
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

19.1	Illustration des RSI-Modells.	3
19.2	SOHO-Bild der Sonne mit Sonnenflecken und Randverdunklung 2003.	6
19.3	Das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum.	7
19.4	gekrümmte Raumzeit.	8
19.5	Illustration der Ray-Tracing-Methode.	11
19.6	Ray Tracing Ergebnis einer Scheibe um ein Schwarzes Loch.	12
19.7	Sequenz der Reionisationsphasen.	15
19.8	Kosmische Zeit und Rotverschiebung in der Rekombinationsepoche.	18
19.9	Kosmische Zeit und Rotverschiebung von $z = 0$ bis 10.	19
19.10	Zentrale Gleichungen der Relativitätstheorie Albert Einsteins.	21
19.11	Renormierung: Die Beseitigung von Unendlichkeiten macht Physiker glücklich!	24
19.12	Gravitationstrichter: Krümmung und gravitative Zeitdilatation.	30
19.13	Roche-Volumen: Potentialgebirge, Lagrange-Punkte und Roche-Volumen eines Doppelsternsystems.	34
19.14	Äquipotentiallinienstruktur, Lagrange-Punkte und Roche-Volumina eines Binärs.	35
19.15	Röntgendoppelstern aus Riesenstern und Schwarzem Loch.	37
19.16	Röntgendoppelstern Mira A und Mira B im Röntgenlicht.	39
19.17	Beteigeuze - Orions rote Schulter.	41
19.18	Sonne wird zum Roten Riesen und innere Planeten verschlingen.	42
19.19	Beziehung zwischen kosmischer Zeit und kosmologischer Rotverschiebung bis $z = 10$	47
19.20	Galaxienverteilung beobachtet im Survey 2dF, 2003.	49

19 Lexikon R

19.1 Radioaktivität

Die Radioaktivität ist eine physikalische Erscheinung, die ausschließlich auf **Umwandlungen des Atomkerns** beruht. Der Atomkern ist positiv geladen und besteht aus Nukleonen. Diese Ansammlung von Teilchen kann sich durch die Wirkungen physikalischer Kräfte verändern und so ihrerseits Teilchen aussenden. Dabei unterscheiden die Kernphysiker **drei Formen des radioaktiven Zerfalls**:

- ◇ Alpha-Zerfall,
- ◇ Beta-Zerfall und
- ◇ Gamma-Zerfall.

Insbesondere wird unterschieden zwischen *natürlicher Radioaktivität*, die in der Natur ohne Zutun des Menschen vorkommt und *künstlicher Radioaktivität*, die vom Menschen durch gezielte Kernreaktionen herbeigeführt wird.

Radioaktivität ist im Allgemeinen gefährlich für Leben. Jede Lebensform verträgt nur eine bestimmte Menge (*Dosis*) von Radioaktivität; wird diese überschritten, stirbt die lebende Zelle und ggf. der gesamte Organismus.

Physikalische Einzelheiten werden bei den einzelnen Zerfallsarten erläutert.

19.2 Radiogalaxie

Radiogalaxien sind Vertreter Aktiver Galaktischer Kerne (AGN), die sich durch eine **hohe** Radioleuchtkraft auszeichnen. Im Jargon der Astronomie sind Radiogalaxien *radiolaut* Quellen.

19.2.1 Eigenschaften von Radiogalaxien

Die visuelle Leuchtkraft ist mit -24. Magnitude eher gering. *Bolton* entdeckte die erste Radiogalaxie mit der *Messier*-Bezeichnung M87 im Jahre 1949. Am gleichen Objekt wurde der Begriff Jet geprägt. Radiogalaxien **haben immer** Jets. Radioastronomen teilen sie gemäß der Fanaroff-Riley-Klassifikation (1974) ein.

Meist sind die Radiogalaxien elliptischen Typs, es handelt sich also um entwickelte Galaxien. Ihr Emissionslinienspektrum ähnelt sehr den Seyfert-Galaxien. Morphologisch ähneln die Radiogalaxien sehr den radiolauten Quasaren: Beide AGN-Typen zeigen im Radiowellenlängenbereich neben den Jets weitere, ausgedehnte Strukturen wie *Lobes*, *Hot Spots* und einen *Core* (Begriffe erläutert unter FR-Klassifikation). Sie unterscheiden sich nur auf der Längenskala, zeigen aber **gleiche Gestalt** (*Morphologie*), wie z. B. Beobachtungen mit dem *Very Large Array* (VLA) belegen.

19.2.2 Typen unter den Radiogalaxien

- ◇ *Broad Line Radio Galaxies* (BLRGs), mit breiten Emissionslinien und blauem Kontinuum,
- ◇ *Narrow Line Radio Galaxies* (NLRGs) mit schmalen Emissionslinien
- ◇ und *High- z Radio Galaxies* (HZRGs), bei denen es sich um **hochrotverschobene Radiogalaxien** handelt.

19.2.3 Was weit entfernte Radiogalaxien verraten

Gerade die hochrotverschobenen Radiogalaxien sind von besonderem Interesse in der Kosmologie, weil diese HZRGs hohe kosmologische Rotverschiebungen z aufweisen und damit ein Studium früherer Phasen im Universum gestatten. Diese Objekte sind so weit entfernt, dass sie sich eignen, um **Jets im frühen Universum** zu untersuchen. Hier war das intergalaktische Medium (IGM) noch dichter, als es im lokalen Universum (bei $z = 0$) ist. Befindet sich die Radiogalaxie in der Nähe der Reionisationsära, war das IGM sogar teilweise noch neutral.

Es ist äußerst interessant, die Propagation von Jets unter diesem Dichtekontrast (Verhältnis von Jetmateriedichte zu IGM-Umgebungsichte) zu studieren, weil sich hier völlig neue Jetstrukturen ausbilden können. Jets im frühen Universum sehen anders aus, als Jets im lokalen Universum. Diese Untersuchungen werden mithilfe von leistungsfähigen Computern in der theoretischen Astrophysik durchgeführt. Das Computerlabor trägt hier sehr zum Verständnis der beobachteten Quellen und der Entwicklung der Strukturen im Kosmos bei.

19.2.4 Entfernungsrekord bei Radiogalaxien

Der Entfernungsrekord für die Radiogalaxien liegt bei $z = 5.19$ und wird vom Objekt TN J0924-2201 gehalten (*Breugel et al.*, 2000; astro-ph/0006238). Die so genannte Lyman-Alpha-Kante, eine charakteristische Spektrallinie von Wasserstoff, die im Ruhesystem im UV zu finden ist, liegt bei diesem Objekt bei 753 nm, also im Bereich sichtbaren, roten Lichts! Diese Radiogalaxie ist also so weit entfernt, dass die kosmische Expansion die 'vor Ort' ultraviolette Strahlung ins rote Licht verschoben wird - allein durch die Ausdehnung des Kosmos!

19.3 Radion

Hypothetisches Kraftfeld, das von dem Kosmologen *Paul Steinhardt* eingeführt. Das Radion durchsetze die ganze Raumzeit im Kosmos. Als Folge dieses Feldes manifestiere sich das, was in der Kosmologie als Dunkle Energie bezeichnet wird. Das fluktuierende, zeitlich variable Radionfeld solle dafür verantwortlich sein, dass unser Vorläuferuniversum mit einem Paralleluniversum kollidiert sei. Aus dieser Weltenkollision, der so genannten Ekpyrosis, sei schließlich - so das sehr spekulative Modell - unser heutiges Universum hervorgegangen!

Natürlich gibt es für diese Idee keinerlei Stützen auf der Grundlage astronomischer Beobachtungen. Allerdings ist eine attraktive Eigenschaft dieser Hypothese, dass sie **erstmalig eine Erklärung für den Urknall** anbietet - das vermag die Urknalltheorie nicht.

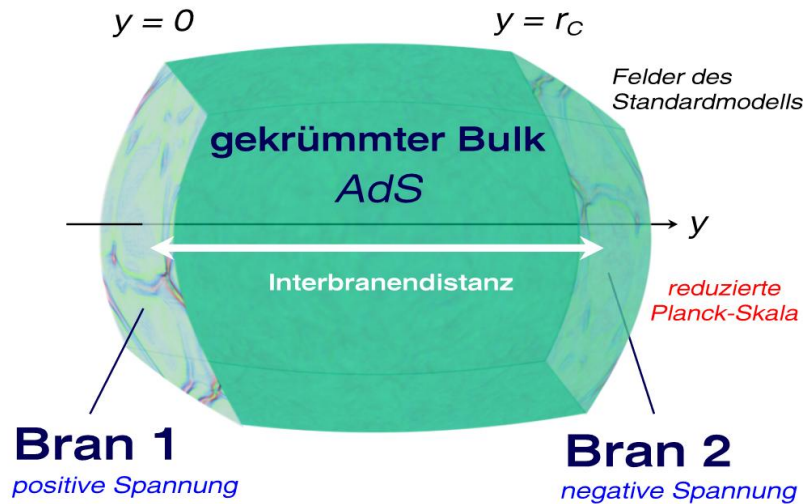


Abbildung 19.1: Illustration des RSI-Modells.

19.4 Randall-Sundrum-Modelle

Die Randall-Sundrum-Modelle (RS-Modelle) wenden die Branen der Stringtheorien im Rahmen einer relativistischen Kosmologie an. Es handelt sich also um eine Variante in der **Branenkosmologie**.

19.4.1 mehr Raum

Wesentliche Voraussetzung für diese Modelle ist demnach die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen, so genannten Extradimensionen. In diesen 'Extraraum' kann gemäß des Modells *nur* die Gravitation eindringen, **nicht** aber Teilchen und Felder des Standardmodells der Teilchenphysik. Den übergeordneten, höherdimensionalen Raum nennen die Physiker **Bulk**. In den Randall-Sundrum-Modellen ist dieser 'leer' in dem Sinne, dass er **kein Skalarfeld** (wie das Cosmon oder Radion) enthalte. Die Metrik des Bulks ist im RS-Modell eine **gekrümmte, fünfdimensionale Anti-de-Sitter-Raumzeit**, abgekürzt mit **AdS₅**. 'Anti' bedeutet, dass die (fünfdimensionale!) kosmologische Konstante dieser Bulk-Geometrie *negativ* ist, was im Gegensatz zur klassischen, vierdimensionalen de-Sitter-Raumzeit mit positiver kosmologischer Konstante steht.

19.4.2 zwei Randall-Sundrum-Modelle: RSI und RSII

Im **RSI-Modell** (Randall & Sundrum 1999, hep-ph/9905221) werden neben dem gekrümmten Bulk zwei Branen betrachtet. Präzise gesagt sind es **3-Branen**, die also mit drei Raumdimensionen ausgestattet sind) betrachtet. Die 3-Branen sind *Hyperflächen* der Bulk-Raumzeit, d. h. sie haben gerade eine Raumdimension weniger als der Bulk. Außerdem sei angenommen, dass die 3-Branen eine flache Minkowski-Metrik aufweisen. Eine Bran kann man gerade mit unserem vierdimensionalen (drei Raum- plus eine Zeitdimension) Universum identifizieren. Dieses System aus Bulk und zwei Branen ist **statisch**, weil der Bulk 'leer' ist. Die beiden Branen sind über eine räumliche Extradimension getrennt. Ihren Abstand

nennt man *Interbranendistanz*; im RS-Modell sei diese konstant. Die starke Krümmung im fünfdimensionalen Anti-de-Sitter-Raum sorgt für eine starke Gravitationsrotverschiebung zwischen den auf Distanz gehaltenen Branen: die Energieskala ist deshalb sehr unterschiedlich, wenn man die eine Bran mit der anderen vergleicht. Das Bulk-Bran-System ist in Abbildung 19.1 illustriert. Diese Branen-Konfiguration löst das so genannte **Hierarchieproblem**, nach dem elektroschwache Energieskala (100 GeV) um etwa 17 Größenordnungen von der Energieskala der Planck-Skala (10^{19} GeV) abweicht. Für diesen gigantischen Skalenunterschied sind die gekrümmte Bulk-Geometrie und der Abstand der Branen in einer höheren Dimension verantwortlich.

Im **RSII-Modell** (*Randall & Sundrum* 1999, hep-th/9906064) hat man ebenfalls eine gekrümmte, fünfdimensionale Anti-de-Sitter-Raumzeit, nur lässt man nun die **Interbranendistanz gegen unendlich** gehen, so dass man effektiv ein **nicht-kompaktes Ein-Bran-Modell** betrachtet. Unter diesen Voraussetzungen stellt man fest, dass das Newtonsche Gravitationsgesetz auf einer Bran modifiziert werden kann. Dies hängt im Speziellen von der kosmologischen Konstante und der Kopplungskonstante im **AdS₅**-Raum ab. Die Newtonsche Gravitationskraft enthält neben dem klassischen Term, der mit $1/r^2$ abfällt, einen weiteren der stärker mit $1/r^4$ abfällt. Bisher gab es keine experimentellen Hinweise in Cavendish-Experimenten oder anderen Experimenten, dass das Gravitationsgesetz auf Längenskalen größer als einige zehn Mikrometer modifiziert werden müsste. Anderes gesagt, falls es Extradimensionen gibt, sind sie eingerollt oder kompaktifiziert und zwar auf kleinere Raumdimensionen als etwa $50\ \mu\text{m}$.

19.4.3 Machen wir doch mal Branenkosmologie

Mit dem RSII-Modell kann man nun den üblichen Weg der Kosmologie beschreiten und die **Friedmann-Gleichungen** nun aber in 5D formulieren (vergleiche Friedmann-Weltmodell). Vergleicht man diese modifizierte Version mit der klassischen 4D-Version wie man sie nur mit den Mitteln der Allgemeinen Relativitätstheorie gewinnt, so identifiziert man **neue Terme in den Friedmann-Gleichungen**. Diese hängen von der **Spannung der Bran** (engl. *tension*) ab (die man sich wie eine Oberflächenspannung einer Seifenblase vorstellen kann) und einem gänzlich neuen Term, den man **Dunkle Strahlung** (engl. *dark radiation*) nennt. Weiterhin lassen sich Beziehungen zwischen fünfdimensionaler kosmologischer Konstante Λ_5 (im Bulk), vierdimensionaler kosmologischer Konstante Λ_4 (auf der Bran), Gravitationskonstante und Branenspannung auffinden.

19.4.4 Der Clou: Lösung des Hierarchie-Problems

Es stellt sich heraus, dass bei geeigneter Branenspannung und fünfdimensionaler kosmologischer Konstante die vierdimensionale kosmologische Konstante verschwinden kann. Die beobachtenden Kosmologen messen derzeit einen Wert der kosmologischen Konstante nahe null, nämlich ausgedrückt als relativistische Energiedichte $(10^{-3}\ \text{eV})^4$! Die Beobachtung gibt weitere Beschränkungen für die Branenspannung, die fünfdimensionale Kopplungskonstante und die Dunkle Strahlung (letztere höchstens 10% der Energiedichte der Photonen).

19.4.5 Erweiterung: Branendynamik in Extradimension

Die Randall-Sundrum-Modelle mit leerem Bulk erfahren eine Erweiterung in **Modellen mit Skalarfeld im Bulk**, z. B. dem Ekpyrotischen Szenario und dem Zyklisches Universum. Hier werden die Branen in Wechselwirkung mit dem Skalarfeld **dynamisch** und können gegeneinander schwingen und sich sogar durchdringen.

19.4.6 Test im Teilchenbeschleuniger

Die Physiker haben genau untersucht, welche experimentellen Signaturen die Randall-Sundrum-Modelle im Teilchenbeschleuniger hinterlassen würden. So wurde gezeigt, dass der Teilchenbeschleuniger LHC, der bald in Betrieb gehen wird, die RS-Modelle verifizieren oder falsifizieren wird, falls das Standardmodell auf der TeV-Bran (derjenigen mit der reduzierten Planck-Skala) beschränkt ist (*Davoudiasl et al.* 2001, hep-ph/0006041).

19.4.7 Vortrag

- ◇ Mehr Details zu Randall-Sundrum-Modellen und der Branenkosmologie: *An introduction to Brane World Cosmology* (Stand März 2004).

19.5 Randverdunklung

Randverdunklung ist ein Phänomen, das bei leuchtenden Kugeln beobachtbar ist. Dieser Effekt ist bedeutsam in der Astronomie bei den Photosphären der Sterne und insbesondere bei der **Sonne**.

19.5.1 Wie sieht sowas aus?

Auf dem Sonnenfoto 19.2 (Credit: SOHO, ESA/NASA 2003) fällt auf, dass der Rand der Sonnenscheibe immer etwas dunkler erscheint, als die Sonnenmitte. (**Vorsicht!** Niemals direkt in die Sonne blicken, um das zu überprüfen: Sonnenfilter, Sonnenprojektionsschirm oder SoFi-Brille verwenden!). Dieser Effekt heißt *Randverdunklung* (engl. *limb darkening*).

19.5.2 Die Erklärungen

Wir nehmen zunächst an, dass das Licht die Sonnenkugel nur in *radialer* Richtung verlasse. Die Photosphäre ist eine *gekrümmte*, strahlende Oberfläche. Nun ist die beobachtete Strahlungsintensität allerdings eine **winkelabhängige** Größe und skaliert mit dem Kosinus des Blickwinkels. Wir nehmen als Beobachter die Sonnenstrahlen unterschiedlich wahr: wir schauen direkt in Sonnenstrahlen hinein, die von der Mitte der Sternscheibe ausgehen; aber bei Strahlen, die vom Rand kommen, blicken wir schräg zum Strahl. Anders formuliert bedeutet das, dass der Blickwinkel klein und nahe 0° ist für Strahlen aus der Scheibenmitte; doch er ist hoch, bis zu 90° im Extremfall, für Strahlen vom Scheibenrand. Der Kosinus dieser Winkel ergibt entsprechend etwa 1 (Mitte) bzw. etwa 0 (Rand) und geht als geometrischer Faktor in die Intensität ein. Die winkelabhängige Intensität wird deshalb zum Rand hin unterdrückt. Das erklärt die Randverdunklung **geometrisch**.

In dieser geometrischen Erklärung wurden radiale Sonnenstrahlen angenommen. Es gibt jedoch in der Natur auch Strahlen vom Rand, die unter kleinem Winkel aus der Photosphäre

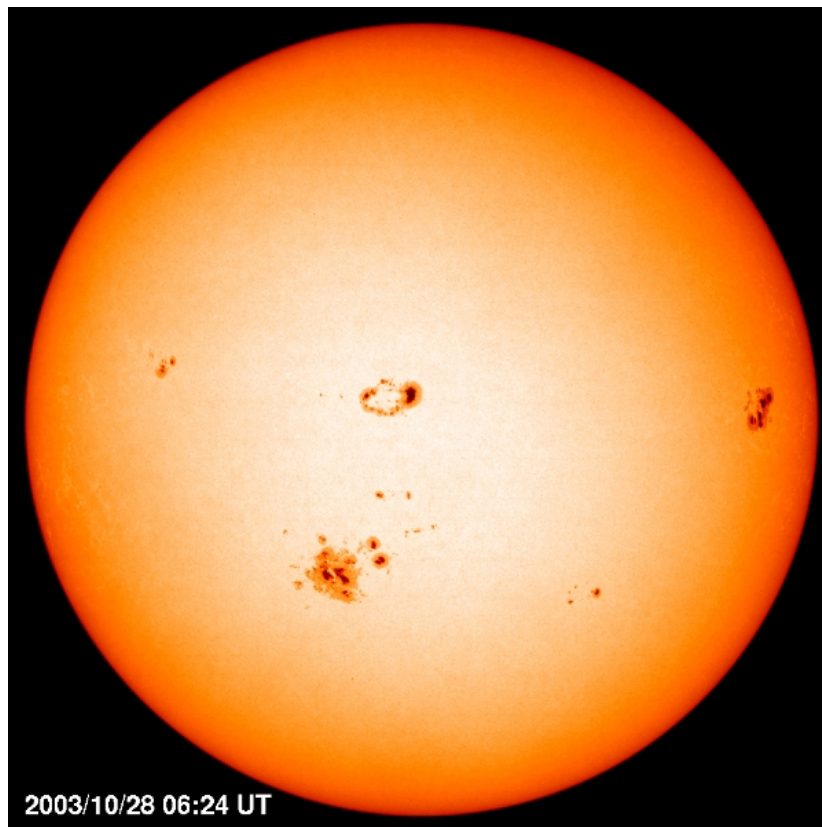


Abbildung 19.2: SOHO-Bild der Sonne mit Sonnenflecken und Randverdunklung 2003.

$$\begin{array}{ccc}
 \text{Klassische Mechanik} & & \text{Relativitätstheorie} \\
 \hline
 \text{Raum} + \text{Zeit} & = & \text{Raumzeit} \\
 3 & + & 1 = 4
 \end{array}$$

Abbildung 19.3: Das vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum.

(etwa parallel zur Sonnenoberfläche) austreten. Das schaffen allerdings nur solche, die besonders nahe an der Sonnenoberfläche sind. Denn je tiefer in der Sonne die Strahlung startet, umso wahrscheinlicher ist ein Absorptions- oder Streuprozess, der die Strahlung schluckt bzw. ablenkt. Wenn es also Strahlung vom Rand noch zum Beobachter schafft, dann nur aus höheren und damit kälteren Schichten der Photosphäre. Die Wärmestrahlung einer kälteren Quelle ist jedoch zum einen 'röter' (hier orange) und zum anderen auch dunkler, weil das Maximum der Planck-Strahlungsverteilung sich mit fallender Temperatur auch nach unten, nämlich zu kleineren Intensitäten, verschiebt. Das erklärt die Randverdunklung zudem **physikalisch**.

19.5.3 Ein Monsterfleck

Es sei am Rande bemerkt, dass das Beobachtungsfoto oben den größten Sonnenfleck zeigt, der mit SOHO beobachtet wurde: Der Fleck im unteren Bereich ist **15mal größer als die Erde!**

19.6 Raumzeit

Raumzeit (engl. *space-time*) ist ein Kunstwort, dass angemessen ein wesentliches Resultat der Relativitätstheorie ausdrückt: Raum und Zeit sind keine Dimensionen mehr, die unabhängig voneinander sind. Wie die Lorentz-Transformation der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) zeigt, bilden Raum und Zeit ein Kontinuum! Die Zeit- und die drei Raumkoordinaten sind eng miteinander verwoben und bilden eine **vierdimensionale Raumzeit** (siehe Grafik 19.3).

19.6.1 Erfinder des Begriffs Raumzeit

Der Begriff *Raumzeit* wurde 1908 vom Mathematiker *Hermann Minkowski* (1864 - 1909) ersonnen, der eine neue Darstellung der Relativitätstheorie durch 4er-Vektoren erfand. Diese elegante Formulierung ist bis heute gebräuchlich. Eine witzige Anekdote ist, dass Minkowski *Albert Einsteins* Mathematiklehrer am Polytechnikum Zürich war. Trotz Begabung hatte Einstein nicht unbedingt mit vortrefflichen Leistungen in Minkowskis Unterricht gegläntzt. Umso erstaunter war Minkowski, als er erfuhr, dass dieser Einstein die Relativitätstheorie erfunden hatte. So reagierte er mit folgendem Kommentar:

Das hätte ich dem Einstein eigentlich nicht zugetraut.

