
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

8.1	Röntgendoppelstern.	1
8.2	Andromedagalaxie M31.	3
8.3	Galaxie: Millennium Run 2005: Struktur des Kosmos im Großen.	5
8.4	Illustration eines GRBs.	6
8.5	Illustration einer Neutronensternverschmelzung.	8
8.6	Feuerball-Modell für GRBs.	9
8.7	Teile von Shoemaker-Levy 9 fallen 1994 auf Jupiter.	18
8.8	Vulkanausbruch auf Io.	19
8.9	Antennengalaxien NGC4038-4039, HST 2006.	20
8.10	Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel.	21
8.11	Phasen des Zerreiß-Szenarios eines Sterns durch Gezeitenkräfte.	22
8.12	Schwarzschild- versus Gezeitenradius für sonnenartige Sterne.	26
8.13	Struktur eines Gravasterns.	29
8.14	Illustration des Epizykel-Modells.	34
8.15	Inspirierte Fallobst zur Gravitationsforschung?.	36
8.16	einfache Darstellung einer gekrümmten Raumzeit.	37
8.17	Feldgleichung der ART.	37
8.18	Ende eines Sterns in Abhängigkeit seiner Masse.	45
8.19	Galaxienkollision.	50
8.20	Doppelbild eines Quasars durch Galaxiencluster als Gravitationslinse.	50
8.21	Gelinste Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln.	52
8.22	Gravitationsrotverschiebung um ein Schwarzes Loch.	56
8.23	ebene Gravitationswellen in der TT-Eichung.	59
8.24	Aufbau des Michelson-Interferometers.	63
8.25	Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).	69
8.26	Definition und Eigenschaften einer Gruppe.	74

8 Lexikon G

8.1 Galaktischer Schwarz-Loch-Kandidat

Diese Bezeichnung basiert auf der Fachsprache, engl. *Galactic Black Hole Candidate* oder GBHC, und meint stellare Schwarze Löcher, die sich in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, tummeln.

In der Astronomie beschreibt das Attribut *galaktisch* etwas, das mit einer Galaxie, einer Ansammlung von hundert Mrd. Sternen zu tun hat. In der Regel bezieht sich *galaktisch* ausschließlich auf unsere Milchstraße.

8.1.1 absolut obsolet

Das Akronym GBHC war vor einigen Jahren noch recht gebräuchlich, wurde nun jedoch durch die Redewendung *galaktisches Schwarzes Loch* ziemlich verdrängt. Achtung, Quelle für ein Missverständnis: Mit *galaktisches Schwarzes Loch* ist **nicht** das zentrale supermassereiche Schwarze Loch einer Galaxie gemeint!

8.1.2 Wirt & Parasit

Das Schwarze Loch hat einen Begleitstern und verrät sich dadurch, dass Materie von diesem durch den Lagrange-Punkt oder durch Wind-Akkretion den Weg zum Loch findet. In der Umgebung des Lochs strahlt dann hell eine Akkretionsscheibe. Die Situation illustriert Abbildung 8.1. Die Vorgänge werden detailliert im Eintrag Röntgendoppelstern erläutert. Es gibt viele Parallelen zur Physik der AGN.

8.1.3 Beispiele

Prominente Quellen sind Cyg X-1, eine Röntgenquelle im Sternbild *Schwan* und *GRO J1655-40*, ein so genannter Mikroquasar, der sogar einen Jet hat. Diese Röntgenquellen sind auf äußerst kurzen Zeitskalen **variabel**, aber **nicht periodisch** (höchstens quasi-periodisch,

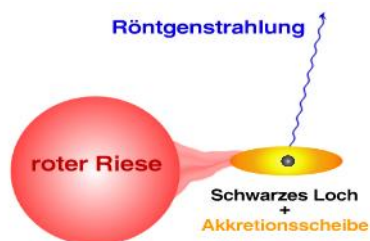


Abbildung 8.1: Röntgendoppelstern.

siehe Quasi-Periodische Oszillationen, QPOs). Dies erklärt sich vermutlich dadurch, dass die Akkretionsrate zeitlich variabel ist, zum Beispiel dadurch bedingt, dass der Begleitstern pulsiert und damit das Schwarze Loch unterschiedlich stark füttert. Daher oszilliert das Übergangsgebiet von kalter Standardscheibe (SSD) zu heißer Korona radial.

8.2 Galaxie

In der Astronomie bezeichnet Galaxie eine Ansammlung von einigen 100 Milliarden Sternen. Galaxien gehören damit zu den größten Strukturen im Universum.

8.2.1 Griechische Milch macht's

Wer den klaren Nachthimmel betrachtet, kennt den Anblick, wie sich die Sterne unregelmäßig verteilen. Unter guten Sichtbedingungen fällt ein schleierartiges Band auf, das sich um den ganzen Himmel windet. Bei genauer Betrachtung entpuppt sich dieses Band als Myriaden von Sternen, die alle zu unserer Heimatgalaxie, der **Milchstraße**, gehören.

Das Wort $\gamma\acute{\alpha}\lambda\alpha\kappa\tau\omicron\varsigma$, *gala*, *galaktos* ist altgriechischer Herkunft und bedeutet 'Milch'. Einerseits hat das einen Bezug zum milchig-trüben Erscheinungsbild der Milchstraße. Andererseits gibt es eine Verbindung zur griechischen Mythologie: Als nämlich Herakles als Säugling von Hera gestillt wurde, saugte er so kräftig, dass Hera ihn von sich stieß und Milch über den Himmel spritzte und dabei das Band der Milchstraße hinterließ.

8.2.2 Von Spiralen, Balken und Ellipsen

Könnte man die Milchstraße von außen betrachten, so würden wir sehen, dass die Scheibe aus Sternen, Gas und Staub ihr Antlitz dominiert. Die Scheibe zeigt dabei weitere, spiralförmige Strukturen, wie sie in der Abbildung 8.2 zu sehen sind: dies ist die berühmte Andromedagalaxie (M31), eine Begleitgalaxie der Milchstraße (Credit: R. Gendler, HST/NASA 2002). Beide Galaxien ähneln sich sehr. Galaxien mit dieser Gestalt (*Morphologie*) heißen **Spiralgalaxien**.

Es gibt jedoch auch ganz andere Gestalten unter den Sternsystemen, z. B. Spiralgalaxien mit einem zentralen, dicken Balken. Es handelt sich dabei um eine dynamische Struktur aus Sternen. Solche Galaxien nennt man **Balkenspiralgalaxien**. Außerdem fanden die Galaxienforscher **elliptische Galaxien**, manchmal auch nur kurz 'Ellipsen' genannt. Sie sehen aus wie eine kugelige oder ovale Wolke, und es gibt sie in groß (*Riesenellipsen*) und in klein (*Zwergellipsen*). Alles, was von der Gestalt her ganz anders aussieht wird in der Gruppe der **irregulären Galaxien** zusammengefasst. Zu diesem Typus gehören z. B. die Kleine und die Große Magellansche Wolke, die ebenfalls der Milchstraße verhältnismäßig nahe (etwa 150000 Lichtjahre) sind.

Alle diese morphologischen Galaxientypen werden in der Hubble-Klassifikation geordnet.

8.2.3 Von Strahle- und Dunkelmännern

Die Astronomen schätzen die Gesamtzahl aller Galaxien im Kosmos auf einige hundert Milliarden! In diesen Galaxienzoo kann man auch mit einem anderen Kriterium Ordnung bringen: mit der Helligkeit. Es gibt weniger helle und hell strahlende Galaxien. Die Milchstraße ist beispielsweise nicht so hell und wird deshalb zu den 'normalen', d. h. **inaktiven Galaxien**



Abbildung 8.2: Andromedagalaxie M31.

gezählt (engl. *inactive*, *dormant*: 'schlafend'). Demgegenüber stehen die **aktiven Galaxien** oder genauer gesagt die **Aktiven Galaktischen Kerne (AGN)**. Deren enorme Leuchtkraft speist ein supermassereiches Schwarzes Loch (*supermassive black hole*, SMBH), das im Zentrum einer jeden (aktiven wie inaktiven) Galaxie lauert. Wird das Loch mit Materie gefüttert, kommt es im Zuge dieser Akkretion zu extrem hellen Leuchtprozessen. Ist das Loch auf Diät, weil es kein Futter in der Umgebung gibt, so bleibt es unauffällig und dunkel, wie bei der Milchstraße. Dennoch beobachten die Astronomen ein SMBH im Herzen unserer Heimatgalaxie, das etwa 3.5 Millionen Sonnenmassen schwer ist und mit der Radioquelle Sgr A* in Verbindung gebracht wird.

8.2.4 Galaxienjagd in der Tiefe des Alls

Wenn Astronomen sehr leuchtschwache, sehr dunkle Objekte im Kosmos beobachten möchten, müssen sie genauso vorgehen wie ein Fotograf, der im Dunkeln fotografiert: sie müssen lange belichten. Die Blende bzw. Öffnung des Teleskops bleibt also lange auf und sammelt viel Strahlung der kosmischen Quellen auf. Mit jedem Photon, das aufgesammelt wird, erhält der Astronom mehr Informationen. Er misst somit ein Spektrum aus, das er mit physikalischen Gesetzen interpretiert. Durch den *Fit* des geeigneten Modells an die Daten versteht der Astronom, um welche Quelle es sich handelt und welche Eigenschaften (Leuchtkraft, Entfernung, Alter, Zusammensetzung etc.) sie hat.

Die moderne Forschung stellt viele dieser lang belichteten Fotos von Himmelsausschnitten bei allen möglichen Strahlungsenergien her: diese Bilder heißen Deep Fields und verraten viel über die Geschichte des Universums, z. B. wie sich Galaxien und darin befindliche schwere Löcher entwickelt haben.

8.2.5 Galaxien sind soziale Wesen oder Einzelgänger

Tja, so ein Sternsystem hat eben doch auch menschliche Züge. So haben Astronomen durch jahrelange Beobachtungen (Surveys) herausgefunden, dass Galaxien sich in Gruppen formieren können, die sie **Galaxienhaufen** (engl. *clusters*) nennen; oder sie stehen mehr oder weniger für sich und heißen **Feldgalaxien**. Damit nicht genug: die Gruppen verdichten sich an manchen Orten zu noch dichteren Haufen, so dass der Begriff **Galaxiensuperhaufen** oder **Superhaufen** (engl. *super clusters*) angebracht ist. Das Zentrum dieser Superhaufen ist eine extrem massereiche Galaxie - im Falle des Virgo-Haufens ist es der AGN M87.

Die erwähnten Beispiele Milchstraße, Andromedagalaxie, Magellansche Wolken und eine Horde von Zwerggalaxien bilden einen kleinen Galaxienhaufen, die so genannte Lokale Gruppe.

8.2.6 Großskalige Strukturen

Die relevanten Raumskalen bei der Betrachtung von Galaxien sind riesig und betragen hunderte von kpc (Galaxiendurchmesser) über Mpc (Distanz zwischen Galaxienhaufen) bis Gpc (Durchmesser von Superhaufen). Sowohl Beobachtungen, als auch Simulationen auf Supercomputern zeigen, dass die Anordnung dieser großskaligen Strukturen sehr unregelmäßig ist: Galaxien und Galaxienhaufen ordnen sich auf Ketten zu fadenförmigen Gebilden an, die an Knotenpunkten zusammenstoßen. An den Knotenpunkten sitzen gerade die Superhaufen mit ihren extrem massereichen, zentralen Riesenellipsen. Zum Erstaunen des Betrachters sind dazwischen extrem große 'Blasen mit Nichts', die so genannten Strukturbildung, Voids.

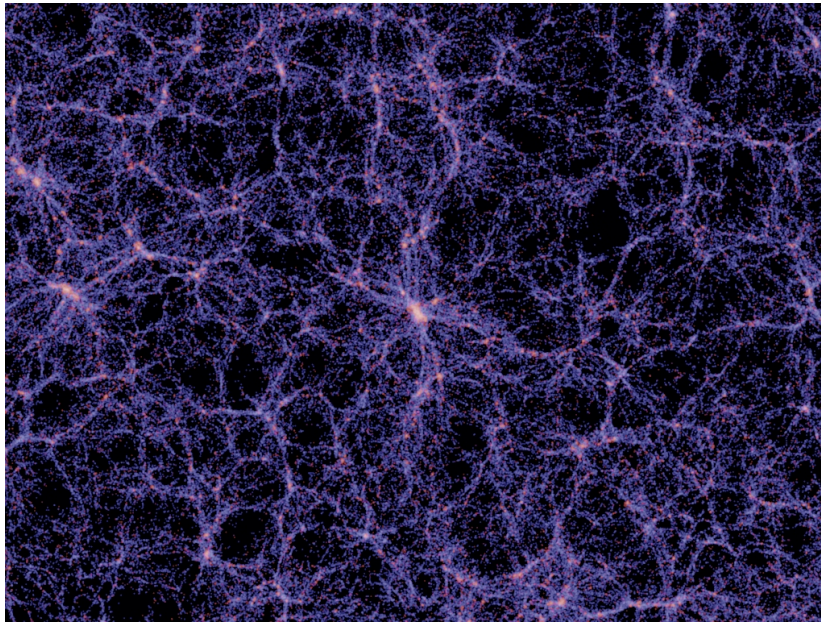


Abbildung 8.3: Galaxie: Millennium Run 2005: Struktur des Kosmos im Großen.

Den visuellen Eindruck gibt sehr gut der *Millennium Run* in dem Bild 8.3 wieder, bei dem ein Supercomputer nach monatelanger Rechnung das Aussehen eines Stücks Universum ausgespuckt hat (Credit: *Volker Springel et al.* 2005, Virgo-Konsortium und MPA).

Diese Untersuchungen sind wesentlich für die moderne Kosmologie, da im Rahmen der Strukturbildung verstanden werden muss, wie sich nach dem Urknall aus der 'Ursuppe' Sterne, Galaxien und schließlich Leben gebildet haben.

8.2.7 kritische Anmerkung zum Schluss

Wie die Diskussion um den Planetenbegriff auf der Tagung der Internationalen Astronomischen Union in Prag im Sommer 2006 gezeigt hat, stellt schon die klare Benennung einfacher, kosmischer Strukturen ein Problem dar. Letztendlich fußt eine eindeutige Definition auf einem recht detaillierten und umfangreichen Kriterienkatalog - das ist nicht immer praktikabel. Einer vergleichbaren Problematik begegnet man bei allen diesen Begrifflichkeiten wie *Planet*, *Stern* oder *Galaxie*. So ist der Übergang vom Kugelsternhaufen über die Galaxie zum Superhaufen eher kontinuierlich. Dennoch sollte aufgrund der Erfahrung klar sein, worüber man spricht.

8.2.8 Weitere Literatur

- ◊ Web-Artikel: Das größte Schwarze Loch der Milchstraße

8.3 Gamma Ray Burst

Es handelt sich dabei um **Strahlungsausbrüche** im hochenergetischen Bereich der Gammastrahlung, die auf sehr kurzen Zeitskalen (Millisekunden bis einige hundert Sekunden)



Abbildung 8.4: Illustration eines GRBs.

am Himmel beobachtbar sind. **Gamma Ray Bursts** werden mit dem Akronym GRB abgekürzt. Im Deutschen ist der Begriff Gammastrahlenausbruch geeignet. Wie ein GRB in etwa aussieht, zeigt die Illustration 8.4 (Credit: Website des Röntgensatelliten Chandra, NASA/CXC). Dieser Lexikoneintrag demonstriert, dass GRBs ein sehr aktives und aktuelles Forschungsgebiet der Astronomie sind. Allein in den letzten Jahren wurden umwälzende Entdeckungen gemacht.

8.3.1 Am ganzen Himmel - im ganzen Kosmos

GRBs werden überall am Himmel in alle Richtungen gleichermaßen (*isotrop*) beobachtet. Es gibt keine Häufung in der galaktischen Ebene, was dafür sprechen würde, dass sie nur in der Milchstraße auftreten oder beobachtbar sind. Die Diagnose, dass GRBs isotrop am Himmel auftreten, basiert vor allem auf dem BATSE-Experiment an Bord des *Compton-Gamma-Ray Observatory* (CGRO), das über 2700 GRBs detektieren konnte. Astronomen interpretieren das so: GRBs sind kosmologisch, d. h. sie können auch in sehr großen Entfernungen, bei **sehr großen kosmologischen Rotverschiebungen** bis $z \sim 6$ beobachtet werden.

8.3.2 Pionierleistung

Der erste GRB wurde bereits am 02. Juli 1967 von den amerikanischen Vela-Satelliten VELA 4A und B entdeckt, die für diese hochenergetische Strahlung empfindlich waren. Eigentlich dienten diese Satelliten nicht astronomischen, sondern militärischen Zwecken, denn die USA wollten damit die Gammastrahlung von Nuklearwaffenexplosionen aufspüren. In dieser Ära des Kalten Kriegs waren die Tests von Kernwaffen verboten.

Gammastrahlung kennt man schon seit längerer Zeit aus der Kernphysik. Wenn radioaktive Atomkerne (*Radionuklide*) zerfallen, bilden sie häufig einen hoch angeregten Tochterkern,

der sich unter Aussendung von Gammastrahlung abregt. Kernphysiker nennen das den Gamma-Zerfall. Doch die Quelle der kosmischen Gammastrahlung eines GRB ist **nicht Radioaktivität!**

8.3.3 Katalogisieren von GRBs

Zunächst ein paar Worte zur Nomenklatur: Die Fülle der beobachteten GRBs - typisch ist ein GRB am Tag - erfordert eine Katalogisierung. Ein Gammastrahlenausbruch wird mit den Buchstaben GRB eingeleitet, danach folgen sechs Ziffern, die das Beobachtungsdatum des Ausbruchs enthalten: Die ersten beiden Zahlen geben das Jahr an, die nachfolgenden beiden den Monat und die letzten beiden den Tag. So steht GRB 990705 für einen Gamma Ray Burst, der am fünften Juli 1999 beobachtet wurde. Gibt es mehrere GRBs pro Tag, werden sie aufsteigend mit Buchstaben des Alphabets gekennzeichnet, z. B. GRB950917A.

8.3.4 Beispiele

Nennen wir nun ein paar besondere GRBs: Der kürzeste Burst hatte eine Länge von 15 Millisekunden (GRB950917A), während der längste etwa 1000 Sekunden dauerte (GRB971208). Der am weitesten entfernte Burst ist GRB050904 mit einer Rotverschiebung von $z = 6.18$ (*Price et al.*, ApJ 2006), und der räumlich nächste war bei $z = 0.0085$ (GRB980425).

8.3.5 Durchbruch 1: das Nachleuchten bei anderen Wellenlängen

Im Jahr 1997 konnten die Quellen für GRBs - die *Gamma Ray Burster* - sogar optisch nachgewiesen werden und zwar als **optisches Nachleuchten** im Anschluss an den Ausbruch im Gammabereich. Astronomen bezeichnen das als **GRB-Nachleuchten** (engl. *GRB afterglow*) und betrachten vor allem die zeitliche Entwicklung des GRB-Leuchtens (umfangreicher Review: *van Paradijs et al.*, ARA& A 2000). Diese so genannte **Lichtkurve** zeigt sehr unterschiedliche Charakteristika in Form von Minima und Maxima. Irgendwann ist der GRB vorbei und die Lichtkurve am Minimum. Die Herausforderung der GRB-Forscher besteht darin, die unterschiedlichen Lichtkurven zu klassifizieren und die zugrunde liegende Physik zu verstehen.

Das Nachleuchten ist von immenser Wichtigkeit, weil es gestattet, die kosmologische Rotverschiebung zu bestimmen. Und siehe da: die GRBs befinden sich tatsächlich in ungeheuer großen Distanzen, Milliarden von Lichtjahren entfernt.

8.3.6 Durchbruch 2: zwei GRB-Typen

Zählt man die GRBs ab, die eine bestimmte Dauer haben, so ergibt sich ein Histogramm mit zwei (evt. drei) Maxima. Die Verteilung der GRBs ist demnach **bimodal**. Die Konsequenz: Astrophysiker unterscheiden heutzutage zwei Typen von GRBs, denen auch eine unterschiedliche Physik zugrunde liegt:

Lange GRBs dauern zwischen 2 und 1000 Sekunden. Die Astrophysiker sind davon überzeugt, dass in diesem Fall junge, sehr massereiche Sterne wie O-Sterne oder Wolf-Rayet-Sterne als Kollapsar (im engeren Sinne der Bezeichnung) enden und in einer Hypernova explodieren (*MacFadyen & Woosley*, ApJ 1999). Hypernovae sind noch heftigere Sternexplosionen als Supernovae (SN), aber von der Physik her verwandt. Zum Teil



Abbildung 8.5: Illustration einer Neutronensternverschmelzung.

treten Supernova und Hypernova sogar zusammen auf. Die Population der Vorläufersterne (engl. *progenitors*) sind vornehmlich junge, massereiche Sterne. Das bereits angesprochene Nachleuchten in anderen Wellenlängenbereichen wurde nur bei den langen GRBs bisher beobachtet!

Kurze GRBs dauern zwischen 0.01 und 2 Sekunden. Astrophysiker erklären diese Ausbrüche mit einem anderen physikalischen Szenario: **Verschmelzungsprozesse** von kompakten Objekten, insbesondere Doppelsternsysteme (*Binäre*) aus Neutronensternen, sollen im Moment der Kollision und Verschmelzung den hellen Gammablitz erzeugen (Narayan, Paczynski & Piran, ApJ 1992; Ruffert & Janka seit 1995). Die Fachleute bezeichnen das mit dem englischen Begriff *NS-NS merging*, wie es in der Abbildung 8.5 illustriert ist (Credit: Website des Röntgensatelliten Chandra, NASA/CXC). Es ist vermutlich auch möglich, dass kurze GRBs bei der Verschmelzung von einem Neutronenstern mit einem stellaren Schwarzen Loch erzeugt werden (Ruffert & Janka, A&A 1999). Hier lautet der Fachbegriff *NS-BH merging*. Doppelsternsysteme sind sehr häufig im Kosmos anzutreffen, so dass es plausibel ist, dass die genannten kompakten Binäre vorkommen und verschmelzen können. Die Population dieser Vorläufersterne sind eher alte Neutronensterne. Das Phänomen des Nachleuchtens wurde bei diesen kurzen GRBs nie beobachtet!

8.3.7 Ein sattes Rrrums!

Hier wird nicht gekleckert, sondern geklotzt: Gammastrahlenausbrüche sind die gigantischsten Explosionen, die im Universum bekannt sind. Der Energieoutput eines GRBs ist enorm, mit dem einer Supernova vergleichbar und übertrifft diese sogar. Es gibt dabei Unterschiede zwischen den kurzen und langen GRBs: Die freiwerdende Energie bei kurzen GRBs liegt bei etwa 10^{48} bis 10^{50} erg; lange GRBs setzen sogar etwa das Tausendfache frei, 10^{51} bis 10^{53} erg! Die Einheit erg ist eine typische Theoretiker-Einheit: $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ Joule}$. In der Supernova- und GRB-Physik gibt es außerdem die inoffizielle Einheit $1 \text{ foe} = 10^{51} \text{ erg}$; *foe* bezieht sich auf (*ten to the power of*) *fifty-one erg*. Der kanonische Wert von $5 \times 10^{50} \text{ erg}$ für die im GRB freiwerdende Energie wurde erst gefunden, als der Blauverschiebungseffekt (*Beaming*) berücksichtigt wurde (Frail et al., ApJ 2001). Zuvor gab es Vermutungen, dass

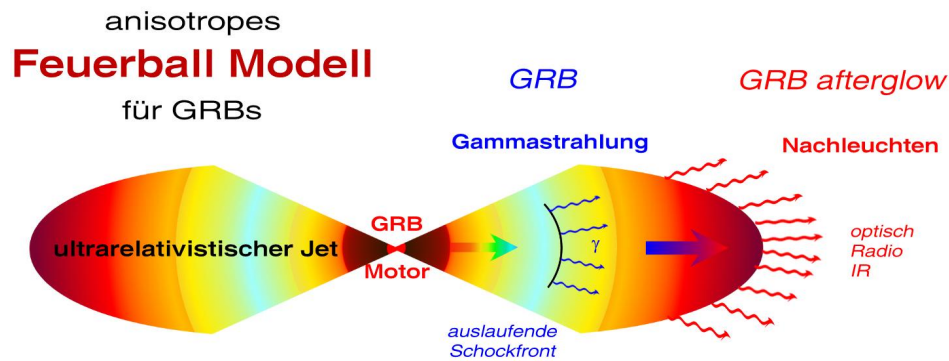


Abbildung 8.6: Feuerball-Modell für GRBs.

GRBs den fundamentalen Energieerhaltungssatz verletzen würden - diese Zweifel sind nun beseitigt.

8.3.8 GRBs - eine kosmische Gefahr

Ein Gamma Ray Burst nahe der Erde hätte fatale Folgen: die intensive, energiereiche Strahlung würde das Leben auslöschen, weil sie eine vergleichbar vernichtende Wirkung wie die Gammastrahlung aus Atomkernen hat. Die bekannte Schädigung des Erbguts oder die direkte Zerstörung des Lebens wären die Folgen eines nahen GRBs. Ein möglicher Kandidat eines langen GRBs ist der 'Superstern' η Carinae, der etwa 100 Sonnenmassen aufweist! Er ist mit 7500 Lj recht weit entfernt, doch wie eine Abschätzung im Lexikoneintrag Hypernova demonstriert, ist das irdische Leben von diesem Stern gefährdet. Jüngst konnte gezeigt werden, dass die langen GRBs mit dem größeren Energieoutput (also die gefährlicheren) in der Milchstraße sehr selten sind. Der Grund ist die interstellare Umgebung des GRBs: in der Milchstraße gibt es zu viele Metalle (dazu später unter dem Abschnitt *GRBs und SN*).

Im Detail hängt die Gefährlichkeit auch davon ab, wie der GRB zur Erde orientiert sein wird. Warum die Orientierung eine Rolle spielt, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

8.3.9 Durchbruch 3: Das Feuerball-Modell

Der so genannte **anisotrope Feuerball** (engl. *anisotropic fire ball*) ist das aktuell favorisierte, physikalische Modell, um GRBs zu verstehen (Meszaros & Rees 1997; umfangreicher Review: Meszaros, ARA& A 2002). In Abbildung 8.6 ist schematisch illustriert, wie das Modell funktioniert: Der 'GRB-Motor', entweder eine Hypernova oder ein Kollaps von mindestens zwei kompakten Objekten, treibt eine Schockfront nach außen. Dort trifft die Schockwelle auf das interstellare Medium (ISM). In diesem Zusammenhang nennt man das Umgebungsmedium um den Gammastrahlenausbruch auch *Circum Burst Medium* (CBM). Die Lorentz-Faktoren liegen bei 100 bis 1000, was Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Explosionsmaterials bis zu 99.99995% der Vakuumlichtgeschwindigkeit entspricht. Die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie werden bei diesen so genannten **ultra-relativistischen Geschwindigkeiten** wichtig. Am Bugschock dieser Front wird die kinetische Energie des Feuerballs auf die Elektronen und Photonen des CBM übertragen. Die Elektronen werden dabei auch ultra-relativistisch und kühlen vor dem Hintergrund des interstellaren

Magnetfeldes über Synchrotronemission. In der innersten Schale entstehen dabei die charakteristischen Gammaquanten des GRBs. Das wird auch *prompte Emission* genannt. Dahinter, in weiteren Schalen des mittlerweile abgebremsten Feuerballs, entsteht das Nachleuchten der anderen Wellenlängenbereiche. Die auslaufende und immer langsamer werdende Schockfront erklärt damit das beobachtete Nachleuchten im Ultravioletten, Optischen, Infraroten und Radiobereich.

8.3.10 Ein Blick in einen fast lichtschnellen Materiestrahl

Das Schlüsselement des anisotropen Feuerballs sind **stellare, ultra-relativistische Jets**. Die Astrophysiker nehmen heute an, dass sie im Kollaps des Vorläufersterns oder des Vorläufersystems entstehen. Aufgrund der enorm hohen Geschwindigkeiten des Jets ist auch der relativistische Beamingfaktor extrem groß. *Beamingfaktor* bezeichnet den speziell relativistischen Doppler-Faktor, der ein Maß dafür ist, wie sehr elektromagnetische Wellen, die vom GRB-Jet ausgehen verschoben werden. Bei einem irdisch beobachteten GRB muss der Jet - beschreibt der anisotrope Feuerball die Natur in richtiger Weise - etwa in Richtung Erde zeigen. Wenn sich ein leuchtendes Objekt fast lichtschnell in Richtung eines Beobachters bewegt, kommt ein starker **Blauverschiebungseffekt** der Strahlung zum Tragen: die Strahlung wird einerseits in ihrer Energie zum Blauen hin verschoben (ändert also ihre Farbe), andererseits wird auch ihre Intensität erhöht (*Beaming*). Ein Beobachter, der die GRB-Strahlung aus der Schockfront sieht, überschätzt sie! 'In Wahrheit', oder physikalisch präzise gesagt, im Ruhesystem ist die GRB-Strahlung viel energieärmer und dunkler. Kurz gesagt: Blauverschobene ('gebeamte') Strahlung ist energetischer und heller!

Beim Gravitationskollaps des Vorläufersterns (lange GRBs) bildet sich ein anfänglich eher pilzförmiger Jet aus. Dadurch dass der Öffnungswinkel des Jets vom Beamingfaktor abhängt, wurden theoretisch so genannte '**verwaiste**' GRBs (engl. *orphan GRBs*) vorhergesagt. Hier sollte ein Nachleuchten bei niedrigeren Strahlungsenergien beobachtbar sein, **ohne** dass zuvor ein assoziierter GRB detektiert wurde. Bisher war die Suche nach diesen orphan GRBs erfolglos.

Daneben gibt es auch so genannte **dunkle GRBs**, wo nur eine Gamma-Komponente **ohne optische Komponente** nachweisbar ist. Vermutlich entstehen diese GRBs in einem Sternentstehungsgebiet, wo dichter, interstellarer Staub sehr hohe Extinktionen (eine bis fünf Magnituden) verursacht. Bei der Extinktion erfolgt aufgrund von Streuprozessen eine Abschwächung der Intensität der Strahlung und eine Rötung. Dieser Effekt mag bei GRBs in dichtem Milieu den optischen Anteil unterdrücken. Allerdings sollten Astronomen in diesem Fall intensive Infrarotstrahlung messen können, was bisher ebenfalls (noch) nicht gelungen ist.

Die Kollapsar-Jets langzeitiger GRBs sind heiße Kandidaten für die Emission ultrahochenergetischer Neutrinos. Eine Entdeckung von GRBs in diesem 'neuen Fenster der Astronomie' wäre eine spektakuläre Entdeckung.

8.3.11 GRBs und SN: gute Kumpels?

Astronomen haben auch festgestellt, dass einige dieser GRBs (z. B. GRB980425) mit Supernovae assoziiert sind: In den Lichtkurven fanden sie '*Extralicht*' (engl. *extra light*), das vermutlich charakteristisch ist für SN. Mittlerweile wurden auch andere solcher *SN-GRB-Verbindungen* (engl. *SN-GRB connection*) gefunden wie GRB030329 (*Hjorth et al.*, Nature

423, 847, 2003). Das stützt das Kollapsarmodell. Unklar ist, *warum nicht alle* Supernovae mit GRBs assoziiert sind. Es wird vermutet, dass das Ausmaß der differentiellen Rotation des Eisenkerns im Kollapsar darüber entscheidet, ob beide Explosionsformen zusammen auftreten oder nicht (siehe auch Review: *Woosley & Bloom ARA& A* 2006; ePrint: astro-ph/0609142).

Hinzu kommt noch ein weiterer Aspekt: die Umgebung des Explosionsortes. Auf diese Spur sind die Astronomen gekommen, als sie die Heimatgalaxien betrachteten, in denen sich die jeweilige Explosion ereignete. Das erste Kriterium ist die Morphologie der Galaxie, also der Hubble-Typ. Die Astronomen finden dann das Ergebnis, dass es deutliche Unterschiede bei den Heimatgalaxien gibt: SN ereignen sich viel häufiger in Spiralgalaxien als lange GRBs. Das zweite Kriterium ist die physische Größe der Galaxie. Auch hier finden Astronomen Unterschiede: GRBs ereignen sich bevorzugt in lichtschwachen, kleinen Galaxien. Was heißt das alles? Nun, die Hypothese lautet, dass die Wahrscheinlichkeit für einen GRB an den chemischen Entwicklungszustand des massereichen Sterns gekoppelt ist, also an seine **Metallizität** (*Fruchter et al.*, *Nature* 441, 463, 2006). So zeigen mehrere Heimatgalaxien, in denen sich lange GRBs ereigneten, Metallizitäten von kleiner als ein Drittel der solaren Metallizität. Diese Vermutung passt zur Stellarphysik, weil metallreiche Sterne so starke Winde entwickeln, dass sie viel Masse verlieren und deshalb nicht zu einem Schwarzen Loch, dafür aber zu einem Neutronenstern kollabieren.

Lange GRBs treten demnach lieber in metallarmen, jungen Galaxien (mit hoher Sternentstehungsrate) auf und scheuen das metallreiche Milieu, wie beispielsweise in der Milchstraße. Die Milchstraße scheint tatsächlich ein recht lebensfreundlicher Ort zu sein.

8.3.12 Ertappte Schwarze Löcher

Das Aufregende und Faszinierende an Gamma Ray Bursts ist, dass man hier im Prinzip die **Bildung eines stellaren Schwarzen Loches** beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass - unabhängig ob kurzer oder langer GRB - am Ende die Entstehung eines Loches steht. Wie bei den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) nehmen Astrophysiker heute an, dass rotierende Schwarze Löcher (Kerr-Lösung) auch bei den leuchtkräftigen GRBs eine Schlüsselrolle spielen. Kerr-Löcher werden zu den **relativistischen Magneto-Rotatoren** (RMRs, *Gammie* 2003) gerechnet. Die schnell rotierende Raumzeit der RMRs ist ein effizienter Antrieb, um ultra-relativistischen GRB-Jets herauszuschießen. Bei den Gamma Ray Bursts spielt somit die gleiche Physik eine Rolle wie bei den AGN: Akkretionsphysik, Magnetohydrodynamik, Jetphysik und natürlich Einsteins Theorie.

