


Abbildung 20.16: Bosonen vs. Fermionen.

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).
- ◊ 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. *slowness*), *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 Einfangszeiten der Neutronen, bewegt sich der s-Prozess **im unteren Bereich nahe am Stabilitätstal** auf der Nuklidkarte. Trägt man die Protonenzahl eines Korns (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 Sternengraß 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** $m - M = -5 + 5 \times \log(r)$ die **Entfernung** r dieser Objekte angegeben. 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, das 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.

Das Standardmodell der Teilchenphysik



Abbildung 20.17: Standardmodell der Teilchenphysik.

- ◊ 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). Alle konnten experimentell nachgewiesen werden. Die Quarks tragen neben der drittelzahligen elektrischen Elementarladung eine Farbladung (daher das *chromos*, grch. 'Farbe', im Begriff Quanten*chromodynamik*). 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 $\bar{u}$), negativ (d , $\bar{u}$) und positiv (u , $\bar{d}$) geladen sind, die Kaonen sowie das Psi-Teilchen (eine Realisierung von *Charmonium*), das aus einem c -Quark und einem $\bar{c}$ -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, dass 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 statet 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 Alltagsgeschäft 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) × SU(2) × 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 schtzen 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, Polarisierung 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 Ionenhllen, 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 Bereiche 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 Aufsammlens 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 Einfallsbewegung 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: $T \propto r^{-3/4}$; sie nimmt mit der Masse M des Zentralobjekts ab: $T \propto M^{-1/4}$, 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 aufammelnden 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).

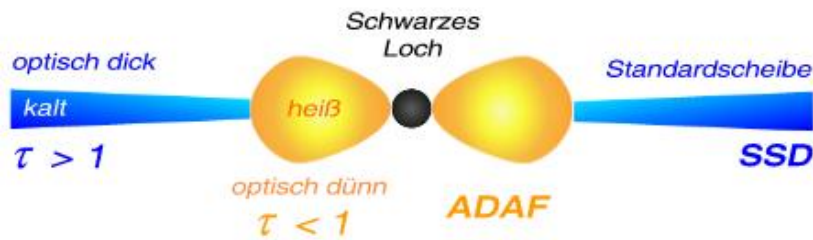


Abbildung 20.18: Schema eines Akkretionsflusses aus Standardscheibe und ADAF.

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 einem 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 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.

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 diese 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 (paradoxe Weise) 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

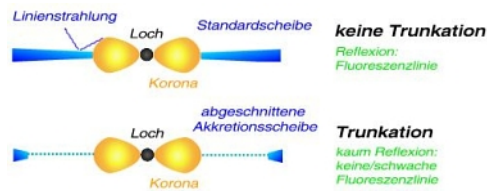


Abbildung 20.19: Entstehung oder Vermeidung von Fluoreszenzlinien bei verschiedenen Scheibenmodellen.

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 erstrebenswert 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 Slipher* 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 **Moleküllinien** 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 Aggregatzustand 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 - *asymptotic giant branch* - 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 differentiellen 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 verbreiteter 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

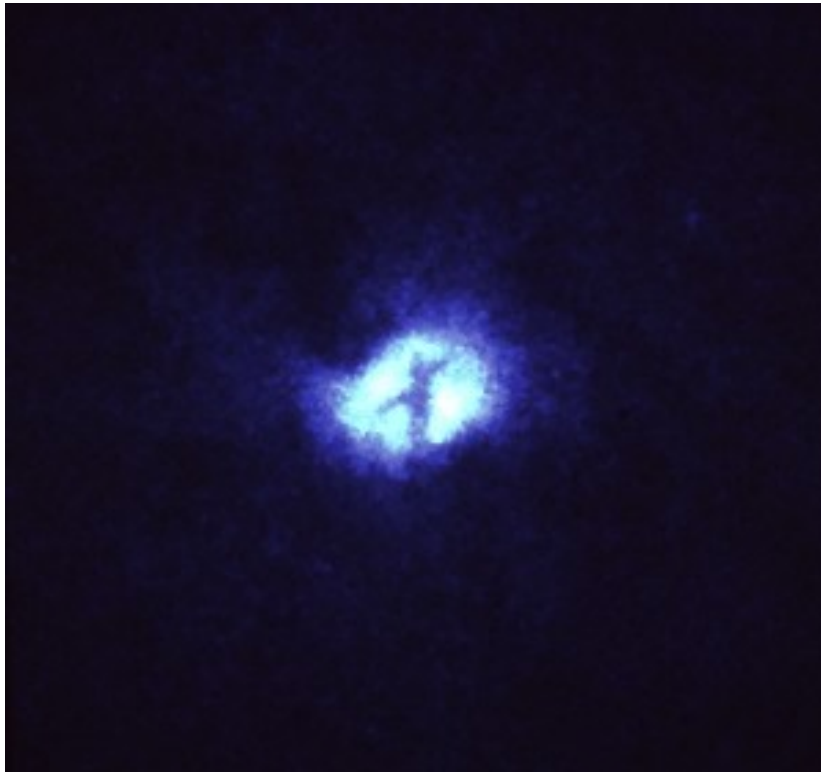


Abbildung 20.20: Staubtorus: Staubabsorption formt ein Kreuz inmitten von M51, beobachtet mit dem HST.