(Quelle: Biographie **Albert Einstein** von *Thomas Bührke*, dtv 2004)

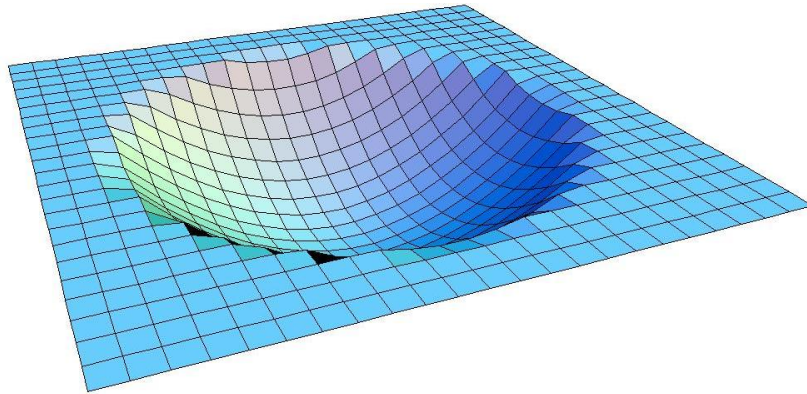


Abbildung 19.4: gekrümmte Raumzeit.

19.6.2 dynamische und gekrümmte Raumzeit

Raum und Zeit existieren nicht weiter als absolute Größen wie in der klassischen Physik, sondern sind selbst **dynamisches Objekt**, physikalische Größe, ein komplexes **Tensorfeld**, eine Metrik. Diese Raumzeit kann in Abwesenheit von Materie und Energie *flach* sein, dann handelt es sich um die Minkowski-Metrik. Die Raumzeit ist jedoch im Allgemeinen durch Massen oder allgemein gesagt Energieformen gekrümmt. Dann muss die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) zur Beschreibung bemüht werden. Besonders ausgeprägt ist die Krümmung der Raumzeit bei Schwarzen Löchern, die durch die Schwarzschild-Metrik (statisch) oder Kerr-Metrik (rotierend) beschrieben werden. Die Krümmung wird erst nahe am Schwarzen Loch besonders hoch und verschwindet bei großen Abständen. Die Relativisten sagen: Dort ist die Metrik asymptotisch flach. Es ist durchaus eine nicht triviale Aufgabe, wie man sich Raumzeit vorzustellen hat. An sich sind wir an eine vierdimensionale Welt gewöhnt: In einem Zimmer füllen wir - der eine mehr, der andere weniger - drei Raumdimensionen, nämlich Länge, Breite und Höhe, aus. Zu einem späteren Zeitpunkt befinden wir uns womöglich an einem anderen Ort im Zimmer: wir haben uns durch die Zeit bewegt. Aber wie bilden diese vier Dimensionen ein Kontinuum? Um das zu veranschaulichen, muss man sich einiger Tricks bedienen und z. B. eine Raumdimension und die Zeitdimensionen unterdrücken. Eine recht einfache Vorstellung von Raumzeit ist dann eine Analogie zu einer dehnbaren **Gummihaut**. In diesem simplen 2D-Modell geht die Information über die Zeitdimension und eine Raumdimension verloren. Eine in einen Rahmen gespannte Gummihaut bildet eine flache Oberfläche (= flache Raumzeit ohne Anwesenheit von Massen). Legt man eine Masse, z. B. eine schwere Metallkugel auf die Gummihaut, so wird sie gekrümmt. Man erhält eine 'Delle' in der Raumzeit, eine gekrümmte Raumzeit – siehe Abbildung 19.4. Dabei ist die Tiefe der Delle ein Maß für die Krümmung der Raumzeit.

Die Delle ist ein Resultat einer ausgedehnten Masse. Man kann dieses Spiel noch weiter treiben und die Masse im Gravitationskollaps in sich zusammenfallen lassen. Das Ergebnis ist ein Schwarzes Loch. Anschauliche Darstellungen davon sind Diagramme von **Gravitationstrichtern**, wie im Eintrag Lapse-Funktion präsentiert. Der Trichter schließt sich nicht, weil hier eine Krümmungssingularität vorliegt.

19.6.3 mathematische Darstellung der Raumzeit

Mathematisch wird die Raumzeit eindeutig durch den **metrischen Tensor** (Metrik) oder alternativ das **Linienelement** ds^2 beschrieben. Im Linienelement stehen die Komponenten des metrischen Tensors als Koeffizienten. Weil der metrische Tensor ein Tensor zweiter Stufe ist, handelt es sich um $4 \times 4 = 16$ Koeffizienten. Einen solchen Tensor kann man als Matrix mit vier Spalten und vier Zeilen aufschreiben. Die Symmetrie des Tensors reduziert die 16 auf nur $4+3+2+1 = 10$ unabhängige

Komponenten. Nun hängt es von der Komplexität und den Symmetrieeigenschaften (siehe auch Isometrien) der jeweiligen Raumzeit ab, wie viele der zehn unabhängigen Koeffizienten verschieden von null sind. Bei hohen Symmetrien wie in der Minkowski-Geometrie oder der Schwarzschild-Geometrie ist der metrische Tensor diagonal: dann gibt es nur vier unabhängige Koeffizienten verschieden von null auf der Matrixdiagonalen - die restlichen Einträge sind null.

19.6.4 Zeit in Einsteins Theorie

Der Zeitbegriff wird in der Relativitätstheorie zur relativen Zeit verallgemeinert: Zeit hängt vom Beobachter ab. Im Studium dynamischer, relativistischer Phänomene in der numerischen ART begegnet man deshalb der Frage, welchen Beobachter man wählen soll, um den zeitlichen Ablauf von Prozessen zu untersuchen. Es hat sich bewährt dann die Symmetrie von Raum und Zeit wieder aufzuspalten. Die Methode nennt man **3+1 Split** oder ADM-Formalismus. Die Raumzeit blättert dann in raumartige, dreidimensionale Hyperflächen, auf denen jeweils die Zeit konstant ist. Das ermöglicht im Rahmen der **numerischen Relativitätstheorie** die Simulation dynamischer Prozesse aus der Sicht eines speziellen Beobachters, beispielsweise des ZAMOs.

19.6.5 Beben der Raumzeit

Raumzeiten sind sehr **steife Gebilde** und lassen sich nur schwer um große Amplituden deformieren. Bei beschleunigten Massen werden *im Prinzip immer* **Gravitationswellen** emittiert, die die dynamische Krümmung der Raumzeit vermitteln. Gravitationswellen sind nichts anderes als Erschütterungen der Raumzeit, die sich mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit von knapp 300000 km/s ausbreiten.

Bewegen Sie mal Ihre Hand. Haben Sie's gemerkt? Sie haben gerade eine Gravitationswelle emittiert und die Raumzeit deformiert!

Eine Hand ist natürlich viel zu leicht, als dass hier ein großer - geschweige denn messbarer - Effekt zu erwarten wäre. Nur stark beschleunigte und kompakte, schwere Massen können eine deutliche Deformation der Raumzeit mittels Gravitationswellen herbeiführen, z. B. bei der Umkreisung von Neutronensternen oder stellaren Schwarzen Löchern in Binärsystemen (engl. *compact binaries*), in Binären aus supermassereichen Schwarzen Löchern, in Supernova-Explosionen oder in Gammastrahlenausbrüchen.

Die sukzessive Annäherung der Komponenten im Binärpulsar *PSR1913+16* **beweist indirekt**, dass er Gravitationswellen abstrahlt. Diese Entdeckung war von großer Bedeutung für die Untermauerung der ART und wurde mit dem Nobelpreis 1993 prämiert.

Die Steifheit der Raumzeit ist ein Glücksfall für die Menschheit, weil sie die Entwicklung und den Erhalt von Leben begünstigt, indem eine relativ stabile Umgebung gewährleistet wird. Wäre die Raumzeit dehnbarer als beobachtet, so wären wir sicherlich nicht hier. Dieser Aspekt darf gerne im anthropischen Prinzip Berücksichtigung finden.

19.7 Rayleigh-Jeans-Strahlungsformel

Siehe im Zusammenhang unter Planckscher Strahler.

19.8 Ray Tracing

Ray Tracing, dt. 'Strahlenverfolgung', ist eine Methode, um Objekte in 2D oder 3D zu visualisieren. Dabei wird die Ausbreitung von Licht simuliert und - im Idealfall - alle Wechselwirkungen der Strahlung (Reflexion, Brechung, Streuung) mit den Objekten im betrachteten Gebiet berücksichtigt.

19.8.1 Licht auf Geraden

Kommerzielle Ray-Tracer-Software, z. B. 3D-Computerspiele oder CAD-Software, arbeitet in der flachen Raumzeit, wie es Relativisten ausdrücken würden. D.h. es liegt der gewöhnliche Grenzfall der *geometrischen Optik* vor: Licht bewegt sich entlang von **Geraden**. Eigentlich ist das jedoch ein Spezialfall.

19.8.2 Licht geht in die Kurve

Ganz allgemein besagt die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) von *Albert Einstein*, dass Masse und Energie die Raumzeit krümmen. Um nun die Ausbreitung von Licht zu verfolgen, müssen die Geodäten der Lichtteilchen berechnet werden. Diese 'Lichtbahnen' heißen in der ART Nullgeodäten. Im Allgemeinen sind die **Lichtbahnen gebogen**, weil auch der 'Raum krumm ist'. Etwas schicker formuliert: Nullgeodäten folgen der gekrümmten Raumzeit.

19.8.3 Wie kommt man auf die Lichtbahnen in der ART?

Zunächst muss man wissen, in welcher Raumzeit sich das Licht ausbreitet. Ist es das Gravitationsfeld der Sonne oder die Umgebung eines Neutronensterns oder soll sogar gezeigt werden, wie ein Schwarzes Loch Licht verschluckt? Sobald das geklärt ist, formuliert man mit der nun bekannten Metrik der Gravitationsquelle die so genannte **Nullgeodätengleichung**: das ist nichts anderes als die voll relativistische Bewegungsgleichung für Lichtteilchen (die Ruhemasse null haben). In Gestalt einer *Geodätengleichung* verraten sich auch die Teilchenbahnen für Teilchen mit Ruhemasse. In jedem Fall ist die Geodätengleichung mathematisch gesprochen eine *Differentialgleichung zweiter Ordnung*.

19.8.4 Ein Lichtteilchen macht noch kein Bild...

...zumindest kein aufregendes. Die Nullgeodätengleichung muss daher für viele Lichtteilchen, die unterschiedliche Startbedingungen (Startposition, Strahlrichtung) haben, gelöst werden. 'Von Hand' wäre das eine mühevoll-prozedur, weil erst etwa eine Million Lichtteilchen (ein Bild mit 1000×1000 Pixel) ein aussagekräftiges und aufregendes Bild macht. Deshalb benutzt man natürlich **Computer** zur Berechnung des Bildes - Fachleute nennen das (sowohl in flachen, als auch gekrümmten Raumzeiten) auch *Rendern*.

Bei dieser Rechnung muss auch klar sein, wo der Beobachter der Szenerie ist. Denn die Geodätengleichung verknüpft ja einen Lichtstrahl von seiner Startposition mit einem Auftreffpunkt. Wo der Auftreffpunkt liegt diktiert einerseits der Lichtstrahl durch seine Startbedingungen und andererseits die Metrik mit ihrer Krümmung.

Das ganze Verfahren von der Berechnung der Lichtausbreitung in gekrümmten Raumzeiten wird nun **allgemein relativistisches Ray Tracing** (engl. *general relativistic ray tracing*) genannt. Es gibt auch *speziell relativistisches Ray Tracing*, das ausrechnet, wie die Umwelt aussieht, wenn man sich fast mit Lichtgeschwindigkeit durch eine Szenerie bewegt.

19.8.5 Lichtausbreitung nahe eines Schwarzen Loches

Betrachten wir doch gleich einen Extremfall und zwar die Bewegung von Lichtteilchen in der Umgebung eines Schwarzen Loches. Die Raumzeit, die benutzt werden muss, ist entweder die Schwarzschild-Metrik (Loch rotiert nicht) oder die etwas kompliziertere Kerr-Metrik (Loch rotiert). Grafik 19.5 skizziert, was berechnet werden soll: ein Lichtstrahl (engl. *ray*) startet von einer dünnen Scheibe (engl. *thin disk*), die um ein Schwarzes Loch (engl. *black hole*) rotiert (z. B. eine Standardscheibe) und bewege sich durch die gekrümmte Raumzeit (engl. *curved space-time*). Der Beobachter möge weit entfernt vom Loch sitzen, wo die Raumzeitkrümmung des Loches vernachlässigbar ist (asymptotisch flache Raumzeit). Der Beobachter betrachtet in diesem Fall ein Bildschirm (engl. *camera screen*), auf dem das Bild abgebildet werden soll. Für jedes Pixel des Bildes muss die Geodätengleichung gelöst werden. Hier bedient man sich aus numerischen Gründen einer nützlichen Eigenschaft von Licht: Lichtwege

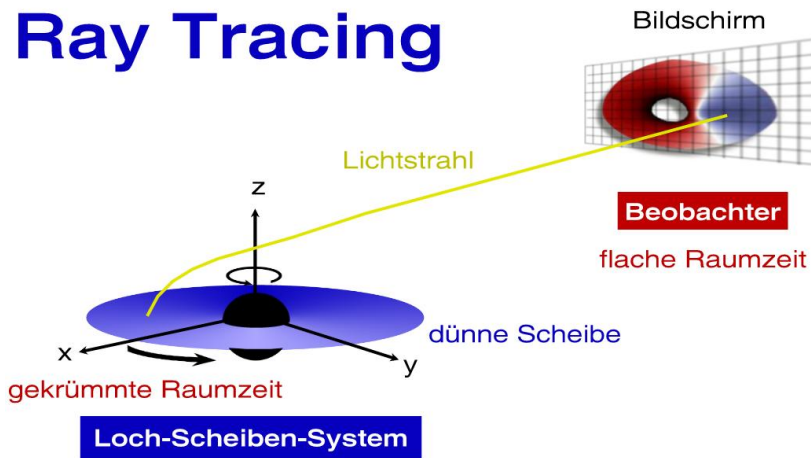


Abbildung 19.5: Illustration der Ray-Tracing-Methode.

sind umkehrbar. Es wäre unnötig die Bahnen sämtlicher Lichtteilchen zu rechnen, die von der Scheibe starten, weil nur ein Bruchteil von ihnen am Bildschirm ankommt. Wir sind doch nur an dem Bild auf dem Bildschirm interessiert. Also machen wir es lieber umgekehrt und **'rechnen rückwärts'** (*back tracking*): die Berechnung startet am Bildschirm und je nachdem, ob das Teilchen die Scheibe, das Loch oder nichts trifft, wird es eingefärbt. Schwups, fertig ist das Bild.

19.8.6 zwei Rechenverfahren

- ◇ Die Geodätengleichung kann erstens durch **direkte Integration** gelöst werden, was numerisch aufwendiger ist und höhere Rechnerleistungen erfordert. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass es für beliebige Raumzeiten funktioniert.
- ◇ Die Geodätengleichung kann zweitens durch **Integrale der Bewegung** (*Erhaltungsgrößen*) gelöst werden, was numerisch effizient und schnell ist. Der Vorteil ist hier, dass deutlich weniger Computerleistung nötig ist.

19.8.7 Lösung der Geodätengleichung mit Erhaltungsgrößen

Im Falle eines Schwarzschild- oder Kerr-Loches nutzt man die Kenntnis von vier Erhaltungsgrößen des Systems aus. Neben Masse, Energie und Drehimpuls ist die wesentliche Größe in der Kerr-Geometrie (die ja Schwarzschild als Spezialfall enthält) die **Carter-Konstante**. *Brandon Carter* leitete 1968 diese neue Bewegungskonstante aus der Separabilität der Hamilton-Jacobi-Gleichung ab. Diese vierte Erhaltungsgröße ist ein **exklusives Merkmal der Kerr-Metrik** und fehlt bei anderen achsensymmetrischen Raumzeiten, wie beispielsweise bei Neutronensternen.

19.8.8 Einsteins verzerrte Welt

Der berechnete Verlauf der Nullgeodäten dient also der Herstellung **voll relativistischer Bilder**: Auf dem Bildschirm sieht der Betrachter Bilder, die mit Einsteins Theorie als Methode und einem Pinsel aus Licht gemalt wurden. Und was man da sieht ist ganz erstaunlich! Die relativistische Welt sieht vollkommen anders, asymmetrisch und verzerrt aus:

- ◇ Das Objekt, das leuchtet, stellt sich im Allgemeinen verzerrt und verbogen, manchmal sogar mehrfach dar. Das ist ein Resultat des **Gravitationslinseneffekts**.

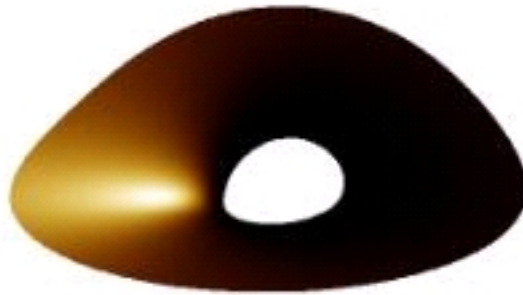


Abbildung 19.6: Ray Tracing Ergebnis einer Scheibe um ein Schwarzes Loch.

- ◊ Falls sich die Lichtquelle auf den Beobachter bewegt, gibt es Blauverschiebungseffekte; falls sich die Lichtquelle vom Beobachter entfernt, so ist es eine Rotverschiebung. Beides wird zusammengefasst im **Doppler-Effekt**.
- ◊ Natürlich tritt auch das Loch selbst in Erscheinung: schwarz, wie es sich gehört. Der physikalische Grund ist, dass Lichtteilchen, die am Ereignishorizont starten oder ihm zu nahe kommen, vom Loch verschluckt werden. 'Verschlucktes Licht' ist schwarz. Dieser Effekt heißt **Gravitationsrotverschiebung**.

Das Resultat eines relativistischen Ray Tracing zeigt die Abbildung 19.6. Es handelt sich im Prinzip um ein Falschfarbenbild, bei dem die Helligkeit einer Gasscheibe farbkodiert wurde: geringe Helligkeit ist schwarz und hohe Helligkeit weiß dargestellt; Zwischenwerte sind gelb. So sieht demnach eine dünne, gegen den Uhrzeigersinn rotierende Scheibe aus, die sich um ein ebenfalls rotierendes Schwarzes Loch dreht. Bei der Scheibe wurde angenommen, dass man fast auf ihre Kante blickt: die Neigung beträgt 70° . Die Scheibe sieht verzerrt aus, als ob sie von hinten nach oben gebogen wurde. Das ist gerade der Gravitationslinseneffekt. Wie man sieht, ist die Strahlung, die vom linken Teil der Scheibe kommt heller, als der rechte Teil. Das ist der oben angesprochene Doppler-Effekt, der sich ja nicht nur in der Lichtfarbe (=Strahlungsenergie), sondern auch in der Helligkeit (=Strahlungsfluss) bemerkbar macht. Das Loch selbst ist hier zum besseren Erkennen weiß dargestellt worden: aus diesem Bereich kommt jedoch kein einziges Lichtteilchen. Das ist der Ereignishorizont des Schwarzen Loches.

19.8.9 Nutzen für die Astrophysik

Die gerenderten Bilder haben einen enormen Informationsgehalt und bieten viel Anlass zur wissenschaftlichen Diskussion. In der Natur ist die Umgebung eines Schwarzen Loches leider noch nicht so fotografiert worden. Das liegt daran, weil die Auflösung der Teleskope dazu (noch!) nicht ausreicht. Die kosmischen Schwarzen Löcher sind zu kompakt und zu weit entfernt, als dass diese Fotos zurzeit gemacht werden könnten - vermutlich schaffen das die Radioastronomen in etwa fünf Jahren mittels *Interferometrie*.

Dennoch sind diese Rechnungen schon seit Jahren nützlich für die Astronomen: In einem weiteren numerischen Schritt kann man aus dem Bild ein **Spektrum** ausrechnen. Die sind sehr wohl beobachtbar! Da die Materie so nah an einem Schwarzen Loch sehr heiß ist, liegt hier ein Gemisch aus Ionen und Elektronen vor, ein **Plasma**. Es ist so heiß, dass es typischerweise im Röntgenbereich strahlt. Entsprechend wird relativistisches Ray Tracing genutzt, um **Röntgenspektren** zu simulieren, insbesondere Wärmestrahlung der Scheibe (engl. *relativistic multi-color black body*) und Eisenfluoreszenzlinien ($Fe\ K\alpha$). Auch der Vergleich mit Radiospektren ist möglich, wenn

man annimmt, dass Synchrotronstrahlung in der Nähe des Loches von relativistischen Elektronen abgestrahlt wird.

Der Vergleich aus Simulation und Beobachtung erlaubt Rückschlüsse auf Eigenschaften des inneren Akkretionsflusses und sogar auf das Schwarze Loch, z. B. ob es rotiert.

19.8.10 Mehr dazu im Wissensportal

- ◇ Web-Artikel: Gefangenes Licht - Relativistisches Ray Tracing
- ◇ Vortrag: Relativistic Emission Lines of Accreting Black Holes (Stand Mai 2003)
- ◇ Diplomarbeit von Andreas Müller (2000): *Emissionslinienprofile relativistischer Scheiben um rotierende Schwarze Löcher*, pdf (3.9 MB)
- ◇ Doktorarbeit von Andreas Müller (2004): *Black Hole Astrophysics: Magnetohydrodynamics on the Kerr geometry*, pdf (9.9 MB)
- ◇ Müller, A. & Camenzind, M.: Relativistic emission lines from accreting black holes - The effect of disk truncation on line profiles, , A& A 413, 861, 2004; Preprint: astro-ph/0309832

19.9 Reichweite

Die Reichweite ist ein zentraler Parameter bei der Betrachtung der **vier fundamentalen Naturkräfte in der Teilchenphysik**:

- ◇ Elektromagnetismus,
- ◇ schwache Wechselwirkung,
- ◇ starke Wechselwirkung
- ◇ und Gravitation.

19.9.1 Die Schweren kommen nicht so weit

Die Botenteilchen, die diese Wechselwirkungen übertragen, heißen **Eichbosonen**, die im Rahmen einer Eichtheorie (engl. *gauge theory*) beschrieben werden. In den Quantenfeldtheorien zeigt sich, dass die **Ruhmassen der Eichbosonen** über die Reichweiten entscheiden: Je schwerer das Eichboson ist, umso kurzreichweitiger ist die assoziierte Kraft.