8.3.13 Eine andere Hypothese

Eine alternative Erklärung für GRBs wird unter dem Einfluss kosmischer topologischer Defekte gesehen. Diese Alternative ist unter Astrophysikern jedoch nicht etabliert und gilt als spekulativ.

8.3.14 Durchbruch 4: Relationen für langzeitige GRBs

Amati-Relation

2002 haben italienische GRB-Forscher zwölf Gammastrahlenausbrüche ausgewertet, die mit italienisch-niederländisch Hochenergiesatelliten BeppoSAX beobachtet wurden. Sie fanden bei der Analyse einen interessanten Zusammenhang, der heute nach dem Erstautor der

Veröffentlichung **Amati-Relation** genannt wird (*Amati et al.*, A&A 390, 81, 2002). Diese Relation besagt, dass die isotrope Gesamtenergie des Ausbruchs (E_{iso}) mit der Maximalenergie der GRB-Strahlung (E_{peak}) im Ruhesystem (!) der Quelle eindeutig zusammenhängt. Das bedeutet, dass die (im Laborsystem) *beobachtete* Maximalenergie der Strahlung erst noch um die kosmologische Rotverschiebung z des Bursts korrigiert werden muss, um die Korrelation zu zeigen. Dazu wird die beobachtete Energie mit $(1 + z)$ multipliziert, was die höhere Ruheenergie liefert. Das klingt kompliziert - was bedeutet das anschaulich? Das heißt schlichtweg, dass die GRB-Strahlung 'vor Ort des Bursts' umso energiereicher ist, je größer die Explosionsenergie ist. Das ist eigentlich sehr einleuchtend.

Ghirlanda-Relation

Eine weitere, ähnliche Beziehung bei GRBs ist die **Ghirlanda-Relation** (*Ghirlanda et al.*, ApJ 616, 331, 2004). Sie besagt, dass eine enge Korrelation zwischen der kollimationskorrigierten Energie des Bursts (E_{γ}) und der Maximalenergie der GRB-Strahlung (E_{peak}) besteht. Wie beim anisotropen Feuerball-Modell beschrieben, wird der GRB durch einen Jet gezündet. Dieser Jet hat einen bestimmten Öffnungswinkel. Es ist möglich, aus der isotropen Gesamtenergie und bekanntem Öffnungswinkel die kollimationskorrigierte Energie (gewissermaßen die 'anisotrope Gesamtenergie') auszurechnen. Die Öffnungswinkel der Jets beschaffen sich die Astronomen dabei aus dem GRB-Nachleuchten. Die somit gefundene Ghirlanda-Relation lautet dann auf der Grundlage der Beobachtungsdaten: $E_{\text{peak}} \propto E_{\gamma}^{0.7}$. Die anschauliche Interpretation ist analog zur Amati-Relation. Allerdings streut die Ghirlanda-Relation nicht so sehr (d. h. die Messpunkte liegen enger an der Korrelationslinie). Das liegt an der adäquaten Berücksichtigung der Anisotropie des Feuerballs.

Firmani-Relation

Damit nicht genug - es wurde 2006 eine weitere GRB-Relation gefunden, die **Firmani-Relation** (*Firmani et al.*, MNRAS 370, 185, 2006). Sie setzt drei charakteristische Größen miteinander in Bezug, die mit der prompten GRB-Emission assoziiert sind. Das sind die isotrope Maximalleuchtkraft (L_{iso}), die Maximalenergie der prompten Emission (E_{pk}) und die Zeitskala des prompten Signals ($T_{0.45}$). Die Firmani-Relation fußt auf Messdaten und lautet $L_{\text{iso}} \propto E_{\text{pk}}^{1.62} T_{0.45}^{-0.49}$. Diese Relation klingt am kompliziertesten von allen. Sie besagt anschaulich, dass die GRB-Leuchtkraft umso höher ist, je größer die Maximalenergie der prompten Emission und je kürzer die Zeitskala des GRB-Aufblitzens ist. $T_{0.45}$ beträgt typischerweise nur wenige Sekunden.

Das mag alles recht schleierhaft klingen, hat aber eine für die Astronomie entscheidende Konsequenz: Die Firmani-Relation kann dazu benutzt werden, um die Rotverschiebung eines GRBs zu bestimmen (*photo-z* im Astronomenjargon). Selbst wenn *kein* Nachleuchten beobachtet wurde und damit keine Rotverschiebung bestimmt werden konnte, folgt die Rotverschiebung aus der Firmani-Relation, die nur Charakteristika der prompten Emission involviert! Mit anderen Worten: **Gammastrahlenausbrüche kämen dann als Standardkerzen in Frage!** Das ist eine völlig neue Eigenschaft der GRBs. Sie ist besonders deshalb so brisant, weil Supernovae Typ Ia - die sehr erfolgreich genutzten Standardkerzen der Kosmologie - maximal bis zu kosmologischen Rotverschiebungen von $z \sim 1.5 - 2$ genutzt werden können. GRBs als gigantischste Sternexplosionen im Kosmos sind jedoch noch beobachtbar, auch wenn sie sehr weit entfernt sind, z. B. bis $z \sim 6$ und mehr! Damit

wären GRBs von entscheidendem Nutzen, falls sie sich als Standardkerzen bewähren. 2004 ist es chinesischen Astronomen gelungen, für ein kleines GRB-Sample kosmologische Parameter (Ω_m , w) *übereinstimmend mit Supernovadaten* zu bestimmen - allerdings war die Signifikanz dieser Messung noch sehr klein (*Dai et al.*, ApJ 612, L101, 2004).

8.3.15 Erfolge mit dem GRB-Satelliten Swift

Ende 2004 wurde ein Spezialesatellit der NASA namens Swift gestartet, der extra für die Entdeckung und Analyse von GRBs designiert wurde (*Gehrels et al.*, ApJ 2004). Die erwartete Lebensdauer des Satelliten beträgt acht Jahre. Swift fängt nicht nur die prompte Gammastrahlung, sondern auch die im Nachleuchten auftretende Röntgen-, UV- und optische Strahlung auf. Schnelligkeit ist gefragt, um das Nachleuchten beobachten zu können: Blitzt ein GRB auf, schwenkt Swift innerhalb von 20 bis 75 Sekunden *vollautomatisch* auf die Position des Blitzes, um Beobachtungsdaten aufzunehmen! Die Beobachtungserfolge verdankt Swift dieser Automatisierung und der Kombination von drei Teleskopen:

- ◇ dem *Burst Alert Telescope* (**BAT**), das mit seinem großen Gesichtsfeld etwa 100 GRBs pro Jahr aufspüren kann. Es beobachtet bei Gammaenergien von 15 bis 150 keV und spürt die Burstposition auf;
- ◇ dem *X-ray Telescope* (**XRT**), also dem Röntgenteleskop, das bei Strahlungsenergien zwischen 0.3 und 10 keV empfindlich ist. XRT schießt Fotos und nimmt Röntgenspektren des GRB-Röntgennachleuchtens auf;
- ◇ dem *UV/Optical Telescope* (**UVOT**), das im optischen Licht zwischen 170 und 650 nm sowohl Fotos macht, als auch Spektren aufnimmt.

Die GRB-Forscher haben u. a. dank Swift viele neue Erkenntnisse gewonnen. So wurde mit Swift und einem weiteren Satelliten HETE-2 2005 herausgefunden, dass die **kurzen GRBs bevorzugt in alten elliptischen Galaxien auftreten** und weniger in jungen Galaxien (*Fox et al.*, Nature 437, 845, 2005; *Gehrels et al.*, Nature 437, 851, 2005).

Ende 2005 wurde das **Verschmelzungsszenario zweier Neutronensterne bestätigt**, weil die beobachtete Rate für kurze GRBs gut mit der erwarteten Kollisionsrate von Doppel-Neutronensternen übereinstimmt (*Barthelmy et al.*, Nature 438, 994, 2005; *Tanvir et al.*, Nature 438, 991, 2005).

Und 2006 bestätigte Swift die oben beschriebene **Amati-Relation** anhand der Beobachtung eines so genannten Röntgenblitzes (engl. *X-ray Flash*, **XRF**) mit der Katalogbezeichnung XRF 050416A (*Sakamoto et al.*, ApJ 636, L73, 2006).

Doch nicht genug mit GRB-Physik: Das Swift-Teleskop wird auch verwendet, um AGN zu untersuchen.

8.3.16 Eine dritte GRB-Klasse?

Im Jahr 2006 haben zwei Gammastrahlenausbrüche die Standardmodelle der GRB-Physik auf eine harte Probe gestellt: Der lange GRB060614 mit einer Dauer von 102 s ($z = 0.125$) und der mit 4 s ebenfalls lange GRB060505 ($z = 0.089$). Beide GRBs passen nicht in das Schema von bislang katalogisierten Ausbrüchen (*McBreen & Greiner*, Physik Journal, Februar 2007).

Nach dem Paradigma der SN-GRB-Verbindung sollte mit einem langen Gammastrahlenausbruch eine Supernova auftreten. Trotz angestrengter Suche wurde

weder bei GRB060614, noch bei GRB060505 eine SN entdeckt. Waren es außergewöhnlich lichtschwache SNe? Auch bei der Lichtkurve wurde die seltsame Beobachtung gemacht, dass sie eher zu kurzen GRBs passe. Im Zuge dieser Ungereimtheiten haben führende GRB-Forscher angeregt, eine neue GRB-Klasse einzuführen (*Gehrels et al.*, Nature 444, 1044, 2006). Eventuell gibt es andere Erklärungen, z. B. dass die Supernovaexplosion so schwach war, dass das ausgeworfene Material wieder zurückfiel auf das Schwarze Loch und somit nicht als hell leuchtender Ausbruch in Erscheinung trat.

Bei bislang etwa 4000 entdeckten GRBs, die gut in das Zwei-Klassen-Schema passen, sind 'zwei Ausreißer' noch nicht genug, um ein erfolgreiches Modell zu überdenken. Zum einen müssen nun die beiden Spezialfälle sehr genau analysiert werden. Zum anderen werden weitere Beobachtungen zeigen müssen, ob eine dritte GRB-Klasse tatsächlich nötig ist.

8.3.17 Kosmologie mit GRBs

Bei extrem weit entfernten GRBs geschehen interessante Effekte: Das optische Nachleuchten eines GRBs mit $z > 6$ kann nicht mehr mit dem UVOT-Detektor auf Swift beobachtet werden, weil es zu stark rotverschoben ist, nämlich oberhalb von 650 nm. Deshalb weicht man in diesen (seltenen) Fällen auf bodengestützte Infrarotteleskope aus.

Der oben erwähnte Entfernungsrekord, der GRB050904 mit $z = 6.18$ ist so weit entfernt, dass das Universum zur Epoche des GRBs noch nicht ganz ionisiert war. Die Ära der Reionisation endete später. Nun kann das optische Nachleuchten des GRBs genutzt werden, um den Kosmos zu durchleuchten, weil sich die Verteilung der neutralen Materie durch Absorptionslinien verrät. Das Prinzip ist vergleichbar der Röntgendiagnostik beim Arzt: der Astronom ist der Arzt, das Universum der Patient. Bitte frei und schön weit aufmachen, Kosmos!

8.3.18 Weitere Links

- ◇ Swift
- ◇ Multimedia-Präsentation Gamma Ray Bursts vom Mai 2002

8.4 Gamma-Zerfall

Eine der drei Formen von **Radioaktivität**, neben Alpha-Zerfall und Beta-Zerfall.

8.4.1 Was genau ist nun γ -Zerfall?

Beim Gamma-Zerfall zerfallen angeregte Zustände von Atomkernen durch Emission hochenergetischer, elektromagnetischer Strahlung. Diese besonderen *Radionuklide* sind also Gammastrahler. Gammastrahlung hat noch größere Energie als Röntgenstrahlung, etwa oberhalb von einem MeV bzw. unterhalb einer Wellenlänge von einem Pikometer (1 pm entspricht 10^{-12} m). Zudem unterscheiden sich beide Strahlungsformen *per definitionem*: Gammastrahlung kommt aus dem Atomkern; Röntgenstrahlung kommt aus der Atomhülle. Im ersten Fall ändern die Nukleonen (Protonen und Neutronen) ihre energetischen Zustände, im letzten Fall sind es die Elektronen.

8.4.2 γ ist nicht ohne

Gamma-Strahlung ist die gefährlichste aller radioaktiven Zerfallsarten, weil ihre Reichweite im Prinzip unendlich ist. Denn elektromagnetische Strahlung kann nie vollständig abgeschirmt werden. Es ist nur möglich eine 'Halbwertstiefe' zu definieren, wo die Strahlung auf die Hälfte ihrer Intensität abgefallen ist. Einen wirksamen Schutz bieten nur Abschirmungen aus Blei.

8.4.3 Auch Kerne spinnen

Üblicherweise schließt sich der Gamma-Zerfall an einen der beiden anderen Zerfallsarten an, weil hier ein **angeregter Tochterkern** übrig bleibt. Erst durch die Quantentheorie war die Radioaktivität berechenbar und erklärbar. Mit quantentheoretischen Methoden kann man in der Kernphysik die energetischen Zustände eines Atomkerns angeben. Dabei spielt auch der Spin der Nukleonen eine gewichtige Rolle. Alle Nukleonen tragen zum **Kernspin** des Atomkerns bei. Dieser kann mit geeigneter elektromagnetischer Strahlung, die von außen eingestrahlt wird, zum 'Umklappen' (eine Änderung des Quantenzustands, was mit einem Energieunterschied verbunden ist) angeregt werden.

8.4.4 Nutzen für die medizinische Diagnostik

In bildgebenden Verfahren der Medizin ist dieser Umklapp-Effekt ausgenutzt, nämlich in der *Kernspintomographie* (Nuklearmagnetische Resonanz, NMR; Details im Eintrag Spin). Allerdings ist die dabei freiwerdende Strahlung keine Gammastrahlung, sondern ungefährliche Radiowellen. Es gibt aber auch die gezielte Verwendung von Radioaktivität in der Medizin: So werden radioaktive Kontrastmittel, z. B. Jod gespritzt, die aufgrund der radioaktiven Strahlung im Körper verfolgt werden können (engl. *tracer*). Die Halbwertszeiten dieser radioaktiven Substanzen sind kurz und die Strahlung schwach genug, dass die Belastung für den Patienten vertretbar ist. Es darf nicht vergessen werden, dass wir ständig einer **natürlichen Radioaktivität** ausgesetzt sind, z. B. durch Radionuklide im Baumaterial oder durch die Belastung mit kosmischer Strahlung auf Flügen.

8.5 Geodäte

Geodäten sind besondere Kurven in der Differentialgeometrie. Diese Kurven sind identisch mit den Bahnen, auf denen sich Licht und Teilchen ohne Einwirkung von äußeren Kräften bewegen. Geodäten lassen sich über die Lösung der **Geodätengleichung** in einer vorgegebenen Metrik berechnen.

8.5.1 Geodäten in der Physik

In der klassischen Mechanik gibt es die so genannte *Eikonalgleichung* der geometrischen Optik. Hier sind die Verhältnisse einfacher, weil die Metrik flach ist. Die Geodäten von Licht sind hier Geraden. Licht breitet sich geradlinig aus, wie wir es aus dem Alltagsleben gewohnt sind.

Physikalisch bedeutende Geodäten sind diejenigen in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Vorgegeben ist die gekrümmte Raumzeit einer Masse, z. B. eines Sterns oder eines Schwarzen Loches. Für diese Metrik schreibt man die Geodätengleichung auf und löst sie für Licht oder für Materieteilchen. Denn die Geodätengleichung gibt vor, wie sich diese Teilchen in der Raumzeit zu bewegen haben. Anschaulich formuliert sind die

Geodäten diejenigen Weltlinien im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum, für die das Eigenzeitintervall (die Zeitspanne im Ruhesystem) extremal wird. Dies legt nahe, Geodäten aus einem *Variationsprinzip* abzuleiten. Salopp formuliert besagt es: Licht nimmt den kürzesten Weg.

Es stellt sich dann heraus, dass die Geodäten im Allgemeinen gekrümmt sind. Somit kann sich auch Licht auf gekrümmten Bahnen bewegen, was das Phänomen der Gravitationslinse erklärt.

8.5.2 Geodätentypen in Einsteins Theorie

In der Relativitätstheorie werden verschiedene Geodätentypen unterschieden, wie man sich leicht an ihrer relativen Lage zum **Lichtkegel** in Raum-Zeit-Diagrammen klar machen kann:

- ◇ **Zeitartige Geodäten** liegen innerhalb des Lichtkegels. Für das Linienelement gilt $ds^2 > 0$. Freie Teilchen oder frei fallende Beobachter bewegen sich auf zeitartigen Geodäten.
- ◇ **Lichtartige Geodäten** liegen exakt auf dem Lichtkegel. Sie heißen auch **Nullgeodäten**. Entlang dieser Bahnen bewegt sich das Licht und Strahlung im Allgemeinen. Für das Linienelement von Strahlung gilt $ds^2 = 0$.
- ◇ **Raumartige Geodäten** liegen außerhalb des Lichtkegels und sind an sich 'unphysikalisch', weil Teilchen auf diesen Bahnen das *Kausalitätsprinzip* verletzen. Anders gesagt: Ereignisse mit zeitartigem Abstand können nicht kausal miteinander verknüpft sein. Für das Linienelement raumartiger Geodäten gilt $ds^2 < 0$. Die hypothetischen Tachyonen bewegen sich auf raumartigen Geodäten.

8.5.3 Aspekte aus der Differentialgeometrie

In der Differentialgeometrie unterscheidet man außerdem: *affine* Geodäten, entlang derer ein Tangentenvektor *parallel* zu sich verschoben wird; *metrische* Geodäten, die ausgezeichnete Kurven zwischen zwei Punkten sind, die beide Punkte verbinden und deren Intervall stationär ist unter kleinen Variationen, die an den Endpunkten verschwinden. Für Nullgeodäten ist der Tangentenvektor oder - äquivalent dazu - der Abstand zwischen zwei Punkten in der Raumzeit Null. Für Photonen gilt daher, dass das Linienelement verschwindet, $ds^2 = 0$.

Die Geodätengleichung ist eine gewöhnliche Differentialgleichung zweiter Ordnung. Nach dem Existenz- und Eindeutigkeitssatz folgt, dass es zu jeder Richtung in einem Weltpunkt **eine eindeutige Geodäte gibt**, die durch diesen Punkt geht.

8.5.4 Anwendungen

In einer speziellen Visualisierungsmethode namens Ray Tracing (dt. Strahlenverfolgung) wird gerade die Geodätengleichung für eine große Zahl von Photonen (einige hunderttausend oder sogar Millionen) gelöst. Das dient der Berechnung des Erscheinungsbilds von Objekten (*Rendern*) in flachen und gekrümmten Raumzeiten. Damit kommt Ray Tracing sowohl bei kommerzieller Software zur Darstellung von Landschaften, Gebäuden und beliebig geformten Körpern in 3D, als auch bei physikalischen Codes zur Darstellung von Strömungen, Jets, Staubtori, Akkretionsscheiben um Schwarze Löcher etc. zum Einsatz.

8.5.5 Web-Artikel

- ◇ Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing

8.6 Geometrisierte Einheiten

Die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) enthält **zwei fundamentale Naturkonstanten**: die Vakuumlichtgeschwindigkeit c von 299 792.458 km/s und die Gravitationskonstante G , die $6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ beträgt.

8.6.1 seltsame, aber praktische Bräuche der Theoretiker

In rein theoretischen Betrachtungen ist es von Vorteil, nicht immer diese Zahlenwerte einzusetzen, ja nicht einmal die Konstante als Parameter c bzw. G in der Rechnung auftauchen zu lassen. Stattdessen setzt man einfach $G = c = 1$. Das resultierende Einheitensystem heißt *geometrisierte Einheiten* (engl. *geometrized units*; auch *geometrische Einheiten* genannt) und wurde erstmals im Fundamentalwerk der Gravitation mit gleichnamigem Titel von den Autoren Misner, Thorne und Wheeler (MTW) 1973 eingeführt.

8.6.2 Einsen mit Folgen

Diese Konvention führt dazu, dass Längen in Einheiten der Masse M angegeben werden. So wird der Gravitationsradius ebenfalls in Vielfachen von M aufgeführt. In einem speziellen Anwendungsbeispiel, wo eine experimentelle Messung durchgeführt wird, rechnet man wieder durch entsprechende Multiplikation mit Potenzen von G und c auf explizite Zahlenwerte in SI-Einheiten (Meter, Kilogramm, Sekunde: MKS) oder Gauß-Einheiten (Zentimeter, Gramm, Sekunde: cgs) um.

8.7 Geometrodynamik

Geometrodynamik ist ein Begriff der von dem Relativisten *John A. Wheeler* 1961 geprägt wurde. Diese Bezeichnung bündelt die Vorstellung, dass die **Geometrie ein dynamisches Gebilde** in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) ist und die Metrik oder Raumzeit im Prinzip ständig 'in Bewegung ist' bzw. lokale Krümmungen ständigen Änderungen unterworfen sind. Der Begriff wurde in Analogie zur klassischen **Elektrodynamik** gewählt, ist aber nicht sehr gebräuchlich. Physiker und Relativisten bevorzugen den Begriff ART, mit dem Geometrodynamik gleichbedeutend ist. Die Loop-Quantengravitation wird manchmal auch *Quantengeometrodynamik* genannt.

8.7.1 Farbgeometrodynamik

Die ART ist eine Gravitationstheorie mit verschwindender Torsion, d. h. der Torsions-Tensor ist null. Nur dann sind die Christoffel-Symbol symmetrisch. Es gibt jedoch die Alternative, eine **Gravitationstheorie mit Torsion** aufzuziehen (siehe auch Fernparallelismus). Naturbeobachtungen erzwingen das nicht, doch gibt es diese Freiheit in der Theorie. Ein Vorteil ist u. a., dass der Spin in die ART implementiert werden kann. Die Idee geht auf den französischen Mathematiker *Elie Joseph Cartan* (1869 - 1951) zurück, der dazu in



Abbildung 8.7: Teile von Shoemaker-Levy 9 fallen 1994 auf Jupiter.

den 1920 Jahren Arbeiten verfasst hat. Dieser theoretische Zweig wurde von *Friedrich W. Hehl* und *Eckehard W. Mielke* in den 1970ern wieder aufgegriffen und wurde aufgrund der Verwandtschaft zur Quantenchromodynamik mit dem Begriff Farbgeometrodynamik (engl. *color geometrodynamics*, CGMD) bezeichnet.

8.8 Gezeitenkräfte

Dieser Begriff meint im Allgemeinen volumenerhaltende Kräfte auf einen Körper, die infolge der **Gravitation** entstehen.

8.8.1 Ebbe & Flut

Populär sind die Gezeitenkräfte zwischen Sonne, Erde und Mond, die je nach Stellung der Himmelskörper zueinander Ebbe und Flut hervorrufen. Der Wassermantel der Erde wird dabei durch die Gravitationskräfte von Sonne und vor allem Mond deformiert.

8.8.2 Jupiter - ein interplanetarer Staubsauger

Auch im Sonnensystem ereignen sich heftige Ereignisse, die in Zusammenhang mit Gezeitenwechselwirkungen stehen. Im Sommer des Jahres 1994 konnten die staunenden Astronomen Zeuge werden, wie der Komet *Shoemaker-Levy 9* durch die hohen Gezeitenkräfte des Planeten **Jupiter** zerrissen wurde, als er ihm zu nah kam. Die Einschläge waren spektakulär und ein Highlight der Astronomie: Die Abbildung 8.7 zeigt (bei genauer Betrachtung) acht Strukturen, die von Einschlägen der Teile Shoemaker-Levys verursacht

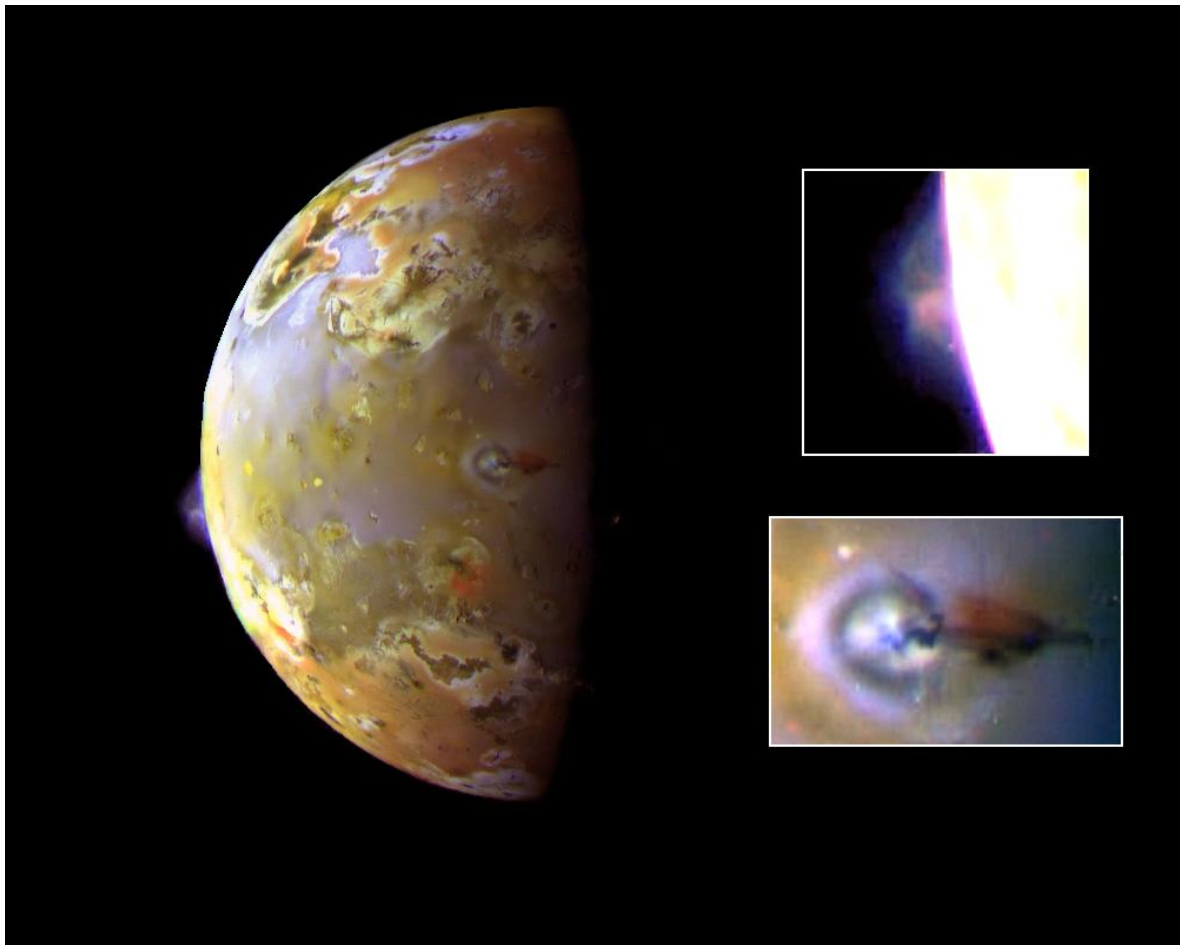


Abbildung 8.8: Vulkanausbruch auf Io.

wurden (Credit: NASA/ESA, HST 1994). Diese Strukturen verändern sich auf der Zeitskala von Tagen.

8.8.3 Jupiter - Ios Masseur

Der Vulkanismus und die hohe morphologische Aktivität des innersten Jupitermonds *Io* werden ebenfalls mit Gezeitenwechselwirkungen erklärt. Das Innere dieses Monds wird ständig umgewälzt und formt ein immer neu erscheinendes Io-Antlitz. Io hat es dadurch zur vulkanisch aktivsten Region im Sonnensystem gebracht. Die Aufnahme 8.8 wurde mit der Raumsonde *Galileo* 1997 aus einer Höhe von 600000 Kilometern über Io fotografiert (Credit: Galileo Project, JPL/NASA, 1997). Auf dem Foto ist etwa in der Mitte eine blaue Rauchfahne zu sehen, die sich etwa 140 Kilometer über Ios Oberfläche erhebt. Sie stammt aus der Region *Pillan Patera*, die schon seit Jahren vulkanisch aktiv ist. Darunter, ebenfalls in der Bildmitte, jedoch nahe an der Trennlinie von Io-Tag und Io-Nacht (*Terminator*) befindet sich der Vulkan *Prometheus*, dessen Rauchfahne eine Ringform aufweist und etwa 75 Kilometer aufsteigt. Schon die Voyager-Sonden dokumentierten 1979 diesen aktiven Vulkan.



Abbildung 8.9: Antennengalaxien NGC4038-4039, HST 2006.

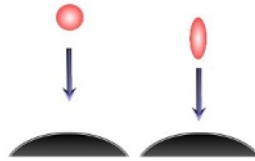


Abbildung 8.10: Gezeitenkräfte auf eine fallende Kugel.

8.8.4 Galaxienhochzeit

Gezeitenkräfte wirken aber durch die **Langreichweitigkeit der Gravitation** auch auf großen Raumskalen und bewirken so beispielsweise eine Veränderung der Morphologie von Galaxien (Balkenspiralgalaxien, **irreguläre Galaxien**), wie eindrucksvoll bei den kannibalistischen Systemen wie der *Antennengalaxien* (Abb. 8.9, Credit: NASA/ESA, HST 2006) beobachtet werden kann. Die Antennengalaxien NGC 4038 und NGC 4039 sind 62 Millionen Lichtjahre entfernt und befinden sich im Sternbild *Rabe* (*Corvus*). Vor einigen hundert Millionen Jahren begannen sie mit der Gezeitenwechselwirkung. Das Bild ist ein Farbenkomposit und zeigt die älteren Sterne, die beide Galaxien in die Ehe mitbringen (gelb-orange), diffus verteilten Staub (braune und schwarze Filamente), und natürlich die durch die Hochzeit neu entstandenen, hell leuchtenden Sterne sowie deren ionisiertes Umgebungsgas aus Wasserstoff (blau und rosa).

In einigen Milliarden Jahren wird die Milchstraße in vergleichbarer Weise mit der Andromedagalaxie kollidieren. Das klingt jedoch schlimmer als es ist, weil es dabei kaum zu direkten Sternzusammenstößen, aber zur Bildung neuer Sterne kommen wird, weil hier die interstellaren Medien beider Galaxien vermischt und verdichtet werden.

8.8.5 unangenehme Gezeiten beim Schwarzen Loch

Kommen wir nun zu den extremen Gezeitenkräften, die - wie sollte es anders sein - von **Schwarzen Löchern** hervorgerufen werden. Körper, die sich zu nahe an den Ereignishorizont wagen, werden durch Gezeitenkräfte stark deformiert und können sogar zerrissen werden. Ein kugelförmiges Testobjekt, das in ein Schwarzes Loch fällt, wird in einen *Ellipsoid* deformiert: in Fallrichtung (*radial*) findet eine Streckung statt und senkrecht zur Fallrichtung (*transversal*) eine Dehnung, wie es die Abbildung 8.10 illustriert. Dabei bleibt das Volumen des Testobjekts jedoch konstant. Die Verhältnisse müssen nicht immer so sein, wie in der Abbildung dargestellt, denn bei besonders schweren Schwarzen Löchern, den supermassereichen Schwarzen Löchern, kann der Gezeitenkrafteffekt auch erst nach dem Ereignishorizont stattfinden und ist damit prinzipiell unbeobachtbar (Einzelheiten bei Gezeitenradius).

8.8.6 Gezeiten in Einsteins Theorie

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) lassen sich Gezeitenkräfte mittels der *Gleichung der geodätischen Abweichung* beschreiben. Der hierbei auftretende so genannte *orthogonale Verbindungsvektor* eignet sich gut, um zwei benachbarte Teilchen, die sich im freien Fall befinden, zu untersuchen. Es zeigt sich auch, dass bei einem Schwarzschild-Loch Spannung und Druck invers mit der dritten Potenz in der Radialkoordinate skalieren, d. h. die Gezeitenkräfte

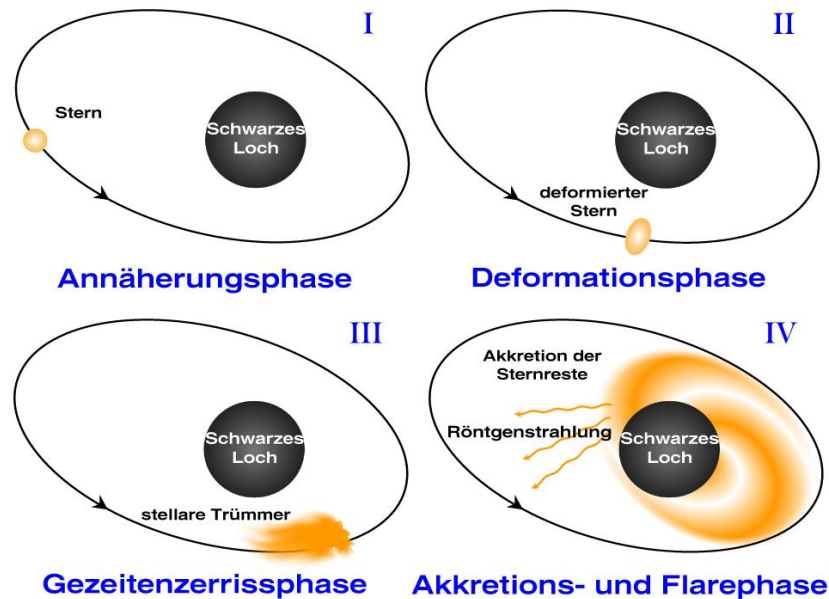


Abbildung 8.11: Phasen des Zerreiß-Szenarios eines Sterns durch Gezeitenkräfte.

werden bei der intrinsischen Singularität in $r = 0$ unendlich groß. Das gilt für alle Schwarzen Löcher.