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 Staubreiservoir 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 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 hydrostatische 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 Wirtstern 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 Material in das 'Nadelöhr Loch'. Das kompakte Gebiet wird dabei stark aufgeheizt 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 Gammasppektren.

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

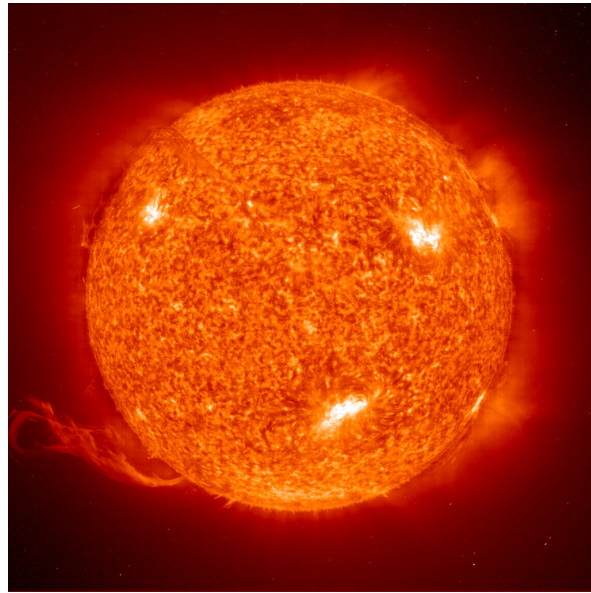


Abbildung 20.21: Sonne im Licht von Helium-II, beobachtet mit SOHO.

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 'Sterngeburt' 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 beschriebenen Staubsablimation 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).

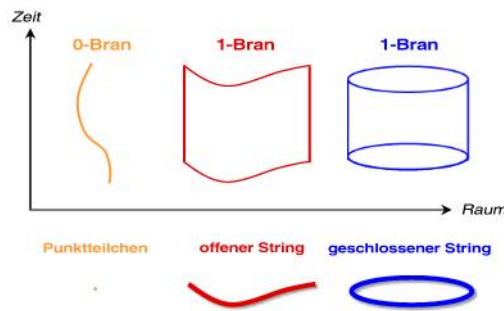


Abbildung 20.23: Stringtheorie: Punktteilchen, offene und geschlossene Strings.

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 Wirkungsfunctionale 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**

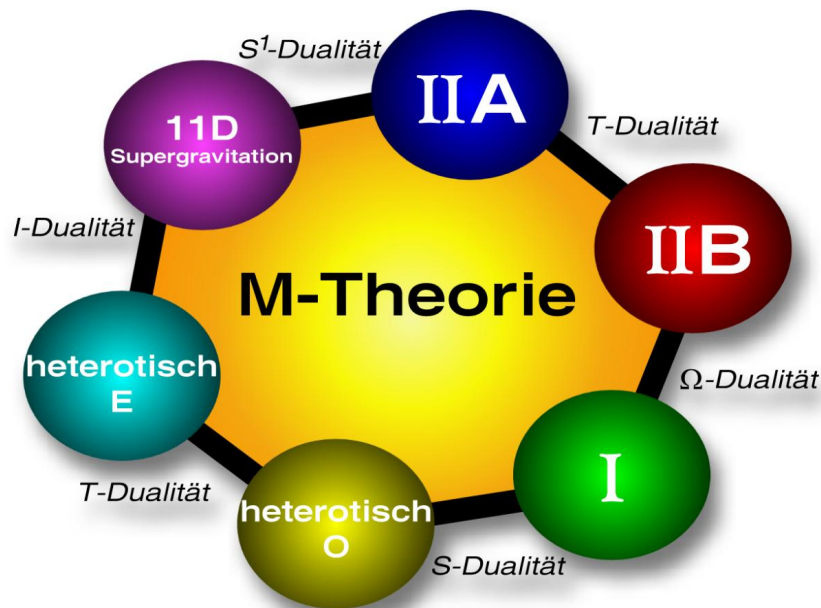


Abbildung 20.24: duale Verknüpfung von fünf Stringtheorien und der Supergravitation zur M-Theorie.

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-Lagrangedichte

$$\mathcal{L}_{\text{Einstein}} = \sqrt{-g}R$$

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-Nordström-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) vorherrscht! 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 nehmen, 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 AdS₅-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.