19.9.2 vier Eichbosonen

Das Eichboson des Elektromagnetismus bzw. der Quantenelektrodynamik ist das Photon, diejenigen der schwachen Wechselwirkung heißen W- und Z-Teilchen (Weakonen), die der starken Wechselwirkung oder Quantenchromodynamik heißen Gluonen und das (noch nicht nachgewiesene und daher hypothetische) Eichboson einer quantisierten Gravitationstheorie oder Quantengravitation ist das Graviton.

19.9.3 Und so weit kommen sie

Weil Photon und Graviton keine Ruhemasse aufweisen, sind die damit verbundenen Wechselwirkungen, also Gravitation und Elektromagnetismus, im Prinzip von **unendlicher Reichweite**. Die beiden verbleibenden Kräfte des subatomaren Bereichs sind hingegen **extrem kurzreichweitig**. Die starke Wechselwirkung hat eine geringfügig höhere Reichweite als die schwache Wechselwirkung. Die Gluonen sind zwar ebenfalls masselos (bezogen auf die Ruhemasse), tragen aber eine Farbladung. Damit wechselwirken die starken Trägerteilchen selbst mit den Quarks und hadronischer Materie, was ihre Reichweite verkürzt (detaillierte Erklärung beim Eintrag Gluonen). Die Reichweite der schwachen Kraft ist deshalb so kurz, weil die Weakonen so massereich sind: 81 bzw. 91 GeV!

19.9.4 Reichweite ausrechnen

Rechnerisch folgt die Reichweite aus dieser Gleichung

$$R_{\text{force}} = \frac{\hbar}{m_{\text{carrier}}c},$$

indem man rechts die Masse des Austauschteilchens einsetzt ($\hbar$: Plancksches Wirkungsquantum, c : Vakuumlichtgeschwindigkeit). Die Gleichung kann man schnell anhand der *Heisenbergschen Unschärferelation* abschätzen oder exakt aus der **Klein-Gordon-Gleichung** im Rahmen der Quantenfeldtheorien ableiten.

19.10 Reionisation

Ganz allgemein versteht man in der Physik unter *Reionisation* eine erneute Ionisierung eines Materials, z. B. durch elektromagnetische Strahlung. Ionisierung bezeichnet den Prozess, der Ladungen von einem neutralen Gebilde (z. B. Atom) entzieht.

19.10.1 Kosmologie: erste Quellen ionisieren

In der Kosmologie bezieht sich der Begriff Reionisation auf eine ganze Epoche, nämlich diejenige, als die ersten entstandenen Strahlungsquellen im Universum das durch die Rekombinationsära ($z \sim 1100$) neutral gewordene intergalaktische Medium (IGM) erneut ionisierten. Als erste Strahlungsquellen kommen die ersten, entstandenen Sterne und die erste Generation der Aktiven Galaxienkerne, im Wesentlichen Quasare, in Betracht. Der Prozess der Reionisation vollzog sich über mehrere Phasen mit folgenden Bezeichnungen: Prä-Überlapp (engl. *pre-overlap*), Überlapp (engl. *overlap*), Reionisation (engl. *reionization*), Post-Überlapp (engl. *post-overlap*). Jede Phase ist mit einer bestimmten Ausdehnung der Ionisationsfronten um die ionisierenden Quellen assoziiert. Dies illustriert Abbildung 19.7 (auch als Animation, 2.2 MB, ca. 900×700 Pixel).

19.10.2 He-Ionisation bei kleinerem z als H-Ionisation

Die wesentlichen chemischen Elemente im IGM, die sich bereits primordial bildeten (siehe primordiale Nukleosynthese) sind Wasserstoff (Elementsymbol H) und Helium (Elementsymbol He). Vor der Reionisationsära lagen sie zwischen den ersten kosmischen Objekten im Wesentlichen in **neutraler Form** vor.

Sobald aber eine Strahlungsquelle ihre neutrale Umgebung ionisiert bilden sich **Strömgren-Sphären** aus, kugelige Gebilde ionisierten Materials. Der Schwellwert zur Ionisation von neutralem Wasserstoff liegt bei 13.6 eV. Diese Energie muss der Ionisator aufbringen, um 'HII-Blasen' (Strömgren-Sphären einfach ionisierten Wasserstoffs) zu bilden.

Die Ionisation neutralen Heliums findet erst bei höheren Schwellwerten statt: die Ionisation neutralen Heliums (HeI) zu einfach ionisiertem Helium ($HeII$) erfolgt ab einer Energie von 24.6 eV, die zweifache Ionisation zu $HeIII$ erst bei 54.4 eV. Das bedeutet, dass die **Helium-Reionisationsepoche** zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung des Universums erfolgte und damit leichter beobachtbar sein muss für Astronomen, weil sie bei *kleineren* Rotverschiebungen z liegen muss. Helium kündigt gewissermaßen die **Wasserstoff-Reionisationsepoche** an (*H-Preview*).

19.10.3 neutrales Material vor Reionisation beobachtet!

Auf der Rotverschiebungsskala liegt das Zeitalter der Reionisation bei $z \sim 10$. $z \sim 7$ kennzeichnet die Wasserstoff-Reionisation und entsprechend z kleiner als 7 die Helium-Reionisation. Beobachtungen (*Fan et al. 2000*), nämlich die beim Quasar SDSS 1044-0125, beweisen, dass die Reionisationsepoche bei $z = 5.8$ bereits vollständig abgeschlossen war: im Spektrum finden sich keine so genannten **Gunn-Peterson-Tröge** vor der Lyman-Alpha-Kante, die ein Indiz für neutrales, stark absorbierendes

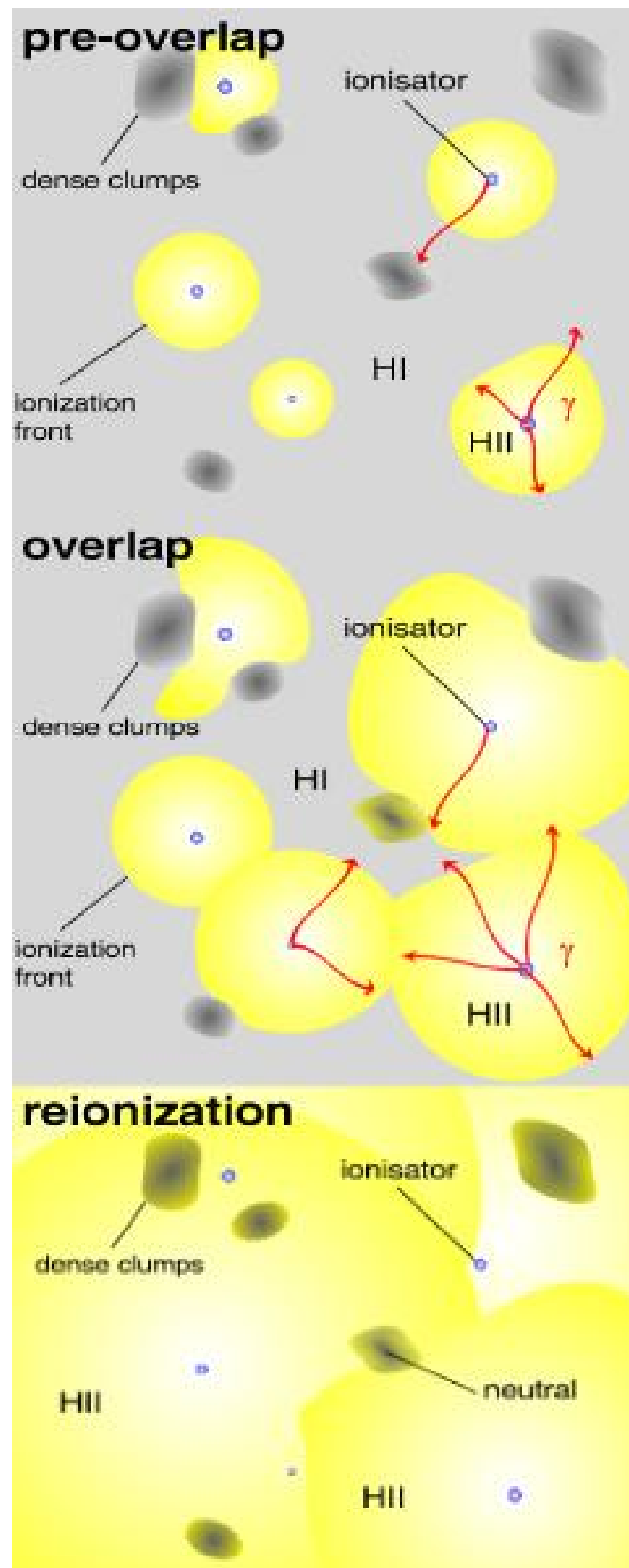


Abbildung 19.7: Sequenz der Reionisationsphasen.

Material sind. Die Reionisationsepoche kann bereits bei vielen weit entfernten Quellen (*HZ sources*, HZ für high-redshift) überprüft werden und gilt als erwiesen.

19.10.4 21cm-Tomographie

Als Indikatoren (im Fachjargon so genannte *Tracer*) für die Prä-Reionisationsepoche, also der Phase mit neutralem IGM, dient die **21cm-Linie** neutralen Wasserstoffs (*HI*). Es handelt sich dabei um einen Hyperfeinstrukturübergang, einem Spin-Flip vom Triplett- zum Singulettzustand im Wasserstoffatom. Radiobeobachtungen dienen so einer 21cm-Tomographie, um das Weltall nach neutralem Wasserstoff zu durchforsten.

19.10.5 Am Ende des Dunklen Zeitalters

Die ersten Strahlungsquellen bzw. die ersten elementaren Bausteine, gasförmige Objekte, die sich natürlich **vor** der Reionisation gebildet haben müssen, siedelt man bei Rotverschiebungen von $z = 15$ bis 30 an. Mit ihrer Entstehung endete das **Dunkle Zeitalter** (engl. *dark ages*) der Kosmologie. Die ersten, entstandenen Sterne rechnet man der **Population III** zu. Sie könnten durch Paarinstabilitäts-Supernovae das ISM und IGM mit Metallen angereichert haben.

19.10.6 Vortrag

- ◇ The first sources of light in the Early Universe and the highest plausible redshift of luminous Quasars (Stand Mai 2001)

19.11 Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung

Die Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie **mit** Λ -Term (siehe kosmologische Konstante) und **mit** Maxwell-Tensor auf der rechten Seite der Feldgleichung. Physikalisch motiviert ist diese Raumzeit, wenn man eine elektrisch geladene Punktmasse oder ein nicht rotierendes, elektrisch geladenes Schwarzes Loch beschreiben will, das sich in einer Umgebung befindet, die mit dem Λ -Fluidum angefüllt ist.

19.11.1 zum Namen

Der Name Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung kommt daher, weil diese Metrik beides beinhaltet: die statische und kugelsymmetrische Eigenschaft von der Reissner-Nordstrøm-Lösung und die kosmologische Konstante wie in der de-Sitter-Lösung.

19.11.2 Eigenschaften: Masse, Ladung und Λ

Die Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Raumzeit ist eine **Drei-Parameter-Lösung**, weil Massenparameter M , elektrische Ladung Q und die kosmologische Konstante Λ die Eigenschaften der Metrik eindeutig festlegen.

19.11.3 Unterscheidung nach Vorzeichen von Λ

Wie bei der de-Sitter-Raumzeit auch, sprechen Theoretiker von der Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung (RNdS-Metrik), falls $\Lambda > 0$ (repulsive kosmologische Konstante; Antigravitation) und von der Reissner-Nordstrøm-Anti-de-Sitter-Lösung (RNAdS-Metrik), falls $\Lambda < 0$ (attraktive kosmologische Konstante). Im Grenzfall $\Lambda = 0$ ist gerade die Reissner-Nordstrøm-Metrik mit verschwindender kosmologischer Konstante realisiert.

Interessanterweise hat die RNAdS-Metrik (wie alle Raumzeiten mit negativem Λ) **keinen Ereignishorizont**.

19.11.4 Linienelement

Das Linienelement der Reissner-Nordstrøm-de-Sitter-Lösung aus demjenigen der Kerr-Newman-de-Sitter-Lösung abgeleitet werden, wenn man dort $a = 0$ setzt.

19.11.5 Weitere Raumzeiten

Falls die kosmologische Konstante und elektrische Ladung des Loches null sind, so liegt gerade die Schwarzschild-Lösung vor.

19.12 Reissner-Nordstrøm-Lösung

Diese Raumzeit ist eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART).

19.12.1 geladene Punktmasse

Sie beschreibt die Metrik einer **elektrischen Punktladung** und besitzt damit 'ein Haar mehr' (vergleiche Keine-Haare-Theorem) als die Schwarzschild-Lösung. Beide Raumzeiten sind kugelsymmetrisch, und es gilt das Birkhoff-Theorem.

19.12.2 keine Vakuumraumzeit

Die Reissner-Nordstrøm-Lösung ist etwas komplizierter, weil sie **keine** Vakuumraumzeit ist, d. h. der Energie-Impuls-Tensor in den Feldgleichungen verschwindet nicht. Er entspricht bei dieser Raumzeit einer Punktladung gerade dem Maxwell-Tensor. Die Einsteinschen Feldgleichungen haben dann einen besonderen Namen und heißen *Einstein-Maxwell-Gleichungen*.

19.12.3 geladene Löcher irrelevant in Astrophysik

In der Astronomie spielen elektrisch geladene Schwarze Löcher (also neben der Reissner-Nordstrøm-Lösung auch die Kerr-Newman-Lösung) eine untergeordnete Rolle, weil Astrophysiker annehmen, dass jede Ladung des Loches recht schnell durch elektrische Ströme, nämlich die Akkretionsflüsse, **neutralisiert** würde.

19.13 Rekombination

Der entgegengesetzte Prozess zur Ionisation: elektrische Ladungen unterschiedlicher Polarität ziehen sich an und können einen nach außen hin neutralen Verbund erzeugen. So rekombiniert ein Elektron mit einem Proton und bildet ein neutrales Atom: neutralen Wasserstoff (in der Astronomie mit **HI** bezeichnet). Eine Ansammlung vieler Protonen, die in der Regel mit Neutronen einen positiv geladenen Atomkern bilden, können mit passender Anzahl Elektronen zu schwereren, neutralen Atomen rekombinieren.

Während bei der Ionisation Energiezufuhr nötig ist, wird bei der Rekombination Energie frei. Diese wird z. B. als Strahlungsenergie in Form von *Rekombinationsleuchten* emittiert.

19.13.1 Als der Kosmos durchsichtig wurde

In der Kosmologie kennzeichnet die **Rekombinationsära** eine Epoche nach der primordialen Nukleosynthese. Die Rekombination ist gerade derjenige Moment, als die zuvor im Universum entstandenen Ladungen (Elektronen, Protonen, Atomkerne) sich zu Atomen verbanden. Infolge dieser Bindung änderten sich plötzlich die Transparenzeigenschaften des Universums: Die Photonen wurden nicht mehr an den freien Elektronen (und Protonen) gestreut (*Thomson-Streuung*) und konnten

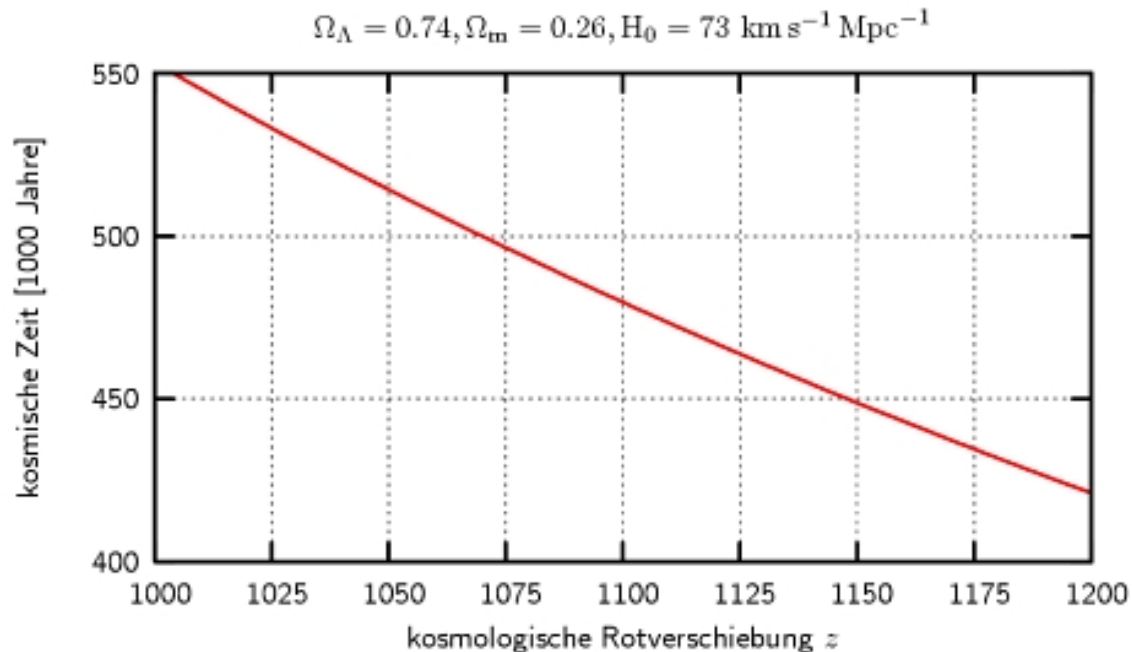


Abbildung 19.8: Kosmische Zeit und Rotverschiebung in der Rekombinationsepoche.

ungestört das frühe Universum passieren. Kosmologen sagen, dass die Strahlung von der Materie **entkoppelte** und deshalb das Universum (elektromagnetisch) durchsichtig wurde. Dieser Prozess wird bei einer kosmologischen Rotverschiebung von $z \sim 1100$ angesiedelt. Das entspricht einer Zeitspanne von etwa 400000 Jahren nach dem Urknall. Das Diagramm 19.8 zeigt den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Alter des Universums auf der Grundlage aktueller kosmologischer Parameter (Dunkle Energie 74%, Dunkle Materie 22%, baryonische Materie 4%, Hubble-Parameter und Krümmungsparameter).

19.13.2 elektromagnetische Wand bei $z \sim 1100$

Da erst zu diesem Zeitpunkt eine elektromagnetische Transparenz gegeben war, ist es *prinzipiell unmöglich* mit elektromagnetischen Teleskopen (seien sie im IR, optisch, UV oder im Röntgen-/Gammabereich) darüber hinaus tiefer ins Universum zu schauen, also zu Rotverschiebungen größer als etwa 1100. Vermutlich ist das - wenn überhaupt - nur mit schwach wechselwirkenden Teilchen wie den Neutrinos, den WIMPs oder mit den Gravitationswellen möglich.

19.13.3 Das Älteste, was Menschen jemals sahen

Die **kosmische Hintergrundstrahlung** (engl. *cosmic microwave background*, CMB; *cosmic background radiation*, CBR) oder alternativ Drei-Kelvin-Strahlung genannt besteht gerade aus diesen ersten 'Ur-Photonen', die sich von der Materie entkoppelten. Sie wurden ausgesendet, als es noch keine Galaxien gab, nicht einmal Sterne! Die beobachtete Hintergrundstrahlung entstand also gerade bei $z \sim 1100$ und hat ihren Ursprung im heißen Urplasma. Physikalisch gesprochen ist es Plancksche Strahlung, also Wärmestrahlung. Die Photonen sind aus der Vernichtung von erzeugten Teilchen und Antiteilchen hervorgegangen. Dieses Teilchenkonglomerat bildete sich seinerseits am Ende der GUT-Ära aus dem Zerfall von X-Bosonen und Y-Bosonen.

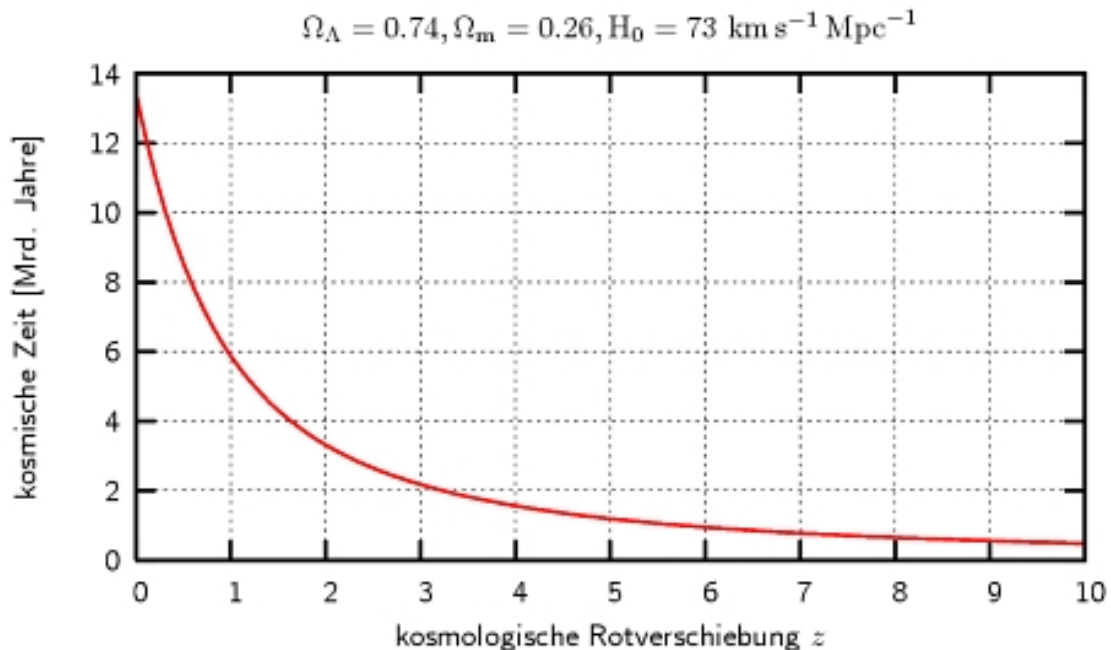


Abbildung 19.9: Kosmische Zeit und Rotverschiebung von $z = 0$ bis 10.

19.13.4 Warum hat das Urplasma eine Temperatur?

Das Plasma kurz vor der Rekombinationsära, das aus Photonen, Elektronen und Atomkernen bestand, hatte genügend Zeit, um durch thermischen Kontakt ins **thermische Gleichgewicht** zu streben. Daher hatte das Plasma 'vor Ort' dieselbe Temperatur von nur etwa 3000 Kelvin. Durch die **Expansion des Universums** kühlte sich die heiße Urstrahlung des Feuerballs auf den heute beobachtbaren Wert von 2.72 Kelvin ab. Dies ist leicht nachzurechnen, weil die Temperatur linear mit $1 + z$ abnimmt.