8.8.7 Loch zerreißt Stern

Ein wichtiges Anwendungsbeispiel ist die Gezeitenwirkung Schwarzer Löcher auf Objekte in ihrer Umgebung. In der Theorie lässt sich der Gezeitenradius (engl. *tidal radius*) definieren, der angibt, ab welchem Abstand zum Schwarzen Loch die Gezeitenkräfte die Selbstgravitation des massiven Objekts dominieren und das Objekt zerreißen (engl. *tidal disruption*).

Von besonderem Interesse in der Astrophysik ist diese Gezeitenwechselwirkung bei Sternen, die einem Schwarzen Loch zu nahe kommen (Sterneinfang, engl. *stellar capture*) und den Gezeitenradius unterschreiten. Diese Sterne werden je nach Größe und Masse teilweise oder vollständig zerstört (engl. *stellar tidal disruption*). Bei einer vollständigen Zerstörung verteilen sich die Sterntrümmer (engl. *stellar debris*) in unmittelbarer Nähe zum Loch und können so akkretiert werden. In diesem Szenario, dargestellt in Phasen in der zweiten Abbildung, erwartet man aufgrund der plötzlich lokal erhöhten Akkretionsrate (engl. *accretion burst*) ein deutliches Aufflackern im hochenergetischen Bereich der elektromagnetischen Strahlung: einen **Röntgenflare**. Dabei erreicht die Region um das Schwarze Loch kurzzeitig eine Röntgenhelligkeit, die mit derjenigen von Quasaren vergleichbar ist! Die Strahlung ist thermischen Ursprungs und ist darauf zurückzuführen, dass sich das stellare Restmaterial stark aufheizt. Deshalb können Astronomen das Flare-Spektrum gut mit einem Schwarzkörper (engl. *black body*), also einer Planckschen Strahlungsverteilung charakteristischer Temperatur anpassen. Die einzelnen Phasen, wie der Zerriss eines Sterns durch Gezeitenkräfte abläuft, ist im großen Schema 8.11 illustriert:

- ◊ **I Annäherungsphase:** Zunächst nähert sich der möglicherweise eingefangene Stern

dem Schwarzen Loch bis auf sehr kurze Distanz (engl. *approaching phase*).

- ◊ **II Deformationsphase:** Dann erleidet er starke Deformationen durch Spannungs- und Druckkräfte am Gezeitenradius (engl. *tidal deformation phase*).
- ◊ **III Gezeitenzerrissphase:** Schließlich wird der Stern durch die enormen Kräfte zerrissen (engl. *tidal disruption phase*).
- ◊ **VI Akkretions- und Flarephase:** Die stellaren Trümmer verteilen sich entlang der Bahn des Vorläufersterns und werden auch akkretiert. Dabei entsteht das charakteristische Röntgenflare (engl. *accretion and flare phase*).

Wie unterscheidet man den Röntgenflare durch Sternzerriss von anderen Flares? Dieser Flare im Bereich ultravioletter Strahlung und weicher Röntgenstrahlung klingt auf der **Zeitskala von Monaten** ab. Integriert man die Leuchtkraft (Einheit einer Leistung, erg/s) des Flares über diese Zeit, so findet man eine freigewordene Energie dieses Ereignisses, die der einer Supernova gleichkommt: 10^{51} erg!

Weitere Charakteristika sind, dass er nicht mit der Aktivität verbunden ist, wie man sie beispielsweise in Seyfert-Galaxien beobachtet. Deshalb ist es wichtig, simultan zu den Röntgenbeobachtungen auch im optischen Bereich zu beobachten, um sicherzustellen, dass keine AGN-Aktivität vorliegt. Die verhältnismäßig ruhigen Schwarzen Löcher in den Zentren **inaktiver Galaxien** (engl. *dormant black holes*) sind durch stellaren Gezeitenzerriss beobachtbar. Außerdem stützen diese Beobachtungen das allgemein akzeptierte Paradigma, dass nahezu alle Galaxien im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch beherbergen.

Die Ereignisse eines Sternzerriss mit beobachteten Röntgenflare sind sehr selten: **nur alle 10000 Jahre** wird ein Stern in einem solchen Ereignis von einem Schwarzen Loch zerrissen (entsprechend der stellaren Akkretionsrate von 10^{-4} Sonnenmassen pro Jahr).

8.8.8 Keine Science-Fiction mehr!

Die ersten Beobachtungen von Röntgenflares durch Sternzerriss wurden Anfang der 1990er Jahre mit dem deutschen Röntgensatelliten ROSAT durchgeführt. Es konnten jedoch nur Kandidaten-Objekte gefunden werden, weil eine letzte Unsicherheit bestand, ob tatsächlich der Flare durch einen zerrissenen Stern hervorgerufen wurde. Nun sind sich die Astronomen sicher, dass sie mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Sternzerriss durch ein Schwarzes Loch beobachtet haben. Hauptindiz ist die zeitliche Entwicklung des Röntgenspektrums. Mit hohem Aufwand wurde in einer internationalen Kollaboration mit hoher räumlicher und hoher spektraler Auflösung auf gute Flare-Kandidaten geschaut. Dazu wurden die Ressourcen weltumspannend gebündelt und der US-amerikanische Röntgensatellit Chandra (NASA) und der europäische Röntgensatellit XMM-Newton (ESA) auf die gleiche Quelle ausgerichtet. Außerdem überprüfte das Weltraumteleskop Hubble (HST) den optischen Bereich, um AGN-Aktivität ausschließen zu können. Bei beobachteter Abwesenheit breiter Emissionslinien und nicht-stellarer Kontinua kann der Astronom davon ausgehen, dass es sich um eine 'normale', d. h. inaktive Galaxie handelt. *Stefanie Komossa* (MPE Garching) und Kollegen untersuchten 2004 die Röntgenquelle **RX J1242-1119** (Rotverschiebung $z = 0.05$) und stellten einen starken Abfall, etwa um den Faktor 240, in der Röntgenleuchtkraft fest, wenn man die alten ROSAT- mit neuen XMM-Beobachtungen vergleicht. Dies wird zusammen mit den anderen beobachteten, individuellen Charakteristika so interpretiert, dass man einen Röntgenflare - ausgelöst von einem zerrissenen Stern nahe einem Schwarzen Loch - beobachtet hat.

Mittlerweile klingt dieser Flare ab, und die Röntgenastronomen beobachten ein so genanntes **Post-Flare-Spektrum** der Quelle. Irgendwann kehrt das gefütterte Schwarze Loch wieder in seinen Ruhezustand zurück und die inaktive Wirtsgalaxie verhält sich so unauffällig wie vor dem Zerriss.

Die Blauhelligkeit gemessen mit HST dient einer Abschätzung der Masse des supermassereichen Schwarzen Loches im Zentrum von RX J1242-1119. So ergeben sich **200 Millionen Sonnenmassen**. Das ist fast das 70fache der Lochmasse, die die Infrarotastronomen im Zentrum der Milchstraße (Sgr A*) gemessen haben.

Mittlerweile ist es gelungen die Flares durch Gezeitenzerriss auch im **Ultravioletten** nachzuweisen: In diesem Fall wurde der Stern durch das zentrale Schwarze Loch in einer elliptischen Galaxie zerrissen, die sich im Gesichtsfeld des *GALEX Deep Imaging Survey* befand (Gezari et al. 2006). Die Lochmasse von etwa 100 Millionen Sonnenmassen ist konsistent dem Schwarzkörperspektrum, der Lichtkurve des Flares und der M- σ -Relation

8.8.9 Papiere zum Gezeitenzerriss eines Sterns

- ◇ Halpern et al. 2004, astro-ph/0402497
- ◇ Komossa et al. 2004, astro-ph/0402468
- ◇ Gezari et al. 2003, astro-ph/0304063
- ◇ Gezari et al. 2006, astro-ph/0612069

8.9 Gezeitenradius

Unter dem Eintrag Gezeitenkräfte wurden verschiedene Bereiche der Astronomie vorgestellt, in denen diese Gravitationskräfte relevant sind. Hier soll es um den Gezeitenradius gehen, der bei den extremen Gezeitenkräfte von Schwarzen Löchern, die auf Sterne wirken, eine Rolle spielt.

8.9.1 Gleichung für den Gezeitenradius

In der Theorie lässt sich der **Gezeitenradius** (engl. *tidal radius*) berechnen, der angibt, ab welchem Abstand zum Schwarzen Loch die Gezeitenkräfte die *Selbstgravitation* des massiven Objekts dominieren. Die Formel für den Gezeitenradius lautet:

$$R_T = R_\star (M_{\text{BH}}/m_\star)^{1/3}. \quad (8.1)$$

Er wächst mit der dritten Wurzel der Masse des Loches (M_{BH}) an, wächst linear mit dem Radius des Objekts $R_\star$ und fällt mit der dritten Wurzel der Masse des Objekts $m_\star$ ab. Die Betrachtung ist wichtig, um abzuschätzen, bei welchen Abständen zum Loch Sterne durch diese enormen Kräfte zerrissen werden. Dieses Ereignis eines Sternzerrisses nennt man im englischen Fachjargon *stellar tidal disruption* (manchmal im Deutschen *Stellardisruption*). Solche Ereignisse sind mit einem deutlichen Anstieg in der Röntgenemission verbunden, weil die stellaren Trümmer nach dem Zerriss teilweise vom nahen Schwarzen Loch aufgesammelt werden. Es entsteht dabei ein charakteristischer **Röntgenblitz** (engl. *X-ray flare*), weil ein Materie aufsammlendes Loch immer Strahlung erzeugt. Wie im Eintrag Akkretion dargestellt, ist das sogar der effizienteste Weg um elektromagnetische Strahlung herzustellen.

In der Gleichung für den Gezeitenradius gibt man Masse und Radius des eingefangenen Sterns (engl. *captured star*), ebenso wie die Masse des Schwarzen Loches vor. Dann lässt sich der Gezeitenradius ablesen. Man muss dazu sagen, dass der Zahlenwert des Gezeitenradius in dieser Gleichung nur eine Abschätzung ist. Das hat zweierlei Gründe: Zum einen folgt die Gleichung aus einer rein Newtonschen Betrachtung der Gravitation; dies kann bei großer Nähe zum Ereignishorizont nicht mehr adäquat sein, weil sich hier die Krümmung der Raumzeit auswirkt. Zum anderen hängt der genaue Vorfaktor (hier 1) von der Bahnform des Sterns (Ellipse, Kreis) und der genauen Dichteverteilung im Stern ab.

8.9.2 Ein Zerriss im Verborgenen

Wir zeigen jetzt anhand der Gleichung für den Gezeitenradius, dass nicht bei allen Schwarzen Löchern ein Röntgenflare vom Sternzerriss sichtbar sein kann. Dazu betrachten wir einen **sonnenartigen Stern** und setzen in die Gleichung 8.1 den Sonnenradius und die Sonnenmasse ein (Daten unter Eintrag Sonne). Die Gleichung kann danach umgeschrieben werden, wenn man den ebenfalls masseabhängigen Schwarzschildradius (den Radius des Ereignishorizontes eines nicht rotierenden Schwarzen Loches vom Schwarzschild-Typ) einsetzt. Das Resultat ist folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} R_T &= R_\odot (M_{\text{BH}}/M_\odot)^{1/3} \\ &= 1.1 R_S \times \left(\frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_\odot} \right)^{-2/3}. \end{aligned}$$

Nun tragen wir in Diagramm 8.12 diesen Gezeitenradius eines sonnenartigen Sterns (grün) gegenüber dem Schwarzschildradius (rot) auf. Der Schnittpunkt der Geraden in doppeltlogarithmischer Auftragung liegt bei einer Masse des Schwarzen Loches von **1.1×10^8 Sonnenmassen**. Überschreitet die Lochmasse diesen kritischen Wert, unterschreitet der Gezeitenradius den Horizontradius. D.h. der Zerriss des Sterns ist **nicht** mehr beobachtbar, weil er hinter dem Horizont verborgen ist. Diese Aussage wird leicht für die kompakteren, rotierenden Kerr-Löcher oder für andere eingefangene Objekte wie Riesensterne (z. B. Roten Riesen) oder andere kompakte Objekte (Neutronenstern, Weißer Zwerg) modifiziert: So kann für ein maximal rotierendes Kerr-Loch (Kerr-Parameter $a = M$ in geometrisierten Einheiten), das einen Horizontradius von einem Gravitationsradius aufweist, die Masse des Schwarzen Loches geringfügig größer sein, bevor der Flare verschwindet. Die Kernaussage bleibt bestehen: Bei den schwersten unter den supermassereichen Schwarzen Löchern ist der Sternzerriss durch Gezeitenkräfte nicht beobachtbar. Der angegebene Zahlenwert von etwa 100 Mio. Sonnenmassen ist allerdings recht hoch und wird nur von zentralen Schwarzen Löchern in Quasaren und Riesenellipsen angenommen.

8.9.3 Wie oft passiert's? - Zerrissrate pro Galaxie

Im Falle der **Milchstraße** besteht eine gute Chance das Röntgenflare eines zerrissenen Sterns beobachten zu können, wenn es denn geschehen sollte. Der Sternzerriss ist nämlich ein relativ seltenes Phänomen und geschieht etwa **alle 10000 Jahre einmal** in einer Galaxie. Das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, assoziiert mit der kompakten Radioquelle *Sgr A**, hat eine Masse von etwa 3 Millionen Sonnenmassen. Demnach liegt der Gezeitenradius von *Sgr A** für sonnenartige Sterne bei 11.4 Schwarzschildradien oder 22.8 Gravitationsradien (entsprechend 101 Mio. km oder 0.68 AU).

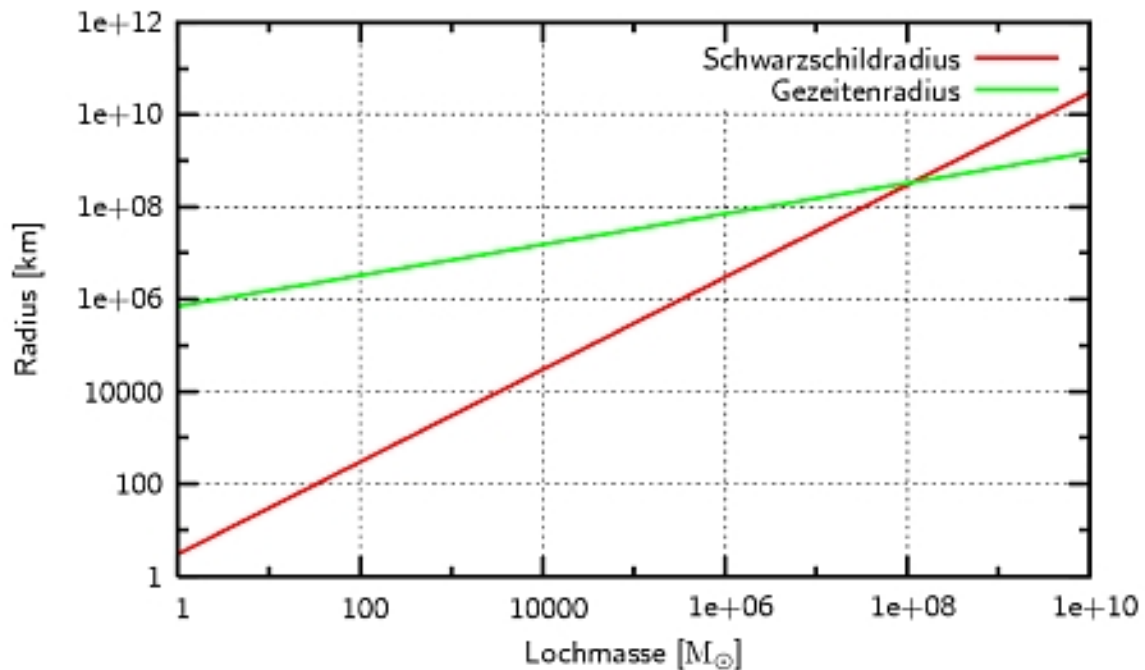


Abbildung 8.12: Schwarzschild- versus Gezeitenradius für sonnenartige Sterne.

8.9.4 Passiert und entdeckt!

Im Februar 2004 wurde bekannt gegeben, dass in der **Röntgenquelle RX J1242-1119**, einer elliptischen Galaxie mit einem zentralen supermassereichen Schwarzen Loch von etwa 200 Millionen Sonnenmassen, ein Röntgenflare eines Sterns beobachtet wurde, der den Gezeitenradius unterschritten hatte (*Komossa et al.* 2004, MPE Garching). Das ist die **erste gesicherte Beobachtung** dieser stellaren Zerreißprobe!

8.10 Gluonen

Die Gluonen (engl. *to glue*: kleben) sind die acht masselosen, elektrisch neutralen, aber farbgeladenen Austauschteilchen der starken Wechselwirkung. Die Physiker nennen diese acht Eichbosonen auch das *Farboktett*. Gluonen werden im Rahmen der Quantenchromodynamik (QCD) quantenfeldtheoretisch beschrieben.

8.10.1 Stark anfangen, schnell nachlassen

Die starke Wechselwirkung ist in der Tat die stärkste unter allen vier Kräften, wenn man die Kopplungen betrachtet. Aber sie ist auch **extrem kurzreichweitig**: nach nur etwa einem 'Fermi' - einem Femtometer im Jargon der Kernphysiker, also 10^{-15} Metern, was etwa dem Durchmesser der Nukleonen entspricht - ist Schluss mit starker Wechselwirkung! Das verwundert ein wenig, weil die Gluonen doch masselos sind und somit eine unendliche Reichweite gemäß der Behandlung mit einem Yukawa-Potential haben sollten (vergleiche

Photonen und Gravitonen).

8.10.2 Auch Gluonen mögen's bunt

Die Auflösung dieses Paradoxons ist verblüffend: Erstaunlicherweise tragen die Gluonen selbst die so genannte **Farbladung** (dagegen ist das Photon der Quantenelektrodynamik elektrisch neutral), was bedeutet, dass sie auch untereinander (also auch ohne Quarks) stark wechselwirken:

Gluonen spüren die Kräfte, die sie vermitteln!

Die räumliche Separation von Quarks, also eine Erhöhung des Abstands, führt zu sehr starken Gluonenfeldern zwischen ihnen. Die Feldenergie reicht aus, um über den Mechanismus der **Paarbildung** mindestens ein Paar aus Quark und entsprechendem Antiquark zu bilden. Diese Quarkpaare konstituieren wiederum farbneutrale (man sagt auch 'weiße') Mesonen. Die Farbneutralität bedeutet, dass nun auch keine starke Wechselwirkung mehr auftritt. Die starke Wechselwirkung ist zwar rein formal und Yukawa-konsistent unendlich, aber eine Abwesenheit von farbgeladenen Teilchen bei typischen Abständen im Fermi-Bereich führt zu ihrem Verschwinden.

Die Farbladung der Gluonen gestaltet die QCD komplizierter, als andere Quantenfeldtheorien. Die Wechselwirkung unter den Gluonen kann auch dazu führen, dass sie gebundene Systeme bilden, die man als **Gluonium** oder **Glueballs** (dt. Gluonenbälle) bezeichnet. Diese Form der Materie wurde allerdings noch nicht experimentell nachgewiesen.

8.10.3 Erster Nachweis in Deutschland

Sehr wohl wurden die Gluonen jedoch einzeln indirekt nachgewiesen. Dieser Nachweis geschah erstmals 1979 in Deutschland, in der *Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage* (PETRA) am Deutschen Elektronen Synchrotron (DESY) in Hamburg. Die Kollaboration um *Paul Söding*, *Günter Wolf*, *Björn Wiik* und *Sau Lan Wu* schloss von sternförmigen **hadronischen Jets** auf ein kurzzeitig existentes Gluon.

Der schnelle Zerfall von Gluonen in Quark-Antiquark-Paare führt zur schnellen Bildung von Hadronen in der Umgebung. In Teilchenbeschleunigern messen die Teilchenphysiker sie als hadronische Jets, also hadronische Teilchenströme.

8.10.4 Jet ist nicht gleich Jet

Diese Jets der Teilchenphysik sind jedoch scharf von den kosmischen Jets abzugrenzen! Der Begriff 'hadronischer Jet' ist zwar dort auch zu finden, meint aber makroskopische Jets auf der kpc- oder Mpc-Skala, die eine signifikante Menge an Protonen enthalten.

8.10.5 Gruppentheorie

Die Beschreibung der starken Eichbosonen im Rahmen der QCD gelingt mit einer speziellen, unitären Symmetriegruppe, der **Farb-SU(3)**. Dieser Umstand lässt unmittelbar die Zahl der Gluonen ableiten: Weil generell eine spezielle, unitäre Gruppe SU(N) gerade $N^2 - 1$ linear unabhängige $N \times N$ -Matrizen oder **Generatoren** hat (die als die Eichbosonen der Eichtheorie interpretiert werden), muss die Farb-SU(3) $3^2 - 1 = 8$ Gluonen besitzen!

8.11 Grad

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

In der Astronomie ist das Winkelgrad generell relevant für die Angabe von Winkeln - besonders gebräuchlich ist Grad als Einheit bei der **scheinbare Größe** von Himmelobjekten. So beträgt die Breite des Vollmondes fast ein halbes Grad. Auch das **Auflösungsvermögen** von Teleskopen wird im Gradmaß angegeben.

8.12 Granulation

Granulation bezeichnet ganz allgemeine eine *Körnung* (lat. *granum*: Korn).

8.12.1 Granulation von Sternplasma

Bei **Sternen** ist mit Granulation die Körnung der Sternoberflächen infolge der Konvektion gemeint. Für Einzelheiten siehe die Lexikoneinträge Photosphäre und Sonne.

8.12.2 Granulation von Raumzeiten

In **Quantengravitationen** wie der Loop-Quantengravitation (siehe dort für Details) bezieht sich Granulation auf die Raumzeit: die Raumzeit ist nicht mehr glatt und kontinuierlich wie in der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern sie ist gekörnt, d. h. diskretisiert in Quanten, den so genannten Wilson-Loops.

8.13 Gravastern

Gravastern (engl. *Gravastar*) ist eine Bezeichnung für eine **neuere, sphärisch symmetrische Lösung** der Einsteinschen Feldgleichungen. Der Name *Grava(c)star* ist ein Kunstwort aus Gravitation (*gravitation*), Vakuum (*vacuum*) und Stern (*star*). Aus diesem Grund kann man als Oberbegriff auch die Bezeichnung Vakuumsterne (*vacuum stars*) wählen. Alternativ, jedoch seltener verwendet, nennt man diesen neuen Objekttyp auch Quasi-Schwarzes Loch (engl. *quasi-black-hole*, QBH). Allgemeiner betrachtet gehören die Gravasterne zu den kompakten Objekten in der Astrophysik.

8.13.1 keine Singularität & kein Horizont

Gravasterne wurden von den theoretischen Physikern *Pawel Mazur* (University of South Carolina, USA) und *Emil Mottola* (Los Alamos, USA) im Jahr 2001 als Alternative zu den **singulären Schwarzen Löchern** vorgeschlagen. Sie haben die erstaunliche Eigenschaft, dass sie *regulär* sind, d. h. es gibt **keine intrinsische Singularität** bei $r = 0$!

Die zweite, wesentliche Eigenschaft ist, dass sie **keinen Ereignishorizont** haben. Die Fluchtgeschwindigkeit bleibt demnach immer knapp unterhalb der

Gravastern

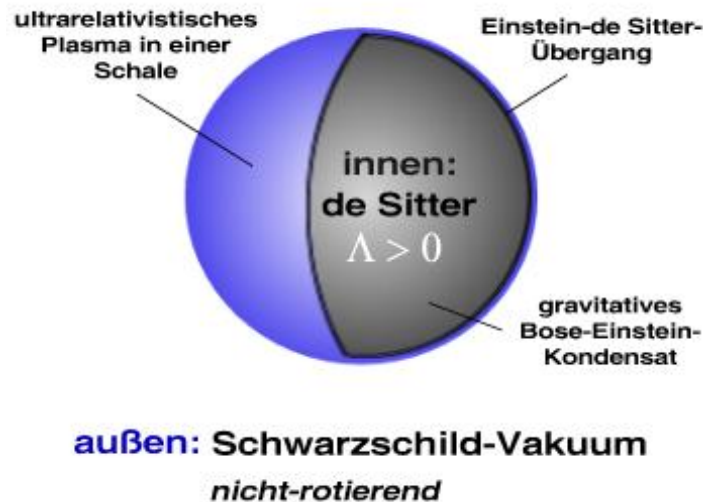


Abbildung 8.13: Struktur eines Gravasterns.

Lichtgeschwindigkeit. Anders gesagt bleibt der relativistisch verallgemeinerte Doppler-Faktor (Rotverschiebungsfaktor, **g-Faktor**), der am Horizont Schwarzer Löcher exakt null wird, an der Oberfläche von Gravasternen endlich, ist aber sehr klein, etwa 10^{-25} ! Ohne Horizont gibt es bei diesen Objekten daher auch **keine** Hawking-Strahlung (allerdings ist die Emission einer thermischen Strahlung anzunehmen).

8.13.2 Struktur von Gravasternen: drei Zonen

- ◇ 1) Im Außenraum entspricht er der Schwarzschild-Lösung für nicht-rotierende Schwarze Löcher. Dieser Bereich ist materiefrei und asymptotisch flach.
- ◇ 2) Dann schließt sich eine **dünne Materieschale** an, die aus einem ultrarelativistischen Quantenfluid besteht, das eine schwache Quelle des Gravitationsfeldes ist. Ultrarelativistisch bedeutet, dass diese Materie am *kausalen Limit* existiert: die Schallgeschwindigkeit in diesem Medium ist gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit. Die Dicke der Schicht ist in der Größenordnung der Planck-Länge. Diese Schale soll während des Gravitationskollapses eines Sterns oder Sternhaufens entstanden sein. Letztendlich bewirkt gerade die Materieschale, dass es nicht zur Ausbildung eines Horizonts kommt. Erreicht die Materie im Kollaps das kausale Limit, so findet ein *Quantenphasenübergang* statt. Die äußere Schwarzschild-Vakuumraumzeit geht in ein anderes relativistisches Vakuum über: der de-Sitter-Raumzeit. Noch bevor sich ein Horizont ausbilden kann, geht die stark gekrümmte Raumzeit (in der eine hohe Energie steckt) in ein so genanntes **gravitatives Bose-Einstein-Kondensat (GBEK)** über. Dieser Phasenübergang zeigt viele Analogien zum klassischen Bose-Einstein-Kondensat in der Festkörperphysik. Bei Gravasternen wählt man ein Bose-Fluidum als Quelle

des Gravitationsfeldes. Deshalb steckt man in das Wirkungsfunktional des Systems die Einstein-Hilbert-Wirkung und diejenige eines Skalarfeldes.

- ◇ **3)** Das GBEK ist schließlich der innerste Bereich des Gravasterns, der den weitaus größeren Anteil an der Masse des Gravasterns hat: es handelt sich um eine **Blase aus Dunkler Energie!** Dieser Innenraum ist ebenfalls materiefrei (daher Vakuum) und kommt einer **de-Sitter-Lösung** (positive kosmologische Konstante) gleich, die man aus der Kosmologie kennt. Die 'Blase' aus Dunkler Energie stabilisiert mit einem nach außen gerichteten Druck die dünne Materieschale (siehe 2) und verhindert so dessen Kollaps. Eine positive kosmologische Konstante Λ bedeutet, dass es sich um eine repulsive Kraft handelt, die der Gravitationskraft entgegen wirkt: um **Antigravitation**. In der Fachsprache heißt die Übergangsregion zwischen Schwarzschild- und de-Sitter-Vakuum auch **Quantenphasen-Interface**. Im Prinzip verbindet diese 'Haut' zwei Vakuumzustände miteinander, nämlich das de-Sitter-Vakuum innerhalb mit dem Schwarzschild-Vakuum bzw. asymptotisch Minkowski-Vakuum außerhalb (bis unendlich).

8.13.3 Strahlung von der Gravasternoberfläche

Die Zustandsgleichung innerhalb der Schale ist sehr 'steif'. Die Schalenmaterie ist noch kompakter als Neutronensternmaterie, denn die Schallgeschwindigkeit ist hier identisch mit der Lichtgeschwindigkeit. Es ist daher zu erwarten, dass **Schockfronten** an der Übergangsschicht abprallen. Die Fürsprecher des Gravastern-Modells sehen darin eine Möglichkeit zur *Unterscheidung der Gravastern von singulären Schwarzen Löchern*. Denn an (materiefreien) Ereignishorizonten gibt es keine derartigen Abpralleffekte. Andere Theoretiker (*Chapline et al.*) berechneten, dass eine Reflektionseigenschaft vorliege, so dass harte Gammastrahlung am Übergang reflektiert werde, aber weichere Photonen durch die Materiehaut gelassen (*transmittiert*) werde, d. h. energiearmes Licht wird verschluckt. Problematisch ist, dass diese Rechnungen besagen, dass Gammastrahlung zwar reflektiert werde, aber diese dennoch aufgrund der Gravitationsrotverschiebung stark rotverschoben werde. Das schmälert die Chance ihrer Detektion und die Zuversicht einer Verifikation/Falsifikation beträchtlich.

8.13.4 Was passiert mit einfallender Materie?

Die **Akkretion eines Gravasterns** ist Gegenstand aktueller Diskussionen. Im für die Beobachtung ungünstigsten Fall verändert sich die aufgesammelte Materie derart, dass sie beim Auftreffen auf die Schale in das Bose-Einstein-Kondensat im Innern umgewandelt wird. Dadurch sollte der Gravastern - wie die Schwarzen Löcher - wachsen, weil er ebenfalls einen Masseparameter hat. In diesem Szenario wäre aber eine Beobachtung äußerst schwierig, weil die ultrakalte Materieschale fast gar nicht leuchtet (nur sehr schwache Wärmestrahlung eines Schwarzen Körpers). Hinzu kommt, dass diese schwache Strahlung dann durch den Einfluss der stark gekrümmten Metrik extrem rotverschoben wird.

8.13.5 Unterscheiden ist schwierig

Astrophysiker müssen mit Beobachtungen sehr nahe an das kompakte Objekt herankommen, bis auf etwa zwei Gravitationsradien (gleich ein Schwarzschild-Radius, R_S), um eine

Unterscheidung von Gravasternen und Schwarzen Löchern angehen zu können. Stark rotverschoben ist jedoch in beiden Fällen die Strahlung, die aus diesem Bereich kommt. Nur sind Schwarze Löcher absolut schwarz und Gravasterne 'grau'. Ausgedrückt in relativistisch verallgemeinerten Dopplerfaktoren gilt für ein Schwarzschild-Loch $g(R_S) \equiv 0$ und für einen Gravastern dagegen nur $g(R_S) \sim 0$.

8.13.6 geschichtlicher Hintergrund

An sich ist die Diskussion von Schwarzschild-de-Sitter-Übergängen nicht neu und geht auf eine Idee von *Sakharov* (1965) und *Gliner* (1966) zurück. In den 1980er Jahren wurden diese Ansätze aufgegriffen, um die Kosmologie voranzutreiben. *Mazur* und *Mottola* haben 2001 die Formen der Zustandsgleichungen aufgegriffen, um die Metrik eines Gravasterns auszurechnen.

8.13.7 Da sollte man hinschauen

Sollten Gravasterne existieren, favorisiert man deren Entstehung in Supernovae massereicher Sterne oder in Hypernovae bzw. lang andauernden Gamma Ray Bursts. Diese Sternexplosionen sind gute Beobachtungskandidaten, um Gravasterne zu entdecken. Bisher gibt es jedoch kein konsistentes Modell, das beschreibt, wie ein massereicher Stern in einen Gravastern übergehen könnte. Das ist nur mit detaillierten Kollapsrechnungen zu bewerkstelligen.

8.13.8 zukünftige Forschungsvorhaben

Nach dem Birkhoff-Theorem ist der sphärisch symmetrische Gravastern notwendigerweise **statisch**. Das ist im Lichte der Astrophysik ein Nachteil der Gravasterne, weil gerade die **schnell rotierenden Schwarzen Löcher** (beschrieben durch die Kerr-Lösung der ART) viele astronomische Beobachtungen befriedigend erklärt:

- ◇ Schnell rotierende Löcher wurden vielfach in Mikroquasaren beobachtet (Röntgenflares, Quasi-periodische Oszillationen);
- ◇ Ein rotierendes Schwarzes Loch existiert auch im Zentrum der Milchstraße;
- ◇ Schnell rotierende Schwarze Löcher sind der favorisierte Mechanismus, um magnetohydrodynamisch Jets von Röntgendoppelsternen und vor allem von Aktiven Galaktischen Kernen anzutreiben.

Eine Verallgemeinerung der Gravastern-Lösung auf den *rotierenden Fall* ist deshalb erwünscht, aber bislang nicht gelungen.

Ein anderer Aspekt ist, dass es nicht genügt, wenn eine Raumzeit Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen ist - es muss auch gezeigt werden, dass die Lösung **stabil** ist. Ist das nicht der Fall, wird dieser Zustand in der Natur gar nicht erst erreicht. Auch die Stabilität von Gravasternen wurde bisher nicht überzeugend dargelegt.