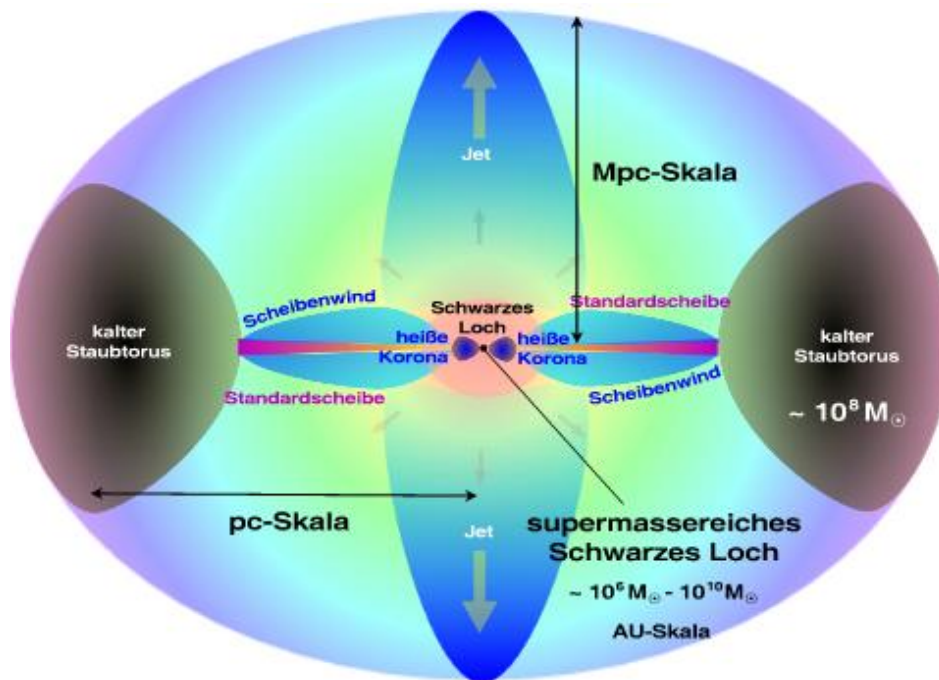


Abbildung 20.25: Querschnitt durch die Morphologie eines AGN.

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 advective 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):

$$M_{\text{SMBH}} \propto \sigma^4.$$

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):

$$M_{\text{SMBH}} \propto M_{\text{bulge}}^{1.12}.$$

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 $z \approx 6$ (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 Stern Giganten gehören zur so genannten Population III. PopIII-Sterne sind so schwer, dass sie am Ende ihrer kurzen Sternkarriere 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 $z \approx 6$ 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 gemutmaß, 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 Supernovatyphen

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 Angström 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 Ermittlung 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 Beobachtungsfiler. 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 II_n**, die ein bisschen Wasserstoff im Spektrum anzeigt, der vom Sternwind 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 Sternengeneration 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 '-remnent'). 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