19.13.5 Von der Rekombination in die Reionisation

Vor der Rekombinationsepoche lag also ein **ionisiertes Universum** vor, in der Rekombinationsepoche hingegen ein neutrales. Im Anschluss, erst bei $z \sim 30$, bildeten sich die ersten Sterne (Population III), Galaxien und Quasare. Sie ionisierten mit ihrer hochenergetischen Strahlung *erneut* ihre kosmische, neutrale, primordiale Umgebung und leiteten die Epoche der **Reionisation** ein. Sie endete erst dann, als im Prinzip das ganze Universum ionisiert war, bei $z \sim 6$. Bei diesem Rotverschiebungswert war das Universum etwa eine Milliarde Jahre alt (vergleiche Abbildung 19.19). Dieser Rotverschiebungsbereich ist den astronomischen Beobachtern heute zugänglich. Sie beobachteten sogar das durch eine Gravitationslinse (häufig schwere Galaxienhaufen) verstärkte Licht einer Galaxie bei $z = 10$!

19.14 relativistisch

Das entsprechende Eigenschaftswort zur Relativitätstheorie. Es wird sowohl auf die Spezielle Relativitätstheorie (SRT), als auch auf die Allgemeine Relativitätstheorie (ART) bezogen. So meint z. B.

19.14.1 Beispiele

- ◇ eine *relativistische Geschwindigkeit* eine Geschwindigkeit die der des Lichts im Vakuum vergleichbar ist;
- ◇ eine *relativistische Mechanik* eine Mechanik, die so verallgemeinert wurde, dass die (Spezielle) Relativitätstheorie findet;
- ◇ eine *relativistische Kosmologie* eine Kosmologie, in der die ART voll berücksichtigt wird;
- ◇ eine *allgemein relativistische Magnetohydrodynamik* ein Regime, in dem die Magnetohydrodynamik ebenfalls die Effekte der gekrümmten Raumzeit miteinbezieht;
- ◇ etc.

19.15 Relativitätsprinzip

Ein fundamentales Prinzip der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) von *Albert Einstein*. Es besagt, dass in allen zueinander gleichförmig geradlinig bewegten Bezugssystemen physikalische Gesetze gleiche Form und identische Messanordnungen gleiche Ergebnisse haben. Insbesondere lässt sich ein gleichförmig geradlinig bewegtes System nicht von einem relativ in Ruhe befindlichen System unterscheiden. Sie sind absolut gleichberechtigt. Diese Systeme heißen **Inertialsysteme**.

19.15.1 Beispiel

Als einfach Beispiel möge die Fahrt in einem Zug dienen: Solange der Zug weder abbremst, noch beschleunigt oder eine Kurve fährt (das bedeutet gerade *gleichförmig geradlinig*), kann man ohne weiteres eine Tasse Kaffee eingießen. Die Verhältnisse sind wie am Kaffeetisch zuhause, der sich relativ in Ruhe befindet. Aber bei **Beschleunigungen** wirken Trägheitskräfte, die das Eingießen einer Tasse Kaffee im fahrenden, beschleunigten Zug schon deutlich schwieriger gestalten.

19.15.2 Übergang zum Äquivalenzprinzip

Das Relativitätsprinzip wird beim Übergang von der SRT zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) auf das **Äquivalenzprinzip** verallgemeinert. Demzufolge sind dann gleichmäßig beschleunigte Systeme ohne Gravitationsfeld nicht von im Gravitationsfeld frei fallenden Systemen (FFO) zu unterscheiden. Träge und schwere Masse sind identisch. Einen Zusatz zum Äquivalenzprinzip stellt die **lokale Lorentzinvarianz** dar: Sie besagt, dass die lokale Physik in einem frei fallenden System in gekrümmter Raumzeit nicht zu unterscheiden sei von einem kräftefreien, gleichförmig geradlinig bewegten System in flacher Raumzeit.

19.16 Relativitätstheorie

Was ist die Relativitätstheorie? Es folgt ein Erklärungsversuch in zehn Sätzen:

Die Relativitätstheorie ist eine physikalische Theorie der hohen Geschwindigkeiten und der Anziehung von Massen. Einerseits besagt sie, dass das fundamentale Tempolimit in der Physik die Lichtgeschwindigkeit ist. Andererseits wird die Gravitation als geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit erklärt. Jede Energieform, zu der auch die Masse gehört, krümmt Raum und Zeit. Es bildet sich so eine 'Delle', die ihre Umgebung beeinflusst. So werden Teilchenbahnen und sogar Licht in der Nähe der Delle abgelenkt. Im Spezialfall verschwindender Energien gibt es keine Dellen, so dass Raum und Zeit geglättet bzw. flach sind. Teilchenbahnen sind dann gerade Linien. Die Relativitätstheorie definiert vertraute Größen völlig neu: Das Relative sind die Begriffe von räumlicher Länge, von der Zeit, vom Beobachter und so auch von der Wirklichkeit.



Abbildung 19.10: Zentrale Gleichungen der Relativitätstheorie Albert Einsteins.

19.16.1 Der Begründer der Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie ist eine der großen physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts neben der Quantentheorie. Wir verdanken sie **Albert Einstein** (1879 - 1955), einem Physiker, Erfinder, Patentbeamten und späteren Professor für theoretische Physik, der durch diese physikalische Theorie Weltruhm erlangte. Erstaunlicherweise erhielt er nicht für diese (sicher ungleich größere) Leistung den Nobelpreis für Physik, sondern für die Erklärung des Photoeffekts mit der *Lichtquantenhypothese* und zwar im Jahr 1921. Einstein griff dabei *Max Plancks* Strahlungsformel (für Schwarze Körper; siehe Planckscher Strahler) auf und forderte diskrete Einheiten der Energie für die elektromagnetische Strahlung. So waren die **Strahlungsquanten** geboren, die ersten Quanten, die in der Physik entdeckt wurden (Details unter Photon). Von diesem Standpunkt aus, hat Einstein die Quantentheorie mitbegründet. Womit er sich nie anfreunden konnte, war ein später folgender Aspekt der Quantentheorie: die Wahrscheinlichkeitsinterpretation in Form der Kopenhagener Deutung.

Die Zurückhaltung des Nobelpreiskomitees mag zeigen, wie unkonventionell und revolutionär Einsteins Vorschlag war. Dabei lagen Anfang der Zwanziger Jahre längst Belege für die Richtigkeit seiner Theorie vor: 1919 wurde bei einer Sonnenfinsternis seine Allgemeine Relativitätstheorie erstmals bestätigt. Einstein war seiner Zeit weit voraus: ein **Pionier der modernen Physik**. Er besaß den Mut den Max Planck nicht hatte, nämlich nicht nur die Wärmestrahlung zu quantisieren, sondern das *gesamte* elektromagnetische Spektrum von Licht. Er war kühn genug, eine Veränderung der *wirklichen* Zeit zu sehen und nicht nur in einer mathematischen Hilfsgröße wie Lorentz und Fitzgerald mutmaßen. Dieser Mut wurde mit Erfolg belohnt, ein Triumph, der bis über Albert Einsteins Tod hinaus andauert und junge Wissenschaftlergenerationen beschäftigt und für Jahrhunderte beschäftigen wird.

19.16.2 Die zwei Relativitätstheorien

In der Physik werden zwei Relativitätstheorien unterschieden: die Spezielle Relativitätstheorie (engl. *Special Relativity*, SR) oder kurz SRT im Deutschen abgekürzt (ab 1905) und die Allgemeine Relativitätstheorie (engl. *General Relativity*, GR), kurz ART, die Einstein 1916 veröffentlichte.

SRT

Die Relativitätstheorie ist ganz allgemein gesprochen eine Theorie der Bezugssysteme und beschreibt die Transformation physikalischer Größen, wenn man den Bezugsrahmen (das Koordinatensystem) wechselt. Die SRT ist dabei beschränkt auf Bezugssysteme, die sich gegeneinander *gleichförmig und geradlinig* bewegen. Wesentliche Postulate dieser Theorie waren die **Konstanz**

der **Lichtgeschwindigkeit c** in allen Bezugssystemen (erste Gleichung in Abb. 19.10), das **Relativitätsprinzip** und der Verzicht auf einen **Weltäther**, der bis dato als Trägermedium für Licht angesehen wurde. Wesentliche Folgen dieser Postulate sind die **Relativität von Länge und Zeit** und das berühmte **Masse-Energie-Äquivalent $E = mc^2$** (zweite Gleichung in Abb. 19.10). Durch Einstein wurde unser Verständnis von Raum und Zeit radikal neu gestaltet: Phänomene wie Zeitdilatation und Lorentz-Kontraktion und die Verschmelzung von Raum und Zeit im **Raum-Zeit-Kontinuum** sind eine natürliche Konsequenz der Speziellen Relativitätstheorie.

ART

In der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) wurde die Relativbewegung der Bezugssysteme zueinander auf *beschleunigte* Bewegungen verallgemeinert. Das Relativitätsprinzip wurde zum Äquivalenzprinzip erweitert. Der freie Fall in einem Gravitationsfeld ist auch eine beschleunigte Bewegung. Deshalb ist die ART eine **Theorie der Gravitation**, die die Newtonsche Physik als einen Spezialfall schwacher Gravitationsfelder entlarvt. Das Newtonsche Gravitationsfeld wird in Einsteins Theorie zur **gekrümmten Raumzeit**. Anders gesagt:

Gravitation wird geometrisch gedeutet.

Der Begriff der **Energie** konnte mit dem der **Raumkrümmung** in Verbindung gebracht werden: Energie und Masse sind äquivalent (siehe SRT) und beide krümmen die Raumzeit. Die im Allgemeinen gekrümmte Raumzeit kann mathematisch als metrischer Tensor (siehe auch Metrik) oder als Linienelement dargestellt werden. Die geeignete Mathematik, um Gravitationseffekte zu berechnen, ist die *Riemannsche Differentialgeometrie*. Die gegenseitige, nicht-lineare Einflussnahme von Energie und Krümmung der Raumzeit spiegelt sich kompakt notiert in tensorieller Form in den **Einsteinschen Feldgleichungen** (dritte Gleichung in Abb. 19.10) wider. Das ist die zentrale Gleichung von Einsteins ART.

19.16.3 Regimes der Relativitätstheorien

Die Relativitätstheorie ist ein wesentlicher Pfeiler der modernen Physik. So kommt die Spezielle Relativitätstheorie dort zum Einsatz, wo schnelle Bewegungen stattfinden, und zwar vergleichbar schnell wie das Licht im Vakuum, kanpp 300000 km/s. Makroskopische Gegenstände wie ein Auto, ein Flugzeug oder der Mensch können sich kaum so schnell bewegen. Man muss schon in den mikroskopischen Bereich zu leichten Teilchen wie Elektronen, Neutrinos, Protonen oder Atomkernen vordringen, um in das Regime der SRT zu kommen. Die **Teilchenphysik** ist also ein typischer Bereich der Physik, wo mit *speziell relativistischen Effekten* gerechnet werden muss, z. B. bei Experimenten in Teilchenbeschleunigern oder bei der kosmischen Strahlung.

Die Allgemeine Relativitätstheorie macht besonders dann bei der Gravitation bessere Vorhersagen, wenn **Effekte höherer Ordnung** eine Rolle spielen, also wenn die Gravitation besonders exakt vermessen wird. So ist Einsteins Theorie die bessere Wahl bei der Berechnung der *Periheldrehung des Merkurs*, der *Lichtaberration an der Sonne* und bei Gravitationslinseneffekten. Die ART sagt aber auch Effekte voraus, die es in der Newtonschen Gravitation **gar nicht gibt**, wie Frame-Dragging (bzw. Lense-Thirring-Effekt) und Gravitationswellen - beides wurde experimentell bestätigt! Das Paradebeispiel für die Domäne der ART ist natürlich die **starke Gravitation**. Damit ist gemeint, dass Einsteins Theorie sehr starke Gravitationsfelder bestens beschreibt, z. B. die Gravitation von kompakten Objekten wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Das sind demnach alles *allgemein relativistische Effekte*.

19.16.4 Gravitation im ganz großen Stil

Mit Einsteins ART war erstmals eine **relativistische Kosmologie** möglich, d. h. eine adäquate physikalische Beschreibung des Universums als Ganzes. Mit geeigneten Annahmen kann man die Einsteinsche Feldgleichung in einen Satz anderer Gleichungen, die *Friedmann-Gleichungen*,

umwandeln. Sie beschreiben viele verschiedene *Modell-Universen* - sogar dynamische Universen. Diese Universen sind Lösungen der Friedmann-Gleichungen und werden Friedmann-Weltmodelle genannt. Eines davon beschreibt gerade unser dynamisches, sich beschleunigt ausdehnendes Universum, das dominiert wird von der kosmologischen Konstante Λ , die ebenfalls 1917 von Einstein erfunden wurde.

19.16.5 Grenzen der Relativitätstheorie

Jede Theorie hat ihre Grenzen - auch Einsteins Theorie. Sie ist eine klassische Theorie, in dem Sinne, dass *Quantisierung* und Heisenbergsche Unschärfe keinen Platz in der Relativitätstheorie haben. So ist die Raumzeit in der ART **unquantisiert**. Deshalb tauchen im Grenzfall starker Gravitationsfelder und kleiner Raumskalen Probleme auf, die signalisieren, dass die Relativitätstheorie alleine keine adäquate Beschreibung mehr liefern könnte. Bei Schwarzen Löchern, die Lösungen der Feldgleichungen der ART sind, gibt es solche Grenzen der Beschreibbarkeit in Gestalt der intrinsischen Singularitäten (*Krümmungssingularitäten*) und auch am Ereignishorizont Schwarzer Löcher. Der bekannte Relativitätstheoretiker *John A. Wheeler* sieht im Auftreten dieser Krümmungssingularitäten einen Zusammenbruch von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie! Diese Meinung teilen jedoch nicht alle Physiker.

In den 1970er Jahren gelang es einem Theoretiker wesentliche Disziplinen der Physik zu verknüpfen: Allgemeine Relativitätstheorie, Quantentheorie und Thermodynamik. Die Rede ist von *Stephen W. Hawking*, der damals die heute nach ihm benannte Hawking-Strahlung Schwarzer Löcher ausgerechnet hat. Bislang wurde diese Strahlungsform zwar noch nicht experimentell bestätigt, aber die physikalischen Eigenschaften des Effekts sind viel versprechend, umwälzend und von theoretischer Konsistenz und Schönheit. Es ist wichtig dabei zu betonen, dass Hawking einen semi-klassischen Zugang gefunden hat. Er hat in der quantentheoretischen Rechnung aber **nicht die Raumzeit quantisiert**.

Die Physiker sind gerade auf der Suche nach einer solchen Quantengravitation. Aktuell gibt es zwei Alternativen, die auf der Bewährungsprobe stehen: die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation (LQG). Letztgenannte Theorie ist deutlich näher an den Konzepten, die die ART diktiert, z. B. der Diffeomorphismusinvarianz. Die LQG zielt 'nur' auf einer Quantisierung der Raumzeit in so genannte Wilson-Loops ab. Die Stringtheorien hingegen zielen auf eine Vereinheitlichung aller vier Naturkräfte ab und fordert eine Quantisierung der Gravitation in Gestalt des Gravitons.

19.16.6 Relativitätstheorie hat sich vielfach bewährt

Trotz dieser gerade beschriebenen Einschränkungen, die Einsteins Theorie hat, gehört sie mit der Quantentheorie zu den mächtigsten und erfolgreichsten Theorien der modernen Physik. In zahlreichen Experimenten haben die Relativitätstheorien die Natur glänzend vorhergesagt und erklärt. Diese beiden Theorien des 20. Jahrhunderts sind im Sinne der Popperschen Wissenschaftstheorie *bewährte* Theorien. Davon zeugen auch zahlreiche wissenschaftliche sowie technologische Anwendungen und kommerzielle Produkte.

19.16.7 $E = mc^2$ im Test

Eine aktuelle, experimentelle Überprüfung der Relativitätstheorie sei herausgegriffen (im Wissensportal befinden sich viele weitere Beispiele), und zwar der Test des Masse-Energie-Äquivalents: eine Gruppe internationaler Forscher hat dazu kernphysikalische Prozesse bei den Atomkernen der Elemente Silizium (Si) und Schwefel (S) untersucht. Die Isotope Si-28 und S-32 werden mit Neutronen (die mit den Protonen zu den Nukleonen gehören) beschossen. Die Atomkerne fangen jeweils ein Neutron ein und wandeln sich entsprechend zu Si-29 und S-33 um. Diese angeregten Atomkerne zerfallen wiederum über den Gamma-Zerfall, d. h. sie senden Gammaquanten einer bestimmten Energie aus. Diese Strahlungsenergie wurde exakt in Streuprozessen in Kristallen vermessen. Dabei stellte sich heraus, dass die Energie der Gammaquanten gerade der Massendifferenz entspricht, die die zugehörigen

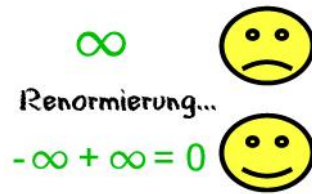


Abbildung 19.11: Renormierung: Die Beseitigung von Unendlichkeiten macht Physiker glücklich!

Atomkerne vor bzw. nach der Aussendung der Strahlung haben. Die Massen der Atomkerne lassen sich durch ein Massenspektrometer sehr genau bestimmen - hier wurde die Zyklotronfrequenz in einer Ionenfalle gemessen, aus der die jeweilige Masse folgte. Ergebnis: Der Unterschied von linker zu rechter Seite in der Gleichung $E = mc^2$ ist **maximal 0.00004%** - also im Prinzip sind beide Seiten fast identisch (*Rainville et al.*, Nature 2005)!

19.16.8 Weiteres im Wissensportal

- ◇ Web-Artikel: Schwarze Löcher - Das dunkelste Geheimnis der Gravitation
- ◇ Vortrag: Einsteins Universum - Das Geheimnis der Dunklen Energie
- ◇ Web-Essay: Brauchen wir Grundlagenforschung?
- ◇ Web-Essay: Alles graue Theorie?

19.17 Renormierung

Die Renormierung oder *Renormalisierung* ist eine Prozedur in den Quantenfeldtheorien, die auftretende **Unendlichkeiten** beim Lösen quantenfeldtheoretischer Gleichungen beseitigt.

19.17.1 Welche Unendlichkeiten?

In den Gründerjahren der Quantentheorie und den darauf aufbauenden Quantenfeldtheorien, in den Dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts, tauchten erstmals diese Unendlichkeiten auf: innerhalb eines einzelnen Elektrons tritt eine elektrostatische Abstoßung auf, die in einer **unendlichen Selbstenergie** resultiert. Typischerweise geschieht das, wenn ein Teilchen ein Photon oder ein anderes Eichboson emittiert und wieder absorbiert. In den Feynman-Diagrammen treten dann **Schleifen** (engl. *loops*) auf, und es handelt sich um Feynman-Graphen höherer Ordnung. Der physikalische Grund für die Unendlichkeiten besteht darin, dass es unendlich viele Möglichkeiten gibt, um Energie oder Impuls von einem Teilchen auf ein anderes zu transferieren.

19.17.2 Wolke virtueller Teilchen

Auch bei anderen Größen begegneten die Quantenphysiker Unendlichkeiten, zum Beispiel den **Wirkungsquerschnitten**, also der Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen einer Teilchenwechselwirkung. Es gibt noch eine weitere, anschauliche Erklärung für die Unendlichkeiten: ein Teilchen wie das Elektron ist in eine 'Wolke' **virtueller Teilchen** gehüllt. Dies sind Teilchen, die im Rahmen der *Heisenbergschen Unschärfe* (formuliert als Energie-Zeit-Unschärfe) kurzzeitig Energie vom Quantenvakuum erhalten und so virtuell - das heißt nicht messbar - existieren. Eine Messung kann nun nicht zwischen Elektron und virtuellen Teilchen unterscheiden und liefert als Messwert

deren zusammen genommene Werte für Masse oder Ladung beispielsweise. Das 'nackte Elektron' hat der Theorie zufolge keine definierte Masse und Ladung!

19.17.3 Die Rettung: Renormierung

Das hört sich nun nach einer Sackgasse für die Quantenfeldtheorien an, war es historisch gesehen zunächst auch, bis Ende der Vierziger Jahre *Richard P. Feynman* (1918 - 1988), *Julian Schwinger* (1918 - 1994), *Sin-Itiro Tomonaga* (1906 - 1979) und *Freeman J. Dyson* (* 1923) unabhängig voneinander einen Ausweg fanden: **die Renormierung**.

Dabei werden fundamentale Parameter neu definiert, also renormiert. Zum Beispiel wird die Masse oder Elementarladung korrigiert und beseitigt dadurch die auftretende Unendlichkeit. Was sich abenteuerlich anhört, erwies sich als mächtiger Apparat in den Quantenfeldtheorien. Die ersten drei genannten 'Renormalisten' erhielten für diese Leistung den **Nobelpreis für Physik 1965**. Die Renormierung wurde historisch erstmals bei der Quantenelektrodynamik angewandt, funktioniert aber konzeptionell bei allen Quantenfeldtheorien.

Für die Renormierungen gibt es **Renormierungstransformationen**, die die Eigenschaften einer Gruppe erfüllen. Diese *Renormierungsgruppe* versucht man auf die Quantenchromodynamik anzuwenden.

19.18 Reverberation Mapping

Reverberation Mapping gehört zu den vielen Begriffen, die sich nicht treffend ins Deutsche übersetzen lassen: **Lichtlaufzeit-Kartierung** trifft vielleicht das Wesen der Methode, aber die Fachwelt spricht nur von *Reverberation Mapping*.

19.18.1 breite Emissionslinien von Galaxien

Es handelt sich dabei um ein Verfahren, um die Massen und den Drehimpuls von Schwarzen Löchern zu ermitteln. Dies funktioniert folgendermaßen: Schwarze Löcher sammeln Material aus der Umgebung mittels Akkretion auf. In Galaxien und besonders in aktiven Galaxien mit Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) beobachten Astronomen die so genannte *Broad Line Region* (BLR), ein Gebiet mit breiten Emissionslinien. Die BLR sind nichts anderes als leuchtende, bewegte Materiewolken, die charakteristische Emissionslinien im Bereich der optischen und ultravioletten Strahlung aussenden. Die Verbreiterung rührt daher, weil die Wolken sich bewegen: aufgrund des **Doppler-Effekts** wird eine (im Ruhesystem der Wolke) scharfe Spektrallinie verschmiert, weil sich die Bewegung in einer Blauverschiebung (Bewegung in Richtung Beobachter) und einer Rotverschiebung (Bewegung vom Beobachter weg) im entfernten Beobachtersystem niederschlägt. Die **Linienbreite** kann demnach als Maß für die Geschwindigkeit der BLR herangezogen werden.