8.13.9 Gravasterne mit anisotropem Druck

Im Gegenteil: Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Gravastern-Modelle, die komplett aus einer idealen Flüssigkeit bestehen, scheitern: Entweder würden sie zu unendlicher

Größe anschwellen, oder es würde sich doch ein Horizont bilden. Die Lösung dieses Stabilitätsproblems ist aus der Sicht neuseeländischer Gravitationsforscher ein **Gravastern mit anisotropem Druck** (*Cattoen et al.* 2005). Das bedeutet, dass der Druck im Gravastern nicht in alle Richtungen gleich sei. Die Anisotropie muss in der Gravasternschale gewährleistet sein. Die Eigenschaft negativen Druckes im Innern bleibt jedoch erhalten. Stetige Lösungen mit isotropem Druck (wie das ursprüngliche Gravastern-Modell nach Mazur und Mottola) haben eine immer Polstelle im Druck als Funktion vom Radius. Das ruft eine unphysikalische, nackte Singularität hervor. Das ist eine neue Erkenntnis in der Gravasternphysik.

8.13.10 skeptische Community

Die Reaktionen der Astronomen auf Gravastern-Modelle sind recht verhalten. Für die einen ist es das, auf das sie ewig gewartet haben, für andere ist nur eine weitere akademische (d. h. überflüssige) Lösung der Einstein-Gleichungen. Dasselbe gilt für eine weitere Alternative zum Schwarzen Loch, die einige Ähnlichkeiten zum Gravastern aufweist, nämlich dem Holostern (*Petri* 2003).

Auf diesem Gebiet muss deshalb sowohl seitens der Theorie, als auch seitens der Beobachtung einiges erforscht werden. Es ist jedenfalls eine heiße Spur, deren Verfolgung hilft, die Rätsel der Schwarzen Löcher zu lösen. Denn auch die klassischen Schwarzen Löcher haben Eigenschaften, die den Physikern Kopfzerbrechen bereiten - vor allem die Krümmungssingularität. Dieser 'Punkt unendlicher Krümmung' ist vielleicht nur ein Artefakt der klassischen Beschreibung mit der ART. Es gibt zwar die Singularitätentheoreme von *Roger Penrose* und *Stephen Hawking*, die die Existenz von Singularitäten erzwingen; doch diese Theoreme erfordern bestimmte Voraussetzungen. Der Gravastern enthält keine Singularität und steht damit in Widerspruch zu den Singularitätentheoremen. Disqualifiziert das den neuen Vorschlag? Oder signalisiert das vielmehr, dass die Singularitätentheoreme einer Überarbeitung bedürfen? Denn auch die Voraussetzungen der Theoreme kann man hinterfragen. Dieser Konflikt ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

8.13.11 Weitere Literatur

- ◇ *Mazur, P. & Mottola, E.*: Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes, Preprint: gr-qc/0109035
- ◇ *Cattoen, C., Faber, T. & Visser, M.*: Gravastars must have anisotropic pressures, *Class. Quant. Grav.* 22, 4189 (2005), Preprint: gr-qc/0505137
- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation

8.14 Gravitation

Die Gravitation (lat. *gravitas*: Schwere) ist eine der vier fundamentalen Kräfte in der Natur: die Schwerkraft.

8.14.1 Der Schwächling unter den Vieren

Diese Kraft ist von allen vier Grundkräften diejenige, die uns besonders vertraut ist. Die anderen Kräfte sind die elektromagnetische Kraft, starke und schwache Kraft - die beiden

letztgenannten spielen eine besondere Rolle im subatomaren Bereich und sind wichtig, um den Zusammenhalt der uns umgebenden Materie zu verstehen.

Vergleicht man die Stärken der vier Fundamentalkräfte der Physik, z. B. mithilfe der *Kopplungskonstanten*, so wird klar, dass die Schwerkraft **die schwächste aller Kräfte** ist. Aufgrund dieser Tatsache kommt ein Dachziegel, der von einem Haus fällt, nicht bis zum Mittelpunkt der Erde, sondern zersplittert auf dem Erdboden: die elektromagnetischen Kräfte zwischen den Atomen des Ziegels und des Bodens haben für eine plötzliche Abstoßung gesorgt, eine Kraft, die die Gravitation nicht überwinden konnte. Noch stärker als der Elektromagnetismus ist die starke Kraft, der es sogar gelingt, elektrisch gleichartig geladene Protonen in einem Atomkern zusammenzuhalten. Der starken Kraft, aber auch der schwachen Kraft (Radioaktivität), verdanken wir also die Vielfalt der chemischen Elemente.

8.14.2 Der Schwächling dominiert

Doch das Attribut schwach ist nicht gleichbedeutend mit unwichtig: Die Gravitation ist die dominante Kraft auf der ganz großen Längenskala - sobald wir von Astronomischen Einheiten, Lichtjahren oder gar Milliarden Parsec sprechen. Denn Gravitation und elektromagnetische Kraft haben eine **unendliche Reichweite**! Doch die Schwerkraft hat im Gegensatz zum Elektromagnetismus die Eigenschaft, dass sie sich **nicht abschirmen** lässt. Die Konsequenz ist:

Gravitation dominiert das Universum.

Sie ist es, die die großräumigen Strukturen formt: Sie lässt die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne tanzen, sie komprimiert massereiche Sterne am Ende ihres Daseins zu Schwarzen Löchern, und sie bringt sogar Galaxien und Galaxienhaufen zum Verschmelzen.

8.14.3 Aber was ist eigentlich Gravitation?

So vertraut uns die Schwerkraft im Alltag ist, so rätselhaft ist sie auch. Es ist keinesfalls leicht zu verstehen, was die **Natur der Gravitation** ist. Selbst im 21. Jahrhundert wissen Physiker und Astronomen zwar viel über die Schwerkraft, aber auch heute noch sind wir weit davon entfernt, alles verstanden zu haben. Ist Gravitation überhaupt eine Kraft?

In den nächsten Abschnitten knöpfen wir uns fast 2400 Jahre menschlichen Denkens vor, das sich als bedeutsam für das Verständnis der Schwerkraft zeichnete. Das ist sicherlich ein wenig Aufwand, doch *Gravitation* ist ein wesentlicher Begriff der Physik und somit auch dieses Lexikons. Am Ende der Lektüre steht hoffentlich eine Ahnung von dem, was Gravitation überhaupt ist.

Antiker Vordenker: Aristoteles

Zu einem gut dokumentierten Pionier der Schwerkraftforschung muss man griechischen Gelehrten *Aristoteles* (384 - 322 v. Chr.) rechnen. Aristoteles ist eigentlich eher bekannt als bedeutender Geisteswissenschaftler, als Schüler *Platons* und als Erzieher *Alexander des Großen*. Aristoteles versuchte jedoch auch die Bewegung von Sonne, Mond und den damals bekannten Planeten durch recht einfache Modelle zu erklären. Die **ruhende Erde war im Zentrum** dieses Modells (*geozentrisches Weltbild*), und um sie kreisten Sonne, Mond und Planeten. Der **Kreis** als vollkommene, geometrische Figur stellte die Grundlage dar,

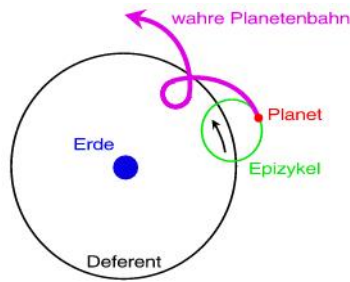


Abbildung 8.14: Illustration des Epizykel-Modells.

um die Bewegungen dieser Körper als Kreisbewegungen aufzufassen. Das erklärte die in etwa periodische Wiederholung der Bewegung der Gestirne. Denn war die Kreisbahn einmal beendet, begann der Zyklus von neuem. Die Sterne wurden dabei als bewegungslose Fixsterne betrachtet. Ohne präzise Messungen und Beobachtungen war dieses Modell konsistent mit den Naturbeobachtungen. Da es in Einklang mit den kirchlichen Lehren stand, überdauerte dieses Aristotelische Weltbild viele Jahrhunderte.

Aristoteles versuchte auch die **Bewegung fallender Körper** auf der Erde zu erklären. Der gerade Fallweg war für ihn ein Beleg dafür, dass die Erde ruhe. Diese ersten Überlegungen mit dem Prinzip 'Naturbeobachtung - erklärendes Modell' stehen bereits im Geiste der fast 2000 Jahre späteren Aufklärungsepoche (Experiment - Theorie). Aristoteles legt hier somit die ersten (wenn auch nicht ganz überzeugenden) phänomenologischen Modelle für die Schwerkraft vor.

Das Epizykel-Modell nach Ptolemäus

Eine kleine Modifikation erfuhr das Modell für die Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten durch den alexandrinischen Gelehrten *Claudius Ptolemäus* (100 - ca. 160 n. Chr.). Er ist der Autor des **ersten Standardwerks der Astronomie**, das unter dem Namen *Almagest* bekannt wurde. Auch das *Ptolemäische Weltbild* ist geozentrisch und fußt auf Kreisbahnen - allerdings wurde Komplexität dadurch ins Spiel gebracht, dass sich die Mittelpunkte von Kreisbahnen ihrerseits auf Kreisen, den so genannten *Deferenten*, bewegen. Der Kreis auf dem Deferenten heißt **Epizykel** (ἐπί κύκλος, grch. 'Überkreis'). Eine Illustration dieses einfachen, geometrischen Modells zeigt die Abbildung 8.14. Das Modell wahrte einerseits die Sonderrolle der Kreisfigur, die von den Aristotelikern als vollkommen angesehen wurde; andererseits vermag das Epizykel-Modell kompliziertere Bewegungen zu erklären: So war damals schon die *rückläufige Bewegung* (z. B. bei Mars) bekannt, die im Aristotelischen Weltbild vollkommen unverständlich war. Wie die Illustration zeigt, weist die resultierende Bahnform des Planeten Schleifen auf, in denen sich der Planet von der Erde aus gesehen rückläufig bewegt. Die Ptolemäische Epizykel-Theorie erklärte demnach die beobachtete Rückläufigkeit. Aber leider waren nicht alle Bewegungen der Himmelskörper mit Epizykeln widerspruchsfrei zu beschreiben.

Galilei - Gravitationsforscher und Pionier der Astronomie

Der italienische Physiker, Mathematiker und Philosoph *Galileo Galilei* (1564 - 1642) ist der erste, der systematisch und mathematisch die Gravitation erforschte. Galilei soll **Fallexperimente** am Schiefen Turm von Pisa durchgeführt haben, um seine Hypothese zu testen, ob Gewicht oder Dichte eines Körpers darüber entscheiden, wie schnell der Körper fällt. Galilei führte auch zahlreiche mechanische Experimente mit **Pendeln** und mit rollenden Objekten auf der **schiefen Ebene** durch. Er erklärte die **Bahn von Geschossen im Schwerefeld** durch eine Überlagerung zweier Bewegungen, nämlich gleichmäßig beschleunigter Fallbewegung und gleichförmig geradliniger Geschossbewegung (*Superpositionsprinzip*) und bewies die **Parabelbahn**.

Randbemerkungen: Bedeutsam und bekannt ist Galileo Galilei für seine astronomischen Entdeckungen: er verbesserte das Holländische Fernrohr, das *Hans Lipperhey* erfunden hatte und beobachtete 1610 erstmals die Krater des Mondes, die Zusammensetzung der Milchstraße aus Sternen und vier Monde des riesigen Gasplaneten Jupiter (*Galileischen Monde*). Seine Entdeckung der Venusphasen bestätigte das Kopernikanische, heliozentrische Weltbild in der Beobachtung. Die Entrückung der Erde aus dem Zentrum der Welt und die Annahme ihrer Bewegung führte zur offenen Auseinandersetzung mit der katholischen Kirche. 1633 wurde Galilei des schweren Verdachts auf Ketzerei nach Rom vorgeladen, und im gleichen Jahr schwor er von der heliozentrischen Lehre ab. 1992 wurde Galilei von der katholischen Kirche durch Papst Johannes Paul II. offiziell rehabilitiert.

Albert Einstein, zu dem wir im Verlauf dieses Lexikoneintrags noch kommen werden, schrieb über Galilei:

Alles Wissen über die Wirklichkeit geht von der Erfahrung aus und mündet in ihr. Rein logisch gewonnene Sätze sind mit Rücksicht auf das Reale völlig leer. Durch diese Erkenntnis und insbesondere dadurch, dass er sie der wissenschaftlichen Welt einhämmerte, ist Galilei der Vater der modernen Physik, ja, der modernen Naturwissenschaft überhaupt geworden.
(entnommen aus *Die Klassiker der Physik*, S. 334, Verlag Hoffmann und Campe, 2004)

Newtonsche Gravitation

Die Erforschung der Gravitation hat durch den englische Universalgelehrten *Sir Isaac Newton* (1643 - 1727) einen gewaltigen Durchbruch erlangt. Newton ist für viele Leistungen berühmt geworden: die Begründung der Differential- und Integralrechnung, Entdeckungen in der Optik (Farbtheorie, Korpuskulartheorie des Lichts) und die heute nach ihm benannte Gravitationstheorie. Die **Newtonsche Gravitationsphysik** ist die erste Gravitationstheorie, die den Namen Theorie verdient, weil sie ein konsistentes, umfassendes Konzept und nicht bloß Phänomenologie oder Hypothese ist. Newton stellte diese Theorie in seinem Werk *Philosophiae naturalis principia mathematica* dar. Dieses Werk *Principia* ist das erste Standardwerk der theoretischen Physik überhaupt! Der Titel ist eine Replik auf die *Principia Philosophiae* von *René Descartes*.

Newton widmete sich 1665 der Optik und Gravitation. Die Geschichte mit dem vom Baum **fallenden Apfel**, der Newton am Kopf getroffen und ihn zur Gravitationstheorie inspiriert haben soll, ist wohl ein Mythos - Newton schrieb lediglich, dass ein fallender Apfel ihn veranlasste, über Gravitation nachzudenken. 27jährig wurde Newton (auf Empfehlung des Vorgängers dieses Amts) Lukasischer Professor der Mathematik - ein Lehrstuhl der Universität Cambridge, den heute übrigens *Stephen Hawking* inne hat. Newton kannte die astronomischen



Abbildung 8.15: Inspirierte Fallobst zur Gravitationsforschung?.

Beobachtungen von *Johannes Kepler* und dessen Entdeckung, dass die Planeten sich auf Ellipsenbahnen um die Sonne bewegen. 1666 begann Newton nach einer physikalischen Erklärung dieser rein empirischen Kepler-Gesetze zu suchen. Das zweite Keplersche Gesetz (*Flächensatz*) konnte er 1679 dadurch erklären, dass es eine **anziehende Zentralkraft** geben müsse, die von der Sonne ausgehe.

Ein Treffen dreier Mitglieder der *Royal Society* im Jahre 1684 sollte zum Schlüsselereignis werden: Hier trafen sich Newtons Widersacher *Robert Hooke*, der Astronom *Edmond Halley* und der Architekt *Christopher Wren*. Sie diskutierten über eine Kraft, die proportional zum umgekehrten Abstandsquadrat sei und die Planetenbewegung bestimme. Angeregt durch diese Diskussion fragte Halley bei Newton nach der Bahnform eines Himmelskörpers, die aus diesem Kraftgesetz resultiere. Newton hatte diese Fragestellung bereits Jahre zuvor berechnet und wusste, dass es eine Ellipsenbahn sein müsse. Die detaillierte Ausarbeitung dieser Rechnung mündete schließlich in eine anderthalbjährige Schaffensphase Newtons und in die Publikation der *Principia* 1687. Das Buch I der *Principia* enthält die drei Bewegungsgesetze, die heutzutage als *Newtonsche Gesetze* gelehrt werden, nämlich das **Trägheitsgesetz**, das **dynamische Grundgesetz** und das **Reaktionsprinzip** (*actio = reactio*). Das in dieser Gleichung

$$F = \frac{dp}{dt}$$

dargestellte dynamische Grundgesetz ist in der Schulphysik viel bekannter in der Form $\mathbf{F} = m \mathbf{a}$, aber dieser Fall gilt nur, falls die Masse zeitunabhängig, $m \neq m(t)$, ist. Das ist im Allgemeinen aber nicht der Fall (z. B. bei der so genannten *Raketengleichung*: eine fliegende Rakete verliert Treibstoff und daher Masse), so dass das Gesetz als zeitliche Ableitung des Impulses $\mathbf{p}$ formuliert werden muss. Das Buch II ist ein Lehrbuch über Strömungsmechanik. Schließlich stellt Newton in Buch III sein **Gravitationsgesetz** vor

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

und demonstriert die Gültigkeit dieser Gravitationstheorie anhand der Bewegungen von Planeten und Kometen. Die Newtonsche Theorie besagt auch, dass sich **Gravitation instantan** ausbreite, d. h. ohne Laufzeitverzögerung. Außerdem haben Zeit und Raum einen **absoluten Charakter** in der Newtonschen Physik. Im nächsten Abschnitt werden wir sehen, dass sich diese Eigenschaften der Gravitation als nicht haltbar erweisen und die Newtonsche Gravitation zur Einsteinschen Gravitation verallgemeinert werden muss.

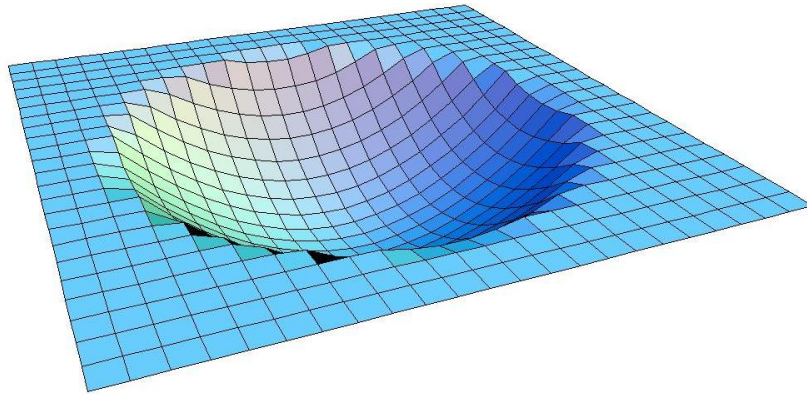


Abbildung 8.16: einfache Darstellung einer gekrümmten Raumzeit.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Abbildung 8.17: Feldgleichung der ART.

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie

Im Jahr 1916 präsentierte *Albert Einstein* (1879 - 1955) eine vollkommen neuartige Sicht auf die Gravitation. In diesem Jahr publizierte er die Allgemeine Relativitätstheorie (ART), eine (unquantisierte) Gravitationstheorie, die die Gravitation nicht als Kraft, sondern als **geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit** auffasst. Dieser Gravitationstheorie vorangegangen war die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), die keine Gravitationstheorie darstellt, die jedoch die revolutionäre Neudefinition der Begriffe Energie, Masse, Zeit und Raum einleitete. Gemäß Einstein sind Raum und Zeit miteinander verknüpft zu einem vierdimensionalen Gebilde: der Raumzeit. Während die Raumzeit in der SRT noch flach ist, wird sie in der ART gekrümmt. Wie man sich vereinfacht in einer zweidimensionalen Variante eine **gekrümmte Raumzeit** vorstellen kann, zeigt Abbildung 8.16. Die 'Beule' in dieser 2D-Raumzeit kommt durch Massen zustande. Einstein hat bereits in der SRT erkannt, dass Energie und Masse äquivalent sind, was in der berühmten Formel $E = mc^2$ zusammengefasst wird. Die Konsequenz: Massen und alle Formen von Energie verursachen 'Beulen' in der Raumzeit. Eine (kräftefreie) Bewegung durch die Raumzeit ist nun nicht in beliebiger Form möglich, sondern nur entlang bestimmter Kurven, die in der ART **Geodäten** genannt werden. Die Geodäten 'schlängeln' sich durch die 'verbeulte Raumzeit' - wie das genau geschieht, diktieren Rechengesetze der Differentialgeometrie. Die Bewegung entlang der Geodäten nehmen wir als Gravitation war. Wir bewegen uns also täglich unter dem Einfluss der gekrümmten Raumzeit! Die Abstraktionsleistung ist gewaltig, um dieses neue Bild der Gravitation halbwegs fassen zu können. Niemand kann sich eine vierdimensionale, gekrümmte Raumzeit vorstellen, aber unterdrückt man einige Dimensionen, so lassen sich zumindest **Raum-Zeit-Diagramme** zeichnen, die beim Verständnis helfen. Einsteins neue Gravitationstheorie lässt sich in eine einzige, aber leider komplizierte Formel fassen: die **Feldgleichungen der ART**. Es ist die übersichtliche Gleichung in Grafik 8.17 (hier zur

Vereinfachung ohne kosmologische Konstante Λ). In dieser knappen Form besagt die Formel direkt, dass die gekrümmte Raumzeit, die in $\mathbf{G}$ steckt, von Masse und Energie, die in $\mathbf{T}$ stecken, hervorgerufen wird; die Gleichung enthält weiterhin den Aspekt, dass die Beulen der Raumzeit die Bewegung diktieren. Allerdings täuscht die Einfachheit dieser Formel! Hinter den Symbolen $\mathbf{G}$ und $\mathbf{T}$ verbergen sich mathematische Objekte, die **Tensoren** genannt werden. Genauer gesagt ist $\mathbf{G}$ der Einstein-Tensor und $\mathbf{T}$ heißt Energie-Impuls-Tensor. Im Allgemeinen sind diese Objekte sehr kompliziert, bestehen aus mehreren Komponenten und variieren von Raumzeitpunkt zu Raumzeitpunkt.

Ein Gravitationsfeld der Newtonschen Physik wird nun also durch eine Raumzeit in der Einsteinschen Physik ersetzt. Die Raumzeit ist Lösung von Einsteins Feldgleichung und eindeutig beschrieben durch die Metrik (den metrischen Tensor $\mathbf{g}$) oder alternativ durch das Linienelement. Die Gravitationskraft Newtons wird abgelöst von den Christoffel-Symbolen, dem Riemann-Tensor und anderen mathematischen Größen der ART (1-Formen, 2-Formen, Killing-Felder, Kretschmann-Skalar, Ricci-Tensor, Ricci-Skalar etc.). Häufig ist von Interesse wie sich Testobjekte durch eine gekrümmte Raumzeit bewegen. Um dieses Problem zu lösen muss die **Geodätengleichung** gelöst werden. Für Licht heißt dieses Verfahren relativistisches Ray Tracing.

Raumzeiten sind im Allgemeinen auch *dynamisch*, d. h. sie verändern ständig ihre Krümmungseigenschaften. Das geschieht insbesondere bei **Gravitationswellen**, die sich ebenfalls mit Einsteins Theorie beschreiben lassen. Es handelt sich um Beulen in der Raumzeit, die sich mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c ausbreiten. Das ist ein wichtiger Unterschied zur Newtonschen Physik: Gravitation breitet sich in Einsteins Theorie nicht beliebig schnell, sondern exakt mit c aus.

Einsteins ART hat sich vielfach in Experimenten bewährt. Eine Reihe experimenteller Tests und Erfolge sowie die Theorie selbst werden im Lexikoneintrag Allgemeine Relativitätstheorie in vielen Einzelheiten vorgestellt.

8.14.4 relativistische Astrophysik

Einsteins Theorie hat auch die Astronomie stark geprägt: Viele astrophysikalische Vorgänge können nur mit der Einsteinschen Gravitation zufrieden stellend behandelt werden. Der Gravitationskollaps zu einem kompakten Objekt (z. B. Neutronensterne) ist ein Beispiel dafür. In der Akkretionsphysik wurden Modelle etabliert, die auf der ART basieren. Aber auch auf der ganz großen Raumskala, ist die Einsteinsche Theorie die richtige Wahl: die Kosmologie ist relativistisch. So kann auch das komplette Universum als Lösung der Einsteinschen Feldgleichung aufgefasst und mit der Robertson-Walker-Metrik beschrieben werden. Die Friedmann-Weltmodelle, die aus der ART hervorgehen, beschreiben exzellent viele Beobachtungen der experimentellen Kosmologie (siehe dazu kosmische Hintergrundstrahlung, Supernovae Typ Ia). Eine Reihe beobachteter Phänomene sind im Rahmen der Newtonschen Gravitation nicht zu verstehen, z. B. gravitative und kosmologische Zeitdilatation, Rotverschiebung und Gravitationsrotverschiebung sowie Frame-Dragging.

8.14.5 kosmologische Bedeutung der Gravitation

Die Bedeutung der Gravitation für das ganze Universum begründet sich in zwei Eigenschaften, die eingangs schon erwähnt wurden: Gravitation hat im Prinzip eine **beliebige Reichweite**, und sie ist **nicht abzuschirmen**. Aufgrund der ersten Eigenschaft kann Gravitation auch

über extrem große Distanzen wirken - bis Milliarden von Lichtjahren, also Skalen, die so groß sind, wie der Kosmos selbst. Aufgrund der zweiten Eigenschaft, Nichtabschirmbarkeit, gibt es kaum eine Möglichkeit Gravitation aufzuhalten (es sei denn durch Antigravitation - dazu mehr im nächsten Abschnitt). Die Konsequenz ist das, was Astrophysiker die **gravitative Instabilität** nennen. Anschaulich kann man das so beschreiben, dass die Materie durch den Einfluss der Gravitation anfängt zu 'klumpen': Wird die Jeans-Masse lokal für eine Massenansammlung überschritten, so setzt der Gravitationskollaps ein. Später fragmentiert dieser Klumpen zu kleineren. Diese Szenarien sind wesentlich, um die Herkunft der **großräumigen Struktur** im Kosmos zu begreifen. Aus der anfänglichen Verteilung des 'Urgases', das in der primordialen Nukleosynthese entstand, bildete sich die erste Sterngeneration (Population III) durch gravitative Instabilitäten. Durch den Einfluss der Gravitation entstanden daraus die ersten Galaxien - so lief es zumindest in einem **hierarchischen Wachstumsszenario** ab.

8.14.6 Antigravitation

Die relativistische Kosmologie hat eine Form der Gravitation hervorgebracht, die feuchte Augen bei Science-Fiction-Fans hervorruft: **Antigravitation**. Um den Zusammenhang zu erklären, müssen wir einen Blick auf die moderne Kosmologie werfen. Die Dynamik der bereits angesprochenen Friedmann-Weltmodelle wird von den Energieformen im Kosmos bestimmt. Die 'normale', baryonische Materie, aus der wir auch selbst bestehen, ist dabei eine Energieform, dessen Bedeutung jedoch so gut wie irrelevant ist. Eine andere Materieform, die Dunkle Materie, ist viel häufiger im Universum anzutreffen. Sie beeinflusst nicht nur die Dynamik und Entwicklung von Galaxien, sondern auch vom Kosmos insgesamt. Ihr relativer Anteil beträgt etwa ein Drittel. Was sich allerdings konkret hinter der Dunklen Materie verbirgt ist ein Rätsel - die aktuellen Vorstellungen werden im Eintrag Dunkle Materie präsentiert.

Kommen wir nun zum entscheidenden Teil: die verbleibenden zwei Drittel der Energie im Universum gehen auf das Konto der **Dunklen Energie**. Was genau hinter dieser mysteriösen, kosmischen Zutat steckt, ist ein brisantes und hochaktuelles Forschungsgebiet. Es ist keine konkrete Materieform, sondern die Physiker favorisieren, dass sich das überall im Universum fein verteilte Quantenvakuum selbst als kosmologisch relevante Energieform manifestiert. Das astronomische Beobachtungsfaktum ist eine **beschleunigte Expansion** des Kosmos. Im Standardmodell der Kosmologie wird das durch die Existenz der Dunklen Energie erklärt (Alternativen werden im Eintrag Dunkle Energie aufgezeigt).

Das Besondere an der Dunklen Energie ist ihre Zustandsgleichung, weil sie einen **negativen Druck** aufweist. Das klingt recht unphysikalisch, aber vermag die Beobachtungen erstaunlich gut zu erklären. Der so genannte w -Parameter liegt laut astronomischen Beobachtungen nahe bei $w = -1$. Damit wird aus einer ganzen Palette von Modellen für Dunkle Energie ein bestimmtes von der Natur offensichtlich bevorzugt, und zwar die **kosmologische Konstante**, die niemand Geringeres als Einstein 1917 eingeführt hat. Sie hat gerade den passenden w -Parameter - und sie variiert zeitlich nicht, was ebenfalls zu aktuellen Beobachtungen an weit entfernten, explodierenden Weißen Zwergen passt. Eine solche Zustandsgleichung sorgt für eine Expansion des Universums, die als Antigravitation aufgefasst werden darf. Denn Dunkle Energie wirkt der Gravitation entgegen. Anhand der Friedmann-Gleichung kann man zeigen, dass zu späteren Entwicklungsperioden hin, der Einfluss der antigravitativen Dunklen Energie gewinnt. Die aktuelle Datenlage sagt eine ewige und immer schnellere

Expansion des Universums voraus. Am Ende steht ein **kalter Kosmos**, in dem vermutlich nur noch Schwarze Löcher (mit unterschiedlichen Massen und Drehimpulsen) und vielleicht noch Schwarze Zwerge existieren.

8.14.7 Schwerkraft auf Quantenniveau

Allerdings hat auch die Einsteinsche Gravitation ihre Grenzen. Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgangen sein, dass die ART mit dem Attribut *unquantisiert* versehen wurde. Das bedeutet, dass die Konzepte der zweiten großen, physikalischen Theorie des 20. Jahrhunderts, der Quantentheorie, keine Beachtung in Einsteins Theorie gefunden haben. Das geschah nicht aus Ignoranz: Gerne hätte Einsteins eine solch umfassende Feldtheorie erfunden; tatsächlich arbeitete er in seinen letzten Lebensjahren an dieser übergeordneten Theorie - doch diese Herausforderung war selbst für Einstein zu groß.

Eine solche quantisierte Gravitationstheorie wird mit dem Etikett **Quantengravitation** versehen. Die Motivation dafür ist, dass Quanteneffekte auch bei gravitativen Vorgängen wichtig werden, nämlich dann, wenn **starke Gravitation und kleine Längenskala** zusammenkommen. Wo passiert denn so etwas in der Natur? Es geschieht bei Objekten, die von der Gravitation dominiert werden und die sehr kompakt sind, nämlich bei **Schwarzen Löchern**. Laut Einsteins ART lauert in jedem Schwarzen Loch ein punktförmiges Objekt, in dem die Krümmung der Raumzeit ins Unermessliche wächst. Diese phantastischen Orte heißen Krümmungssingularitäten (und sind streng von den Koordinatensingularität zu unterscheiden!). Aber gibt es tatsächlich Punkte in der Natur? Die Konzepte der Quantentheorie negieren das. Die Physik Schwarzer Löcher ist eine erste Motivation, um sich an eine Ausarbeitung einer Quantengravitation zu wagen.

Eine zweite Motivation liefert die Kosmologie des frühen Universums: die Hochenergiephysiker haben herausgefunden, dass unsere Welt der vier Naturkräfte nicht im jungen Kosmos anzutreffen war. Das Temperaturmilieu führte dazu, dass einige Kräfte miteinander 'verschmolzen': Je heißer es ist, umso weniger fundamentale Naturkräfte sind vorhanden. Der 'Gipfel' dieser **Unifikation** soll als Urkraft in der Planck-Ära vorgeherrscht haben. Die Gravitation sei die erste gewesen, die sich mit Expansion und dadurch bedingter Abkühlung, von der Urkraft abgespalten haben soll. Die Fachleute nennen diesen Übergang **Symmetriebrechung**. Nach der ersten Symmetriebrechung lagen zwei fundamentale Naturkräfte vor: Gravitation und X-Kraft in der so genannten GUT-Ära. Die Frage, die die Hochenergie- und Teilchenphysiker antreibt, ist, wie man die Gravitation mit den anderen Quantenkräften *einheitlich* als Quantenfeldtheorie beschreiben könnte.

Im Quantenbild ist die Gravitation weder Kraft, noch gekrümmte Raumzeit: sie ist Eichboson. So nennen die Quantenfeldtheoretiker quantisierte 'Botenteilchen', die die Kraft vermitteln. Im Falle der Gravitation hat dieses Austauschteilchen auch einen Namen, nämlich **Graviton**. Die Eigenschaften der Gravitation verlangen einige Eigenschaften des Gravitons, z. B. dass es Spin 2 haben *muss*. Helle Aufregung ist daher entstanden, als in den 1970er Jahren eine Theorie entdeckt wurde, die Spin-2-Teilchen enthält. Diese Theorie war eine der ersten Varianten der **Stringtheorien**. Damit wurden die Stringtheorien schlagartig zum interessantesten Kandidaten einer Quantengravitation. Auch im 21. Jahrhundert gehören die Stringtheorien zu den aktivsten Gebieten der theoretischen Physik. Wie unter dem Eintrag Stringtheorien erläutert wird, steckt diese Forschung in einem Wechselbad aus Erfolgen und Zweifel. Eine Problematik besteht beispielsweise darin, dass bis heute dieses Botenteilchen der Gravitation nicht experimentell entdeckt wurden. Auf der Erfolgsseite kann die Stringtheorie

eine moderne Sichtweise auf Gravitation und Eichung verbuchen: So wurde die **AdS/CFT-Korrespondenz** entdeckt, die auf einen tief liegenden Zusammenhang zwischen Gravitation und Teilchentheorien hinweist. Inzwischen wurde das Prinzip verallgemeinert und wird zurzeit erforscht (*gauge/gravity duality*). Weitere Erfolge sind Modelle die sich unter der Bezeichnungen **Branenwelt** versammeln. Diese Modelle, beispielsweise die Randall-Sundrum-Modelle oder das Zyklische Universum, haben ganz erstaunliche Eigenschaften und vermögen bislang Unverstandenes (Koinzidenzproblem, Schwäche der Gravitation, Kleinheit der kosmologischen Konstante, Ursache des Urknalls etc.) auf sehr elegante Weise zu erklären.