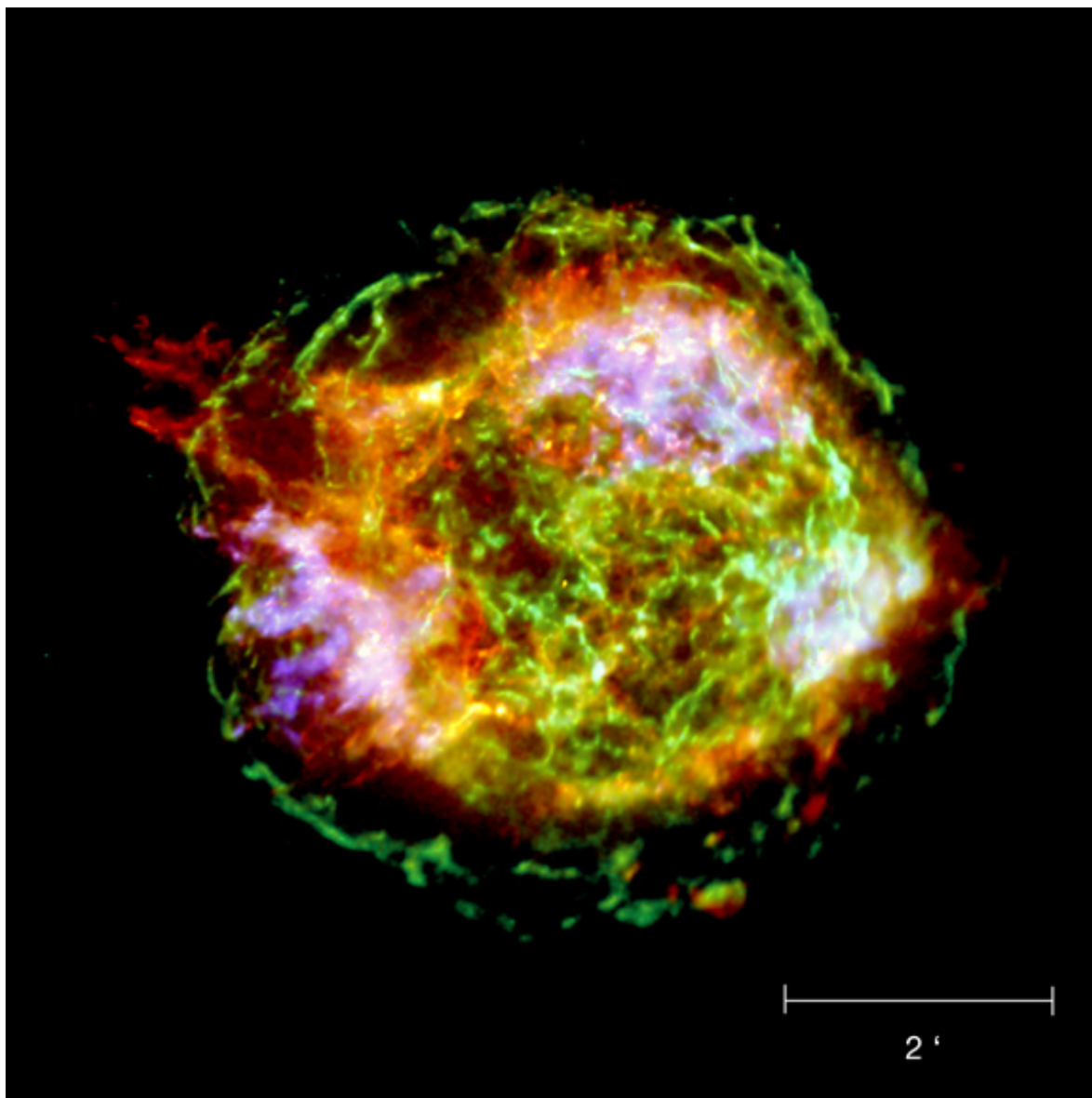


Abbildung 20.27: Chandra-Röntgenbild des Supernovaüberrests Cas A.

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 $100 \text{ foe} = 10^{53} \text{ erg}$! 1 foe ist eine Einheit, die die Supernovaforscher eingeführt haben. Sie entspricht der typischen Energie einer Supernova: $1 \text{ foe} = 10^{51} \text{ erg}$ (*ten to the power of fifty-one ergs*).

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 $z \lesssim 10$ 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.

Neutrino-physik besteht darin, dass die SN 1987A **erstmalig 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. Gammablitzes 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 **Weißer 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 Austauscheteilchen'. 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 Austauscheteilchen erhalten ein 'ino' als Suffix angehängt (siehe Illustration oben). Auf diese Weise erhält man nun neue SUSY-Teilchen, die man neben anderen als Selektrenen, Squarks, Neutralinos, Gluinosen 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

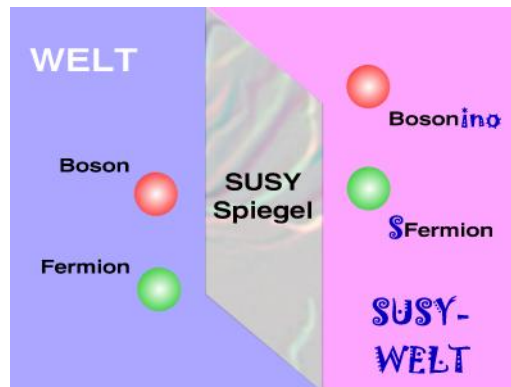


Abbildung 20.29: Die Spiegelwelt der Supersymmetrie.

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 Angestregtes 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 beispielsweise *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):

$$H|\Psi\rangle = E|\Psi\rangle; A|\Psi\rangle = a|\Psi\rangle,$$

und man kann den *quantenmechanischen Erwartungswert* a des Operators bilden

$$\langle \Psi | A | \Psi \rangle = a, \quad a \text{ ist Erhaltungsgröße!}$$

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 sprunghaft 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 aussieht (Isotropie), während ein Eiskristall nur unter bestimmten Sichtwinkeln immer wieder gleich aussieht (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 Bardeen*, *Leon Cooper*, *Bob Schrieffer*) 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 **Symmetriepoperatoren** 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.

Invarianz unter unitärer Transformation

$$\begin{aligned} \mathbf{U}\mathbf{H}\mathbf{U}^+ &= \mathbf{H} \\ \mathbf{U} &= e^{i\mathbf{G}} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \mathbf{H}: \text{Hamiltonian} \\ \mathbf{U}: \text{unitärer Operator} \\ \mathbf{G}: \text{Erzeugende} \end{array}$$

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 **$N^2 - 1$ 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*).

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