19.18.2 entfernte Primärquelle beleuchtet Wolken

Der zweite Parameter ist der Abstand der Materiewolke vom zentralen Schwarzen Loch. Es wird vorausgesetzt, dass die Bewegung der Wolke durch die gravitative Bindung an die dunkle Zentralmasse bewerkstelligt wird. Im bewährten astrophysikalischen Modell nimmt man nun an, dass die BLR deshalb Emissionslinien aussendet, weil die hochenergetische, elektromagnetische Strahlung in der Umgebung sie dazu anregt. Die Primärquelle dieser Strahlung ist das Zentrum des AGN. Es beleuchtet die BLR, die sich typischerweise in einem Abstand von bis zu zehn Lichttagen von der Zentralmasse befindet. Reverberation Mapping nutzt nun im Wesentlichen die Messung von **Lichtlaufzeiten** aus: Der beobachtende Astronom misst einerseits *direkt* die Strahlung der Primärquelle und andererseits *zeitversetzt* aufgrund endlicher Lichtlaufzeiten zwischen Primärquelle und BLR *indirekt* die Strahlung der Linie. In diesem zeitlichen Versatz steckt die Information über die **Geometrie der BLR**. Primärstrahlung (AGN bzw. Galaxiezentrum) und Antwortstrahlung (Linie) dienen zur Kartographie der Materiewolken, insbesondere zur Abschätzung ihrer Größe und ihres Abstands zur Zentralmasse.

19.18.3 Masse aus Geschwindigkeit und Abstand

Astronomen nehmen deshalb Kontinuumspektren und variable Emissionslinien auf und extrahieren daraus mittels Reverberation Mapping die Zentralmassen. Die Dopplergeschwindigkeit v (oder auch mit σ bezeichnet) aus der Breite der Linie und die Größenabschätzung r gehen in die Berechnung der Masse Schwarzer Löcher mithilfe des **Virial-Theorems** ein:

$$M \approx r\sigma^2/G.$$

Man kann also dieses Verfahren zu den **kinematischen Methoden** zählen, um eine Evidenz für Schwarze Löcher abzuleiten.

Eine gewichtige Rolle spielt Reverberation Mapping (neben der **M - σ -Relation**) bei der Bestimmung von Massen der supermassereichen Schwarzen Löcher in AGN.

19.18.4 auch Anwendung in der Röntgenastronomie

In der Röntgenastronomie kann die Reverberation-Mapping-Technik dazu verwendet werden, um die Geometrie der Korona abzuleiten. Hier geht man gewissermaßen umgekehrt vor, als bei den BLR beschrieben wurde: Allgemeiner gesprochen kann man die BLR als **Reflektor** auffassen, der die Primärstrahlung aufnimmt und als 'Antwort' die Linie emittiert. Die Geometrie der BLR ist eine Unbekannte, die ermittelt werden soll. Umgekehrt wird nun in der Röntgenastronomie die Geometrie des Reflektors als bekannt vorausgesetzt. Hier ist es nämlich die Geometrie des Akkretionsflusses in der Nähe des Loches. Typischerweise wird hier die flache Standardscheibe angenommen. Sie übernimmt die Rolle der BLR und reflektiert die Primärstrahlung (hier von der Korona) und gibt sie reprozessiert in Form der relativistischen Eisenlinie wieder ab. Die Röntgenastronomen sind an der **Geometrie der Korona** interessiert. Sie versuchen Gestalt und Größe mittels Reverberation Mapping der variablen Eisenlinie und des gemessenen koronalen Kontinuums zu ermitteln. In die Variabilität der Fluoreszenzlinie geht nicht nur eine unterschiedliche Beleuchtung durch die Korona ein. Es ist sinnvoll anzunehmen, dass auch die Standardscheibe die Linie nicht immer auf die gleiche Weise reflektiert. Denn die Standardscheibe hat unterschiedliche Temperaturen - je nachdem, ob man mehr den heißen Innenrand oder den kühleren Außenrand betrachtet. Entsprechend ist die Scheibe auch unterschiedlich ionisiert. Astrophysiker sagen dann, dass die *Standardscheibe ein variables Ionisierungsprofil* habe. Diese zusätzliche Physik erschwert die Reverberation-Mapping-Analyse - sowohl in der Röntgenastronomie, als auch in der optischen Astronomie.

19.19 Reynolds-Zahl

Dies ist eine der charakteristischen, dimensionslosen Zahlen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik, benannt nach dem englischen Physiker *Osborne Reynolds* (1842-1912), einem der Pioniere der Hydrodynamik.

19.19.1 laminare vs. turbulente Strömung

Die Reynolds-Zahl Re ist ein Maß für den Strömungswiderstand in viskosen (zähen) Flüssigkeiten. Bei der **kritischen Reynolds-Zahl** geht eine **laminare Strömung** in eine **turbulente Strömung** über. Der Übergangsbereich ist durch Instabilitäten in der Strömung gekennzeichnet. Die kritische Reynolds-Zahl markiert also den Gültigkeitsbereich des **Gesetzes von Hagen-Poiseuille**, das nur für laminare Strömungen gilt.

19.19.2 Berechnung der Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl in einer Strömung durch eine Röhre berechnet sich als Produkt aus Rohrdurchmesser, Dichte des Fluidums und mittlerer Geschwindigkeit der Strömung, geteilt durch die Viskosität.

Je höher die Viskosität (Zähigkeit) des Fluidums (Flüssigkeit, Gas), desto kleiner ist demnach die Reynolds-Zahl. Andererseits wächst die Reynolds-Zahl linear mit der charakteristischen Geschwindigkeit der Strömung.

19.20 RGB-Bild

Siehe dazu unter dem Eintrag Falschfarbenbild.

19.21 Ricci-Tensor

Der Ricci-Tensor ist ein Tensor 2. Stufe und wird gebildet, indem man den Riemann-Tensor (4. Stufe) über den metrischen Tensor verjüngt:

$$R_{\kappa\lambda} = R^\mu_{\lambda\mu\kappa} = g^{\mu\nu} R_{\nu\kappa\mu\lambda}.$$

Eine weitere Verjüngung nach dieser Prozedur macht aus dem Ricci-Tensor den **Ricci-Skalar** oder die **skalare Krümmung**

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}.$$

Aus Ricci-Tensor und Ricci-Skalar besteht ein anderer, wichtiger Tensor der Allgemeinen Relativitätstheorie: der Einstein-Tensor. Dieser wiederum macht die rechte, die *geometrische* Seite der Einsteinschen Feldgleichungen aus.

19.22 Riemann-Tensor

Der Riemann-Tensor oder Riemann-Christoffel-Tensor ist einer der wichtigsten Tensoren in *Albert Einsteins* Allgemeiner Relativitätstheorie (ART). Die alternative Bezeichnung **Krümmungstensor** offenbart seine physikalische Interpretation: er ist ein Maß für die **Krümmung** der Raumzeit.

19.22.1 Krümmung der Raumzeit

Die Krümmung verändert sich im Allgemeinen in der Raumzeit von Raumzeitpunkt zu Raumzeitpunkt. Die Physiker nennen das eine **gekrümmte Raumzeit**. Anschaulich mag man sich diese Raumzeit vorstellen, wie ein Gebirge mit Bergen und Tälern. Die Krümmungen werden - und das ist die Kernaussage der ART - durch eine Form von Energie, z. B. Masse, hervorgerufen. Die Information über die Energieform steckt in einem zweiten wichtigen Tensor der ART, dem Energie-Impuls-Tensor. Objekte, Testmassen oder auch Licht, die sich nun durch die gekrümmte Raumzeit (kräftefrei) bewegen, bleibt nichts anderes übrig, als den Krümmungen zu folgen. Die sich ergebenden, gewundenen Wege heißen Geodäten. Der gerade beschriebene Sachverhalt wird mathematisch mit den Einsteinschen Feldgleichungen ausgedrückt. Diese Gleichungen koppeln Energie-Impuls-Tensor und Riemann-Tensor. Prosaisch formuliert besagt dieser Satz gekoppelter, nichtlinearer, partieller Differentialgleichungen:

Masse und Energie sagen der Raumzeit wie sie sich zu krümmen hat, und die Raumzeit sagt der Energieform, wie sie sich zu bewegen hat.

19.22.2 Der Krümmungstensor - der komplizierteste Tensor der ART

Dringt man tiefer in die Tensorrechnung der ART ein, so stellt man fest dass der Riemannsche Krümmungstensor ein Tensor 4. Stufe ist. Diese Gebilde sind recht komplex und nicht leicht in der Handhabung: Denn der Krümmungstensor der ART hat $4^4 = 256$ Komponenten! Zum Glück weist der Riemann-Tensor einige Symmetrien auf, so dass er in den vier Dimensionen der klassischen ART (Länge, Breite, Höhe, Zeit) **20 voneinander unabhängige Komponenten** hat.

19.22.3 Definition

Wie die Definitionsgleichung zeigt, besteht der Riemann-Tensor $\mathbf{R}$ aus partiellen Ableitungen der Christoffel-Symbole ('Gammas, Γ ', auch *Levi-Civita-Zusammenhänge* genannt)

$$R^\kappa_{\lambda\mu\nu} = \partial_\mu \Gamma^\kappa_{\lambda\nu} - \partial_\nu \Gamma^\kappa_{\lambda\mu} + \Gamma^\sigma_{\lambda\nu} \Gamma^\kappa_{\sigma\mu} - \Gamma^\sigma_{\lambda\mu} \Gamma^\kappa_{\sigma\nu}.$$

Diese wiederum sind partielle Ableitungen der Metrik. Im Krümmungstensor stecken demnach zweite Ableitungen der Metrik $\mathbf{g}_{\mu\nu}$, oder man könnte auch sagen zweite Ableitungen der Mannigfaltigkeit. Auf diese Weise ist der Riemann-Tensor ein Maß für Krümmungen.

19.22.4 Teamarbeit von Einstein & Grossmann

Albert Einstein entdeckte die physikalische Relevanz des Krümmungstensors für seine Gravitationstheorie. Er griff dabei die Arbeiten des Mathematikers *Georg Friedrich Bernhard Riemann* (1826 - 1866) auf, der die fundamentalen Arbeiten seines Doktorvaters *Carl Friedrich Gauß* (1777 - 1855) weiterentwickelte. Der Mathematiker und Kommilitone Einsteins, *Marcel Grossmann*, gab den entscheidenden Hinweis auf die damals neuen Aspekte der Riemannschen Differentialgeometrie. Berühmt wurde die Bemerkung in Einsteins Züricher Notizbuch 'Grossmann Tensor vierter Mannigfaltigkeit', wo Einstein 1912 den Riemannschen Krümmungstensor identifizierte.

19.22.5 flach: $\mathbf{R} = 0$

Verschwindet der Riemann-Tensor, so heißt die Metrik **flach** und weist daher keine Krümmungen auf.

19.22.6 Symmetrien des Riemann-Tensors

Der Riemann-Tensor besitzt eine Reihe von Symmetrien unter Vertauschung seiner vier Indizes, die teilweise auf die Symmetrie des metrischen Zusammenhangs (also der Christoffel-Symbole) zurückgehen. Daneben gibt es noch eine Reihe von *Differentialidentitäten*, die so genannten **Bianchi-Identitäten**, die der Riemann-Tensor erfüllt. Die Gültigkeit und Existenz von Bianchi-Identitäten ist tief verwurzelt in der Natur der Gravitation. Eine unglaublich interessante Diskussion, die diesen Sachverhalt beleuchtet, findet sich unter dem Eintrag Bianchi-Identitäten.

19.22.7 Verjüngungen des Riemann-Tensors und Invarianten

Die Verjüngungen des Riemann-Tensors heißen Ricci-Tensor und Ricci-Skalar (oder skalare Krümmung). Die innere Krümmung kann man als Skalar berechnen, indem man den Riemann-Tensor mit sich selbst kontrahiert, also ein Produkt bildet von kovarianten und kontravarianten Riemann-Tensor 4. Stufe. Dieses Produkt heißt **Riemannsche Invariante** (engl. *Riemann invariant*, *Riemannian invariant*, auch *Kretschmann scalar*, dt. Kretschmann-Skalar). Sie hat die nützliche Eigenschaft, dass sie unabhängig (invariant) vom zur Berechnung gewählten Koordinatensystem ist! Es ist also egal, welche Koordinaten man zur Berechnung auswählt: die Invariante hat immer denselben Wert.

19.22.8 Wo sind Krümmungssingularitäten?

Die Riemannsche Invariante einer Raumzeit eignet sich zum Auffinden ihrer echten, nicht behebbaren Singularitäten. Denn dort, wo die Riemannsche Invariante nicht definiert ist, wo 'durch eine Null geteilt wird', liegt eine unendliche Krümmung vor. Die Relativisten bezeichnen das als Krümmungssingularität. Dort versagt eine physikalische Beschreibung. Es zeichnet sich aktuell ab, dass eine Quantengravitation wie die Loop-Quantengravitation (Quantengeometrie) das Auftreten dieser Unendlichkeiten zu beheben vermag. Eine Quantisierung der Raumzeit scheint Krümmungssingularitäten zu verhindern!

Doch bleiben wir bei der klassischen, unquantisierten ART: Als Beispiel zum Auffinden von Singularitäten kann man die Raumzeit einer Punktmasse betrachten. Sie wird durch die Schwarzschild-Lösung beschrieben. Nicht rotierende, elektrisch ungeladene Schwarze Löcher werden im Rahmen der ART auch durch die Schwarzschild-Lösung repräsentiert. Möchte man sich die Riemannsche Invariante der Schwarzschild-Metrik beschaffen, muss man die metrischen Koeffizienten, die Komponenten des metrischen Tensors, ableiten. Daraus folgen in einem ersten Schritt die Christoffel-Symbole. Gemäß der Gleichung oben folgen aus den berechneten Christoffel-Symbolen die Komponenten des Riemann-Tensors. Die Rechenarbeit ist im Falle der Schwarzschild-Lösung noch gut zu bewältigen, weil sie eine hohe Symmetrie (Kugelsymmetrie) aufweist. Hat man sich einen Riemann-Tensor beschafft, so folgt der entsprechend dazu duale Tensor durch 'Überschieben' des metrischen Tensors (Kontraktion). Schließlich liegt der Riemann-Tensor in kontra- und kovarianter Form vor und kann miteinander multipliziert werden, um die Riemannsche Invariante zu erhalten.

19.22.9 Die echte Schwarzschild-Singularität

Die Riemannsche Invariante der Schwarzschild-Geometrie hat den Wert $48 M^2/r^6$, wobei M die Masse der Punktmasse oder auch des Schwarzen Loches ist. Diese Größe divergiert im Ursprung bei $r = 0$, so dass hier die echte Singularität der Schwarzschild-Lösung ist. Es handelt sich um eine **Punktsingularität**. Im Unendlichen, bei sehr großen Werten von r , verschwindet die Riemannsche Invariante, d. h. die Krümmung geht gegen null und die Raumzeit wird asymptotisch flach.

19.22.10 Die echte Kerr-Singularität

Die gleiche Rechenprozedur kann man für eine weniger symmetrische Raumzeit durchführen, z. B. für rotierende Schwarze Löcher, die durch die Kerr-Lösung dargestellt werden. Hier liegt eine Axialsymmetrie vor, die die Berechnung der Riemannschen Invarianten zu einem deutlich längeren Unterfangen macht. Die Riemannsche Invariante der Kerr-Geometrie ist entsprechend komplizierter und lautet (*Glass & Krisch, Class. Quantum Grav. 21, 5543, 2004*):

$$R_{\kappa\lambda\mu\nu} R^{\kappa\lambda\mu\nu} = 48 \frac{M^2}{r^6} \frac{1 - (a/r)^2 \cos^2 \theta}{\left(1 + (a/r)^2 \cos^2 \theta\right)^6} \left(1 - 14 (a/r)^2 \cos^2 \theta + (a/r)^4 \cos^4 \theta\right)$$

Wie man sofort sieht, geht diese Invariante für $a = 0$ in die der Schwarzschild-Lösung über. Um das Wesen der echten Singularität der Kerr-Lösung herauszufinden, ist nun zu diskutieren, wann der Nenner der Riemannschen Invarianten verschwindet. Denn der Grenzwert von etwas Konstantem durch null geht gegen unendlich und markiert die Krümmungssingularität. Umschreiben liefert eine Bedingung, die besagt, dass die Boyer-Lindquist-Funktion ρ verschwinden muss. Das ist gegeben, wenn gleichzeitig die Bedingungen $r = 0$ und $\theta = \pi/2$ (bzw. 90°) erfüllt sind. Besser ist dieses Ergebnis mit Kerrs ursprünglichem, kartesischen Koordinatensystem zu interpretieren: Es liefert $x^2 + y^2 = a^2$ und $z = 0$, also eine Ringsingularität, die genau in der Äquatorialebene liegt.

19.22.11 Gravitationstrichter

In Abbildung 19.12 ist die gekrümmte Schwarzschild-Geometrie auf einem Computer visualisiert worden (*Müller 2005*). Das Bild enthält zweierlei Informationen: die Krümmung der Raumzeit (blaue 'Gummihaut') und die gravitativ bedingte Zeitdilatation (farbige Isokonturlinien). Es handelt sich also um einen so genannten **Gravitationstrichter**. Der tiefe blaue Schlund im Zentrum besagt gerade, dass die Krümmung im Zentrum des Loches unendlich wird. Der Schlund schließt sich unten nicht! Das markiert den Ort der zentralen Punktsingularität. Die Uhren ticken aus der Sicht eines Außenbeobachters immer langsamer und bleiben schließlich am Ereignishorizont (hier identisch mit dem Schwarzschild-Radius, der innerste blaue Ring) stehen. Die Farbskala am Bildrand zeigt den Wertebereich der Lapse-Funktion (auch Rotverschiebungsfaktor genannt), die zwischen 1 (asymptotisch flache Raumzeit) und 0 (stark gekrümmte Raumzeit am Horizont) variiert.

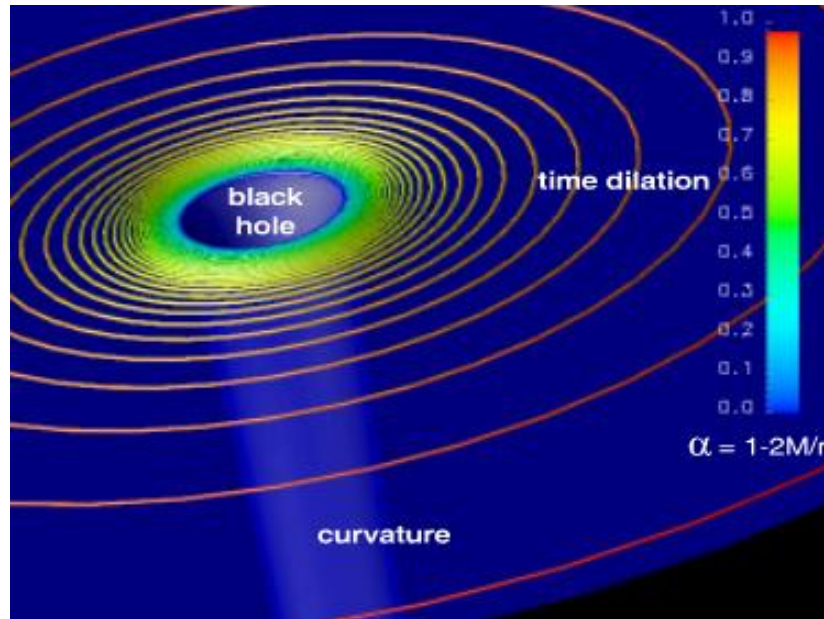


Abbildung 19.12: Gravitationstrichter: Krümmung und gravitative Zeitdilatation.

Ein einfallendes Objekt würde also immer langsamer werden und bei Erreichen des Horizonts (von außen gesehen) stehen bleiben. Das Abstoppen ist allerdings nicht mehr sichtbar, weil jede Strahlung unendlich stark rotverschoben wird, die vom Horizont kommt. Die Ursache dafür ist die Gravitationsrotverschiebung. Es sei angemerkt, dass aus der Sicht des einfallenden Objekts, die zentrale Punkt singularität in endlicher Zeit erreicht wird. Das ist eben der gewichtige Unterschied der Bezugssysteme und das Wesen der Relativitätstheorie.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Bild nicht um eine Visualisierung handelt, die einem realen Foto eines Schwarzen Loches gleichkommt - es ist nur eine Darstellung mathematischer Größen in Falschfarben. Einem echten Foto kommt die relativistische Ray-Tracing-Simulation einer leuchtenden Gasscheibe um ein Loch im Eintrag Schwarzes Loch nahe, das ebenfalls als Falschfarbenbild dargestellt wird.

19.23 Ringsingularität

Die Ringsingularität ist ein exklusives Merkmal rotierender Schwarzer Löcher, also Schwarzer Löcher der Kerr-Familie. Das, was bei der Schwarzschild-Lösung eine Punkt singularität ist, die nicht durch eine Wahl anderer Koordinaten zu beheben ist, wird bei rotierenden Löchern zu einer Ringsingularität 'aufgeblasen'. In diesen echten Singularitäten wird die Krümmung unendlich.

19.23.1 Singularitäten erzeugen die Gravitation

Mathematisch leitet man die Ringsingularität am besten mit pseudo-kartesischen Koordinaten ab.

$$ds^2 = dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 - \frac{2Mr^3}{r^4 + a^2 z^2} \left(dt - \frac{1}{r^2 + a^2} [r(xdx + ydy) + a(xdy - ydx)] - \frac{z}{r} dz \right)^2$$

In dieser Form leitete Roy P. Kerr historisch die Lösung rotierender Massen 1963 ab. Die echten oder intrinsischen Singularitäten sind die **Quellen des Gravitationsfeldes** Schwarzer Löcher. Man

darf nicht vergessen, dass es sonst nur ein Vakuum gibt, weil Schwarzschild- und Kerr-Lösung Vakuumlösungen der Einsteinschen Feldgleichungen sind.

19.23.2 Wie findet man die Singularitäten?

Im Allgemeinen findet man Krümmungssingularitäten, indem man die **Riemannschen Invarianten** ausrechnet. Dabei handelt es sich um ein Produkt aus kontravariantem und kovariantem Riemann-Tensor. Unter diesem Lexikoneintrag findet man eine genaue Beschreibung der mathematischen Prozedur. Die durch Koordinaten festgelegten Orte, wo die Invarianten divergieren ('Division durch null'), sind gerade die Krümmungssingularitäten. So ist dieses Produkt für die Schwarzschild-Lösung proportional zu r^{-6} , so dass als intrinsische Singularität die Punktsingularität in $r = 0$ resultiert.

In der Kerr-Geometrie läuft diese Behandlung darauf hinaus, die Nullstellen einer bestimmten Boyer-Lindquist-Funktion (ρ) zu diskutieren. Sie wird genau dann null, wenn *gleichzeitig* die Bedingungen $r = 0$ **und** $\theta = \pi/2$ (bzw. 90°) erfüllt sind. Die Interpretation dieses erstaunlichen Ergebnisses wird erst klar, wenn man Kerrs Originalkoordinaten ($\{t, x, y, z\}$) wieder einführt. Dann resultieren die beiden Bedingungen $x^2 + y^2 = a^2$ **und** $z = 0$ für die intrinsische Singularität der Kerr-Lösung. Das beschreibt gerade einen **unendlich dünnen Ring** mit Radius a (Vorsicht! Siehe nächster Abschnitt.), der in der Äquatorebene liegt! Man kann sich dieses Gebilde als **Massenstrom** vorstellen, der in seiner Umgebung ein rotierendes Gravitationsfeld erzeugt: die Kerr-Metrik. Der Ringradius a entspricht gerade dem **Kerr-Parameter**. Dieser parametrisiert den spezifischen Drehimpuls eines rotierenden Loches, $a = J/Mc$ (J : Drehimpuls des Loches, M : Lochmasse).