In den 1980er Jahren ist eine andere Variante der Quantengravitation hinzugekommen, die einen etwas anderen Ansatz verfolgt. Nah an den Konzepten der Einsteinschen Gravitation (siehe z. B. unter dem Zungenbrecher Diffeomorphismusinvarianz), betont die **Loop-Quantengravitation** (LQG) den geometrischen Charakter der Gravitation. Im Rahmen dieser Theorie ist die Quantisierung der Raumzeit in so genannte Wilson-Loops tatsächlich gelungen. Mit den Konzepten der LQG können in der Tat die Singularitäten der ART beseitigt werden! Das gilt sowohl für die Krümmungssingularität Schwarzer Löcher, als auch für die Urknallsingularität. Die Theorie und ihre Prognosen werden unter dem Eintrag Loop-Quantengravitation vorgestellt.

Stringtheorien und Loop-Quantengravitation sind die beiden bedeutenden Anwärter, die das Potenzial haben, die Einsteinsche Gravitation zu erweitern. Der Skeptiker mag einwenden, dass es bislang keine überzeugenden Hinweise aus Experimenten gibt, die diesen Quantengravitationen den Status einer bewährten Gravitationstheorie verleihen würden. Das ist der gravierende Unterschied zu den Theorien von Newton und Einstein. Die Gravitationsforscher bleiben jedoch sehr aktiv, um diesen Nachweis zu erbringen. Wichtige, neue Impulse werden von der Teilchenbeschleunigeranlage der modernsten Generation erwartet: dem *Large Hadron Collider* (**LHC**).

8.14.8 Approximatives, Spekulatives & Exotisches

Mit dem bisher Gesagten könnte der Eintrag über Gravitation eigentlich schließen, aber es sollte auch etwas über Gravitationstheorien abseits des Mainstreams gesagt werden. Im Folgenden sollen **approximative und alternative Gravitationstheorien** knapp vorgestellt werden.

Gravitationstheorien mit Torsion

Bei den Gravitationstheorien mit Torsion verschwindet der Torsions-Tensor nicht. Die ART hingegen ist *torsionsfrei*, was *symmetrische* Christoffel-Symbole zur Folge hat. Bei Gravitationstheorien mit Torsion handelt man sich also zusätzliche Terme ein, die es in der ART gar nicht gibt. Das gestaltet diese Alternativen komplizierter als die ART.

Fernparallele Gravitation

Fernparallele Gravitation oder kurz **Fernparallelismus** wurde 1928 von Einstein als neue Gravitationstheorie *mit* Torsion erfunden. In dieser Theorie ist Schwerkraft nicht eine Folge der Krümmung einer Raumzeit, sondern vielmehr eine Folge der Verdrillung der Raumzeit (Torsion). Die Gravitationsforscher konnten zeigen, dass Fernparallelismus und ART als *gleichwertige Formulierungen* der Gravitation aufgefasst werden können.

Aktuell publizieren Gravitationstheoretiker die entsprechenden fernparallelen Pendants zu den gewohnten Lösungen der Feldgleichungen der ART.

In der modernen Gravitationsphysik wird außerdem versucht, noch andere Formen des Fernparallelismus zu konstruieren, die *nicht* als Analog der ART aufgefasst werden können. In diesen fernparallelen Gravitationstheorien (engl. *teleparallel gravity*) können völlig neue Einsichten in die Natur der Schwerkraft gewonnen werden. Die Hoffnung ist, auf diesem Wege eine Gravitationstheorie zu finden, die der Einsteinschen Theorie übergeordnet ist oder interessante Querverbindungen zu Eich-, Feld- und Quantengravitationstheorien ziehen zu können.

Skalar-Tensor-Theorien

Bei den Skalar-Tensor-Theorien liegt die Idee zugrunde, dass neben dem metrischen Tensor ein *weiteres* **Skalarfeld** vorhanden ist. Dieses Feld koppelt an den Krümmungsskalar (*Ricci-Skalar*), aber nicht an den metrischen Tensor. Die ART kann aus einem Wirkungsfunktional abgeleitet werden, das in der Literatur *Einstein-Hilbert-Wirkung* genannt wird. Hier fehlt ein Skalarfeld. Das Wirkungsfunktional der Skalar-Tensor-Theorien enthält entsprechend zusätzliche Terme. Das Skalarfeld kann nun mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgestattet werden: es kann in jedem Raumzeitpunkt konstant sein, oder es kann variieren. Im Falle einer Variation kann davon gesprochen werden, dass die Newtonsche Gravitationskonstante G nun *keine fundamentale Naturkonstante* mehr ist. Es gibt viele Varianten der Skalar-Tensor-Theorien. Die bekannteste ist die **Brans-Dicke-Theorie**.

MOND-Theorie

Die MOND-Theorie (siehe dort für Details), die 1983 von dem israelischen Physiker *Mordehai Milgrom* erfunden wurde, ist eine Gravitationstheorie, die das Newtonsche Gravitationsgesetz um einen zusätzlichen Faktor korrigiert. Dieser Faktor hängt von der Beschleunigung ab und vermag u. a. das Rotationsverhalten vieler Spiralgalaxien sehr gut zu erklären - erstaunlicherweise *ohne* Dunkle Materie.

TeVēS

TeVēS stellt gewissermaßen einen 'Ableger' von MOND dar, weil sie aus der relativistischen Erweiterung von MOND entdeckt wurde. *Jacob D. Bekenstein* hat 2004 diese **Tensor-Vektor-Skalar-Gravitationstheorie** formuliert, die sozusagen noch einen Schritt weiter geht als die Skalar-Tensor-Theorien, weil ein zusätzliches Vektorfeld enthalten ist. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass TeVēS viele Beobachtungen der modernen Kosmologie gleichermaßen zu erklären vermag wie die Einsteinsche Theorie. Dennoch ist diese recht neue Theorie umstritten und befindet sich erst am Anfang eines langwierigen Evaluierungs- und Testprozesses.

Post-Newtonsche Approximation

Die so genannte Post-Newtonsche Approximation der Einsteinschen Gravitation wird gewonnen, wenn man den Grenzübergang $v/c \ll 1$ von der ART zur Newtonschen Physik durchführt, **aber Terme der linearen Ordnung v/c** belässt. Pseudo-Newtonsche (PN) Gravitation ist so etwas wie eine 'Zwittergravitation zwischen Einstein und Newton'. Sie

bietet sich insbesondere in der Himmelsmechanik an, wenn hinreichend gute Resultate für Bahnbewegungen gewünscht sind, aber nicht voll relativistisch gerechnet werden kann oder soll. Die Ermittlung der approximativen Gravitationsgleichungen sind zwar recht aufwendig, können aber sehr bequem in Computercodes zur Lösung des Schwerkraftproblems implementiert werden. So werden PN-Codes gerne zur Berechnung von Phänomenen mit Gravitationswellen herangezogen. Zur Erhöhung der Genauigkeit und damit zur noch besseren Annäherung an die Einsteinsche Gravitation, kann die entsprechende Ordnung v/c einfach erhöht werden, z. B. PN 5. Ordnung.

Eine analoge Methodik wird von Gravitationsforschern zur Approximation anderer Gravitationstheorien, z. B. einer Skalar-Tensor-Theorie, durchgeführt. Das unterstreicht die Universalität und Brauchbarkeit des Näherungsverfahrens.

Pseudo-Newtonsche Gravitation

Im Rahmen der Pseudo-Newtonschen Gravitation wird eine Annäherung an die Einsteinsche Gravitationsphysik angestrebt. Punktmassen werden relativistisch mit der Schwarzschild-Lösung beschrieben. Der pseudo-Newtonsche Ansatz besteht in einem 1980 von *B. Paczynski* und *P. Wiita* vorgeschlagenen Modell, das das Schwerefeld einer Punktmasse nachahmt. Dazu wird nicht die typische und mathematisch aufwendige Tensorschreibweise benutzt, sondern die Potentialformulierung, die annahmet wie eine Newtonsche Gravitationsphysik. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass nicht das übliche Newtonsche Potential verwendet wird, sondern das so genannte **Paczynski-Wiita-Potential**. Dieses neue Potential skaliert mit dem Schwarzschild-Radius und vermag entsprechend bis zu einem gewissen Grad die Gravitationseffekte um eine Punktmasse und insbesondere die Effekte nahe einem statischen Schwarzen Loch zu simulieren. Die Genauigkeit mit der die relativistischen Effekte imitiert werden können, beträgt etwa 10-20%, sofern Radien außerhalb der marginal stabilen Bahn (hier bei sechs Gravitationsradien) betrachtet werden.

Gravitation mit Extradimensionen

Eine interessante Variante einer Gravitationstheorie, sind die **Feldtheorien mit Extradimensionen**. Es handelt sich um die Theorien, die weitere Raumdimensionen, nicht jedoch weitere Zeitdimensionen zulassen. Das besondere ist, dass die Gravitation auch in den höheren Raumdimensionen wirkt - nicht jedoch die anderen Naturkräfte. Damit erklären Gravitationstheorien mit zusätzlichen Raumdimensionen, die in der modernen Sprache auch **Branenmodelle** genannt werden, sehr elegant das Hierarchieproblem in der Physik.

Der historisch erste Vorschlag war die **Kaluza-Klein-Theorie**, die als 5D-Feldtheorie auf eine Vereinheitlichung des Elektromagnetismus und der ART abzielte. Die Theorie scheiterte damals, enthält aber Aspekte, die auch heute wieder (im Rahmen der Stringtheorien) interessant sind, z. B. die Kompaktifizierung der Extradimensionen. Interessanterweise können einige Theorien mit Extradimensionen auf die Form von Skalar-Tensor-Theorien gebracht werden. Mit anderen Worten: die Eigenschaften der Extradimensionen können als Skalarfeld identifiziert werden. Beispiele dafür sind das Radion bzw. Dilaton.

Im Wissensportal werden folgende Branenmodelle im Detail vorgestellt: das **ADD-Szenario**, die **Randall-Sundrum-Modelle**, das **DGP-Szenario** und das **Zyklische Universum**. Alle Modelle geben wertvolle, neue Einsichten in physikalisches Neuland. Allerdings ist bislang nicht klar, ob in der Natur tatsächlich diese Form der Physik realisiert

ist. Eventuell bringt die Klärung der Pioneer-Anomalie diesbezüglich neue Erkenntnisse.

f(R)-Gravitation

Die f(R)-Gravitation (siehe diesen Eintrag für Einzelheiten) ist eine Modifikation von Einsteins ART. Im Wirkungsfunktional werden dabei **nichtlineare Zusatzterme** berücksichtigt, die eine beliebige Abhängigkeit von dem **Krümmungs- oder Ricci-Skalar** R haben können - daher die Bezeichnung f(R). Die Dynamik der Gravitation wird bestimmt von einer Feldgleichung, die aus diesem neuen Wirkungsfunktional resultiert. Die Nichtlinearitäten sorgen dabei für neue Effekte, dass beispielsweise die Gravitation auch bei schwachen Krümmungen wesentlich oder sogar zu einer beschleunigten Ausdehnung der Raumzeit führen kann. Der letztgenannte Aspekt macht die f(R)-Modell interessant für die Kosmologie, weil ein f(R)-Szenario die Rolle der Dunklen Energie übernehmen könnte. Derzeit werden viele **f(R)-Familien** vorgestellt, analysiert, falsifiziert und ihre Bedeutung für die Gravitationsforschung, Astrophysik und Kosmologie ausgelotet. Damit diese Alternative sich etablieren kann, sind noch viele erfolgreich absolvierte Bewährungsproben notwendig.

8.14.9 Bedeutung der Gravitation für den Menschen

Will man die Milliarden dauernde Entwicklung des Universums auf den Punkt bringen, so stellt man Folgendes fest: Wir erfahren Gravitation nicht nur täglich als Kraft, die uns am Erdboden hält, sondern ihre sehr subtilen und einzigartigen Eigenschaften, die sie unter allen Naturkräften auszeichnen, sind überhaupt dafür verantwortlich, dass wir hier sind! Die Auswirkungen der Gravitation auf unser Leben manifestieren sich in vielen Aspekten: Die Leben spendende Energie der Sonne wäre ohne Gravitation gar nicht vorhanden; der Lauf der Gestirne, der unsere kulturell verfestigten Zyklen wie Tag, Monat und Jahr formte, ist ebenfalls ein Produkt der Gravitation; ohne Gravitation hätte die Erde keine Atmosphäre, deren Gase die Evolution des Lebens mit einer phantastischen Vielfalt bereichert haben - diese Liste ließe sich weiter fortsetzen. Wir sollten daraus den Schluss ziehen, etwas bodenständiger zu werden und nicht abzuheben, sondern dem gewichtigen Einfluss der Gravitation in Demut, aber nicht mit Schwerkut, zu begegnen.

8.14.10 Literaturtipps

- ◇ C. W. Misner, K. S. Thorne & J. A. Wheeler: **Gravitation**, Freeman San Francisco, 1973
- ◇ **Die Klassiker der Physik - $E = mc^2$** , Verlag Hoffmann und Campe, 2004

8.15 Gravitationskollaps

Im Allgemeinen versteht man darunter in der Astrophysik den Zusammenfall eines massiven Objektes unter der Wirkung der eigenen Schwerkraft.

8.15.1 Schau 'mal, was da kollabiert

So kollabiert im Rahmen der Sternentwicklung eine kalte Gas-, Staub- und/oder Molekülwolke bei Erreichen einer kritischen Masse - der so genannten Jeans-Masse - zu einem Protostern.

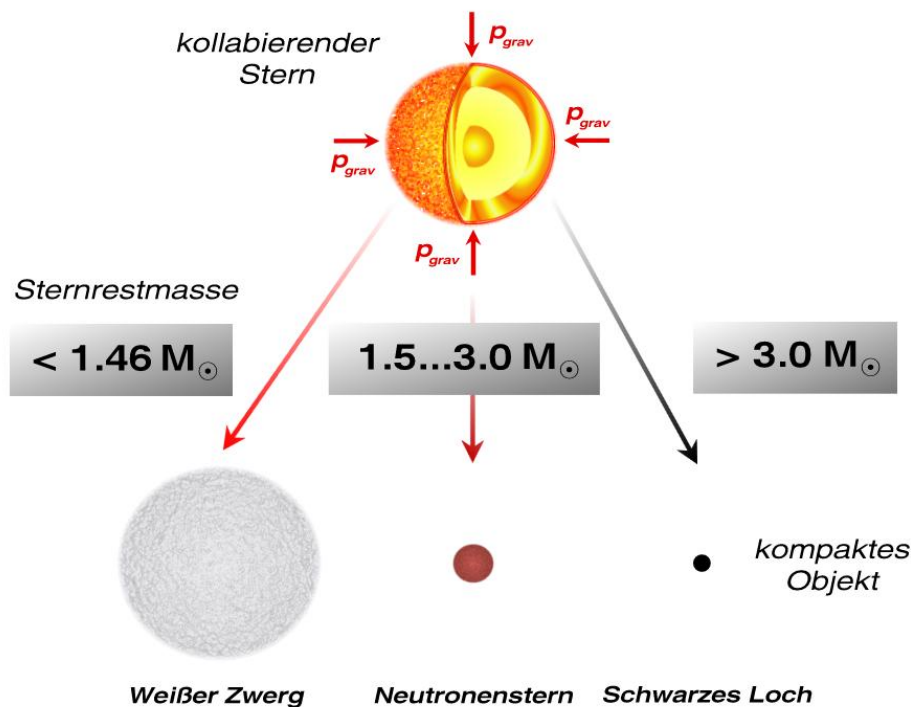


Abbildung 8.18: Ende eines Sterns in Abhängigkeit seiner Masse.

In 'normalen' Sternen wird der Gravitationsdruck durch Gas-, Zentrifugal- und Strahlungsdruck kompensiert: Der Stern steht im hydrostatischen Gleichgewicht. Wichtig in diesem Zusammenhang ist der Gravitationskollaps 'sterbender' Sterne. So bezeichnen Astronomen das Ende der normalen Sternphase und den Übergang zu einem kompakten Objekt. Der Kollaps setzt dann ein, wenn die inneren, thermonuklearen Fusionsprozesse enden und das nukleare Feuer erlischt. Der Reststern fällt im freien Fall unter der Wirkung der Eigengravitation in sich zusammen. Zunächst gewinnt der Gravitationsdruck die Oberhand, kann aber womöglich gestoppt werden.

8.15.2 Die Masse macht's

Was mit dem kollabierenden Stern geschieht, hängt von seiner **Masse und Zusammensetzung** ab, wie Abbildung 8.18 zusammenfasst. Im Gravitationskollaps wird die Materie mehr und mehr verdichtet. Dabei kann sie ihre Eigenschaften entscheidend verändern. Physiker nennen diese meist sprunghaften Änderungen **Phasenübergänge**. *Phase* ist ein Begriff der Thermodynamik (Wärmelehre). Beispiel eines simplen, aus dem Alltag bekannten Phasenübergangs ist kochendes Wasser: Bei Raumtemperatur flüssiges Wasser - die flüssige Phase - kocht bei etwa 100 Grad Celsius und verdampft - in die gasförmige Phase. Ähnliches geschieht bei den Phasenübergängen kollabierender Sternmaterie.

8.15.3 Endzustand 1: Weißer Zwerg

Aufgrund des Pauli-Prinzips der Quantentheorie können Teilchen mit halbzahligem Spin, die Fermionen, nicht beliebig stark verdichtet werden. Dies betrifft zunächst die Elektronen in der kollabierenden Sternmaterie, die fermionisch sind. Das Pauli-Verbot sorgt bei hohen Dichten für den **Entartungsdruck der Elektronen**. Wiegt die Kollapsmaterie nicht mehr als 1.46 Sonnenmassen (mit einer leichten Abhängigkeit von der Zusammensetzung), so kann der Entartungsdruck dem Gravitationsdruck standhalten und das System ins Gleichgewicht bringen! Die gerade erwähnte kritische Massengrenze heißt Chandrasekhar-Masse nach dem indischen Astrophysiker, der sie entdeckte. Die so stabilisierten, stellaren Objekte heißen Weiße Zwerge. Diese Objekte sind sehr heiß und strahlen deshalb weiß (siehe Effektivtemperatur). Den zweiten Namenszusatz Zwerge verdanken sie ihrer geringen Größe: Sie haben nur einen Durchmesser, der vergleichbar der Erde ist, aber wiegen typischerweise soviel wie die Sonne! Diese erste Möglichkeit für ein kompaktes Objekt nach dem Gravitationskollaps ist im Bild links zu sehen. Weiße Zwerge kühlen langsam aus und werden schließlich zu Schwarzen Zwergen. Dieser Vorgang dauert jedoch gut 10 Mrd. Jahre, was vergleichbar mit dem Alter des Universums ist. Das Alter eines Weißen Zwergs kann drastisch verkürzt werden, wenn er durch Aufsammeln von Materie (Akkretion), beispielsweise von einem nahen Begleitstern, die Chandrasekhar-Masse überschreitet: Dann explodiert der Weiße Zwerg in einer spektakulären Sternexplosion, die nichts übrig lässt. Diese Explosion ist eine Supernova vom Typ Ia und ist von großer Bedeutung für die Kosmologie.

8.15.4 Endzustand 2: Neutronenstern

Bei höheren Restmassen der kollabierenden Sternmaterie kann auch der Entartungsdruck der Elektronen nichts mehr ausrichten. Die Elektronen werden bei den immensen Dichten buchstäblich in die Atomkerne gepresst; die Kernphysiker nennen das einen inversen Beta-Zerfall. Die Konsequenz dieser kernphysikalischen Umwandlungsprozesse auf subatomarem Niveau ist die **Neutronisierung** der Materie. Nun hat die Sternmaterie einen Phasenübergang vollzogen und die Eigenschaften komplett verändert. Neutronen sind allerdings auch Fermionen, so dass nun der Entartungsdruck der Neutronen den kollabierenden Stern stabilisiert. Neben den Neutronen gibt es eine Reihe exotischer Teilchen (Hyperonen, Kaonen, Diquarks, schließlich sogar freie Quarks, wie Astrophysiker vermuten), die sich bei noch höheren Dichten bilden. Das so stabilisierte, noch kompaktere Objekt heißt Neutronenstern. Auch er wiegt etwa soviel wie die Sonne, hat allerdings nur einen Durchmesser von etwa 20 Kilometern! Die Massengrenze für Neutronensterne ist seit Jahren strittig unter den Experten: Ein konservativer Wert liegt bei zwei bis drei Sonnenmassen, der aus der Theorie relativistischer, kompakter Sterne folgt (*Nauenberg & Chapline* 1973; *Rhoades & Ruffini* 1974). Mittlerweile werden auch deutlich kleiner Grenzmassen diskutiert, z. B. 1.5 bis 1.8 Sonnenmassen (*Burgio* 2004). Stein des Anstoßes ist die Zustandsgleichung der Neutronensternmaterie: Es ist einfach nach wie vor unklar, was mit so kompakter Materie im Detail geschieht. Die inhomogene Schalenstruktur unterschiedlicher Materieformen im Innern des Neutronensterns macht die theoretische Beschreibung außerordentlich kompliziert. Wertvolle Hinweise kann in dieser strittigen Frage die beobachtende Astronomie liefern, weil es in vielen Fällen möglich ist, Massen und Radien von Neutronensternkandidaten am Himmel zu messen. Aus diesen Parametern folgen Eigenschaften der inneren Struktur, die ein theoretisches Modell favorisieren könnten.

Neutronensterne findet man entsprechend in der Mitte der ersten Abbildung oben. Neutronensterne sind bereits hochrelativistische Objekte. Sie vermögen recht effektiv aufgrund von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie Licht einzufangen, abzuschwächen und zu röten. Dieses Phänomen hat die Bezeichnung Gravitationsrotverschiebung. Deshalb sind Neutronensterne im Bild dunkelrot dargestellt. Neutronensterne werden in der Regel von den Astronomen entdeckt, wenn ein scharf gebündelter Strahlungskegel, der nahe an der Neutronensternoberfläche entsteht, die Erde trifft. Diese Neutronensterne heißen Pulsare. Neutronensterne können auch besonders starke Magnetfelder aufweisen und heißen dann Magnetare.

8.15.5 Endzustand 3: Schwarzes Loch

Es gibt aber auch das ultimative kompakte Objekt, das einen Neutronenstern in Kompaktheit und Masse übertrifft: ein stellares Schwarzes Loch. Theoretisch werden sie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) beschrieben und kursieren hier unter den Namen Schwarzschild-Lösung (nicht rotierend) und Kerr-Lösung (rotierend). Es gehört zu den größten Geheimnissen der Astrophysik, was genau mit der Materie beim Kollaps zu einem Schwarzen Loch passiert. Im Rahmen der Relativitätstheorie, die eine klassische, unquantisierte Theorie ist, weisen Schwarze Löcher tief im Innern Singularitäten auf. Sie sind die Quelle der Gravitation, weil aus der Sicht der Theorie der Rest der Raumzeit 'leer' ist. Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch ist der Kollaps auf einen Punkt! Die Gravitationsrotverschiebung in der Nähe des Lochs ist so stark, dass jede Strahlungsemission unterdrückt wird. Das markiert den Ereignishorizont und macht die Schwärze der Löcher aus. Der Horizont verhüllt die intrinsische Raumzeit-Singularität (so genannte *kosmische Zensur*). In einer Singularität wird die Krümmung unendlich (siehe auch Riemann-Tensor und Kretschmann-Skalar) und eine physikalische Beschreibung bricht zusammen. Im Rahmen der klassischen ART lässt sich nur sagen, dass in der Singularität 'Masse ohne Materie' existiert. In einem Schwarzen Loch hat Materie sämtliche Eigenschaften bis auf Masse und Drehimpuls verloren. Diesem Sachverhalt trägt das No-Hair-Theorem Rechnung, das von dem Relativisten *John A. Wheeler* begründet wurde. Er ist es auch, der im Auftreten der Krümmungssingularitäten den Zusammenbruch der klassischen Physik sieht. Vielleicht zeigen Singularitäten, dass hier der Zuständigkeitsbereich einer völlig neuen physikalischen Theorie beginnt.

Die moderne Physik kennt bereits solche Theorien wie die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation, die versuchen über die klassische ART hinauszugehen. Auf der Basis dieser aktuellen Erkenntnisse ergeben sich neue Ansätze für das Vakuum und Quantenvakuum. Vorsichtig gesagt könnte sich mit den neuen Theorien ein Ende von klassischen Schwarzen Löchern ankündigen, wie die aktuell diskutierten Alternativen Holostern und Gravastern andeuten - aber noch sind die Physiker nicht soweit.

8.15.6 Jeder soll es sehen: spektakuläre Verwandlungen

Die Bildung Weißer Zwerge läuft relativ unspektakulär ab: Der massenarme Vorläuferstern, der mit der Sonne vergleichbar ist, bläht sich zum Roten Riesen auf und verliert seine äußeren Sternhüllen, die einen Planetarischen Nebel bilden. Die restliche Stermaterie fällt in sich zusammen und hinterlässt einen Weißen Zwerg.

Für den Entstehungsprozess der letzten beiden Typen kompakter Objekte, Neutronensterne und stellare Schwarze Löcher, muss der Vorläuferstern sehr massereich sein. Typisch sind 8

bis 20 Sonnenmassen. Das finale Szenario ist katastrophal: Im Gravitationskollaps läuft eine Schockwelle ins Innere des Sterns. Im Kern gibt es bereits einen hochverdichteten Sternkern, der besonders eisenhaltige Prä-Neutronenstern. Die einlaufende Schockwelle wird an dieser dichten Materie (engl. *hard core*) reflektiert und läuft wieder nach außen. Dort zerreißt sie die äußeren Sternhüllen und verursacht die Explosion des Sterngiganten in einer **Supernova Typ II** (engl. *core-collapse SN*). Der innere Teil kollabiert und formt einen Neutronenstern. Wenn mehr Masse in sich zusammenfällt, läuft der Gravitationskollaps ähnlich ab, nur wird die Explosion noch heftiger und leuchtkräftiger und heißt deshalb **Hypervnova** bzw. langzeitiger Gammastrahlenausbruch. In diesem Fall entsteht ein Schwarzes Loch.

Der Kollaps ist im Allgemeinen **asymmetrisch** und versetzt damit dem entstehenden kompakten Objekt einen '**Kick**': Es findet also ein Impulsübertrag statt. So wurde ein *astro-archäologisches Objekt* mithilfe des Weltraumteleskops *Hubble* entdeckt: ein stellares Schwarzes Loch von etwa sechs bis sieben Sonnenmassen, das vermutlich in einem dichten Kugelsternhaufen gebildet wurde. Durch den Kick hat es den Haufen verlassen und ist so eines der ältesten Objekte der Milchstraße, das seither auf einer stark exzentrischen Bahn die galaktische Ebene kreuzt. Ähnliches beobachtet man bei einigen Neutronensternen, die mit hoher Geschwindigkeit durch den interstellaren Raum vagabundieren.

Unter dem Eintrag Penrose-Diagramm befindet sich die Darstellung eines kugelsymmetrischen (und daher idealisierten) Gravitationskollapses, der zu einem stellaren Schwarzen Loch führt. In diesem Raumzeit-Diagramm kann man unterschiedliche Typen von Geodäten verfolgen und die Ausbildung eines Ereignishorizonts schematisch visualisieren.

8.15.7 kleine Anmerkung

Oben war von drei *Endzuständen* die Rede; es kommt durchaus vor, dass die kompakten Objekte, die sich nach dem Gravitationskollaps eines Sterns gebildet haben, *vorläufigen* Charakter haben. Das hängt von der Umgebung ab. Wenn der 'End'zustand mit Materie gefüttert wird, kann beispielsweise der Weiße Zwerg in einer SN Ia vollständig zerrissen werden; befindet sich ein Neutronenstern in einem Doppelsternsystem mit einem weiteren Neutronenstern, wird das System früher oder später durch die Emission von Gravitationswellen verschmelzen und zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Einzig die Schwarzen Löcher sind als wirkliche Endzustände zu bezeichnen - nicht mal durch die Abstrahlung von Hawking-Strahlung würden sie verschwinden, weil das für Schwarze Löcher mit Sonnenmasse schon deutlich länger dauert, als das Alter des Universums!

Zu diesen klassischen drei und beobachteten Endzuständen gesellten sich in jüngster Zeit einige **Alternativen**: der Bosonenstern, der Fermionenstern, der Quarkstern, der Strange Star, der Gravastern, der Holostern, der Vakuumstern - jedoch gibt es bislang keine überzeugenden Argumente für die Existenz all dieser modernen Alternativen.

8.15.8 Web-Artikel

◇ Kompakte Objekte des Himmels (inkl. Tabelle mit beobachteten Quellen)

8.16 Gravitationskühlung

Gravitationskühlung ist ein dissipationsloser Vorgang, der zur Verdichtung einer Konfiguration durch Aussendung von Konstituenten führt. Das wird anschaulich unter dem

Begriff Bosonenstern erklärt (Abschnitt 'Entstehung').

8.17 Gravitationslinse

Als Gravitationslinsen bezeichnen Astrophysiker generell Objekte, die allein aufgrund ihrer hohen Masse, Strahlung signifikant abzulenken vermögen. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) kann das **jede** Masse, weil sie die Raumzeit lokal krümmt und damit die Bahnen anderer Teilchen und von Strahlung, die Geodäten, beeinflusst. In der Praxis wichtig ist der Effekt nur bei **hohen, kompakten Massen**, weil sie eine größere Ablenkung der Bahnen bewirken.

8.17.1 Massen als Linsen

Strahlung folgt gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie den **Nullgeodäten** einer Metrik. Im uns vertrauten Fall einer **flachen Metrik**, der Minkowski-Geometrie, bewegt sich das Licht auf Geraden. Dies ist der Grenzfall der geometrischen Optik. Im allgemeinen Fall jedoch ist die Metrik gekrümmt durch die Anwesenheit von Materie und Energie. Die Nullgeodäten sind dann ebenfalls gekrümmt und können über das Lösen der **Geodätengleichung** ermittelt werden.

In Analogie zu einer Linse, die parallel zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen in ihrem Brennpunkt vereint, lenkt Masse über die Raumkrümmung Strahlung ab.

8.17.2 Linsen der Kosmologie

Bedeutsame Gravitationslinsen in der Astronomie sind massereiche **Galaxienhaufen** (engl. *galaxy cluster*) oder Ansammlungen von Dunkler Materie. Die Dunkle Materie ist anteilig neben der 'normalen' baryonischen Materie in jeder Galaxie enthalten und beherrscht deren Dynamik und Entwicklung. In Galaxienhaufen macht der Massenanteil an Dunkler Materie sogar 90% aus, nur 1% ist sichtbar in Form von Sternen, der Rest ist intergalaktisches Gas! Der gesamte Materieinhalt bestimmt die Dynamik des Haufens und führt zu heftigen Gezeitenwechselwirkungen zwischen den einzelnen Clustergalaxien. Dies kann zu kannibalistischen Szenarien führen, wo Galaxien miteinander verschmelzen (engl. *merging*) oder sich große Galaxien kleinere einverleiben. Dies resultiert häufig in irregulären Galaxien (siehe Hubble-Klassifikation), wie den prominenten *Antennengalaxien* (siehe Bild 8.9 und Beschreibung unter dem Eintrag Gezeitenkräfte). Ein anderes schönes Beispiel eines 'Unfalls der Materiegiganten' zeigt Abbildung 8.19. Dieses Foto des Weltraumteleskops *Hubble* zeigt rechts NGC 2207 und links IC 2163 im Sternbild *Großer Hund* (*Canis Major*). Die Spiralgalaxien kommen sich etwas zu nahe. Somit treten sie in Interaktion durch Gezeitenkräfte: Sterne werden hinausgeschleudert, das interstellare Gas beider Spiralen vermischt sich und regt die Sternentstehung an, eventuell verschmelzen auch früher oder später die Kerne der Galaxien - sprich die supermassereichen Schwarzen Löcher - weil ihr 'Tanz' durch die Abstrahlung von Gravitationswellen immer enger wird. Aus der Durchmischung der Welten entstehen neue Welten und vielleicht sogar neues Leben (Credit: *Merritt et al.* 2004, NASA/ESA).



Abbildung 8.19: Galaxienkollision.

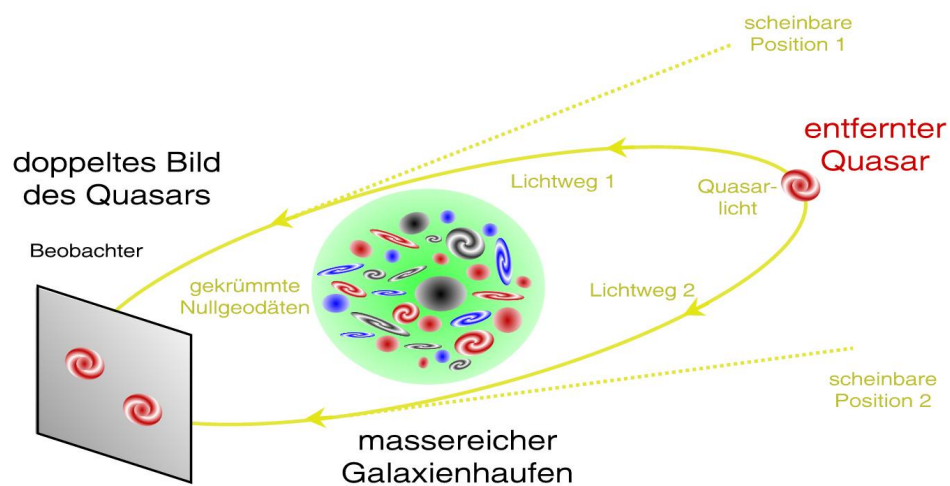


Abbildung 8.20: Doppelbild eines Quasars durch Galaxiencluster als Gravitationslinse.

8.17.3 kosmischer Schwips: Doppel- und Mehrfachbilder

Wenn Galaxienhaufen als Gravitationslinsen wirken, fokussieren sie die Strahlung derjenigen kosmischen Objekte, die hinter ihnen und nahe entlang der Sichtlinie liegen. Dabei können auch **Mehrfachbilder** ein und desselben Objekts auftreten, weil die Strahlung auf *verschiedenen* Lichtwegen zum Beobachter gelangt. Es handelt sich gewissermaßen um eine 'kosmische optische Täuschung', wie Abbildung 8.20 zeigt. Häufig beobachten Astronomen bei Galaxienhaufen verzerrte Bilder einzelner Galaxien, die dann als **fadenförmige Gebilde** auf Aufnahmen in Erscheinung treten (siehe Objekte im Abell-Katalog). Manchmal entsteht auch ein charakteristisches rundes Gebilde, der so genannte **Einstein-Ring**. Hier sind die Verhältnisse zwischen Linse und gelinstem Objekt besonders symmetrisch.

8.17.4 klein, aber Linse

Außerdem gibt es kleine Ansammlungen von Materie, die als Mikrolinsen fungieren. Ihre Masse ist so gering, dass man kein aufgelöstes verzerrtes Abbild, aber einen charakteristischen, symmetrischen Helligkeitsanstieg eines Sterns oder eines anderen strahlenden Objekts erhält, wenn eine solche Mikrolinse genau zwischen Beobachter und gelinstem Objekt vorüberzieht. Auch das wurde bereits beobachtet und hat eine Relevanz bei den **MACHOs**, den *Massive Compact Halo Objects*. Diese leuchtschwachen Objekte befinden sich im Halo der Milchstraße und können so indirekt über Mikrolinsen-Ereignisse (engl. *microlensing events*) in Anzahl und Masse abgeschätzt werden. Vermutlich handelt es sich bei den MACHOs um Braune Zwerge oder **M-Zwerge** (massearme Sterne vom Spektraltyp *M*), die sich im Halo der Milchstraße bewegen (z. B. *Gaudi & Han* 2004, astro-ph/0402417).

Die Mikrolinse kann allerdings auch ein Stern sein, der mindestens einen Planet hat. So eignet sich der Gravitationslinseneffekt zur **Suche und Identifikation von Planeten**. Der erste Kandidat für dieses *Planetarische Mikrolinsen-Ereignis* (engl. *planetary microlensing event*) ist das Objekt OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53 (katalogisiert nach den MOA und OGLE Beobachtungen). Diese Linse hat eine Entfernung von 5.2 kpc und ist Sternen im Galaktischen Zentrum in etwa 8 kpc Distanz vorgelagert. Zufällig liegen Hintergrundstern und Mikrolinse ziemlich exakt auf einer Linie. So erscheint das Licht des Hintergrundsterns für kurze Zeit in der Form eines winzigen Einstein-Rings an der Himmelssphäre. Astronomen beobachteten für die Dauer von etwa einer Woche eine schwache Abweichung (*Spikes*) in der Lichtkurve des Hintergrundsterns. Herkömmliche Modelle für das davor liegende Linsensystem mit einzelnen, linsenden Objekten versagen, um diese besondere Lichtkurve anzupassen. Spikes sind ein Charakteristikum von Linsen, die aus einem Binärsystem bestehen. Es stellte sich heraus, dass die Massen der beiden Linsenkomponenten sehr verschiedenen voneinander sind. Die Astronomen um *Ian Bond* schlagen deshalb ein Linsensystem aus Stern mit Planeten vor, um den Anstieg der Lichtkurve zu erklären. Setzt man für den Stern an, dass es sich um einen Hauptreihenstern (speziell ein M-Zwerg mit 0.4 Sonnenmassen) handelt, so hätte der Planet etwa 1.5 Jupitermassen und umkreiste den Stern in einem Abstand von etwa drei Astronomischen Einheiten (Abkürzung AU). Die exotischere Alternative für das Binärsystem wäre ein Weißer Zwerg mit nur 0.6 Sonnenmassen, der dann in 2.8 AU einen Planet mit 2.5 Jupitermassen umkreiste (*Bond et al.* 2004, astro-ph/0404309).

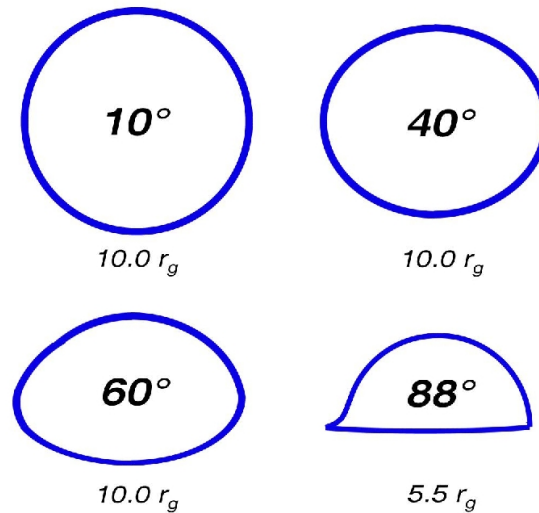


Abbildung 8.21: Gelinste Umlaufbahnen um ein Schwarzes Loch unter verschiedenen Blickwinkeln.

8.17.5 Die Mutter aller Gravitationslinsen

Neben den Galaxienhaufen und Mikrolinsen sind die **Schwarzen Löcher** ein weiterer Kandidat für Gravitationslinsen. Auch hier kann man die verzerrten Bilder nicht direkt aufgelöst beobachten, sondern muss die Verzerrung spektroskopisch ableiten. Das numerische Verfahren Ray Tracing bietet eine Möglichkeit im Computerlabor die gelinsten, verzerrten Objekte zu studieren. So kann man die scheinbare Deformation von Akkretionsscheiben beobachten, wenn man sie unter hohen Neigungen beobachten würde. Gleiches gilt für enge Umlaufbahnen um Schwarze Löcher. Abbildung 8.21 zeigt simulierte Kreisbahnen um ein Schwarzes Loch, die einen Abstand von 5 bis 10 Gravitationsradien zum zentralen, maximal rotierenden Schwarzen Loch (nicht dargestellt) haben (*A. Müller*, Dissertation 2004). Es handelt sich bei allen vier Fällen um **Primärbilder**, also nur um Strahlung, die direkt zum Beobachter propagiert. Wichtig ist nun, dass man die klassische elliptische Bahnform nur bei kleinen Neigungen (Inklinationen) der Bahnebene hat, wie die beiden oberen Darstellungen belegen. Bei höheren Inklinationen hingegen, etwa ab 60 Grad, machen sich deutlich die **relativistischen Linseneffekte** bemerkbar: Der Beobachter blickt zwar eher auf die Kante der Bahnebene, aber die Strahlung wird um die kompakte Masse herumgelenkt. So kann man auch Bereiche direkt hinter dem Loch beobachten, die sich im *geometrischen Schatten* befinden und **Newtons** **unbeobachtbar** wären. Bei der hier höchsten Inklination von 88 Grad, was sehr nahe am Maximum von 90 Grad liegt, erhält man ein stark verzerrtes Abbild des Orbits: Obwohl der Beobachter fast exakt auf die Kante der Bahnebene schaut, wo die klassische Ellipse wie eine Linie erscheinen und der Orbiter auf ihr hin- und her oszillieren würde, sieht man in diesem gelinsten Beispiel den hinteren Teil des Bahnorbits! Leider reichen die aktuellen Auflösungen der Teleskope nicht aus, um solch befremdliche Bahnbewegungen am Himmel zu beobachten. Wenn dies gelänge könnte man den **Umlaufsinn der Lochrotation** direkt sehen! Denn die Links-Rechts-Asymmetrie ist auf den Frame-Dragging-Effekt zurückzuführen: Das rotierende Loch zieht den Orbiter mit

sich mit. Im hier gerechneten Beispiel rotiert das Loch maximal (Kerr-Parameter $a = M$ in geometrisierten Einheiten) im Gegenuhrzeigersinn. Deshalb befindet sich bei der Bahnform unter 88 Grad die kleine Ausstülpung der beobachteten Bahn links unten. Auf der gleichen Seite zeigen leuchtende Standardakkretionsscheiben das charakteristische Vorwärts-Beaming, ein Gebiet hoher Blauverschiebung.

Neben der starken Abhängigkeit von der Inklination, spielt natürlich der Abstand des Orbits zum Loch eine gewichtige Rolle. Bei großen Abständen verschwinden die relativistischen Linseneffekte, weil man in den **asymptotisch flachen Bereich** der Raumzeit Schwarzer Löcher kommt. Dieser Fall ist aktuell bei demjenigen Stern mit der Bezeichnung *S2* beobachtbar, der als Stern mit engster Bahn das supermassereiche Schwarze Loch im Galaktischen Zentrum (etwa 3 Millionen Sonnenmassen) umkreist. *S2* ist zwar mit einer Periastronentfernung von 17 Lichtstunden sehr nahe am Loch, doch entspricht diese Entfernung im relativistischen Einheitensystem gewaltigen 4142 Gravitationsradien. Diese Distanz ist zu groß (vergleiche 5 bis 10 Gravitationsradien in Abbildung), als dass relativistische Effekte, wie Linsenbeugung eine Rolle spielen würden: die Bahnform von *S2* ist eine exakte Kepler-Ellipse (siehe Kepler-Gesetze).

Die Verhältnisse sind bei linsenden Schwarzen Löchern tatsächlich noch komplizierter: Neben den dargestellten Primärbildern entstehen Bilder höherer Ordnung dadurch, dass eng am Loch vorbeilaufende Strahlung das Loch mehrfach umrunden kann (unter gewissen Umständen kann es sogar auf dem Photonenorbit eingefangen werden). So gibt es im Allgemeinen noch **Sekundär- und Tertiärbilder**, die es bei flachen Standardakkretionsscheiben ermöglichen, die Newtonsch unbeobachtbare Unterseite der Scheibe zu beobachten!

Was rechtfertigt den Titel dieses Eintrags 'Mutter aller Gravitationslinsen'? Nun, Schwarze Löcher sind die extremste Form einer Gravitationslinse, weil die Linse sogar das Licht ab einer kritischen Grenze namens Ereignishorizont einzufangen vermag. Aus diesem Grund sind Schwarze Löcher schwarz.

8.17.6 Werkzeuge der modernen, experimentellen Kosmologie

Gravitationslinsen erweisen sich als äußerst nützlich für die Kosmologie: leuchtschwache Objekte werden durch den Einfluss einer Linse verstärkt, so dass ein größerer Strahlungsfluss gemessen werden kann, als ohne Linse. Dies ermöglicht es den Astronomen noch tiefer in den Kosmos zu schauen. Der aktuelle Entfernungsrekordhalter **Abell 1835 IR 1916** ist eine Galaxie mit einer Rotverschiebung von $z = 10$! Astronomen aus der Schweiz, Frankreich und Kalifornien beobachteten mit der Infrarot-Kamera ISAAC (*Infrared Spectrometer And Array Camera*) des *Very Large Telescope* (VLT) in Chile diese schwache Infrarotquelle im Galaxienhaufen Abell 1835. Ihre Strahlung wird durch eine Gravitationslinse im Vordergrund um einen Faktor 25 bis 100 verstärkt. Die Gesamtmasse dieser sehr jungen Galaxie wurde zu nur 500 Mio. Sonnenmassen (inklusive Dunkle Materie im Halo) abgeschätzt (*Pello et al.* 2004, astro-ph/0403025).

Diese Entdeckung übertrumpfte den nur zwei Wochen vorher aufgestellten Rekord einer Galaxie bei $z \sim 7$ (*Kneib et al.* 2004). Auch hier fokussiert der vorgelagerte Galaxienhaufen Abell 2218 die auf der Erde als Infrarotstrahlung detektierte Strahlung und verstärkt sie um einen Faktor 25. Ohne den linsenden Galaxienhaufen hätte man dieses Objekt, das bereits 750 Millionen Jahre nach dem Urknall sein Licht aussandte, nicht entdeckt.

8.17.7 Einstein, der Visonär

Albert Einstein spekulierte schon 1936 auf der Basis seiner Theorie über die Existenz von Gravitationslinsen. Er selbst hatte es nicht für möglich gehalten, dass man dies je beobachten würde (siehe Einstein-Ring für Einzelheiten). Heute ist eine Vielzahl von gelinsten Objekten bekannt (Abell-Katalog). Viele Quasare sind darunter, die **Doppelbilder**, Einsteinkreuze und Einstein-Ringe zeigen. Ein prominentes Beispiel ist das scheinbare Quasarpaar Q2345+007 in einer Entfernung von $z = 2.15$ (siehe Rotverschiebung). Eine Linse konnte für dieses Doppelbild nicht beobachtet werden. Aus diesem Grund vermutet man eine **Ansammlung von Dunkler Materie** als Gravitationslinse (*Green et al.* 2002, astro-ph/0202081).

Einen ähnlichen Effekt wie bei den Gravitationslinsen erwartet man beim '**topologischen Linsen**'. Diese 'Geisterbilder' sind dann auf eine komplexe Topologie des Universums zurückzuführen. Bisher hat man das noch nicht *bewusst* beobachtet. Die Erscheinung wäre derjenigen, die von Gravitationslinsen resultiert vergleichbar, kann aber auch bis zur Unkenntlichkeit, bis zur **perfekten optischen Täuschung**, verzerrt sein. Vielleicht spielt uns der Kosmos so manchen Streich - und wir merken es nicht einmal.

8.17.8 Linsen verzerren den Hintergrund

Der Gravitationslinseneffekt ist auch deshalb bedeutsam in der Kosmologie, weil die überall verteilte Materie in Form von Galaxien, Galaxienhaufen und intergalaktischer Materie die **kosmische Hintergrundstrahlung** beeinflusst. Dieser Vorgang muss berücksichtigt werden, wenn die Kosmologen aus der Hintergrundstrahlung Eigenschaften des Universums herauslesen möchten. Es konnte gezeigt werden, dass enge Strukturen im CMB-Spektrum ausgeschmiert und geglättet werden (*Zaldarriaga & Seljak*, PRD 1998). Der Effekt kann bis zu 10% betragen.

8.18 Gravitationsradius

Die Gravitationsradius ist die übliche **Längeneinheit in der Gravitationsforschung** und insbesondere in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). So verwendet man diesen Radius in der Theorie Schwarzer Löcher.

8.18.1 Definition

Der Gravitationsradius ist definiert zu $r_g = GM/c^2$, wobei G die Gravitationskonstante, c die Vakuumlichtgeschwindigkeit und M die Masse des Schwarzen Loches ist. Die Zahlenwerte in SI-Einheiten sind: $G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ sowie $c = 299\,792.458 \text{ km/s}$.

8.18.2 $G = c = 1$

Die theoretischen Astrophysiker und Relativisten machen sich das Leben noch einfacher und setzen in Gestalt der geometrisierten Einheiten $G = c = 1$, so dass der Gravitationsradius auch M wird. Manchmal gehen sie noch einen Schritt weiter und setzen sogar auch $M = 1$. Das Vorgehen mag befremdlich anmuten, ist aber weit verbreitet in der theoretischen Physik. Denn es erleichtert theoretische Rechnungen enorm. Beim Vergleich mit experimentellen Daten skaliert man die Ergebnisse wieder entsprechend um.

In alternativem Gebrauch ist die Skala des Schwarzschild-Radius R_S , der gerade doppelt so groß ist, als der Gravitationsradius: $R_S = 2GM/c^2$.

8.19 Gravitationsrotverschiebung

Gravitationsrotverschiebung bezeichnet einen **Rotverschiebungseffekt**, der durch die **Gravitation** hervorgerufen wird: Die Lichtteilchen (Photonen) erleiden einen Verlust von Strahlungsenergie dadurch, dass sie einem anziehenden Gravitationsfeld zu entkommen versuchen.

8.19.1 Analogie

Wenn wir einen Ball in die Luft werfen, so erreicht er einen höchsten Punkt und die Schwerkraft zwingt ihn wieder zur Umkehr. Der Grund: die kinetische Energie des Balles bzw. seine Geschwindigkeit war zu gering, als dass er gegen die Schwerkraft ankommen würde, um das irdische Schwerkraftfeld zu verlassen. Diese Bewegung ist sehr gut mit der Newtonschen Gravitation zu beschreiben, um z. B. den höchsten Punkt auf der Bahn, die Auftreffgeschwindigkeit oder den Auftreffpunkt des Balles zu berechnen. Falls der geworfene Körper die Fluchtgeschwindigkeit der Erde überschreitet, so kann er tatsächlich die Erde verlassen. Diese Grenzggeschwindigkeit beträgt allerdings bei der Erde satte 11.2 km/s oder 40000 km/h so dass im Prinzip nur Raketen das Verlassen der Erde gelingt.

Bei Licht verhält es sich erstaunlicherweise genauso, denn auch Licht verliert Energie, wenn es den Bereich eines Schwerefeldes verlässt. Dies ist jedoch nur korrekt mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu verstehen und zu beschreiben. Das Schwerfeld wird dann ersetzt durch eine **gekrümmte Raumzeit**. Die Lichtteilchen bewegen sich auf Nullgeodäten. Es gibt eine Analogie zwischen Licht und geworfenem Ball: der Ball verliert kinetische Energie, während die Lichtteilchen Strahlungsenergie verlieren. Da ein Verlust an Strahlungsenergie eine Verschiebung zum roten Ende des Spektrums hin bedeutet, ist dies ein Rotverschiebungseffekt - weil weiterhin die Ursache die Gravitation ist, heißt dieses Phänomen *Gravitationsrotverschiebung*.

8.19.2 Extremfall Schwarzes Loch

Prinzipiell darf man sagen, dass jeder Emitter gravitationsrotverschiebend auf die Strahlung wirkt, die er ausstrahlt, weil er eine Masse hat. Bei den üblichen kleinen Massen ist der Effekt jedoch verschwindend gering. Aber der Effekt tritt besonders drastisch bei kompakten Massen wie **Schwarzen Löchern** in Erscheinung: Am Ereignishorizont schlucken sie jede Strahlung, weil die Gravitationsrotverschiebung unendlich groß ist: das verleiht Schwarzen Löchern gerade die charakteristische Schwärze.

8.19.3 gravitationsrotverschobene Linien in AGN

Der Effekt, wie sehr die gekrümmte Raumzeit eines Loches an der Umgebungsstrahlung zieht, kann mit hochpräzisen, astronomischen Messmethoden sogar noch in einiger Entfernung zum Loch nachgewiesen werden. So zeigen **Spektrallinien**, die in der Nähe des supermassereichen Schwarzen Loches des Aktiven Galaktischen Kerns Mrk 110 ausgesandt werden, messbar die Gravitationsrotverschiebung an: Das wurde mittels optischer

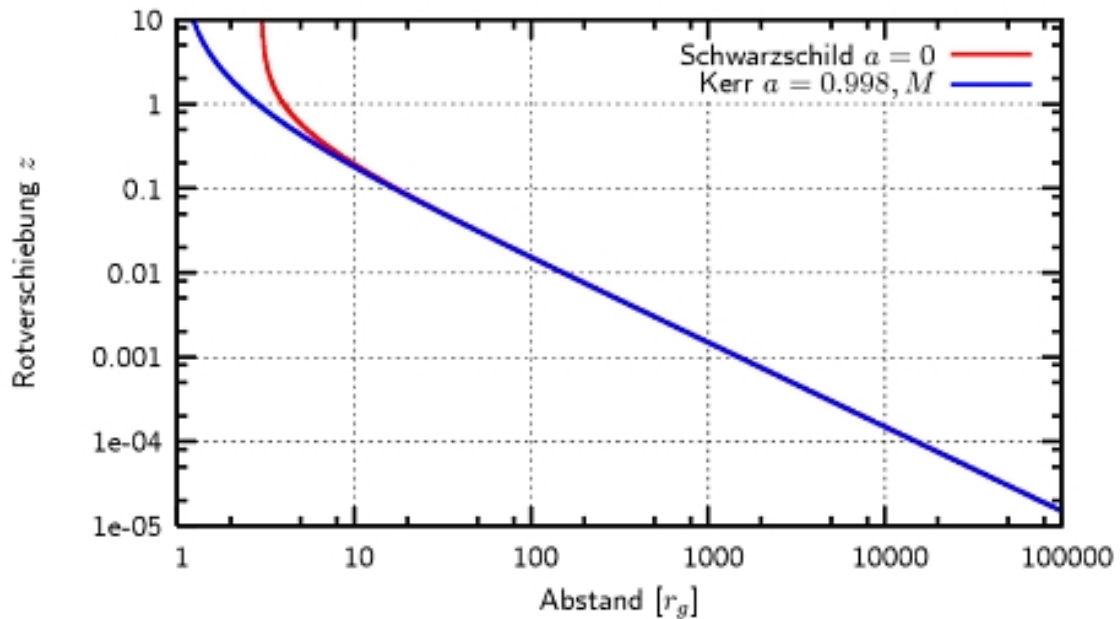


Abbildung 8.22: Gravitationsrotverschiebung um ein Schwarzes Loch.

Spektrallinien von Wasserstoff und Helium (*Kollatschny* 2003) und mittels Sauerstoff-Stickstoff- und Kohlenstofflinien im Bereich weicher Röntgenstrahlung nachgewiesen (*Boller et al.* 2006). Die Entstehungsregion der optischen Linien (die so genannte *broad line region*, BLR) ist einige wenige bis etwa hundert Lichttage vom Loch entfernt (entsprechend hundert bis einige tausend Gravitationsradien). Die Röntgenstrahlung entsteht deutlich näher am Loch, bei etwa ein Zehntel bis einem Lichttag (einige zehn bis hundert Gravitationsradien). Diese Beobachtungen sind konsistent mit Simulationsmodellen, bei denen die Linien von Keplersch rotierenden Ringen in der Äquatorebene des Loches abgegeben werden (*Müller & Wold* 2006). Diese Modelle legen nahe, dass mit modernen, hochauflösenden Teleskopen die Gravitationsrotverschiebung **bis zu einer Entfernung von etwa 75000 Gravitationsradien** nachweisbar sein könnte! Sie zeigen auch, dass die Lochrotation nur mit Spektrallinien getestet werden kann, die sehr nahe am Loch entstehen, z. B. relativistisch verbreiterte Eisenlinien ($\text{Fe K}\alpha$).

Diagramm 8.22 zeigt die Rotverschiebung als Funktion des Abstandes vom Schwarzen Loch. Es wurde dabei nicht nur die Gravitationsrotverschiebung berücksichtigt, sondern auch der (longitudinale und transversale) Doppler-Effekt. Im Modell kommt die Strahlung von einer Keplerscheibe aus der Äquatorebene. Wie man sieht nimmt die Rotverschiebung z (nicht zu verwechseln mit der kosmologischen Rotverschiebung!) beständig zu, wenn man dem Loch näher kommt. Abweichungen zwischen einem nicht-rotierenden Schwarzschild-Loch (rote Kurve) und einem schnell rotierenden Kerr-Loch (blaue Kurve) sind erst bei Radien **kleiner als 4 Gravitationsradien** erkennbar. Mit anderen Worten: so nahe muss der Emittor mindestens an das Loch kommen, um Lochrotation zu testen!

8.19.4 Von rot nach blau

Weitere Einzelheiten sind beim gegensätzlichen Effekt, der Blauverschiebung, nachzulesen.

8.20 Gravitationswellen

Gravitationswellen sind Wellen, die von beschleunigten Massen erzeugt werden. Man stellt sich darunter eine 'Delle' in der gekrümmten Raumzeit vor, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzt. Wie alle Wellen transportieren auch Gravitationswellen Energie und Informationen, insbesondere Informationen über sich ändernde Krümmungseigenschaften der Raumzeit. Informationen tragen alle Wellen in Form von Richtung, Polarisierung, Frequenz (alternativ als Wellenlänge oder Energie) und Intensität (Wellenamplitude) mit sich. Gravitationswellen stehen in wunderbarer Analogie zu den elektromagnetischen Wellen der klassischen Elektrodynamik, die von beschleunigten, elektrischen Ladungen ausgesandt werden.

8.20.1 Hier lauert ein Nobelpreis

Energie wird gerade umgesetzt, wenn Gravitationswellen auf Materie treffen. Sie dehnen und stauchen diese Materiekonfiguration. Diese Deformation geschieht nicht nur in der Raumdimension, sondern auch in der Zeit. Denn die Welle ist dynamische Raumzeit, ein vierdimensionales Kontinuum, das sich fortpflanzt. Die deformierende Auswirkung auf Testkonfigurationen möchten Physiker gerade ausnutzen, um Gravitationswellen zu messen. Bislang ist dies **nicht auf direktem Wege** gelungen, aber **indirekt!**

8.20.2 Auf Einsteins Pfaden

Die Existenz von Gravitationswellen oder auch *Gravitationsstrahlung* genannt geht auf die Pionierarbeit von *Albert Einstein* (1916) zurück. Er hat die nicht-linearen Feldgleichungen seiner Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) **linearisiert** und auf **Wellengleichungen** reduziert. Es folgt nun eine Skizzierung der mathematischen Prozedur im Tensorformalismus der ART (in voller Schönheit, siehe z. B. MTW, *Gravitation*):

- ◊ Wir starten mit einem Ansatz für die Metrik, deren raumzeitliche Schwingung gerade der Gravitationswelle entspricht. Sie soll nicht wesentlich von einer flachen Raumzeit (mit Krümmung null) abweichen. Demnach setzt man den metrischen Tensor mit der Minkowski-Metrik an, die ja eine flache Metrik beschreibt; wir ergänzen sie jedoch mit einem Zusatzterm, einer linearen Korrektur ('Störung')

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \epsilon h_{\mu\nu}, \quad (8.2)$$

mit der skalaren Größe

$$h = \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu}.$$

Dieser lineare Ansatz für die Metrik ist eine **Näherung schwacher Gravitationsfelder**.

- ◊ Diesen Ansatz für den metrischen Tensor (8.2) stecken wir in die Einsteinschen Feldgleichungen. Warum? Weil sie die Dynamik der Gravitationswelle beschreibt.

Damit wir die Metrik einsetzen können, müssen sämtliche darin enthaltene Größen ausgerechnet werden: die Christoffel-Symbole, der Riemannsche Krümmungstensor und der daraus resultierende Einstein-Tensor.

- ◇ Außerdem verschwindet die rechte Seite der Feldgleichungen (Energie-Impuls-Tensor ist null), weil sich zunächst die Gravitationswellen nur im Vakuum ausbreiten mögen.
- ◇ Jetzt wird es kompliziert: Die resultierende Metrik, die die Minkowski-Metrik korrigiert, ist nicht eindeutig festgelegt. Wie in der Elektrodynamik gibt es eine *Eichfreiheit*, die man ausnutzen kann, um die Einsteinschen Feldgleichungen zu typischen **Wellengleichungen** zu reduzieren. 'Typisch' heißt hier, dass der d'Alembert- oder 'Quabla-Operator' - natürlich in seiner relativistischen Form - als Differentialoperator auftritt. Wie üblich symbolisieren wir ihn durch ein Quadrat. Sowohl der Krümmungstensor, als auch der Einstein-Tensor erweisen sich als *eichinvariante Größen*. Die Eichungen in der Theorie der Gravitationswellen nennt man *Einstein-, Lorentz-, Hilbert-, Fock- oder de-Donder-Eichung*. Die hier gemeinte Lorentz-Eichung ist das gravitative Analog zur Lorentz-Eichung der Elektrodynamik in flacher Raumzeit.

8.20.3 Was tun mit der Wellengleichung?

Der Formalismus offenbart, dass (analog zur Elektrodynamik) viele Tensorfelder eine Wellengleichung erfüllen: Nicht nur die neu eingeführte Variable

$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h, \quad (8.3)$$

auch die Störung der Metrik selbst und vor allem der Riemannsche Krümmungstensor in linearisierter Form genügen einer homogenen Wellengleichung mit d'Alembert-Operator! Die Wellengleichung lautet dann:

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0.$$

Die Tatsache, dass der Krümmungstensor, der die Existenz und Krümmung des Gravitationsfeldes beschreibt, selbst eine Wellengleichung erfüllt, beweist, dass sich Gravitationseffekte in Form einer Gravitationswelle mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten.

Es sei betont, dass diese **lineare, relativistische Gravitationstheorie** nur einen Ausschnitt der wesentlich komplizierteren, nicht-linearen Gravitationswellenphysik bietet. Die Fortpflanzung der Gravitationswellen in der Nähe *starker Gravitationsquellen* bzw. *in medium* ist ein übergeordnetes, komplexeres Regime!

In dieser linearisierten Theorie kann man **ebene Wellenlösungen** finden, indem man für die zeitlich und räumlich variierenden Tensorfelder die üblichen Wellenlösungen analog zur Elektrodynamik oder klassischen Mechanik ansetzt: eine ebene Welle, geschrieben als Amplitude multipliziert mit einem Exponential mit imaginärem Argument und dem Produkt aus 4er-Wellenvektor und 4er-Ortsvektor.

8.20.4 Lieber TT eichen, als TT fahren

Dieser Ansatz macht eine weitere Eichung nötig, die man **transversale, spurfreie Eichung** (engl. *transverse traceless gauge*, **TT gauge**) nennt. Dabei werden dem Tensorfeld der Wellengleichung weitere Bedingungen auferlegt, wobei nur seine räumlichen Komponenten

$$\begin{aligned}
h_{\mu 0} &= 0, & h_{jk} &\text{ungleich null} \\
h_{kj,j} &= 0, & &\text{divergenzfrei} \\
h_{kk} &= 0, & &\text{spurfrei}
\end{aligned}$$

Abbildung 8.23: ebene Gravitationswellen in der TT-Eichung.

ungleich null, divergenzfrei und spurfrei sind (siehe Gleichungssatz in Abbildung 8.23). In der TT-Eichung gibt es keinen Unterschied mehr zwischen dem Tensorfeld h und der neu eingeführten Variable (8.3)! Alle Tensoren, die den Bedingungen der TT-Eichung genügen, nennt man **TT-Tensoren**. Die Transversalität ist auf die Tatsache, dass die Gravitationswelle senkrecht zur eigenen Ausbreitungsrichtung *räumlich* oszilliert zurückzuführen (Nachweis durch Bildung des Produkts aus Tensorfeld h und 4er-Wellenvektor).

Auch aus einfachen Ansätzen ohne TT-Eichung (eindimensionale, zeitlich variable Wellen) resultieren ebene Gravitationswellen, die sich in eine bestimmte Richtung fortpflanzen. Zu diesen Tensorfeldern lassen sich Linienelemente zuordnen, die gerade als raumzeitlich variierende Gravitationswellen interpretiert werden können.

8.20.5 Gravitationswellen haben zwei Polarisationen

Man kann nun die Linienelemente ausnutzen, um zu beschreiben, was geschieht, wenn Gravitationswellen auf eine Konfiguration von Testteilchen treffen. Dann zeigt sich in verschiedenen Fallstudien, dass Gravitationswellen **transversale** Wellen sind und zwei **Polarisationszustände** besitzen, die sich um 45° unterscheiden. Anders gesagt, hat das Gravitationsfeld zwei Strahlungsfreiheitsgrade, ist also eine **Tensorwelle** mit Spin 2. Die Gezeitenkräfte wirken senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Treffen linearisierte, ebenfrontige Gravitationswellen auf einen Ring aus Testteilchen, so geschieht eine **Quadrupoldeformation**: der Ring wird zunächst in einer Ebene in eine Ellipse, dann wieder in einen Ring und wiederum in eine Ellipse deformiert (illustriert in Animation).

Als Maß für die **Stärke einer Gravitationswelle**, die *Amplitude*, kann die Deformation des Rings mit Radius R zu einer Ellipse entlang der kürzeren Halbachse um dR dienen. Ein größerer Wert dR/R spricht demnach für eine stärkere, intensivere Welle. Eine typische Größenordnung der absoluten Längenänderung dR ist 10^{-21} Meter! Diese winzige Längenskala stellt die Messtechnik vor enorme Anforderungen. Im Wesentlichen ist dies die Ursache dafür, dass Gravitationswellen bisher nicht direkt mit einem Detektor gemessen werden konnten.

8.20.6 Woher kommen Gravitationswellen?

Als **kosmische Quellen** für Gravitationswellen kommen im Prinzip alle beschleunigten Massen in Frage. Die uns umgebende Raumzeit ist also nur in erster Näherung flach: vielmehr handelt es sich um ein ständig schwingendes, raumzeitliches Gebilde, in dem Gravitationswellen verschiedener Intensität und Frequenz interferieren. Zur Messung dieser Ereignisse gibt es nur eine Komplikation: die Raumzeit ist ein sehr *starres Gebilde*, und es sind enorme Massenbeschleunigungen nötig, um sie signifikant zum Schwingen zu bringen und so einen Detektornachweis zu erbringen. Aus diesem Grund kommen nur extreme Ereignisse

im Kosmos in Betracht. Diese Quellen werden nochmals nach dem Zeitverhalten des Signals unterschieden: Einmalige Ereignisse nennt man **Burst-Quellen**. Daneben gibt es regelmäßig zeitlich wiederkehrende Ereignisse von **periodischen Quellen**.