19.23.3 Ein Ring ohne Ausdehnung!

Bei der Interpretation des Ringradius muss man aufpassen: bei einer Visualisierung der Krümmungsinvarianten wird klar, dass der Ring keine Ausdehnung hat. Die Ringsingularität befindet sich **immer innerhalb des inneren Horizonts**, des so genannten Cauchy-Horizonts. Die Ringsingularität sitzt wie bei Schwarzschild bei $r = 0$, hat aber dennoch einen anderen Charakter. Diese Eigenschaft ist am schwierigsten zu verstehen und erfordert eine genaue Analyse der Singularitätenstrukturen in den richtigen Koordinaten (*B. Carter*, 1968; aufgegriffen im Buch von *Hawking & Ellis: The Large Scale Structure of Space-Time*, 1973). Obwohl die Riemannschen Invarianten unabhängig vom Koordinatensystem sind, kann ein falsches Koordinatensystem eine adäquate Interpretation gehörig erschweren. So erlauben pseudo-sphärische Koordinaten *keine* angemessene Interpretation des Satzes an Bedingungen $r = 0$ **und** $\theta = \pi/2$. Offensichtlich lässt sich nur erahnen, dass die intrinsische Kerr-Singularität vollkommen wesensverschieden von der intrinsischen Schwarzschild-Singularität ist.

19.23.4 Bedeutung für die Astrophysik

Vom Standpunkt des Astronomen ist nur wesentlich, dass die Singularität hinter dem Ereignishorizont verborgen ist. Dieses Prinzip heißt *kosmische Zensur* (engl. *cosmic censorship*) und wurde von dem englischen Mathematiker *Roger Penrose* entdeckt. Es besagt, dass 'nackte', also sichtbare Singularitäten verboten sind. Eine intrinsische Singularität ist deshalb auch auf astronomischem Wege nicht sichtbar. Bislang gab es auch keinerlei astronomische Beobachtung, die der kosmischen Zensur zu widersprechen schien.

Bei der Schwarzschild-Lösung gilt $a = 0$. Das Loch rotiert nicht und ist kugelsymmetrisch und statisch. Also schrumpft hier die Ringsingularität gewissermaßen auf die zentrale Punktsingularität zusammen und die entartete Bedingung wird zu einer einzigen, nämlich $r = 0$.

19.24 Robertson-Walker-Metrik

Die Robertson-Walker-Metrik (eigentlich FLRW-Metrik) beschreibt in der relativistischen Kosmologie das Universum als Ganzes. Gemäß des kosmologischen Prinzips muss das Universum eine Raumzeit mit

konstanter Krümmung sein. Genau dieser Forderung wird die Robertson-Walker-Metrik gerecht. Die Robertson-Walker-Geometrie bildet den raumzeitlichen Hintergrund der Friedmann-Weltmodelle, die Gegenstand der Kosmodynamik sind. Die Metrik vermag sowohl statische als auch dynamische Universen zu beschreiben.

19.24.1 Evidenz von der Beobachtung

Wie sich in den 1920er Jahren durch die Beobachtungen von entfernten Galaxie durch die amerikanischen Astronomen *Slipher* und *Hubble* erwies (und später bestätigte), leben wir in einem dynamischen Kosmos: er dehnt sich aus.

19.24.2 Eigenschaften der FLRW-Universen

Das Linienelement besitzt eine hohe Symmetrie, denn Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Räume (benannt nach den vier Pionieren dieser Kosmologie) sind kugelsymmetrisch. Die Gleichung des Linienelements in der Signatur (+ - - -) der Metrik lautet

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right).$$

19.24.3 Drei Universen unterschiedlicher Krümmung

Eine wesentliche Größe im Robertson-Walker-Linienelement ist die **Krümmung**, auch **Krümmungsparameter** genannt, und mit k bezeichnet. Der Krümmungsparameter kann nur die Werte -1, 0 oder +1 annehmen.

- ◇ $k = -1$ beschreibt ein **hyperbolisches Universum**,
- ◇ $k = 0$ entspricht dem flachen **Euklidischen Universum**,
- ◇ $k = +1$ entspricht einem **elliptischen Universum** oder **sphärischen Universum**.

Mit dem Vorzeichen von k liegt also die **Geometrie des Universums** fest, nicht jedoch die **Topologie des Universums**! Die Topologie kann im Allgemeinen **offen** oder **geschlossen** sein, nur für positive Krümmung, $k = +1$, sind sie alle Universen geschlossen.

19.24.4 Welches ist unser Universum?

Welche Krümmung das existierende Universum hat, ist immer eine Frage der Beobachtung des Materieinhalts bzw. Energieinhalts. Momentan spricht die Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Ballonexperimente: u. a. BOOMERANG, *Tegmark et al.*, MAXIMA; Satelliten: COBE seit 1992, WMAP seit 2003, ab 2008 PLANCK) für eine Λ CDM **Kosmologie** mit einem flachen, offenen Universum ($k = 0$), also gerade dem kritischen Grenzfall entsprechend. Die Daten vieler unterschiedlicher Experimente wurden in eine Temperaturkarte des kosmischen Mikrowellenhintergrunds gepackt. Noch genauer ist es, die Temperaturverteilung am Himmel in geeignete Basisfunktionen zu entwickeln (Kugelflächenfunktionen, engl. *spherical harmonics*). Aus der Gewichtung der einzelnen Funktionen kann sehr genau die thermische Vergangenheit des Universums rekonstruiert werden. Diese präzisen Daten werden mit einem kosmologischen Modell abgeglichen werden. Hier wird die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik wichtig, geht sie doch in die Friedmann-Gleichung ein, die die Dynamik des Kosmos beschreibt.

19.24.5 Der Konsens ist flach

Das flache Λ CDM Universum nennt man auch das Konsens-Modell (engl. *concordance model*). Es ist die (topologisch) einfachste Lösung ist, die zu den Daten passt.

Die bisher hochwertigsten Daten von WMAP schließen jedoch auch ein **sphärisches Universum** mit $k = +1$ nicht ganz aus. Deshalb wurde als Alternativen zum flachen Konsens-Modell das Dodekaeder-Universum (*Luminet et al.* 2003, Nature Artikel) und das Horn-Universum (*Aurich et al.* 2004) vorgeschlagen.

19.24.6 späte Dominanz von Λ

Die tragende Rolle in der späten Evolutionsgeschichte des Universums spielt offensichtlich die kosmologischen Konstante Λ , allgemeiner **Dunkle Energie** genannt. Sie macht etwa 74% aller Energieformen im Universum aus und treibt durch ihre antigravitative Wirkung das Universum auseinander.

19.24.7 Schicksal des Universums

Falls aber mehr Masse im Universum vorhanden ist, könnte die kosmische Expansion gestoppt werden und in ferner Zukunft einen Big Crunch auslösen. Dieses Szenario könnte wiederum in einem erneuten Urknall enden (**pulsierendes Universum**). Aus philosophisch-ästhetischer Sicht klingt das sehr attraktiv, denn die Natur würde selbst bei der Entstehung und Vernichtung des Universums einen Zyklus offenbaren. Zyklen in der Natur sind in vielen anderen Bereichen (Jahreszeiten, Sonnenflecken etc.) bekannt - warum nicht auch beim Kosmos? Ein Beleg oder die Widerlegung dieser spekulativen Idee wird erforscht. Aber die aktuellen Beobachtungsdaten schließen Big Crunch und einen kosmischen Zyklus aus. Das Universum wird sich sehr wahrscheinlich ewig ausdehnen, dabei immer mehr auskühlen und ein dunkler, kalter Ort werden, der von Schwarzen Zwergen und Schwarzen Löchern dominiert wird.

19.25 Robinson-Theorem

Das Robinson-Theorem ist ein mathematischer Satz, der für Raumzeiten mit bestimmter Symmetrie gilt. Die Raumzeiten sind in der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) von *Albert Einstein* eine Weiterentwicklung der Gravitationsfeldersfelder in der klassischen Gravitationsphysik *Isaac Newtons*. Gravitation wird in Einsteins Theorie völlig neu verstanden, nicht als Kraft, sondern als *geometrische* Eigenschaft der Raumzeit.

19.25.1 Raumzeit muss Achsensymmetrie haben

Das Robinson-Theorem ist ein Eindeutigkeitssatz (engl. *uniqueness theorem*) und gilt für **stationäre und axialsymmetrische Raumzeiten**. Die Raumzeiten haben also salopp gesagt die Symmetrie eines Zylinders, eine Achsensymmetrie. Das ist jedoch nicht alles, was für die Gültigkeit des Theorems vorausgesetzt werden muss.

19.25.2 weitere Voraussetzungen des Theorems

- ◇ Diese Raumzeit muss darüber hinaus **asymptotisch flach** sein, d. h. die Krümmung soll bei großen Abständen ('im Unendlichen') verschwinden. Die stationäre und axialsymmetrische Raumzeit geht hier in die Minkowski-Metrik über.
- ◇ Außerdem soll die Raumzeit einen **glatten, konvexen Ereignishorizont** enthalten.
- ◇ **Außerhalb des Ereignishorizonts** soll die stationäre und axialsymmetrische Raumzeit **regulär** (= nicht singulär) sein, d. h. dort dürfen keine Krümmungssingularitäten vorkommen.

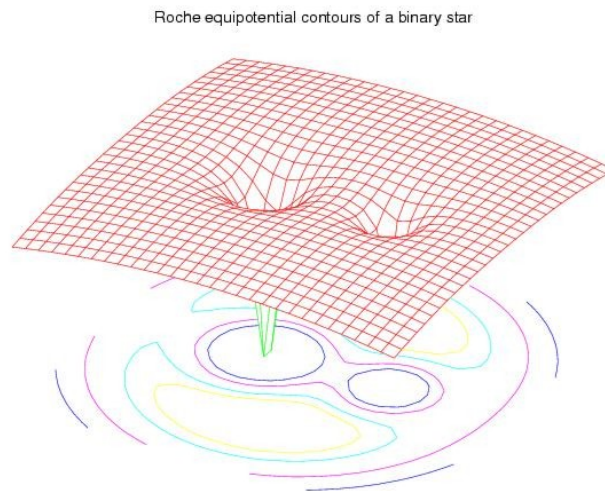


Abbildung 19.13: Roche-Volumen: Potentialgebirge, Lagrange-Punkte und Roche-Volumen eines Doppelsternsystems.

19.25.3 Was besagt das Theorem?

Unter diesen vier Voraussetzungen (Achsensymmetrie, asymptotische Flachheit, konvexer Horizont, Regularität) besagt nun das Robinson-Theorem, dass die Raumzeit **eindeutig durch nur zwei Parameter** bestimmt ist: durch **Masse und Drehimpuls**. Mit anderen Worten: die betrachtete Raumzeit ist identisch mit der **Kerr-Lösung**. Rotierende, elektrisch neutrale Schwarze Löcher werden gerade durch die Kerr-Lösung mathematisch beschreiben und sind von großer Bedeutung für die Astronomie.

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

19.25.4 Originalveröffentlichung

◇ Robinson, D.C. 1975, *Phys. Rev. Lett.* **34**, 901

19.26 Roche-Volumen

Das Roche-Volumen (auch Roche-Fläche) ist eine charakteristische Größe in der Diskussion von **Doppelsternsystemen** (*Binären*, engl. *binaries*). Benannt wurde sie nach dem französischen Astronomen *Edouard Albert Roche* (1820 - 1883), der sich in seinen Forschungen vornehmlich mit den Saturnringen beschäftigte.

19.26.1 Schwer- und Zentrifugalkräfte

Das Roche-Volumen gibt das maximale Volumen eines Sterns an, bevor seine Masse auf den Begleiter überfließen kann. Genauer gesagt gibt es **zwei Roche-Volumina** in einem Binärsystem - für jeden Stern eines. Normalerweise hält ein Stern seine Masse durch die Gravitationskraft fest. Ist nun ein vergleichbar schwerer Begleiter in der Nähe, wird das Gravitationsfeld gestört: In der Umgebung der Sternmassen gibt es Punkte, wo sich die Gravitationskräfte gegenseitig aufheben. Diese Punkte heißen Lagrange-Punkte benannt nach dem französischen Mathematiker *Joseph-Louis Lagrange* (1736 - 1813).

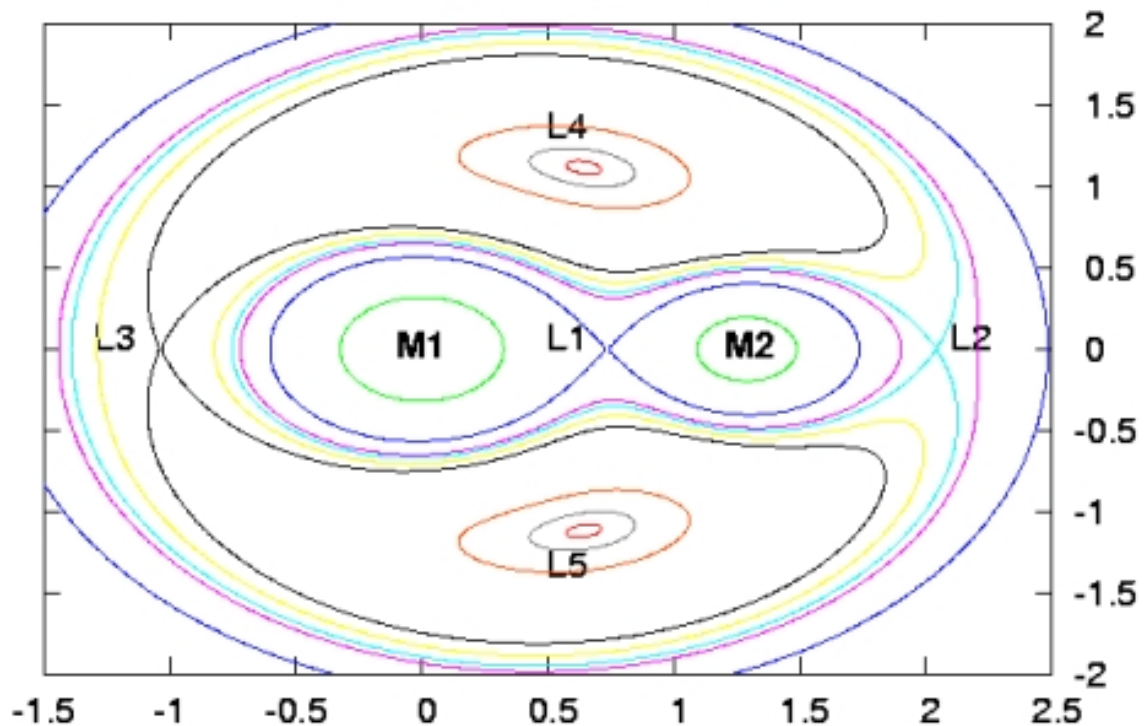


Abbildung 19.14: Äquipotentiallinienstruktur, Lagrange-Punkte und Roche-Volumina eines Binärs.

Die klassische Mechanik behandelt diese Aufgabe als **Zwei-Körper-Problem**. Es muss dazu gesagt werden, dass die beiden Sterne nicht statisch im Raum liegen, sondern umeinander kreisen. Bei der Betrachtung darf man deshalb **Zentrifugalkräfte** nicht vergessen. In der Theorie spricht man deshalb von *effektiven Gravitationskräften*, die um Zentrifugalterme korrigiert sind.

19.26.2 Berechnung im Schwerpunktsystem

Zur Bestimmung der Roche-Volumina muss man sich das effektive Gravitationspotential dieser zwei Sternmassen beschaffen. Historisch ist diese Rechnung schon lange bekannt und kann beispielsweise bei *Zdenek Kopal* in den Annalen der Astrophysik nachgelesen werden (An. Ap. 18, 379, 1955). Es ist sinnvoll, die Verhältnisse im **Schwerpunktsystem** zu beschreiben. Man führt also eine Schwerpunktkoordinate und eine Relativkoordinate ein. Das resultierende Gesamtpotential ist als **Potentialgebirge** in Abbildung 19.13 dargestellt.

19.26.3 Orte gleichen effektiven Potentials

Man diskutiert das Potential, indem man Linien konstanten Potentials betrachtet. Einige dieser Isokonturlinien des Potentials sind unter das Gebirge projiziert worden. Die Abbildung 19.14 zeigt die Visualisierung der Isokonturlinien als zweidimensionales Diagramm. Diese so genannte **Äquipotentiallinienstruktur** zeigt charakteristische Punkte. Es handelt sich dabei um **genau fünf Lagrange-Punkte** in einem System von zwei Massen, M1 und M2. Sie sind im Diagramm von L1 bis L5 durchnummeriert. Die dreidimensionalen Roche-Volumina der Sterne entsprechen in

der Isokonturliniendarstellung der blauen liegenden Acht. In dieser Berechnung wurde angenommen, dass die Masse M_1 der Sonnenmasse und die Masse M_2 nur einer halben Sonnenmasse entsprechen. Der Abstand der beiden Schwerpunkte M_1 und M_2 sei gerade so groß wie 1.3 Sonnenradien. Die beiden Raumachsen sind gerade in Einheiten des Sonnenradius beschriftet. Der interessante Punkt in der Ableitung der Roche-Flächen ist nun der **innere Lagrange-Punkt L1**. Er liegt genau auf der Verbindungslinie der beiden Massenschwerpunkte, zwischen den beiden Massen, am Kreuzungspunkt der Acht. Bei diesen Parametern liegt L1 näher bei der kleineren Masse M_2 . Das ist plausibel, muss ein Testteilchen doch viel näher an den leichteren Stern kommen, damit ein Gleichgewicht der Kräfte herrscht. Die Lagrange-Punkte L2 und L3 liegen hinter den Sternen, jedoch ebenfalls auf der Verbindungslinien der beiden Massenschwerpunkte. Es gilt: *L1, L2 und L3 sind kollinear*. L4 und L5 sind hingegen außerhalb, bei diesen speziellen Parametern mehr als ein Sonnenradius von L1 entfernt.

Die Roche-Volumina sind nun gerade diejenigen (nicht kugelsymmetrischen!) Volumen, die die blaue Äquipotentialfläche im Dreidimensionalen umschließt und die durch den inneren Lagrange-Punkt verläuft. Im Prinzip ähnelt sie zweien an der Spitze zusammen geklebten Tropfen.

Anhand des Potentialgebirges ist anschaulich klar, dass die Lagrange-Punkte **labile Gleichgewichtslagen** darstellen. Die Tangenten verlaufen hier horizontal. Tangenten entsprechen gerade der effektiven Kraft, denn der negative Gradient des Potentials ist die Kraft!

19.26.4 Strom kreuzt Roche-Volumen

Sterne sind dynamische Objekte und können sich im Verlauf ihres Sternlebens stark verändern. Die Pulsationsveränderliche sind Sterne, die ihren Sternradius periodisch ändern. Übersteigt nun bei einer Pulsation ein Stern im Binärsystem sein Roche-Volumen, so kann Materie dieses Sterns durch L1 zum Begleiter überfließen. Die Fachwelt nennt dieses Phänomen *Roche lobe overflow*. *Lobe*, dt. 'Einhüllende', ist an sich die bessere Begriffswahl anstelle von 'Volumen' oder 'Fläche'. Das Sternplasma strömt dabei nicht auf direktem Wege über, weil der Stern rotiert und deshalb auch das Sternplasma Drehimpuls besitzt. Es kommt zur Ausbildung eines Akkretionsflusses um den Begleiter, z. B. einer Standardscheibe.

Es kann auch vorkommen, dass *beide Sterne* des Systems ihr Roche-Volumen ausfüllen. Das System hat dann eine hantelförmige Gestalt. In diesem Fall sprechen die Astronomen von **Kontaktsystemen**. Das Roche-Volumen ist besonders relevant im Verständnis einiger enger Röntgendoppelsterne.

19.26.5 Anmerkung zum Erde-Mond-System

Die hier dargestellten Verhältnisse sind sehr allgemein und auch auf das Erde-Mond-System übertragbar. Würde die Erde den inneren Lagrange-Punkt dieses Systems überschreiten, so würde wahrscheinlich das Wasser der Ozeane zu unserem Trabanten überfließen. Glücklicherweise ist die Erdoberfläche weit genug von L1 entfernt.

Die Lagrange-Punkte des Erde-Mond-Systems haben allerdings eine wichtige praktische Anwendung in der Raumfahrt: Weil diese ausgezeichneten Punkte aufgrund verschwindender effektiver Kräfte relativ stabil sind, positioniert man dort Satelliten, die z. B. astronomische Observatorien tragen. Lagrange-Punkte sind geeignete **Satelliten-Parkplätze**.

19.27 Röntgendoppelstern

Röntgendoppelsterne (*X-ray binaries*, **XRBs**) sind **Doppelsternsysteme** (**Binärsysteme**, engl. *binary system*) mit deutlich ausgeprägter Röntgenleuchtkraft. Typischerweise ist die kompakte Komponente die dominante und entscheidende Röntgenquelle.

19.27.1 Ein Stern zu Gast beim Wirt

Nach einem gängigen Modell wird die Röntgenemission dadurch erklärt, dass Materie von einem 'Wirtsstern' oder *Donatorstern* zum 'Parasiten', der kompakten Komponente, gelangt. Die Materie

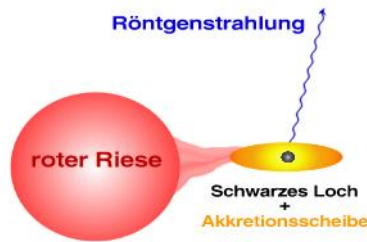


Abbildung 19.15: Röntgendoppelstern aus Riesenstern und Schwarzem Loch.

wird vom tiefen Gravitationspotential der kompakten Komponente angezogen und aufgesammelt. Dieser Prozess heißt Akkretion. Dabei entsteht ein charakteristisches Leuchten im hochenergetischen Bereich der elektromagnetischen Strahlung: Röntgenstrahlung wird ausgesendet (siehe Grafik 19.15).

19.27.2 zwei Szenarien

1) Für den Materieübertritt gibt es zwei Szenarien: Entweder es kommt zum Massenüberfluss durch den inneren Lagrange-Punkt des Doppelsternsystem. An diesem charakteristischen Punkt zwischen zwei Massen heben sich die Gravitationskräfte beider Komponenten gerade gegenseitig auf. Dieses Phänomen heißt in der Fachwelt **Roche lobe overflow**, weil hier der Donatorstern sein Roche-Volumen überschreitet.