8.20.7 starke kosmische Gravitationswellen-Emitter

- ◇ Supernova-Explosionen (Typ II),
- ◇ kompakte Objekte in einem Mehrfachsystem, z. B. ein Doppelsternsystem aus zwei Neutronensternen (NS) oder stellaren Schwarzen Löchern (SL), also **kompakten Binären** (engl. *compact binaries*),
- ◇ entstehende kompakte Objekte im Gravitationskollaps,
- ◇ verschmelzende kompakte Objekte, insbesondere NS-NS-, NS-SL-, SL-SL-Verschmelzung,
- ◇ supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen von Galaxien (siehe auch Aktive Galaktische Kerne), die Masse durch Akkretion aufnehmen
- ◇ verschmelzende supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen von Galaxien
- ◇ oder die Entstehung des Universums im Urknall. Die Astronomen gehen davon aus, dass man mit Gravitationswellen noch tiefer in die Frühphasen des Universums schauen kann, als mit elektromagnetischen Wellen. Die natürliche, elektromagnetische Barriere der Rekombinationsära bei einer Rotverschiebung von $z \sim 1100$ bzw. etwa 400000 Jahre nach dem Big Bang ist 'transparent' für Gravitationswellen. Die Kosmologen hoffen, dass die Gravitationswellen aus dem frühen Kosmos das dichte, frühe Universum mehr oder weniger unbeeinflusst passiert haben und so wertvolle Informationen über die Entstehung unserer Universums bis zur Erde tragen können. Die Astronomen erwarten die Existenz eines **Gravitationswellenhintergrunds**, der als gravitatives Analogon zur kosmischen Hintergrundstrahlung zu betrachten ist.

8.20.8 Wie schnell zappelt eine Gravitationswelle?

Die **Frequenzen der Gravitationswellen** dieser Quellen sind sehr unterschiedlich und streuen nach aktuellen Berechnungen im Bereich von acht Größenordnungen, von 10^{-4} bis 10^4 Hz. Die niedrigsten Frequenzen im mHz-Bereich werden von umeinander kreisenden kompakten Binären erwartet. Doppelsternsysteme aus Weißen Zwergen tragen so zu einem kontinuierlichen Brummen im All bei. In der **Gravitationswellenastronomie** nennt man das *Untergrundrauschen*. Die Frequenz von verschmelzenden stellaren Schwarzen Löchern liegt bei ziemlich genau einem Millihertz, die Entstehung eines stellaren Schwarzen Lochs bei etwas höheren Frequenzen (engl. *chirp*: 'Zirpen', 'Zwitschern'). Bei 10^{-2} Hz liegt die Frequenz von Gravitationswellen aus einem Doppelsystem mit zwei massereichen Schwarzen Löchern von 100 000 Sonnenmassen. Eine solche Konfiguration ist vorstellbar, wenn ganze Galaxien miteinander verschmelzen und sich deren Kerne annähern. Die **ULIRG NGC 6240** ist ein favorisierter Kandidat für ein solches doppeltes, massereiches Schwarzes Loch (Arbeiten von *Stefanie Komossa*, MPE).

Die Frequenz erhöht sich im entwickelnden Binärsystem aus kompakten Objekten infolge der Abstrahlung von Energie und wird schließlich besonders groß, etwa 10 bis 100 Hz,

im 'Showdown', wenn sie verschmelzen. Die höchsten Frequenzen erwartet man bei der klassischen Kernkollaps-Supernova (engl. *core collapse SN*), also SN Typ II: Bei dieser Burst-Quelle liegen die erwarteten Frequenzen bei einem bis 10 kHz (Quelle: Website des deutschen Gravitationswellendetektors GEO 600).

Der mHz-Frequenzbereich ist prinzipiell terrestrisch nicht beobachtbar. Erst **weltraum-gestützte Laser-Interferometrie** wird dieses Beobachtungsfenster öffnen. Dies ist die Motivation für das multinationale Projekt **LISA** (engl. Akronym für *Laser Interferometer Space Antenna*), einer Anordnung aus Laserinterferometern, die im Weltraum Gravitationswellen messen soll!

Das Beobachtungsfenster auf der Erde öffnet sich erst **ab einer Frequenz von etwa 10 Hz**. Die Komponenten eines Doppelsternsystems nähern sich mit der Zeit immer mehr an, was die Frequenz der Gravitationswellen nach und nach erhöht. Kurz vor dem Kollaps des Binärs, d. h. dessen Verschmelzung, beträgt die Frequenz etwa 40 Hz und ist damit irdisch beobachtbar.

8.20.9 Zentrum deutscher Gravitationsforschung

In Deutschland sitzen die Experten für Gravitationswellen in Theorie und Experiment am MPI für Gravitationsphysik, das auch *Albert-Einstein-Institut* (AEI) genannt wird. Die Abteilung für Theorie befindet sich in Golm bei Potsdam, während die Experimentatoren und der L-förmige Gravitationswellendetektor in der Nähe von Hannover untergebracht sind. Das AEI entwickelt Datenanalyse-Verfahren für GEO 600 und LIGO. Außerdem berechnen die Gravitationsforscher am AEI theoretische Simulationen von umkreisenden und verschmelzenden kompakten Binären auf Supercomputern exzessiv behandelt. Am AEI beschäftigt man sich auch mit anderen Forschungsgebieten der Gravitation, neben Gravitationswellen. Wie an den meisten Forschungsinstituten wird eine enge, internationale Zusammenarbeit gepflegt.

8.20.10 Es geht komplizierter...

Die allgemeine Behandlung und Wechselwirkung von Gravitationswellen ist sehr kompliziert, wie der obige, mathematische Abriss sicherlich andeutet (obwohl dieser vereinfachend war: im Limes schwacher Gravitationsfelder und im Vakuum). Natürlich sollte die Energie, die die Gravitationswellen mit sich tragen, die Raumzeit selbst krümmen, ein Effekt, der in der linearisierten Theorie vernachlässigt wird. Außerdem verändern Gravitationswellen ihre Gestalt, wenn sie durch ein mit Materie gefülltes Medium propagieren, was man in Analogie zu elektromagnetischen Wellen als '**Brechung**' bezeichnen könnte.

Auch in Abwesenheit von Materie und einer Region, die nur von Gravitationswellen durchsetzt ist, können seltsame Dinge geschehen: Bei bestimmten Wellenlängen und Amplituden kann ein **Gravitationswellenpuls** kollabieren und eine Singularität hinterlassen: solche Brill-Wellen können aus reiner Gravitationsenergie, ein Schwarzes Loch erzeugen!

All diese Effekte verdeutlichen, dass eine tief gehende theoretische Behandlung nur mithilfe von Methoden der Numerischen ART möglich ist. Dann gelingt auch eine approximative Beschreibung von Quellen der Gravitationswellen. Ein mathematischer Zugang besteht z. B. darin, dass jede beliebige Massenverteilung durch elementare Quellen, den *Multipolen*, darstellbar ist. Eine **Multipolentwicklung** in einer geeigneten Basis ist

mit den *Kugelflächenfunktionen* (engl. *spherical harmonics*) sehr elegant möglich. Die Kugelflächenfunktionen bilden eine orthonormierte Basis auf der Einheitskugel. Damit eignen sie sich hervorragend, um beliebige Verteilungen auf Kugelschalen mathematisch darzustellen. In der Kosmologie nutzt man das aus, um die Verteilung der kosmischen Hintergrundstrahlung auf der Himmelskugel zu beschreiben. Dieses Verfahren ist auch aus der klassischen Elektrodynamik bekannt, um beliebige Ladungsverteilungen und deren Feldverteilungen im Umgebungsraum zu beschreiben. Außerdem erweist sich diese Methode sehr brauchbar bei der Behandlung des quantenmechanischen Wasserstoffsproblems (siehe Quantentheorie) und in der Kern- und Solarphysik. Es ist eine fundamentale Methode, die in sehr vielen Bereichen der Physik Anwendung findet.

Im Prinzip gibt es beliebig viele Multipole, die in der Reihenentwicklung durchnummeriert und bezeichnet werden (Monopol, Dipol, Quadrupol, Oktupol, Hexadekapol etc.). Numerisch interessant wird es dann, wenn aufgrund der Symmetrie der Massenverteilung bestimmte Terme herausfallen oder nach Erreichen einer bestimmten Genauigkeit die Reihenentwicklung abgebrochen werden darf.

8.20.11 Anwendung in der Pulsarphysik

Auf diese Weise ist es möglich einen Binärpulsar relativ einfach durch Multipole zu beschreiben. Dabei unterliegt das Quadrupolmoment einer sehr starken zeitlichen Änderung, weshalb die Abstrahlung von Gravitationswellen hier äußerst effektiv ist. Die so genannte **Quadrupolformel** ist eine der wenigen Formeln der Physik mit *dritter* Zeitableitung. **Indirekt (!)** wurden auf diese Weise Gravitationswellen bereits nachgewiesen: Die Emission von Gravitationswellen reduziert in einem Doppelsternsystem die Rotationsenergie des Systems. Infolge dieses Energieverlusts müssen sich die Sterne sukzessiv annähern. Im Prinzip geschieht diese Abstrahlung **bei allen** Doppel- und Mehrfachsternsystemen. Besonders effizient ist sie jedoch nur bei engen, kompakten Binären. Der **Binärpulsar PSR1913+16** ist 25 000 Lj entfernt und erzeugt eine sehr hohe Abstrahlungsleistung bei Gravitationswellen, nämlich fast 10^{45} Watt! Diese hohe Leistung beruht auf der Kompaktheit der Neutronensterne (etwa 1.4 Sonnenmassen mit je nur ca. 20 km Durchmesser) und der des Systems (Umlaufzeit von nur acht Stunden). Nur eine Komponente pulsiert nachweislich. Die Verkürzung der Umlaufzeit durch Abstrahlung von Gravitationswellen und damit die Reduktion der Pulsperiode kann hervorragend durch die Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben werden. Die Astronomen *Russel A. Hulse* und *Joseph H. Taylor Jr.* bekamen für ihre Langzeitbeobachtung und deren Interpretation 1993 den Nobelpreis für Physik. Ihr beobachteter Binärpulsar wird auch häufig als *Hulse-Taylor-Pulsar* bezeichnet. Die Beobachtung war nicht nur ein weiterer Erfolg für die ART, sondern auch für die **Gravitationswellenastronomie**. Der indirekte Nachweis spornt seither viele Kollaborationen an, die Gravitationswellen auch auf direktem Wege zu entdecken (siehe unten).

8.20.12 Pionier des Gravitationswellenexperiments

Experimentell wurde erstmals 1969 von *J. Weber* der Versuch unternommen, Gravitationswellen direkt nachzuweisen. Das Messprinzip beruhte darauf, dass die Wellen die Anordnung von Testteilchen deformieren und die Teilchen dadurch relative Beschleunigungen erfahren. *Weber* benutzte einen anderthalb Tonnen schweren Zylinder aus Aluminium,

MICHELSON INTERFEROMETER

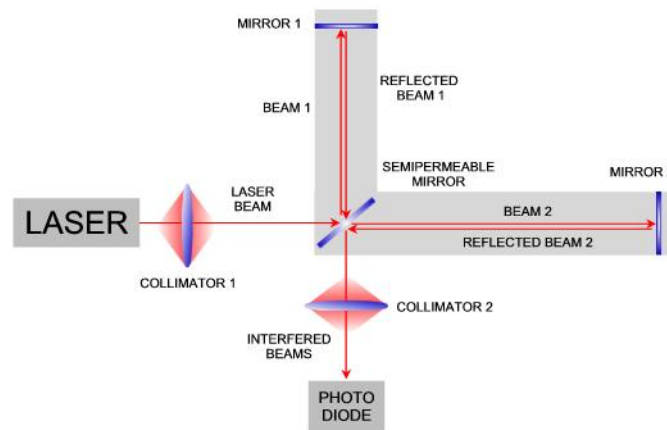


Abbildung 8.24: Aufbau des Michelson-Interferometers.

der mit Piezosensoren bestückt war und beim Durchgang von Gravitationswellen in Schwingungen versetzt werden sollte. Dieses Phänomen ist vergleichbar mit einer Glocke, die man anschlägt und die dann in Schwingungen gerät. Um lokale Störeffekte ausschließen zu können, wurden zwei dieser Detektoren in 1000 km Abstand aufgestellt. Tatsächlich soll *Weber* Signale aus dem Galaktischen Zentrum detektiert haben, was aber nicht reproduziert werden konnte. Die Empfindlichkeit dieser Zylinder-Detektoren ist außerordentlich gering; außerdem reagieren sie **nur auf eine bestimmte Frequenz** von Gravitationswellen.

8.20.13 Laser-Interferometrie

Viel günstiger ist dagegen eine optische Anordnung aus **Laser-Interferometern**. Solche Messapparaturen beruhen auf dem klassischen *Michelson-Interferometer*, dessen Prinzip Abbildung 8.24 illustriert. Es ist bizarr, dass diese Messapparatur, die 1881/87 Einstein zur Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie bestärkte nun dazu benutzt werden soll, um die letzten Geheimnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie nachzuweisen.

Im experimentellen Aufbau von Laser-Interferometern wird ein sehr stabil laufender Festkörper-Laser dazu verwendet, um das infrarote Laserlicht mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels auf zwei optische Laufstrecken (so genannte **Arme**) aufzuteilen. Diese Arme bilden üblicherweise ein großes L. Am Ende dieser Strecken wird der Teilstrahl jeweils an einem weiteren Spiegel total reflektiert und wieder zu dem Ort geleitet, wo sich die beiden Teilstrahlen bildeten. Dort werden die Teilstrahlen überlagert. In der Physik nennt man die Überlagerung von Lichtwellen **Interferenz**. Interferierende Wellen bilden ein charakteristisches Interferenzmuster und können sich (bei gleicher Wellenlänge) auslöschen, wenn 'Wellenberg auf Wellental' trifft (*destruktive Interferenz*) oder verstärken, wenn 'Wellenberg auf Wellenberg' trifft (*konstruktive Interferenz*). Im Gravitationswellendetektor stellen die Forscher das optische System im normalen Modus so ein, dass durch destruktive Interferenz kein Licht sichtbar ist. Dort, wo die interferierenden Strahlen ausgekoppelt werden, ist es dunkel. Trifft nun eine Gravitationswelle senkrecht auf die Ebene, in der die

Arme des Interferometers liegen ein, so wird ein Arm (oder beide, je nach Einfallrichtung) periodisch verkürzt und verlängert. Dies ändert die Bedingung für destruktive Interferenz, so dass plötzlich ein Signal am vormals dunklen Auskopplungsort erzeugt werden muss: die Gravitationswelle würde gemessen!

Das hört sich alles ganz toll an. Aber die **messtechnische Herausforderung** lässt sich pointiert wie folgt darstellen: die Interferometrie dient der Messung eines Gangunterschieds, also einer sehr kleinen relativen Längenänderung. Diese wurde mit einer Obergrenze zu 10^{-18} abgeschätzt. Bezogen auf die mittlere Armlänge von 3 km (wie bei LIGO, siehe unten) bedeutet dies, eine Länge unterhalb der Ausdehnung der Nukleonen im Atomkern messen zu wollen! Oder genauso unglaublich veranschaulicht: Auf der Länge eines Lichtjahres entspricht die Längenänderung aufgrund einer durchlaufenden Gravitationswelle dem Durchmesser eines menschlichen Haares! Daher ist klar, dass der Trend zu größeren Armlängen geht. Dies kann künstlich durch Mehrfachreflexionen des Laserstrahls innerhalb der optischen Kavität erreicht werden. Das Großprojekt LISA geht sogar in den Weltraum und kann die Armlänge eklatant steigern.

8.20.14 Lokalisierung der Quelle

Weltweit existieren eine ganze Reihe von Projekten, die auf dem Interferometrie-Prinzip beruhen und sich im Wesentlichen nur durch die Armlängen unterscheiden. Eine Zahl von mindestens zwei Apparaturen ermöglicht die **Lokalisierung** des Entstehungsortes der Gravitationswelle an der Himmelssphäre. Außerdem verbessert es die Messstatistik und reduziert den Einfluss von (lokalen) Störsignalen. Das 'Rauschen' durch störende, lokale Einflüsse wie Straßenverkehr, Flugzeuge, Erdbeben etc. kann durch globale Messungen an verschiedenen Orten der Erde minimiert werden. Die Planung sieht vor, die internationalen Projekte zu koppeln, den Datenaustausch zu bewerkstelligen und so Gravitationswellenastronomie im großen Stil zu betreiben. Das Konzept und auch dessen hohe, organisatorische Anforderungen ist damit der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) der Radioastronomie ähnlich.

8.20.15 Geplante und im Bau befindliche Laser-Interferometer

- ◇ GEO 600 mit 600 m Armlänge bei Hannover, BRD. Die deutsch-britische Kollaboration nimmt bereits Messungen auf.
- ◇ VIRGO mit 3 km Armlänge, die künstlich durch Mehrfachreflexionen auf 120 km gesteigert werden kann. Die französisch-italienische Kollaboration mit Standort nahe Cascina bei Pisa erreicht eine gute Empfindlichkeit im Bereich zwischen 10 und 1000 Hz der Gravitationswellen.
- ◇ TAMA 300 mit 300 m Armlänge in Japan. Das Projekt existiert seit 1995 und nutzt *Fabry-Perot Michelson Interferometer* zur Messung von Gravitationswellen.
- ◇ *Australian International Gravitational Observatory*, AIGO hat 80 m Armlänge und befindet sich in Australien.
- ◇ *Laser Interferometer Gravitational Wave Observaotory*, LIGO. LIGO ist ein Laserinterferometer mit 4 km Armlänge der USA. Die erste Anordnung wird mittlerweile verbessert: LIGO-II ist um einen Faktor 10 empfindlicher als LIGO-I.

- ◇ *Laser Interferometer gravitational-wave Small Observaotory in a Mine*, LISM, ist unterirdischer Detektor (1000 m Tiefe) in der Kamioka-Mine (wo sich auch der berühmte Neutrinodetektor *Super-Kamiokande* befindet) in Japan. LISM ist mit 20 m Armlänge zwar deutlich kleiner als konkurrierende Gravitationswellendetektoren, aber aufgrund seiner Abschottung durch das Gestein und seiner relativ erdbebensicheren Lage sehr empfindlich. Bislang wurde die Empfindlichkeit für Gravitationswellen mit einem Faktor 100 über derjenigen von LIGO beziffert (April 2004). Das thermische Rauschen wird mit kryogenisch gekühlten Instrumenten unterdrückt. So soll die Empfindlichkeit weiter gesteigert werden, um mit LIGO-II mithalten zu können.
- ◇ *Laser Interferometer Space Antenna*, LISA, ein **weltraum-gestütztes Projekt** mit 5 Millionen km Armlänge; das entspricht der 13fachen mittleren Entfernung der Erde zum Mond oder fast 17 Lichtsekunden! Dieses europäisch-amerikanische Projekt wird von der ESA und der NASA geplant und gefördert und soll aus drei baugleichen Satelliten bestehen, die ein riesiges, gleichseitiges Dreieck im All bilden und um 20° der Erde hinterher fliegen sollen. Mit diesem Laser-Interferometer der Superlative können sämtliche Gravitationswellen nachgewiesen werden, fast unabhängig von Frequenz und Richtung, weil die Armlänge so unglaublich groß ist und das Dreieck frei im Weltraum drehbar ist. Es ist geplant LISA 2015 zu starten und dann für fünf Jahre Messungen durchzuführen.

8.20.16 Gravitationswellensalat

Es sei auf eine weitere Komplikation bei der Detektion von Gravitationswellenemittern hingewiesen: Es gibt es viele Quellen, deren Signale (mit unterschiedlichen Amplituden und unterschiedlichen Frequenzen) überlappen. Selbst wenn also der Nachweis von Gravitationswellen gelingt, muss aus diesem 'Signalgemisch' die jeweilige Quelle extrahiert werden. Diese Problematik läuft unter dem Begriff 'Quellenverwechslung' (engl. *source confusion*) und ist ein generelles Problem der beobachtenden Astronomie. Hohe räumliche Auflösung und Frequenzfilter sind dabei die Methoden im elektromagnetischen Sektor, die auf analoge Weise für die Detektion von Gravitationswellen entwickelt werden müssen. Wie aus der bisherigen Betrachtung ersichtlich ist, kann die Armlänge des Interferometers als Frequenzfilter aufgefasst werden.

Trotz einiger aktiver Experimente wurden Gravitationswellen **bislang nicht** gesichert **direkt** nachgewiesen. Mit dem Betrieb der neuen Laser-Interferometer sollte dies möglich werden und der Astronomie ein neues Fenster ins All eröffnen: die **Gravitationswellenastronomie**.

8.21 Gravitomagnetismus

Gravitomagnetismus ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie *Albert Einsteins*. Der Effekt ist wichtig bei rotierenden Raumzeiten. Dort gibt es den Lense-Thirring-Effekt bzw. das Frame-Dragging, das mit dem Gravitomagnetismus erklärt werden kann. Rotierende Massen erzeugen ein **gravitomagnetisches Feld**. Dieses Feld wirkt sich auf Teilchen und Licht aus und führt zur **Lense-Thirring-Präzession**.

8.21.1 Verwandtschaft von Gravitation und Elektromagnetismus

Die Lense-Thirring-Präzession wiederum ist das allgemein relativistische Analogon zur klassischen **Thomas-Präzession** eines magnetischen Moments im magnetischen Feld. In der klassischen Elektrodynamik kann man das magnetische Feld $\mathbf{B}$ aus einem magnetischen Vektorpotential $\mathbf{A}$ konstruieren, $\mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{A})$. Im Rahmen des ADM-Formalismus der ART (3+1 Split) zerfällt das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum in dreidimensionale Teilräume (*Hyperflächen*) konstanter Koordinatenzeit. Von einer Hyperfläche zur nächsten, späterer Zeit vermittelt die Lapse-Funktion. Innerhalb der Hyperfläche von einem Ort zum anderen vermittelt der *Shift-Vektor*. Dieser kann als Vektorpotential wie in der Elektrodynamik aufgefasst werden und generiert dann das oben genannte *gravitomagnetische Feld*. Der Elektromagnetismus hat also ein relativistisches Pendant: den **Gravitomagnetismus**. Das gravitomagnetische Feld beschreibt die Umgebung rotierender Massen und verschwindet bei nicht rotierenden, statischen Massen (beispielsweise bei Punktmassen wie der Schwarzschild-Lösung). Anders gesagt: Ein Massenstrom erzeugt ein gravitomagnetisches Feld, so wie ein elektrischer Strom ein magnetisches Feld in seiner Umgebung erzeugt. Aus dem *gravitomagnetischen Tensor* lässt sich eine gravitomagnetische Kraft ableiten. Diese Kraft ist das Analog zur Lorentz-Kraft der Elektrodynamik. Die gravitomagnetische Kraft lässt **Gyroskope** im gravitomagnetischen Feld präzedieren. Gyroskope sind nichts anderes als Kreisel. Ein Kreisel ist ein guter Testkörper, um den Lense-Thirring-Effekt experimentell zu vermessen. Ein präzedierender Kreisel macht eine typische Torkelbewegung, in der seine Drehachse nicht raumfest bleibt, sondern die Spitze eine Ellipse beschreibt.

8.21.2 Parallelen zur Quantenwelt des Spins

In der Quantentheorie kennt man die **Wechselwirkung von Drehimpulsen**, besonders die Kopplung des Bahndrehimpulses an den Spin, aber auch von Spins untereinander (*Spin-Spin-Wechselwirkung*). Diese Effekte sind mit dem Lense-Thirring-Effekt verwandt. Denn ein sich drehender Kreisel wechselwirkt mit einem rotierenden Körper in der Umgebung.

8.21.3 Gravitomagnetismus beim rotierenden Schwarzen Loch

Bedeutend ist der Lense-Thirring-Effekt in der Astrophysik, weil er Ursache für so genannte **gravitomagnetische Dynamos** ist. Dieser Mechanismus erzeugt starke, toroidale ('schlauchförmige') Magnetfelder nahe an rotierenden Schwarzen Löchern. Diese Löcher werden im Rahmen von Einsteins Theorie durch die Kerr-Geometrie beschrieben. Die Rotation ist vital, weil im Falle der statischen Schwarzschild-Lösung das gravitomagnetische Feld und somit die gravitomagnetische Kraft verschwinden. Das rotierende Loch hingegen verstärkt die Felder in der Magnetosphäre. Wie alle anderen Objekte, werden auch die Magnetfelder von der Rotation mitgerissen und verdrillt. Enger gewickelte Feldlinien entsprechen im Feldlinienbild einer Verstärkung des Feldes.

Dieses Phänomen wiederum spielt eine wichtige Rolle bei der allgemein relativistischen Magnetohydrodynamik: Während der Akkretion bilden sich Poynting-Fluss-dominierte Jets. D.h. über den Mechanismus von magnetischen Feldern, die mit dem rotierenden Loch wechselwirken, fällt nicht nur Materie in das Loch hinein, sondern kann den Bereich um das Loch wieder als Ausfluss verlassen.

Ein anderer Aspekt sind die quasi-periodischen Oszillationen (QPOs). Ein Ansatz der Astronomen besteht darin, dass eine der beobachteten QPO-Frequenzen mit der Lense-Thirring-Frequenz übereinstimme. Die quasi-periodisch wirkende gravitomagnetische Kraft sorgt in diesem Szenario für charakteristische, quasi-periodische Torkelbewegungen der inneren Akkretionsscheibe, wie bei einem Kreisel. In beobachteten Lichtkurven von Röntgenstrahlung finden sich diese charakteristischen Frequenzen.

8.22 Graviton

Das Graviton ist das **hypothetische** Austauscheteilchen (Eichboson) einer Quantenfeldtheorie der Gravitation, einer Quantengravitation. Es ist ein **Tensorboson** und hat damit Spin 2.

8.22.1 Graviton vs. Photon

Wie beim Photon erwartet man, dass seine **Ruhemasse exakt null** ist, weil die Gravitation ebenso wie die elektromagnetische Wechselwirkung im Prinzip eine *unendliche Reichweite* hat. Gravitonen bewegen sich ebenfalls mit der Lichtgeschwindigkeit c , wie die Photonen.

Das Graviton darf nicht mit den *unquantisierten* Gravitationswellen verwechselt werden: die Gravitationswellen folgen aus den Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART), die aber eine klassische (soll heißen unquantisierte) Theorie ist. Die Gravitonen sind Quanten und müssen mit quantenfeldtheoretischen Konzepten beschrieben werden.

8.22.2 Ein bisschen Feldtheorie

Der feldtheoretische Ansatz besteht darin, sich die *Lagrangedichte* der betreffenden Feldtheorie zu beschaffen. Aus ihr folgt durch Auswertung der **Euler-Lagrange-Gleichungen** (wie man sie schon in der klassischen Mechanik notiert) die **Bewegungsgleichung der Theorie**, die Feldgleichungen. Eine solche Lagrangedichte wurde auch für die ART gefunden, die *Einstein-Lagrangedichte*

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

Dabei bezeichnet g die **Determinante der Metrik** und R die **skalare Krümmung**, die aus den Verjüngungen von Ricci-Tensor und Riemann-Tensor folgen. Im Prinzip lassen sich aus diesem Ansatz und der Annahme einer Lagrangedichte für die Materiefelder (mit endlichem analytischen Rechenaufwand) die vollen Einsteinschen Feldgleichung als Bewegungsgleichungen der ART ableiten! Im Zugang einer **Relativistischen Feldtheorie der Gravitation** (*relativistic field theory of gravity*, **RTG**) geht man wie bei den Gravitationswellen auch zunächst mit einem *linearisierten Ansatz* für die Metrik an das Problem heran:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + \epsilon h_{\mu\nu}.$$

Man stattet die Gravitonen *mit* Masse aus, um gegebenenfalls den Masseparameter a *posteriori* null zu setzen, wie experimentell zu erwarten wäre. Wiederum handele es sich um schwache Gravitationsfelder, die nur wenig von der Minkowski-Metrik abweichen mögen (siehe Gleichung oben). Es handelt sich also um eine lineare Gravitation mit massebehafteten

Gravitonen auf einer flachen Hintergrundmetrik. Die Lagrangedichte sieht dann so aus, wie in der folgenden Gleichung dargestellt:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{Einstein}} - \frac{1}{4}m^2(\mathbf{h}_{\mu\nu}\mathbf{h}^{\mu\nu} + ah^2)$$

Andrei Gruzinov zeigte 2002, dass ein masseloses Graviton noch nicht durch Beobachtungen ausgeschlossen werden kann. Er nahm Bezug auf Beobachtungen im Sonnensystem, im Speziellen die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne und die Periheldrehung des Merkurs, die ein masseloses Graviton nahe legen sollen (*Zakharov* 1970, *van Dam & Veltman* 1970). Eine Behandlung mit massiven Gravitonen und der zweiten hier präsentierten Lagrangedichte (m : Gravitonenmasse, $a = -1$: Pauli-Fierz Massenterm) zeige hingegen, dass es nur eine **Obergrenze für die Gravitonenmasse** gebe.

Die Kollegen *Gershtein et al.* bestätigen diese These anhand von gemessenen WMAP-Daten. Bei Zugrundelegung des gemessenen, totalen Dichteparameters von 1.02 (**flaches** Universum) und dem Hintergrund der Robertson-Walker-Metrik, leiten sie eine Obergrenze der Gravitonenmasse von 1.3×10^{-66} Gramm bzw. 7.3×10^{-34} eV ab. Dieser Zahlenwert ist winzig, aber endlich.

Mit diesen Ergebnissen ist jedoch die verschwindende Ruhemasse noch nicht ausgeschlossen! Weitere Messungen und neue theoretische Zugänge bleiben abzuwarten. Die Erwartung scheint sich jedoch zu erfüllen.

8.22.3 Quantengravitation und mehr Raumdimensionen

Die Quantengravitation birgt weitere faszinierende Aspekte: schon Anfang des letzten Jahrhunderts wurde über die Möglichkeit spekuliert, dass neben den vier Dimensionen der Relativitätstheorie zusätzliche Raumdimensionen existieren könnten. In der **Kaluza-Klein-Theorie** der 1920er Jahre wurde der Versuch unternommen die ART mit der Elektrodynamik in einer übergeordneten, vereinheitlichten Theorie zu beschreiben. Leider hatte diese Theorie einige Pathologien, so dass erst Anfang der 1990er Jahre im Rahmen der Stringtheorien das Thema Extradimensionen wiederbelebt wurde. Die aktuelle Forschung spekuliert darüber, ob die Physik des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen niedrigdimensionalen Raum (Unterraum, engl. *subspace*) - einer so genannten **3-Bran** - beschränkt ist, während sich die Gravitation in einem höherdimensionalen Raum, nämlich 3-Bran **plus** Extradimensionen, dem **Bulk**, ausbreiten kann. Das hätte unter anderem die erstaunliche Konsequenz, dass Gravitonen, die in hochenergetischen Stößen (z. B. in Teilchenbeschleunigern) entstehen könnten, in Extradimensionen verschwinden und damit Energie forttragen! Experimente, die den Energieerhaltungssatz verletzen, könnten daher ein Indiz für solche Prozesse sein. Danach wird in Teilchenbeschleunigern der neusten Generation tatsächlich gesucht.

8.22.4 Quellenverweise

- ◇ Veröffentlichungen zum Thema *Gravitonenmasse*: *A. Gruzinov*, 2002, astro-ph/0112246; *Gershtein et al.*, 2003, astro-ph/0305125
- ◇ Review zur Quantengravitation und Extradimensionen von *M. Cavaglia*, hep-ph/0210296)

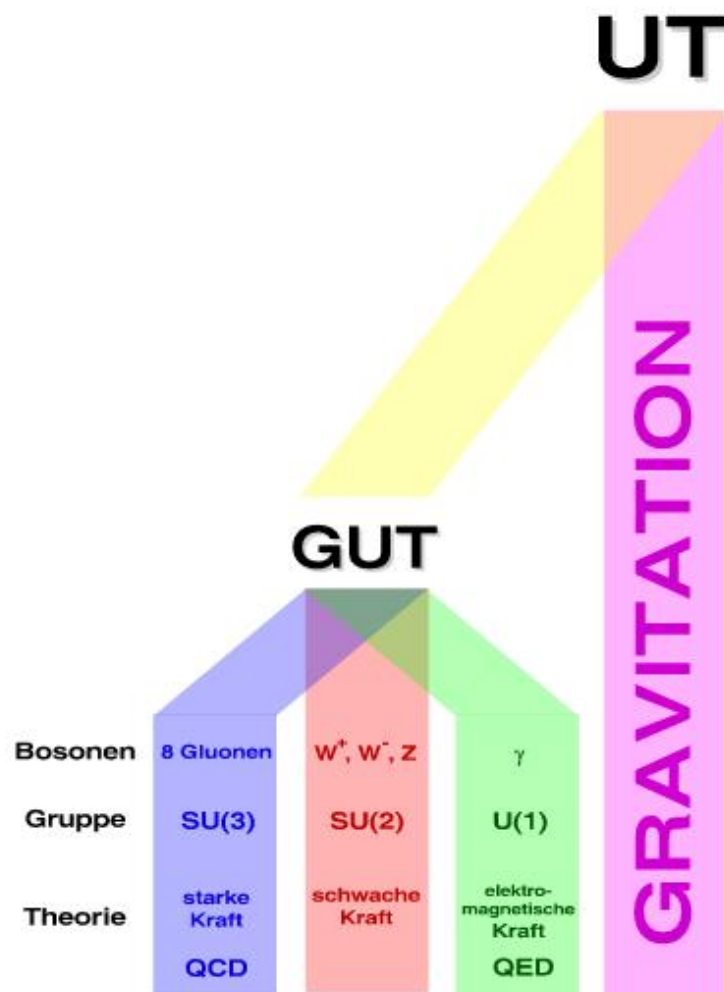


Abbildung 8.25: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).

8.23 GRBR

Dies sind die Relikte oder Überreste von Gamma Ray Bursts (GRBs). Das Akronym GRBR steht für *Gamma Ray Burst Remnant*. Sie sind vergleichbar den viel bekannteren SNR und zeigen Strukturen von expandierenden Schockwellen (*blast waves*) durch das interstellare Medium (ISM). Über Fermi-Prozesse können dabei ultra-hochenergetische Neutrinos gebildet werden.

8.24 Große Vereinheitlichte Theorien

In den Großen Vereinheitlichten Theorien (engl. *Grand Unified Theories*, kurz *GUT*) ist die Vereinigung von dreien der fundamentalen Naturkräften gelungen, nämlich elektromagnetischer, schwacher und starker Wechselwirkung. Schematisch zeigt das Grafik 8.25.

8.24.1 Motivation

Warum sollte man diese für uns offensichtlich separat in Erscheinung tretenden Kräfte vereinigen wollen? Die Antwort ist, dass die 'laufenden Kopplungskonstanten' der genannten drei Kräfte auf eine vereinigte Kraft hinweisen. Eine Kopplungskonstante ist als Maß für die Stärke einer Kraft zu verstehen. Die starke Kraft ist die stärkste von den vieren (daher ihr Name), die Gravitation die schwächste. Nun zeigt sich jedoch, dass sich bei höheren Energien die Kopplungskonstanten annähern: sie 'laufen' und konvergieren bei einer Energie von etwa 2×10^{16} GeV, wie man aus Hochenergie-Experimenten in Teilchenbeschleuniger extrapolieren konnte. Ab dieser Schwellenenergie sind starke, elektromagnetische und schwache Wechselwirkung nicht mehr voneinander unterscheidbar und manifestieren sich in einer fundamentalen Kraft, der so genannten X-Kraft. Dies ist ein Zustand höherer Symmetrie. Ein Unterschreiten der Schwellenenergie von 2×10^{16} GeV bricht diese Symmetrie und sorgt für ein Aufspalten der X-Kraft in die elektroschwache und starke Kraft. Im Grenzwert kleiner Energien verschwindet demnach die X-Kraft, so wie wir es auch täglich beobachten.

Die drei Kräfte, die in der GUT zur X-Kraft 'verschmelzen', beschreiben die Physiker für sich genommen mit Quantenfeldtheorien. Die Quantenelektrodynamik (QED) beschreibt elektromagnetische Prozesse auf der Quantenebene, die Quantenchromodynamik (QCD) beschreibt den Zusammenhalt von Atomkernen und Nukleonen und das Glashow-Weinberg-Salam-Modell beschreibt schwache Prozesse, wie den Beta-Zerfall. Es liegt nahe, dass es auch für die GUT eine entsprechende Quantenfeldtheorie gibt. Sie kann aus der mathematischen Beschreibung der separaten Kräfte gewonnen werden. Dazu benutzen die Teilchenphysiker die Gruppentheorie. Jeder Wechselwirkung ist eine bestimmte Gruppenstruktur - eine Symmetriegruppe - zugeordnet:

8.24.2 Gruppenzugehörigkeiten

- ◇ Bei der elektromagnetischen Kraft heißt sie **U(1)**, unitäre Gruppe. Aus dem Gruppenformalismus folgt die Existenz eines Botenteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung, dem **Photon** (die Regel, dass eine Gruppe $N^2 - 1$ Erzeugende hat, gilt hier nicht!).
- ◇ Die schwache Wechselwirkung wird durch die spezielle, unitäre Gruppe **SU(2)** repräsentiert. Hier gilt die Regel, dass die Gruppe $N^2 - 1$ Erzeugende hat, also drei ($2^2 - 1 = 3$) schwache Austauschteilchen. Es handelt sich um die *masselosen Weakonen* W^+ , W^- und W^0 genannt werden. Erst durch 'Mischung' - beschrieben mit dem Weinberg-Winkel - von Photon und Z-Teilchen in einer **elektroschwachen Theorie** (Schwellenenergie: 1 TeV) wird aus dem *masselosen* W^0 ein *massebehaftetes* Z^0 . Ebenso werden die geladenen W-Teilchen massiv. Das Higgs-Boson sorgt dann letztendlich über den Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung für die hohen Massen der schwachen Eichbosonen.
- ◇ Die starke Wechselwirkung wird durch die **SU(3)** dargestellt. Sie hat gegenüber der SU(2) eine Dimension mehr. Daraus folgen acht ($3^2 - 1 = 8$) starke Eichbosonen, die eine so genannte Farbladung tragen: sie heißen **Gluonen**.

8.24.3 Wir basteln uns eine GUT

Das sind also die Gruppenstrukturen der separaten Kräfte. Die einfachste GUT erhält man, wenn man das **direkte Produkt** der einzelnen Symmetriegruppen der drei Wechselwirkungen (ohne Gravitation) bildet. So resultiert eine **SU(5)-Theorie** mit **24 Eichbosonen** ($5^2 - 1$). Das heißt also, dass neben den 12 bisher bekannten Eichbosonen (8 Gluonen, 1 Photon, 2 W-Teilchen und 1 Z-Teilchen) 12 weitere hinzukommen. Diese neuen Eichbosonen nennt man **X-Bosonen**, und **Y-Bosonen**. Sie gehören zu den Leptoquarks (Neologismus aus Leptonen und Quarks). X- und Y-Bosonen und deren Antiteilchen sind elektrisch, schwach und farbgeladen. Außerdem sind es Vektorbosonen, die also Spin 1 haben. X- und Y-Bosonen sind superschwer und haben Massen um 10^{16} GeV - zum Vergleich: Proton und Neutron wiegen jeweils 1 GeV. Die X-Bosonen tragen eine elektrische Ladung von $4/3$ Anteile der Elementarladung ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ C). Demzufolge tragen Anti-X-Bosonen $-4e/3$. Die Y-Bosonen haben ein Drittel der Elementarladung, so dass Anti-Y-Bosonen die elektrische Ladung von $-1e/3$ tragen. Auf die insgesamt 12 X- und Y-Bosonen (inklusive Antiteilchen) kommt man nun, wenn man die Farbladung als weiteren Freiheitsgrad ergänzt: Jedes X-, Anti-X-, Y- und jedes Anti-Y-Boson kann die Farbladung *rot*, *grün* oder *blau* annehmen (entsprechend Indizes R, G, B). So benutzt man die Symbole $X_R, X_G, X_B, Y_R, Y_G, Y_B$ und für die Antiteilchen $\text{Anti-}X_R, \text{Anti-}X_G, \text{Anti-}X_B, \text{Anti-}Y_R, \text{Anti-}Y_G, \text{Anti-}Y_B$.

8.24.4 Wir basteln uns eine andere GUT

Die Beschreibung der GUT mittels einer SU(5)-Gruppe stellt die einfachste Realisierung dar. Daneben wurde 1975 eine SO(10)-Eichgruppe vorgeschlagen (*Fritzsch & Minkowski, Georgi*). In der SO(10) ist die SU(5) als Untergruppe enthalten. Wie zu erwarten ist, sind in dieser Gruppe noch mehr Eichbosonen enthalten als die 24 der SU(5)-Theorie. Daneben können alle GUT-Modelle erweitert werden, so dass sie Supersymmetrie (SUSY) enthalten. Die Supersymmetrie entpuppt sich dabei als eine **vitale Ingredienz**, damit sich die drei laufenden Kopplungskonstanten tatsächlich in einem Punkt treffen. *Ohne SUSY verfehlen sich die Kurven knapp*. Deshalb gilt dieses extrapolierte Verhalten als gewichtigster Hinweis auf SUSY! Welche Gruppenstruktur die richtige Wahl für die GUT ist, muss die innere Konsistenz der Theorie und ihre Kompatibilität zu anderen Theorien sowie natürlich zum Experiment zeigen.

8.24.5 GUT und was sind die Konsequenzen?

1) Zerfall des freien Protons

Die wichtigste Folgerung der GUT ist der **Zerfall des freien Protons**. Das *gebundene* Proton zerfällt bekanntermaßen im radioaktiven β^+ -Zerfall. Sollte es die neuen Leptoquarks wirklich geben, so sind Feynman-Diagramme denkbar, in denen beispielsweise ein Proton in ein Positron und ein neutrales Pion (= Pi-Meson) zerfällt. Das neutrale Pi-Meson zerfällt seinerseits in Photonen (Photopionenproduktion):

$$p \rightarrow e^+ \pi^0 \rightarrow e^+ \gamma \gamma.$$

Solche Prozesse verstoßen gegen die **Baryonenzahlerhaltung**. Die Baryonenzahl B ist eine Quantenzahl. Für die Nukleonen (Proton und Neutron) ist sie jeweils 1, für das Antiproton -1, für die Quarks je $1/3$, für Antiquarks $-1/3$ und für alle Leptonen (Elektronen, Myonen,

Tauonen, Neutrinos) ist sie null. Mit dieser Kenntnis kann man folgende Baryonenzahl-Bilanz für die Zerfallsgleichung des Protons machen. Die linke Seite enthält nur das Proton: $B_L = 1$ (L für 'links'). Die rechte Seite enthält nun ein Positron mit verschwindender Baryonenzahl, weil es ein Lepton ist und ein Pi-Meson. Das neutrale Pion besteht aus zwei Quarks, u-Quark mit $B = 1/3$ und Anti-u-Quark $B = -1/3$. So folgt $B_R = 0$ (R für 'rechts'). Der Vergleich von B_L und B_R ergibt einen Unterschied, d. h. in diesem Prozess ist die Baryonenzahlerhaltung verletzt!

Protonenzerfall wird durch die X-Kraft vermittelt. Die extrem hohe Masse der X- und Y-Bosonen führt dazu, dass diese X-Kraft extrem kurzreichweitig ist. Anschaulich gesprochen müssen sich Teilchen sehr, sehr nahe kommen, damit sie die X-Kräfte spüren. Das ist sehr unwahrscheinlich. Präzise das ist der Grund dafür, dass die Zerfallszeit des freien Protons enorm groß ist. Theoretisch konnte man einen Wert von etwa 10^{32} **Jahren** ableiten! Experimentell versucht man dieses Phänomen mit Szintillationszählern zu messen. Diese Detektoren sind in der Lage kurze Lichtblitze zu messen, die aus dem Protonenzerfall als Cerenkov-Strahlung entstehen. Dazu werden die Zähler um einen großen Wassertank herum angeordnet. Der Grund, dass man gerade Wasser verwendet besteht darin, weil es naturgemäß sehr viele Protonen in Form von Wasserstoffatomkernen enthält (H_2O). Wie die Zerfallszeit nahe legt, sollte bei einer Zahl von 10^{32} Protonen im Tank, der Zerfall einmal im Jahr beobachtbar sein. Ein noch größerer Tank verbessert die Statistik entsprechend. Bislang blieb der Erfolg aus und man konnte keinen Zerfall des freien Protons detektieren.

2) Materie-Antimaterie-Asymmetrie

Die schweren X- und Y-Bosonen zerfallen in Quarks und Leptonen nach folgenden Reaktionsgleichungen:

$$\begin{array}{ll} X \rightarrow uu & \bar{X} \rightarrow \bar{u}\bar{u} \\ X \rightarrow \bar{d}e^+ & \bar{X} \rightarrow d e^- \\ Y \rightarrow \bar{u}e^+ & \bar{Y} \rightarrow u e^- \\ Y \rightarrow \bar{d}\bar{\nu}_e & \bar{Y} \rightarrow d\nu_e \end{array}$$

Dabei wird nicht nur die Erhaltung der Baryonenzahl B verletzt, sondern auch die der Leptonenzahl L . Interessanterweise ist die Differenz $B - L$ wieder eine Erhaltungsgröße (nur in der SU(5)-Theorie). Außerdem gilt **Erhaltung der elektrischen Ladung**. Man kann die GUT auch so auffassen: Sie stellt eine **Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen** her. Dies besitzt eine Analogie zur Supersymmetrie, die eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen generiert.

In der Kosmologie und letztendlich für unsere Existenz sind die X- und Y-Bosonen von großer Bedeutung: Kurz nach dem Urknall waren alle Kräfte gleich. In dieser Planck-Ära gab es nur eine **Urkraft**. Schließlich setzte der erste Phasenübergang ein: Durch die Expansion des Universums und der damit verbundenen Abkühlung fand eine spontane Symmetriebrechung statt. Deshalb spaltete sich die Urkraft in die X-Kraft und die Gravitationskraft auf. Diese auf die Planck-Ära folgende Epoche nennt man die **GUT-Ära**. Zeitlich ist sie auf 10^{-36} bis 10^{-33} Sekunden nach dem Urknall anzusiedeln. Die GUT-Epoche ist gekennzeichnet von der Existenz superschwerer X- und Y-Bosonen mit Massen von etwa 10^{16} GeV. Doch das Universum expandierte weiter und wurde kälter. Beim Unterschreiten der GUT-Schwellenenergie von 2×10^{16} GeV, entsprechend einer Temperatur von 10^{29} Kelvin setzte

der nächste Phasenübergang ein. Die X-Kraft zerfiel in elektroschwache Kraft und starke Kraft. Die X- und Y-Bosonen waren nun nicht mehr stabil. Sie zerfielen und reicherten die Urmaterie mit Quarks und Leptonen an. Interessanterweise war der Zerfall jedoch **asymmetrisch**: Es entstanden unterschiedliche Mengen von Teilchen und Antiteilchen. Das primordiale Plasma war heiß und dicht und die Teilchen konnten nicht 'friedlich' mit ihren Antiteilchen koexistieren. Es kam zu einer heftigen Vernichtungsschlacht von Teilchen und Antiteilchen, deren Gewinner die Gammaphotonen waren. In dieser Phase spricht man vom **strahlungsdominierten Kosmos**, weil die Annihilation (Zerstrahlung, Vernichtung) eine ungeheuer große Zahl an Photonen erzeugte. Nun kam jedoch die geringfügige Asymmetrie zum Tragen: Es gab ein bisschen mehr Teilchen als Antiteilchen. Am Ende der Annihilation gab es sehr viele Photonen, aber auch eine Materieteilchen. Dies war die Saat für die ersten Sterne, Galaxien und die Voraussetzung für irdisches Leben: Wo wären wir heute ohne X- und Y-Bosonen?

8.24.6 Novalis: 'Hypothesen sind Netze, nur der wird fangen, der auswirft...'

Die GUT ist demnach ein recht erfolgreiches und viel versprechendes Konzept. Allerdings darf man nicht vergessen, dass sie noch eine Hypothese ist, die nicht erfolgreich bestätigt werden konnten. Aber der Leiter der vereinheitlichten Kräfte steht man heute auf der Sprosse der elektroschwachen Theorie: Sie wurde bestens durch die Verifikation von Z- und W-Teilchen bestätigt.

Die Vereinigung von X-Kraft und Gravitation macht dagegen konzeptionelle Probleme. Die Hinzunahme der Gravitation zur GUT stellt gerade eine Vereinheitlichung **aller Naturkräfte** dar. Die Forscher sind noch nicht so weit, als dass sie diese *Unified Theory* (UT) gefunden hätten. Die Herausforderung besteht darin, eine robuste Quantengravitation zu formulieren. Das ist die Basis, um alle Kräfte quantenfeldtheoretisch einheitlich zu beschreiben. Ein Erfolg versprechender Kandidat für eine UT ist die M-Theorie. Sie kann als übergeordnetes Konstrukt zu den Stringtheorien angesehen werden. Einer Unifikation aller Naturkräfte scheint dieser Ansatz besonders nahe zu kommen, aber bisher tun sich die Stringtheorien schwer mit Detailvorhersagen, die direkt in aktuellen Experimenten überprüft werden könnten. Ein zweiter Forschungspfad ist die Loop-Quantengravitation (LQG), die weniger dem Unifikationsbestreben aller Kräfte folgt. Hier geht es speziell um eine quantisierte Beschreibung der Gravitation, die der Allgemeinen Relativitätstheorie in besonderem Maße Rechnung trägt.

8.25 Gruppe

Gruppe meint ein mathematisches Gebilde, das bestimmten Kriterien genügt. Generell gibt es in einer Gruppenstruktur *Elemente* einer bestimmten *Menge*, die miteinander durch eine *mathematische (binären) Operation*, beispielsweise einer **Transformation**, verknüpft werden. Bei den Gruppen resultiert aus dieser Operation wieder ein Element, das zur Ausgangsmenge gehört.

8.25.1 Kriterienkatalog mathematischer Gruppen

- ◇ *Abgeschlossenheit* (engl. *closure*, Eigenschaft **i**): die Verknüpfung zweier Elemente führt wieder auf ein Element der Gruppe.

Gruppeneigenschaften

Gruppenelemente: $a, b, c, \dots \in \mathcal{G}$

Binäroperation: $\circ$

(i) Geschlossenheit: $a, b \in \mathcal{G}$, then $a \circ b = c \in \mathcal{G}$

(ii) neutrales Element: $a \circ i = i \circ a = a$

(iii) inverses Element: $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = i$

(iv) Assoziativität: $a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c$

Sind Bedingungen (i) bis (iv) erfüllt, so heisst $(\mathcal{G}, \circ)$ **Gruppe**

Bei Erfüllung der Kommutativität heisst $(\mathcal{G}, \circ)$ **Abelsche Gruppe**

Abbildung 8.26: Definition und Eigenschaften einer Gruppe.

- ◇ Existenz eines *neutralen Elements* i (Eigenschaft **ii**): die Operation ist eine *Identität*.
- ◇ Existenz eines *inversen Elements* (Eigenschaft **iii**): die Operation von Element und zugehörigem inversen Element führt auf das neutrale Element.
- ◇ *Assoziativität* (Eigenschaft **iv**).

Sind alle diese Eigenschaften (vergleiche Abbildung 8.26) erfüllt, heißt die Menge mit betreffender binären Operation *Gruppe*. Ist außerdem *Kommutativität* gegeben, also Vertauschen der Reihenfolge von Operationen führt zum gleichen Ergebnis, so nennt man die Gruppe *abelsch* (engl. *Abelian group*).

8.25.2 Bezug zur Physik: Eichtheorie

In Physik ist die **Gruppentheorie** ein sehr wichtiger mathematischer Zweig, der zu einem tiefen Verständnis der Natur führt. Man untersucht dabei die *Invarianzeigenschaften* physikalischer Gesetzmäßigkeiten, die auf **Symmetrien** und **Erhaltungsgrößen** führen (*Noether-Theorem*). Viele physikalische Transformationen (Rotationen, Translationen, Galilei-Transformation, Lorentz-Transformation etc.) erfüllen gerade die Gruppeneigenschaften und bilden damit mathematische Gruppen. Die Struktur dieser Gruppen hat einen tief sinnigen, physikalischen Gehalt, weshalb das Studium der Gruppentheorie lohnt.

So offenbaren auch die Gravitationstheorien Gruppenstrukturen: die klassische Newtonsche Theorie kann auf die **Galilei-Gruppe** zurückgeführt werden.

Die Spezielle Relativitätstheorie und Allgemeine Relativitätstheorie stehen mit der Speziellen und Allgemeinen Lorentzgruppe in Zusammenhang. Man erkennt hier Verwandtschaften zu den klassischen **Drehgruppen** des zwei- und dreidimensionalen Raumes, was nahe legt, dass zumindest ein Anteil bei den Lorentz-Transformationen als Drehung im vierdimensionalen Minkowski-Raum interpretiert werden kann.

Die Quantenfeldtheorien des Standardmodells der Teilchenphysik, Quantenelektrodynamik, Quantenchromodynamik und schwache Wechselwirkung sind ebenfalls mit Symmetriegruppen bestimmter Gruppenstruktur verknüpft.

In den Eichtheorien führt man *Eichfelder* ein, die dafür sorgen, dass gewisse Symmetrien erhalten bleiben. Diese Eichfelder werden als **Eichbosonen** interpretiert, die gerade die Wechselwirkung der jeweiligen Eichtheorie vermitteln. Es handelt sich um die *intermediären* Vektorbosonen, also Spin 1 tragende Austauscheteilchen. Einzige Ausnahme bildet das hypothetische Graviton, das Austauschboson einer Quantengravitation, das ein Tensorboson (Spin 2) ist.

Das Konzept macht klare Aussagen zu diesen Wechselwirkungen, wie beispielsweise zur Zahl ihrer Eichbosonen und die Erscheinung der Wechselwirkungskräfte. In der QED beispielsweise erreicht man eine *Invarianz der Dirac-Gleichung* (die man aus einer speziell relativistischen Quantenmechanik extrahiert) durch die Einführung eines Eichfeldes, das man schließlich mit dem Photon identifiziert!

Die Methodik ist in den anderen Quantenfeldtheorien identisch: Physiker sind immer daran interessiert, die Bewegungsgleichungen der jeweiligen Theorie, die **Feldgleichungen**, invariant unter bestimmten **Eichtransformationen** zu lassen. Die resultierenden Eichfelder können immer als Eichbosonen der Theorie interpretiert werden, die die Wechselwirkung vermitteln!

Die **ungebrochenen Eichtheorien** beinhalten masselose Eichbosonen, wie es im Falle der QED und dem masselosen Photon erfüllt ist. Massebehaftete Eichbosonen kann man erst durch den Higgs-Mechanismus generieren, so zum Beispiel in der Schwachen Wechselwirkung. Das Higgs-Boson bewirkt eine spontane Symmetriebrechung und stattet durch Wechselwirkungen mit Fermionen und Bosonen diese mit Masse aus.

8.25.3 Terminologie von Gruppen

Die Gruppennamen fußen auf den Eigenschaften der Transformation. Gegeben sei eine Eichgruppe $G(N)$. Es gelten folgende Vereinbarungen und Definitionen:

- ◇ $G(N)$ heißt *speziell*, wenn die Determinante der Transformationsmatrix exakt eins ist: $\det(U) = 1$. Die speziellen Gruppen nennt man die $S(N)$.
- ◇ $G(N)$ heißt *unitär*, wenn die Transformationsmatrix unitär ist: $U^\dagger = U^{-1}$. Dabei bezeichnet † oder *T die Bildung der komplexen Konjugation aller Komponenten der Matrix sowie anschließende Transposition, also das Vertauschen von Spalten und Zeilen der Matrix. Die unitären Gruppen nennt man die $U(N)$.
- ◇ $G(N)$ kann beide Eigenschaften, speziell und unitär, erfüllen. Dann heißen diese Gruppen die $SU(N)$.
- ◇ $G(N)$ heißt *orthogonal*, wenn die Transformationsmatrix orthogonal ist, $O^T = O^{-1}$. Dabei bezeichnet T wiederum die Transposition, also das Vertauschen von Spalten und Zeilen einer Matrix (Anmerkung: Bei **reellen Matrizen** fallen die Begriffe *unitär* und *orthogonal* zusammen.). Diese Gruppen erhalten das Präfix O .
- ◇ Die speziellen, orthogonalen Gruppen heißen auch $SO(N)$.
- ◇ Das N in $G(N)$ gibt gerade die *Dimension* der Transformationsmatrix an.

8.25.4 Beispiele:

- ◇ 1) Die $SO(2)$ ist Drehgruppe im 2D-Raum. Sie wird von Pauli-Spin-Matrizen (oder alternativ den Quaternionen) generiert. Dies sind also 2×2 - Matrizen. Die $2^2 - 1 = 3$ Pauli-Matrizen heißen **Generatoren** der Drehgruppe.
- ◇ 2) Dementsprechend ist die $SO(3)$ die Drehgruppe im 3D-Raum. Die Drehungen leisten 3×3 - Matrizen.
- ◇ 3) *Heisenberg* führte eine Symmetrie zwischen Proton und Neutron, den Nukleonen ein. Sie haben denselben **Isospin**, $I = 1/2$, aber unterschiedliche Projektionen dieses Isospinvektors. Die zugrunde liegende Gruppe des Isospins ist die $SU(2)$. In Abwesenheit von elektromagnetischer Wechselwirkung wären Proton und Neutron identisch, aber infolge der vorhandenen elektromagnetischen Wechselwirkung findet eine Symmetriebrechung statt und bewirkt den geringfügigen Unterschied in den Massen dieser beiden Teilchen und den klaren Unterschied in der elektrischen Ladung.
- ◇ 4) Die Quantenelektrodynamik hat eine besonders einfache Gruppenstruktur, die $U(1)$. Die Transformationsmatrix ist demnach eine unitäre 1×1 - Matrix. Das Eichboson ist das masselose, elektrisch neutrale Photon, der Generator der $U(1)$. Die assoziierte Symmetrie bzw. Erhaltungsgröße ist die **erhaltene elektrische Ladung**.
- ◇ 5) Die **schwache Hyperladung**, eine Quantenzahl, fußt ebenfalls auf der $U(1)$ -Gruppe.
- ◇ 6) Der **schwache Isospin**, wie er ausführlich bei den Leptonen beschrieben wird und zu deren Klassifikation dient, basiert auf der $SU(2)$ -Gruppe.
- ◇ 7) Die Gruppenstruktur der Quantenchromodynamik basiert auf der $SU(3)$ und wird also durch spezielle, unitäre 3×3 - Transformationsmatrizen beschrieben. Das **Farb-Oktett**, die acht masselosen Gluonen mit Farbladung, sind kein Zufall: sie sind gerade die $3^2 - 1 = 8$ linear unabhängige Generatoren dieser Symmetriegruppe. Die Erhaltungsgröße ist die **erhaltene Farbladung**.
- ◇ 8) Eine besondere Stellung und höhere Komplexität nimmt die schwache Wechselwirkung ein. Die schwachen Austauschteilchen sind **nicht masselos**, sondern sogar sehr massereich, nämlich 86fache bzw. 97fache Protonmasse! Auch ist der 'schwache Ladung' nicht erhalten. Das gibt bereits einen Hinweis auf eine kompliziertere Gruppenstruktur. Die Teilchenphysiker fanden das direkte Produkt zweier Gruppen $SU(2) \times U(1)$ und begründeten eine **elektroschwache Theorie**. Deren Anfangszustand ist eigentlich symmetrisch und führt auf **vier masselose Bosonen**. Die Umgebung, das Quantenvakuum ist hingegen *nicht symmetrisch*. Dieses Vakuum, was durch ein masseloses Skalarfeld, dem Higgs-Teilchen beschrieben wird, bewirkt eine **spontane Symmetriebrechung** in dessen Folge die beiden W-Teilchen und das Z-Teilchen eine Masse erhalten, das Photon hingegen nicht.
- ◇ 9) Das Unifikationsbestreben geht jedoch noch viel weiter, als nur bei diesen zwei Wechselwirkungen. In den Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT) kann man drei der vier fundamentalen Kräfte (ohne Gravitation) in einem einheitlichen Bild beschreiben. Das direkte Produkt der einzelnen Symmetriegruppen führt auf die **$SU(5)$ -Gruppe** 24 Eichbosonen. Somit handelt man sich 12 weitere bosonische Austauschteilchen neben

den bekannten ein, sie heißen **X-Bosonen** oder *Leptoquarks*. Die Theorie hat sicherlich einen ästhetischen Reiz, doch muss das Experiment ihre Gültigkeit untermauern. Entweder schafft man es, diesen Nachweis in Teilchenbeschleunigern zu erbringen oder die Beobachtung des Frühen Universums, nur Sekundenbruchteile nach dem Urknall bringt Indizien zur Richtigkeit der GUT.

- ◊ **10)** Die Spezielle Lorentz-Transformation lässt die Minkowski-Metrik invariant und ist daher eine Isometrie. Man kann die Gruppeneigenschaften anhand der Lorentz-Transformationsmatrix nachvollziehen und die **Spezielle Lorentz-Gruppe** ableiten. Dem übergeordnet ist die Poincarégruppe, die um Translationen erweitert ist. Die Lorentzgruppe ist demgemäß eine **Untergruppe** der Poincarégruppe.

Untergruppen sind auf Untermengen definiert, die jedoch ebenfalls die Kriterien einer mathematischen Gruppe erfüllen.

8.26 GUT

GUT ist das englische Akronym für die Großen Vereinheitlichten Theorien, den *Grand Unified Theories*. Es handelt sich dabei um eine physikalische Theorie, die auf eine Unifikation der Naturkräfte abzielt. Die GUT ist dabei die konsequente Weiterentwicklung der erfolgreichen Elektroschwachen Theorie. Während diese Theorie die elektromagnetische Kraft und die schwache Kraft vereint, vermag die GUT sogar drei Kräfte in einem vereinigenden Konzept zu beschreiben: elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung.

8.26.1 Nachwuchs im Teilchenzoo

Mit dieser Vereinheitlichung gehen notwendigerweise neue Teilchen einher, die die Physiker X-Bosonen und Y-Bosonen nennen. Sie sind gerade die Austauschteilchen der X-Kraft, derjenigen Kraft, zu der elektromagnetische, schwache und starke Kraft 'verschmolzen' sind.

Die GUT ist noch von hypothetischem Charakter und existiert in unterschiedlichen Ausarbeitungen (verschiedene Gruppenstrukturen; mit oder ohne Supersymmetrie). Ein wesentlicher experimenteller Test besteht im **Zerfall des freien Protons**, den die GUT prognostiziert. Bisher wurde er trotz erheblichen Aufwands nicht nachgewiesen.

In der Kosmologie ist die GUT von Relevanz, weil im Rahmen eines heißen Urknalls (engl. *Hot Big Bang*, HBB) eine Epoche in der Entwicklung des Universums existiert haben muss, in der die X-Kraft neben der Gravitation vorherrschte. Diesen Abschnitt bezeichnen Kosmologen als **GUT-Ära** und ordnen in zeitlich hinter der Planck-Ära bzw. Epoche der Quantengravitation und vor der Inflation ein.

Die GUT ist wesentliche Zutat der menschlichen Existenz, verursachte doch der Zerfall der X- und Y-Bosonen am Ende der GUT-Ära die **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie**. Die Anteile an Materie und Antimaterie zerstrahlten in Form von Vernichtungsstrahlung (*Annihilationsphotonen*), ließen aber aufgrund der Asymmetrie einen kleinen Teil 'normaler Materie' übrig. Das war der gerade der Keim für die ersten kosmischen Objekte, wie Sterne und Galaxien und schließlich auch für Planeten und das Leben. Uncharmant formuliert (fast eine Kakophonie) klingt das in etwa so: '*Menschen sind reprozeßierte Reste von zerfallenen X-Bosonen.*'

8.27 GZK-cutoff

GZK-cutoff ist die Fachbezeichnung für einen charakteristischen Abfall in der spektralen Verteilung der kosmischen Strahlung (CR für *Cosmic Rays*). Die Hochenergiephysiker erwarten diesen Abfall bei höchsten Energien ab etwa 10^{20} eV.

8.27.1 physikalischer Grund des Abfalls

Die Erklärung dafür ist die Folgende: Die Hauptkomponente in der kosmischen Strahlung sind die Protonen. Besonders energiereiche Protonen ab Energien um 2×10^{20} eV können eine **baryonische Resonanz** zeigen, die so genannte **Deltaresonanz** bei 1232 MeV, auch als D(1232) bezeichnet. Die Lebensdauer dieser Resonanz ist mit 10^{-23} Sekunden äußerst kurz. Der Zustand zerfällt in ein Pion und ein Nukleon (**Photopionenproduktion**).

8.27.2 Nach Anregung sind die Protonen raus

Wenn nun ultrahochenergetische (UHE) Protonen (oder auch Neutronen, anderen Atomkerne) der kosmischen Strahlung mit kalten Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung (engl. *Cosmic Microwave Background*, CMB) wechselwirken und D(1232) anregen, *fehlen* höherenergetische Protonen in der Verteilung der kosmischen Strahlung. Anders gesagt entsprechen die kalten CMB-Photonen im Laborsystem heißen Gammaphotonen im Ruhesystem der Protonen. Durch Reaktionen zwischen Proton und Photon verlieren in jedem Falle die ultrahochenergetischen Protonen kinetische Energie. Dies sollte sich in einem steilen Abfall des CR-Spektrums oberhalb von 10^{20} eV bemerkbar machen.

8.27.3 Ursprung des geheimnisvollen Akronyms GZK

Dies mutmaßten die Pioniere *Greisen*, *Zatsepin* und *Kuz'min* erstmals 1966. Daher nennt man diesen Abfall (engl. *cutoff*) auch **Greisen-Zatsepin-Kuz'min-cutoff** oder kurz **GZK-cutoff**.

8.27.4 Experimenteller Status

Die mittlere freie Weglänge von diesen UHE-Protonen mit 10^{20} eV liegt Berechnungen zufolge zwischen 30 und 50 Mpc bzw. 100 und 150 Millionen Lichtjahren. Nur *lokale* Quellen für UHE-Protonen kämen also in Frage, wenn Protonen mit größeren Energien detektiert würden. Es gibt wenige dieser Beobachtungen, die bis heute nicht geklärt sind. Die aktuellen Daten des Airshower-Detektors AGASA sprechen sogar eher für ein Fehlen des GZK-cutoffs. Deshalb warten die Hochenergiephysiker mit Spannung auf neue Messungen, weil erst Großprojekte wie AUGER, EUSO und OWL eine ausreichende Zahl an detektierten Ereignissen und die damit verbundene gute Statistik bringen werden (*de Marco et al.* 2003).

Es gibt noch eine zweite Prognose: *Hill & Schramm* bestimmten 1985 einen unteren Schwellwert von 5×10^{19} eV, damit Photopionenproduktion stattfinden kann. Deshalb sollte neben einem scharfen Abfall der Verteilung eine Häufung von Protonen dieser Energie mit unterem Schwellwert beobachtbar sein. Leider ist die Auswertung dieser UHE-Spektren nicht trivial und daher konnte bisher weder eine Häufung (in Form eines Buckels, *bumps*), noch der GZK-cutoff zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Die detektierten Protonen sind gemäß diesem Szenario bestenfalls 'intergalaktisch' (gerade mal etwas weiter als bis zum Virgo-Haufen) und nicht 'kosmologisch'.

8.27.5 Auswege in der Theorie

Eine mögliche Erklärung für die Abwesenheit des GZK-cutoffs sind topologische Defekte.

Es wurden einige Modelle vorgeschlagen, die UHE-Teilchen mit Energien im Bereich von 10^{11} GeV produzieren könnten. So werden Hybrid-Defekte aus Monopol und kosmischem String oder magnetische Monopole, die in intergalaktischen Magnetfeldern auf die UHE-Skala beschleunigt werden, diskutiert.

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