2) Oder es kommt im zweiten Szenario zur **Wind-Akkretion**. Hier wird der Teilchenwind des Begleitsterns zum Teil eingefangen und findet auf diese Weise den Weg zum kompakten Objekt. Als kompaktes Objekt kommen sämtliche Typen in Frage: Weißer Zwerg, Neutronenstern, Quarkstern, stellares Schwarzes Loch - oder vielleicht sogar die Alternativen zum klassischen Loch, nämlich Gravastern oder Holostern.

19.27.3 Unterteilung der Röntgendoppelsterne

- ◇ Die Low-Mass X-ray Binaries (**LMXBs**) bestehen aus stellarem Schwarzem Loch oder Neutronenstern plus leichtem Stern, der eine Masse von zwei Sonnenmassen nicht überschreitet. Entsprechend sind die Donatorsterne in LMXBs kühler und besitzen keine starken Winde. Ihre Sternwinde sind eher schwach ausgeprägt und vergleichbar dem Sonnenwind.
- ◇ Ist der Donatorstern schwer und wiegt mehr als zwei Sonnenmassen, so spricht man von High-Mass X-ray Binaries (**HMXBs**). HMXBs zeigen deshalb starke Sternwinde der massereichen Begleiter, die oft junge Sterne vom Spektraltyp O oder B sind und oftmals den Wolf-Rayet Typus entsprechen. Sie beherbergen auch ein stellares Schwarzes Loch oder Neutronenstern als kompakte Komponente.
- ◇ Handelt es sich bei der kompakten Komponente definitiv um ein Schwarzes Loch, so verwendet man meist in der Terminologie den Begriff Mikroquasar oder auch *Black Hole X-ray Binary* (**BHXB**). Manchmal sprechen Astronomen dennoch von Mikroquasaren, auch wenn die kompakte Komponente ein Neutronenstern sein könnte. Das erklärt sich dadurch, dass sie häufig nicht genau wissen, um welches Objekt es sich bei der kompakten Komponente handelt. So wird schon seit geraumer Zeit SS 433 als Mikroquasar bezeichnet, obwohl man erst seit kurzem relativ sicher weiß, dass sich hier ein stellares Schwarzes Loch befindet. Die Differenzierung ob Neutronenstern oder Loch gelingt dann, wenn Astronomen die Masse der kompakten Komponente ableiten können (z. B. aus den Kepler-Gesetzen): Liegt sie oberhalb von etwa drei Sonnenmassen, kann man sich ziemlich sicher sein, ein stellares Schwarzes Loch entdeckt zu haben. Andere Objekte passen einfach nicht in die Beobachtungen und Modellvorstellungen.

Der genaue Massenwert ist noch unbekannt, weil man die exakte Massengrenze der Neutronensterne - infolge Unsicherheiten bei der Zustandsgleichung - noch nicht genau kennt. Aktuell besteht ein Spielraum bei der Obergrenze für Neutronensterne von 1.8 bis 3.2 Sonnenmassen.

- ◊ Handelt es sich um einen akkretierenden Pulsar, also ebenfalls ein Neutronenstern, so hat sich für den Röntgendoppelstern die Bezeichnung **AXP** eingebürgert. Dies steht für Accreting X-ray Pulsar, also übersetzt akkretierenden Röntgenpulsar.
- ◊ Ist die kompakte Komponente ein Weißer Zwerg, so nennt man diese Röntgendoppelsterne kataklysmische Veränderliche (engl. *cataclysmic variables*, **CVs**). Da die Strahlungsemission mit der gravitativen Energie des kompakten Objekts skaliert und Weiße Zwerge weniger kompakt sind als Neutronensterne und diese wiederum weniger kompakt als Schwarze Löcher, ist die kontinuierliche Röntgenemission kataklysmischer Veränderlicher eher unterdrückt. Es kann allerdings heftige Ausbrüche geben, also intensive Röntgenstrahlung auf kurzen Zeitskalen (Röntgenbursts). Sie ereignen sich dann, wenn akkretierte Materie auf der Oberfläche des Zwergs 'niederregnet'. Wenn der Weiße Zwerg eine kritische Masse angesammelt hat, die so genannte Chandrasekhar-Masse von etwa 1.46 Sonnenmassen, explodiert das System in einer charakteristischen Supernova vom Typ Ia. Diese besonders hellen Ausbrüche nutzen Astronomen als Standardkerzen zur **Eichung** von Helligkeiten, zur **Entfernungsbestimmung** und zur **Messung kosmologischer Parameter**, die Zustand und Dynamik des Universums festlegen.

19.27.4 Wer pustet da?

Die HMXBs haben also einen massereichen Donatorstern der starke Winde auf das kompakte Objekt bläst. Aus diesem Grund kann der Abstand der Doppelsternkomponenten größer sein, als bei den LMXBs (vergleiche Wind-Akkretion). Der Teilchenwind kann durch die Absorption von UV-Photonen getrieben werden, die von der kompakten Quelle, beispielsweise der Akkretionsscheibe, stammen (engl. *line driven wind*). Dies funktioniert nur, wenn der Wind nicht allzu hoch ionisiert ist. Andernfalls ist der Wind nämlich transparent für UV-Photonen und Röntgenstrahlung könnte den Wind heizen. Die hochenergetische Röntgenstrahlung kann z. B. von einer 'Blase' sehr heißen Plasmas, der Korona, emittiert werden. Koronen bilden sich in Verbindung mit dem Akkretionsfluss aus und fluktuieren sowohl zeitlich, als auch räumlich.

19.27.5 HMXBs magnetischer als LMXBs

Die Magnetfelder der HMXBs scheinen stärker ausgeprägt zu sein, als bei den LMXBs. Dieser Sachverhalt könnte auf effizientere Dynamos schnell rotierender kompakter Objekte zurückgeführt werden. Durch gravitomagnetische Prozesse wie dem Lense-Thirring-Effekt kann eine rotierende Raumzeit Magnetfeldlinien, die im Akkretionsfluss 'eingefroren' sind, mitschleppen. Dadurch werden die Feldlinien verdrillt, 'aufgezogen' und damit verstärkt. Besonders effizient ist solch ein Dynamo bei schnell rotierenden Schwarzen Löchern, die durch die Kerr-Lösung mathematisch beschrieben werden.

Der Lense-Thirring-Effekt hat noch einen anderen interessanten Aspekt, der für Röntgendoppelsterne eine Rolle spielt: Die gravitomagnetischen Kräfte können auf die Akkretionsscheibe einwirken. Dies führt zu einer kreiselartigen Torkelbewegung (*Lense-Thirring-Präzession*), die mit einer charakteristischen Frequenz assoziiert ist. Sie heißt **Lense-Thirring-Frequenz** und wird mit einer der beobachteten Frequenzen von Quasi-periodische Oszillationen (QPOs) in Verbindung gebracht.

19.27.6 wunderbare Mira

Kürzlich, Ende April 2005, gelang den Röntgenastronomen ein wunderbares Foto, das die Vorstellung des Materialüberflusses in engen Röntgendoppelsternen beeindruckend untermauerte. Die Abbildung 19.16 zeigt die Beobachtung des veränderlichen Sterns Mira, die mit dem Röntgensatellit Chandra

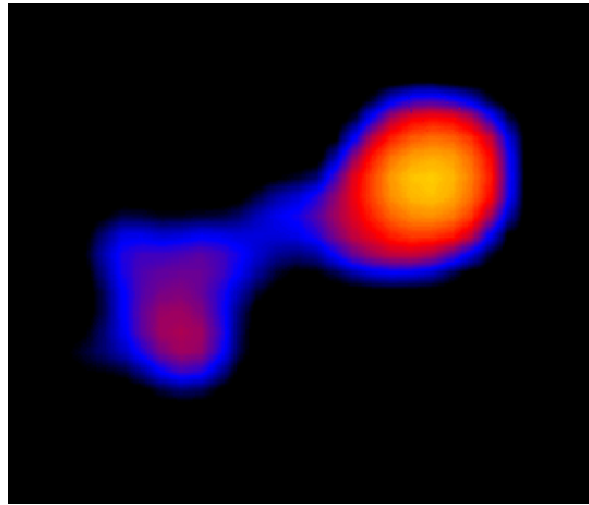


Abbildung 19.16: Röntgendoppelstern Mira A und Mira B im Röntgenlicht.

gemacht wurde (Credit: NASA/CXC/SAO/M. Karovska *et al.*, 2005; ePrint Publikation unter [astro-ph/0503050](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503050)). Die Astronomen beobachteten in diesem Doppelsternsystem im Sternbild *Cetus* (dt. *Walfisch*) einen Röntgenausbruch, der in der Fachwelt *soft X-ray transient*, also ein vorübergehender Ausbruch im Bereich weicher Röntgenstrahlung, genannt wird. Man sieht hier den klassischen Fall, wie ein Riese einen Zwerg füttert: Rechts im Bild sieht man den Roten Riesen *Mira A*, präzise gesagt handelt es sich um einen AGB-Stern. Dieser Sternengigant hat den 600fachen Sonnenradius; säße er anstelle der Sonne in unserem Sonnensystem, würde seine Oberfläche zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter liegen. Links befindet sich - versteckt in einer heißen 'Gaswolke' - die kompakte Komponente, *Mira B* (*VZ Ceti*), die ein Weißer Zwerg ist. Der Abstand der beiden Sterne beträgt nur rund 70 Astronomische Einheiten (entsprechend 0.6 Bogensekunden), so dass auf den Zwerg Materie des Riesen überfließen kann. Im 420 Lichtjahre entfernten Doppelsternsystem Mira AB findet der Materieüberfluss durch **Windakkretion** statt und ähnelt damit eher den symbiotischen Sternen. Zwar entsteht der Eindruck, dass hier rechts das deformierte Roche-Volumen abgebildet wäre, doch ist das nur die durch den Sternenwind nicht kugelförmige Helligkeitsverteilung des Riesen. *Mira A* verliert durch den Sternenwind 10^{-7} Sonnenmassen pro Jahr (*Bowers & Knapp*, 1988). Das Verblüffende an diesem Bild ist neben der hohen räumlichen Auflösung des Systems, dass erstmal ein einzelner AGB-Stern als starke Röntgenquelle in Erscheinung getreten ist. Der Röntgenausbruch wird nun damit erklärt, dass eine große Materiemenge aus der Sternoberfläche geschossen wurde. Dieser Vorgang ist durchaus mit den magnetohydrodynamisch getriebenen Sonnenflares vergleichbar: Die Magnetfeldlinien in der Umgebung der Sternoberfläche vernichten sich gegenseitig durch magnetische **Rekonnexion**. Somit wird magnetische Energie in kinetische Energie des Plasmas umgewandelt und treibt einen Materieauswurf aus der Sternoberfläche an.

Durch Massenauswurf-Ereignisse (engl. *mass ejection events*) erhöht sich auch kurzzeitig die Akkretionsrate auf den Weißen Zwerg. So trägt auch der Akkretionsfluss zum Ausbruch bei, falls die plötzliche 'Überfütterung des Zwergs' für Strahlungsausbrüche in der Gasscheibe sorgt oder ein jet-artiger Auswurf beim Zwerg angeregt wird. Doch Zwerge vertragen nicht soviel Futter: Sollte *Mira B* zuviel Material anhäufen und die Chandrasekhar-Masse überschritten werden, könnte dem Riesen *Mira A* die gut gemeinte Fütterung die Existenz kosten. Denn dann explodiert der Weiße Zwerg in einer Supernova Typ Ia und zerstört das Doppelsternsystem. Merke: Unterschätze nie David, Goliath!

19.27.7 Anmerkung: Mira-Veränderliche

Mira A ist der Prototyp der so genannten **Mira-Veränderlichen** (Mira-Sterne, kurz *Miras*). Sie sind regelmäßige Pulsationsveränderliche mit langen Perioden von hundert bis zu tausend Tagen. Miras Periode beträgt etwa 330 Tage und kann mit dem bloßen Auge verfolgt werden. Die periodisch Helligkeitsschwankung ist das 'Wunderbare' an Mira und gab ihm im 17. Jahrhundert seinen lateinischen Namen.

19.27.8 Weitere Informationen

- ◇ Web-Artikel: Akkretionsflüsse um rotierende Schwarze Löcher
- ◇ externer Web-Artikel: Aktive Schwarze Löcher: Ultraheiße Leuchtfeuer im All von *Andreas Müller*, auf Einstein online (AEI Golm)

19.28 Roter Riese

Rote Riesen sind große, leuchtkräftige, aber relativ kühle Sterne.

19.28.1 Ort im HRD

Als Konsequenz dieser Eigenschaften findet man Rote Riesen im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) der Sterne rechts oben. Die Rote-Riesen-Phase setzt bei einem Stern dann ein, wenn die thermonuklearen Fusionsprozesse so weit fortgeschritten sind, dass das **Wasserstoff-Schalenbrennen** einsetzt. D.h. die Wasserstofffusion findet nicht mehr im heißen Zentrum des Sterns, sondern in seinen Randzonen, nahe der Sternoberfläche statt. Das Umschalten auf Schalenbrennen bläht den Stern auf ein Vielfaches seines ursprünglichen Volumens auf - das erklärt den Begriffsbestandteil 'Riese'. Weil die Leuchtkraft dabei aber nahezu konstant bleibt, kühlt sich seine Oberfläche ab (siehe erste Gleichung unter Effektivtemperatur): Gemäß den Gesetzen der thermischen Strahler (*Planck-Gesetz*, Plancksche Strahlungsformel) erscheint der Stern somit röter - das erklärt ersten Begriffsbestandteil 'Rot'.

19.28.2 windige Typen!

Das Stadium des Roten Riesen ist verbunden mit kräftigen **stellaren Winden**, also Teilchen, die von der Sternoberfläche abgeblasen werden. Im 'Zwiebelschalenmodell' der Sterne findet man im Außenbereich massereicher Sterne die Massenschalen der leichtesten Elemente, also Wasserstoff und Helium. Besonders diese Elemente werden vom Sternenwind in den interstellaren Raum gepustet.

19.28.3 Ende des Roten Riesen: Weißer Zwerg und Planetarischer Nebel

Die Innenbereiche des Sterns können am Ende der Rote-Riesen-Phase dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten (vergleiche hydrostatisches Gleichgewicht). Deshalb fällt das Sterninnere im Gravitationskollaps in sich zusammen, bis der Entartungsdruck der Elektronen den Kollapsar wieder stabilisieren kann: ein **Weißer Zwerg** ist entstanden. Diese erdgroßen, etwa sonnenschweren Sterne sind stabil bis zur so genannten Chandrasekhar-Grenze. Während das Innere zum Zwerg kollabiert, erscheinen die abgeblasenen Sternhüllen nun als farbenprächtiger **Planetarischer Nebel**.

Zum Vergleich: Ganz anders verläuft die Entwicklung massereicher Sterne mit mehr als etwa acht Sonnenmassen. Sie durchlaufen *keine* Rote-Riesen-Phase, sondern sind Blaue oder Blauweiße Riesen, die am Ende ihres vergleichsweise kurzen Sternenlebens in einer gigantischen Sternenexplosion, einer Supernova (Typ II) oder sogar einer Hypernova, enden. Was dann vom Riesenstern bleibt ist ein Supernovaremnant, in dem ein kompaktes Sternrelikt sein Dasein fristet. Diese Relikte sind je nach kollabierender Masse Neutronensterne oder stellare Schwarze Löcher. Die Brennprozesse des Sterns

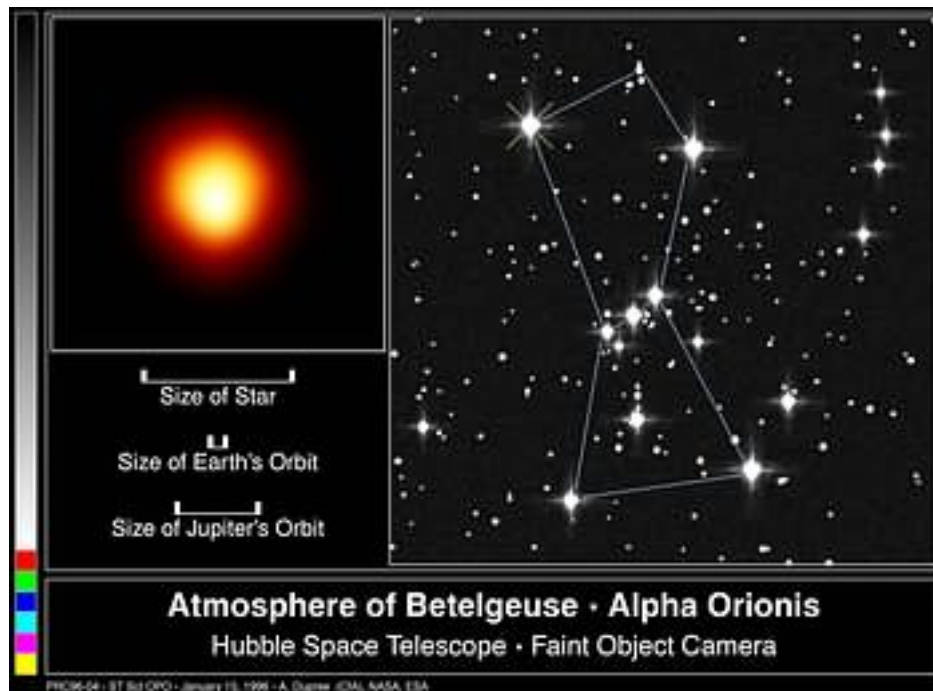


Abbildung 19.17: Beteigeuze - Orions rote Schulter.

sind dann zum Erliegen gekommen. Neutronensterne oder Schwarze Löcher stehen also *nicht* am Ende der Entwicklung von Roten Riesen.

19.28.4 Beispiel: Beteigeuze

Noch heller und größer als die Riesen sind die Überriesen, wie bei den Yerkes-Leuchtkraftklassen näher ausgeführt wird. Die Abbildung 19.17 zeigt ein bekanntes Musterbeispiel für einen Roten Überriesen: *Beteigeuze* (auch: Betelgeuse) der Hauptstern (*Alpha Orionis*) im Wintersternbild *Orion*. Schon mit bloßem Auge erkennt man deutlich den hellen, roten Stern, der sich in einem Abstand von 427 Lichtjahren zur Erde befindet. Die Abbildung zeigt eine Beobachtung im ultravioletten Licht des Weltraumteleskops Hubble (Credit: STScI/NASA/ESA, *Dupree & Gilliland*, März 1995). Beteigeuze ähnelt durchaus in Entfernung und Sterngröße Mira A, der im Eintrag Röntgendoppelstern genau beschrieben wird. Beide Riesen sind Pulsationsveränderliche, d. h. ihre Sternoberflächen schwingen um einen mittleren Sternradius und sorgen so für eine periodische Helligkeitsvariation.

19.28.5 Beispiel: Sonne

Auch die Sonne wird in etwa 6.5 Mrd. Jahren zum Roten Riesen werden. Diese Verwandlung geschieht, weil der Wasserstoffvorrat im Zentrum der Sonne nach Ablauf dieser Zeit zur Neige gehen wird. Die Sonne hat dann einen Heliumkern und geht schließlich über zum Wasserstoffbrennen in den Sternschalen (*Schalenbrennen*). Betrachtet man das im HRD, so verlässt die Sonne in dieser Phase die Hauptreihe: Sie macht sich auf in das Gebiet der Riesen. Der Übergang zum Riesen dauert vom Zünden des Schalenbrennens an einige hundert Millionen Jahre. Weil der Sternkern sich weiter verdichtet hat, steigt die Zentraltemperatur auf 100 Mio. Kelvin: Dann setzt zentrales Heliumbrennen (Triple-Alpha-Prozess) ein. Die nächste, neue Brennphase setzt ein, sobald auch das Helium im Kern aufgebraucht ist: dann verlagert sich das Heliumbrennen ebenfalls in die Sternschalen und im Kern brennt Kohlenstoff.

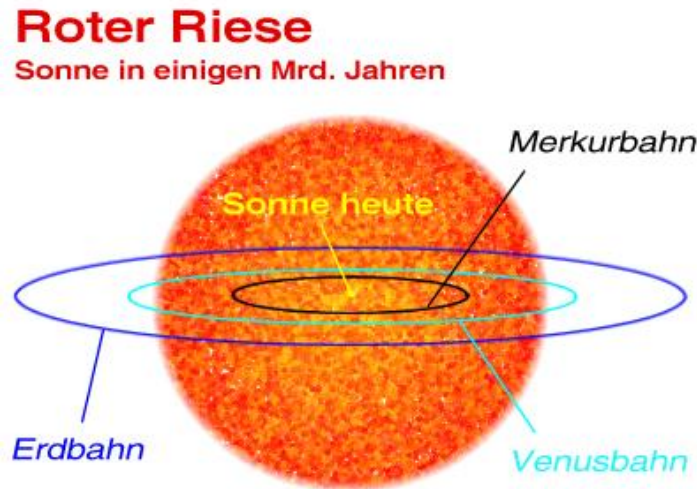


Abbildung 19.18: Sonne wird zum Roten Riesen und innere Planeten verschlingen.

Die Sonne bläht sich infolge des Schalenbrennens um etwa das Hundertfache auf. Sie verändert dabei auch ihr Erscheinungsbild: als Riesenstern wird die Sonne das 10000fache ihrer jetzigen Leuchtkraft aufweisen und sie wird rot erscheinen, weil sich ihre Effektivtemperatur absenkt - das wird auch ihren Spektraltyp ändern. Durch den kräftigen Sonnenwind wird die Sonne **fast die Hälfte ihrer Masse** an die Umgebung abgeben. Aufgrund des enormen Aufblähens kühlen sich die Sternhüllen des Riesen ab und werden ausgedünnt - das stoppt schließlich das Schalenbrennen wieder. Die Ausdehnung der Sonne zum Riesen hat auch entscheidende Konsequenzen für das innere Sonnensystem, weil dann die inneren Planeten Merkur und Venus von der Sonne verschlungen werden (siehe maßstabsgerechte Abbildung 19.18). Auf der Erde wird die Temperatur lebensfeindlich anschwellen: das Ende des irdischen Lebens ist in diesem Szenario der **Wärmetod!** Danach wird der innere Teil der Sonne zu einem etwa erdgroßen Weißen Zwerg in sich zusammenfallen. Das Schicksal der Sonne teilen mehr als **90% der Sterne** - nämlich alle Sterne mit **Anfangsmassen von weniger als 8 Sonnenmassen**.

19.28.6 Neue Erkenntnisse über das Innere Roter Riesen

Die Bezeichnung Zwei-Schalen-Brennen kann zu Missverständnissen führen, denn das Brennen in den Schalen findet *nicht* zur gleichen Zeit, sondern abwechselnd statt. In einem Zyklus von etwa 10000 Jahren zündet das Heliumbrennen in der inneren Schale. In der Zone zwischen den Schalen kommt es durch die Konvektionsströme zu Durchmischungen des Sternplasmas - die Durchmischung an der Grenzschichten geschieht auch durch Instabilitäten der Hydrodynamik, z. B. der *Kelvin-Helmholtz-Instabilität* (die jeder Kaffeetrinker schon gesehen hat, der seinen Kaffee mit Milch genießt). Durch die Mischungsprozesse gelangt Material aus dem Sterninnern an die Oberfläche des Roten Riesen und ist damit spektroskopisch beobachtbar, weil es dann aus der Photosphäre kommt.

Im Sterninnern läuft der s-Prozess ab, der durch nachfolgende Beta-Zerfälle die schweren Elemente im Roten Riesen erzeugt. Wenn Wasserstoff- und Heliumbrennen (durch die oben beschriebene Ausdünnung des Riesen) aufhören, verliert der Riese einerseits seine äußeren Hüllen und kollabiert andererseits zum Weißen Zwerg. Das hätte das Ende gewesen sein können, doch etwa **10% der Weißen Zwerge gelingt die Rückkehr** ins pralle Sternenleben: Sie werfen das Heliumschalenbrennen im so genannten *späten Helium-Schalen-Flash* an. Im HRD bewegt sich der Weiße Zwerg von unten wieder zurück ins Riesengebiet. Der späte Helium-Flash hat im wahrsten Sinne umwälzende Folgen für den Stern, denn die neue Energiequelle durchmischt die Schalen durch Konvektion. Wenn auch diese

Brennphase des Heliums endet, bewegt sich der wiedergeborene Rote Riese im HRD wieder zurück zu den Weißen Zwergen. In dieser Übergangsphase sprechen Astronomen von **PG1159-Sternen**. Das sind die Nachfolger der AGB-Phase und gewissermaßen 'umgestülpte, ehemalige Rote Riesen'. Diese gut durchmischten Sterne erlauben den Sternforschern einen nachträglichen Blick in das Innere von Rote Riesen. Die Astronomen müssen nur die Spektren der PG1159-Sterne betrachten und die Zusammensetzung und Elementhäufigkeiten analysieren. Das ist tatsächlich möglich und erlaubt die verborgenen, inneren Prozessen in Roten Riesen *im Nachhinein* - wenn der Riese gar nicht mehr existiert - zu verstehen. Daraus erhalten die Astronomen Kenntnisse über den Ursprung der schweren Elemente und ihre genaue Häufigkeitsverteilung.

PG1159-Sterne sind seltene, sehr heiße, wasserstoffarme Post-AGB-Sterne ('Prä-Weiße-Zwerge'). Die Effektivtemperaturen der PG1159-Sterne sind mit 75000 bis 200000 Kelvin extrem hoch (typisch 140000 K). Die Sternatmosphäre ist so stark ionisiert, dass die Spektrallinien typischerweise im Ultravioletten liegen. Eine astronomische Beobachtung erfordert deshalb weltraumgestützte UV-Astronomie, die mit den US-amerikanischen Weltraumteleskopen Hubble und FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*) möglich ist (*Jahn et al.* 2007). Die Spektroskopierung der PG1159-Sterne verrät die Häufigkeiten der schweren Elemente, die der Rote Riese zuvor im Innern produziert hat. Dabei haben die Astronomen eine Überraschung erlebt: Das Sternplasma der ehemals Roten Riesen, das an die Oberfläche des PG1159-Sterns 'gespült' wurde, weist einen unerwartet **hohen Kohlenstoffanteil** auf. Das ist nur dadurch erklärbar, dass die Konvektionsströme deutlich effektiver sind, als bislang angenommen. Das sorgt für fast gleiche Häufigkeiten von Helium und Kohlenstoff. Die Vielzahl der Kohlenstoffkerne gehen kernphysikalische Reaktionen mit den Protonen ein und produzieren dabei viele Neutronen. Die Neutronen wiederum gehen in den s-Prozess ein. Im Innern des Sterns finden auch Reaktionen statt, in denen sich Heliumatomkerne an verschiedene andere Atomkerne anlagern. Dabei synthetisieren neue, schwerere Elemente. Z.B. entsteht so Stickstoff (N-14) Fluor (F-18) und aus Sauerstoff (O-18) wird Neon (Ne-22). So resultieren auch höhere Häufigkeiten der Elemente Fluor und Neon (*Werner et al.* 2005). Der astronomische Nachweis von Neon hat das Wiedergeburtsszenario Roter Riesen bestätigt.

19.28.7 Literaturhinweis

- ◇ *Werner, K. & Rauch, T.*: Die Wiedergeburt der Roten Riesen; Sterne und Weltraum, Februar 2007

19.29 Roter Zwerg

Rote Zwerge sind leuchtschwache Sterne der Spektralklasse K und M, die sehr zahlreich im Universum sind. Die Sonne ist an sich ein **Gelber Zwerg**. Rote Zwerge haben noch kleinere Oberflächentemperaturen (siehe auch Effektivtemperatur) und eine noch geringere Leuchtkraft. In der Sonnenumgebung sind etwa 80% aller Sterne Rote Zwerge.

19.30 Rotverschiebung

Generell meint dieser Begriff eine Verschiebung von Spektrallinien (oder spektralen Komponenten) zum roten Ende des Spektrums hin.

19.30.1 kosmologische Rotverschiebung

Im Speziellen meint dieser Begriff eine wichtige astrophysikalische Größe der Kosmologie: die **kosmologische Rotverschiebung** z (engl. *redshift*). Sie ersetzt oft die **Angabe von Entfernungen**, weil z einfacher zu bestimmen ist, als die tatsächliche Entfernung des kosmologischen Objekts (in der Regel eine Galaxie). Die Entfernung folgt erst mit dem Hubble-Gesetz oder (bei größeren Distanzen)

mit einem kosmologischen Modell, wie beispielsweise den Friedmann-Weltmodellen. Je größer die Rotverschiebung, umso größer die Entfernung des Objekts.

Die kosmologische Rotverschiebung ist auch ein Maß für das **Alter** eines kosmischen Objekts: Je größer die Rotverschiebung, umso früher war das Objekt bereits im Kosmos vorhanden. Das liegt daran, weil der Blick an den Himmel im Prinzip ein Blick in die Vergangenheit ist: Das Licht, oder allgemeiner gesprochen die Strahlung, der Himmelsobjekte benötigt eine gewisse Zeit, bis sie auf der Erde ankommt, weil die Vakuumlichtgeschwindigkeit *endlich* ist.

19.30.2 Definition

Beobachtet man die Emission einer Quelle bei einer bestimmten Wellenlänge, so definiert man ganz allgemein die Rotverschiebung als Quotient der Differenz zwischen der Wellenlänge im Beobachtersystem (Index *obs*) und derjenigen im Emittersystem (Index *em*) über der Wellenlänge im Emittersystem

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}}.$$

19.30.3 Hubble-Gesetz

Edwin Hubble konnte 1929 nachweisen, dass viele entfernte Galaxien eine Fluchtbewegung ausführen: Sie bewegen sich von uns weg. Es waren zwar nur 18 Galaxien, die Hubble untersuchte, doch mit wachsender Zahl hat sich dieses Ergebnis bestätigt. Dieser Zusammenhang ging als Hubble-Effekt in die Kosmographie ein. Das Hubble-Gesetz zeigt einen *linearen Zusammenhang* zwischen Rotverschiebung z und Distanz D mit einer Proportionalitätskonstante, der Hubble-Konstanten H_0 . Die Linearität hat jedoch nur im nahen Universum ihre Gültigkeit, nämlich bis zu einem maximalen Abstand von gut 400 Mpc oder z kleiner als 0.1. Für weiter entfernte Objekte bricht die Linearität zusammen. Allgemeiner handelt es sich bei $H(z)$ (ohne Index 0!) um den **Hubble-Parameter**, der *zeitabhängig* ist.

19.30.4 Beispiel: Quasar 3C 273

Der hellste Quasar mit der Bezeichnung 3C 273 hat beispielsweise eine kosmologische Rotverschiebung von $z = 0.158$. Er ist zwar knapp oberhalb des Gültigkeitsrahmens des Hubble-Gesetzes, bemüht man es dennoch, so resultiert eine Entfernung von 658 Mpc oder 2.14 Mrd. Lichtjahren. Das ist nicht nur für den irdischen Laien, sondern auch für kosmologische Maßstäbe eine enorme Distanz. Die Strahlung, die uns heute von 3C 273 erreicht, wurde dort ausgesandt, als die Erde etwa halb so alt war, als heute.

19.30.5 Der Grund: der Kosmos dehnt sich aus!

Ursache für die kosmologische Rotverschiebung ist die **kosmische Expansion des Universums**. Der Kosmos als Ganzes lässt sich in der relativistischen Kosmologie als eine Raumzeit beschreiben. Die Dynamik dieser vierdimensionalen Mannigfaltigkeit unterliegt den Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie, den tensoriellen Einsteinschen Feldgleichungen.

In den Anfängen der relativistischen Kosmologie wurden materiefreie Universen gefunden, die **de-Sitter-Räume**. Natürlich ist dieses Universum *nicht* in der Natur realisiert, weil das beobachtete Universum mit Materie oder allgemein gesprochen Energie angefüllt ist. Die materiegefüllten Universen wurden später entwickelt. Vor allem die **Robertson-Walker Räume** (*H.P. Robertson* 1935, *A.G. Walker* 1936) sind bis heute von außerordentlicher Wichtigkeit. Sie bilden die raumzeitliche Basis (das Linienelement) für die Friedmann-Weltmodelle, die aus der Anwendung dieser Robertson-Walker-Metrik auf die Feldgleichungen resultieren.

19.30.6 Es gibt viele Rotverschiebungen!

Die beobachtete Rotverschiebung einer Quelle setzt sich aus verschiedenen Effekten zusammen. Der kosmologische Beitrag ist der bereits diskutierte aufgrund der Expansion der Raumzeit des

Universums. Daneben gibt es Beiträge, die auf **lokalen Effekten** beruhen, wie beispielsweise einer Bewegung. Erklärt wird diese Verschiebung im Spektrum durch den **Doppler-Effekt**, der vor allem bei akustischen Wellen bekannt ist. Bei elektromagnetischen Wellen verhält es sich genauso: Dadurch dass sich der Emittent in Bezug zum Beobachter entlang der Sichtlinie bewegt, kommt es im Falle einer Bewegung vom Beobachter weg zu einer 'Dehnung' der elektromagnetischen Wellen, dies entspricht der Rotverschiebung. Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter zu, werden die Wellenzüge 'gestaucht' und es gibt eine Blauverschiebung. Das Ausmaß der Verschiebung hängt von der Größe der **Radialgeschwindigkeit** ab, also der entlang der Sichtlinie projizierten Geschwindigkeitskomponente. Es handelt sich um einen rein kinematischen, klassischen Effekt. Die nahe Andromedagalaxie (M31, NGC 224), die sich mit der Milchstraße in der Lokalen Gruppe befindet, bewegt sich auf die Milchstraße zu und ist blauverschoben.

Vorsicht Interpretationsfalle: Es ist ganz wichtig, dass der kinematische Doppler-Effekt nicht mit der kosmologischen Rotverschiebung durcheinander gebracht wird! In vielen Büchern findet man, dass die kosmologische Rotverschiebung z in die Doppler-Formel eingesetzt wird. Die Resultate sind jedoch von fragwürdigem Wert: eine Galaxie mit $z = 2$ bewegte sich dann mit 80% der Lichtgeschwindigkeit von uns weg! Der Entfernungsrekordhalter Abell 1835 IR 1916 mit $z = 10$ hätte eine Geschwindigkeit von etwa 97% der Lichtgeschwindigkeit. Diese Berechnungen machen keinen Sinn. Vielmehr muss man die kosmologische Rotverschiebung als dynamische, expandierende Raumzeit deuten: Die entfernten Galaxien 'schwimmen' mit der sich ausdehnenden Raumzeit mit. Man spricht manchmal auch vom *Hubblefluss* (engl. *Hubble flow*). Es ist eine **dynamische Raumzeit des Kosmos**, die expandiert, und alles im Kosmos muss dieser Dynamik folgen.

Ein weiterer Beitrag zur beobachteten Rotverschiebung ist die **Gravitationsrotverschiebung**. Hier müssen die Lichtteilchen gegen ein Gravitationsfeld Arbeit verrichten, um ihm zu entkommen und verlieren dabei Energie. Deshalb werden sie zum roten Ende des Spektrums verschoben. So werden beispielsweise aus Röntgenphotonen optische Photonen oder aus ultravioletten Photonen werden Radiophotonen. Vor allem bei den starken Gravitationsfeldern Schwarzer Löcher oder bei Strahlung in der Nähe von schweren Gravitationslinsen ist dieser Prozess relevant. Dieser Effekt ist mit der Allgemeinen Relativitätstheorie zu begründen. Der Emissionsort muss allerdings recht nahe am schweren, gravitierenden Objekt sein.

Die Rotverschiebung einer Quelle zerfällt demnach allgemein in die drei oben geschilderten Anteile: kosmologische, Doppler- und gravitative Rotverschiebung

$$z_{\text{tot}} = z_{\text{cosmo}} + z_{\text{Doppler}} + z_{\text{grav}}.$$

Den größten Anteil bei **weit entfernten**, kosmischen Quellen macht die kosmologische Rotverschiebung: die Strahlung wird fast ausschließlich durch den ausdehnenden Kosmos zum roten Ende des Spektrums hin verschoben. Die anderen Beiträge - Dopplerbewegung oder Gravitationsrotverschiebung - kann man in der Regel vergessen: Die Gravitationsrotverschiebung ist so klein, dass sie meist vernachlässigt wird. Der Anteil durch den Doppler-Effekt, der letztendlich auf eine **Pekuliarbewegung** (Eigenbewegung) zurückzuführen ist, macht bei einer (recht hohen) Radialgeschwindigkeit von 1500 km/s nur einen Anteil von $z_{\text{Doppler}} = 0.005$ aus. Deshalb vernachlässigt man diese geringeren Beiträge und den Index *cosmo* und schreibt in der Regel nur z .

Diese Verschiebung ist umso höher, je weiter die Quelle entfernt ist (vgl. Hubble-Gesetz). In Ermangelung zuverlässiger Methoden zur Bestimmung der Entfernung, löst daher die Rotverschiebung den Entfernungsparameter ab, weil diese Größe durch gemessene Spektren den Astronomen leichter zugänglich ist. Die Entfernung folgt dann erst aus einem kosmologischen Modell, die in den letzten Jahrzehnten häufigen 'Modetrends' unterlagen. Mittlerweile ist der Satz an kosmologischen Parametern (Hubble-Konstante und Dichteparameter 'Omegas', Ω etc.) gut bekannt. Wie in der Teilchenphysik spricht man nun von einem **Standardmodell der Kosmologie**.

19.30.7 Blauverschiebung & Rotverschiebungsfaktor

Wenn man von Rotverschiebung spricht, darf man den komplementären Begriff der Blauverschiebung nicht verschweigen: Hier findet eine Verschiebung zum anderen, kurzwelligeren oder hochenergetischen

Ende des Spektrums hin statt. Die oben dargestellte Gleichung der Rotverschiebung z zeigt, dass sie gerade der Kehrwert des Rotverschiebungsfaktors (g-Faktor) g minus 1 ist. Der Faktor $z + 1$ ist (falls z die kosmologische Rotverschiebung meint) gerade ein **Maß für die Ausdehnung des Universums**: ein Objekt bei $z = 1$ befindet sich in einem Universum, das gerade halb so groß war, wie das heutige, lokale Universum bei $z = 0$; ein Objekt bei $z = 2$ ist in einem Universum, das nur ein Drittel so groß ist, wie unser lokales Universum etc.

19.30.8 Problem mit Energieerhaltung? Nein!

Rot- und Blauverschiebungen bergen ein weiteres Verständnisproblem: Wo bleibt die Strahlungsenergie, wenn z. B. das stark rotverschobene Photon einer entfernten Galaxie auf der Erde ankommt? Keine Sorge, der **Energieerhaltungssatz** wird *nicht* verletzt. Man darf eben nur die Energie im Bezugssystem Galaxie mit derjenigen im Bezugssystem Erde vergleichen, wenn man auch berücksichtigt, dass das Universum zum Zeitpunkt der Emission des Photons in der Galaxie ein *anderes* Universum war, als zum Zeitpunkt der Ankunft des Photons auf der Erde! Präzise gesagt unterscheiden sich beide Bezugssysteme im Skalenfaktor $R(t)$, auch *Weltradius* genannt. 'Rotverschobene, kosmologische Photonen' sind ähnlich zu den 'gravitationsrotverschobenen Photonen' in einem Schwerfeld zu sehen. Denn die Strahlungsenergie geht in beiden Fällen an die (dynamische bzw. gekrümmte) Raumzeit verloren. Kosmologische Rotverschiebung und Gravitationsrotverschiebung sind rein geometrische Effekte.

Es spiegelt sich jedoch auch die **Relativität des Beobachters** darin wider, denn es spielt eine Rolle, in welchem Bezugssystem dieser sitzt.

19.30.9 Die kosmische Zeit

Die kosmologische Rotverschiebung z kann sehr einfach aus Beobachtungen von Spektren abgeleitet werden. Ist man daran interessiert, wie alt das betreffende Objekt gegebener Rotverschiebung ist, benötigt man ein kosmologisches Modell. Aus der Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung wird ein Satz kosmologischer Parameter abgeleitet, der unser Universum sehr gut beschreibt. Zu diesen Parametern gehört der Anteil Dunkler Energie, der Anteil der Dunklen und der baryonischen Materie, der Hubble-Parameter und der Krümmungsparameter. Kennt man sie, so kann man einer Rotverschiebung ein Alter zuordnen, das man **kosmische Zeit** (engl. *cosmic time*) nennt. Die kosmische Zeit entspricht dem Alter des Universums seit dem Urknall. Sie kann aus den Friedmann-Gleichungen extrahiert werden und zeigt eine Abhängigkeit von den kosmologischen Parametern. Das Diagramm 19.19 zeigt die Beziehung zwischen Rotverschiebung und Alter des Universums als Graphen. Bei $z = 0$ befindet sich das lokale Universum, also unsere unmittelbare Umgebung. Eine Rotverschiebung $z = 1100$ (hier nicht zu sehen) markiert die Grenze des elektromagnetisch beobachtbaren Universums. Denn bei dieser Rotverschiebung ereignete sich die **Rekombination**. Für größere Rotverschiebungen als etwa tausend ist das Universum nicht durchsichtig (*optisch dick*), weil Strahlung das Urplasma aus Elektronen und Protonen nicht durchdringen kann. Bei der Rekombination war das Plasma kühl genug, so dass ein Elektron von je einem Proton eingefangen werden konnte. Es bildete sich neutraler Wasserstoff (HI), und das Universum wurde transparent für Strahlung (*optisch dünn*). Wie man im Diagramm unter dem Eintrag Rekombination erkennen kann, war das Universum gerade etwa 400000 Jahre alt, als es transparent wurde. Unser lokales Universum ist bereits 13.7 Milliarden Jahre alt (linker Rand des Diagramms 19.19).

19.30.10 Meilensteine der Kosmologie

Die **Entfernungsangaben** von weit entfernten, astronomischen Objekten enthalten große Unsicherheiten. Deshalb greifen die Astronomen auf die kosmologische Rotverschiebung z zurück. Sie ist viel einfacher zu bestimmen und weniger fehleranfällig als die Entfernung. Die Astronomen messen Rotverschiebungen spektroskopisch (*spectro-z*) oder photometrisch (*photo-z*). Hier ein paar Meilensteine der Kosmologie:

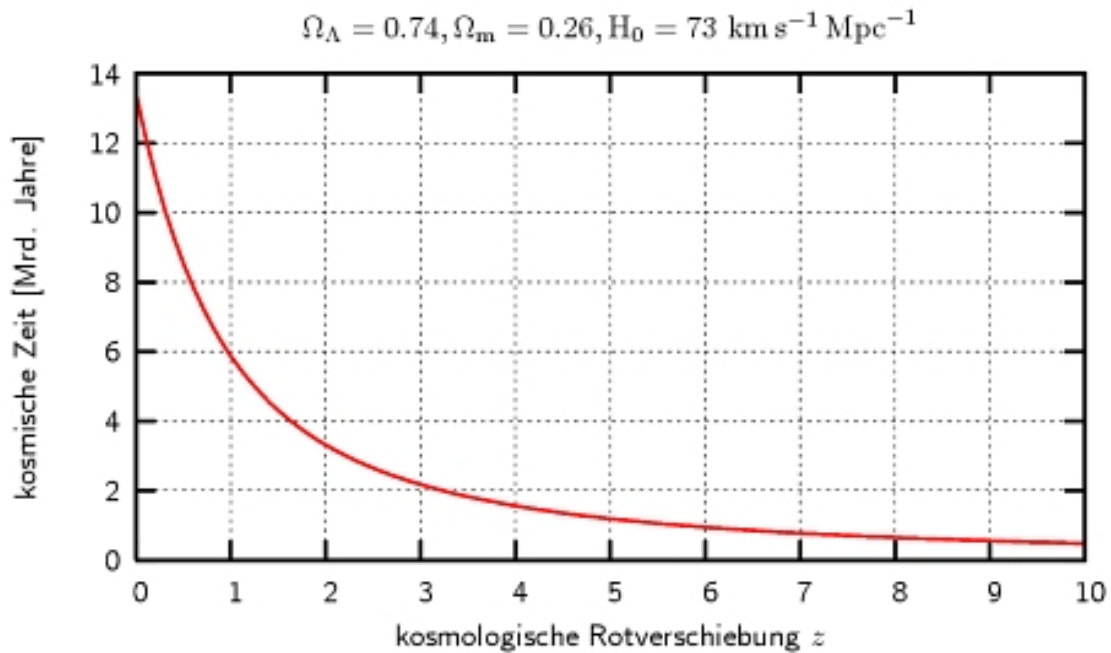


Abbildung 19.19: Beziehung zwischen kosmischer Zeit und kosmologischer Rotverschiebung bis $z = 10$.

- ◇ Bei $z = 0$ ist die unmittelbare kosmologische Nachbarschaft, das **lokale Universum**. Erst in dieser Spätphase des Kosmos bildete sich **Leben**.
- ◇ Bei $z = 1.0$ beginnt *per definitionem* die Domäne der **hochrotverschobenen** Objekte.
- ◇ Bei $z = 2.0$ bis 3.0 beobachten wir das Maximum der Häufigkeit der Quasare. Die Quasardichte war zu diesen Zeiten etwa 1000 höher, weil das Universum kleiner war und sich mehr Quasare gebildet haben.
- ◇ Bei $z = 5.0$ war das Zeitalter der **Reionisation** von Helium. Diese Epoche ist die 'Vorschau' der Reionisation von Wasserstoff (engl. '*H preview*'), weil Astronomen sie bei kleineren Distanzen beobachten.
- ◇ Bei $z = 6.0$ war das Zeitalter der Reionisation von Wasserstoff, durch intensive, hochenergetische Strahlungsquellen, die ersten Sterne (Population III). In diesem Bereich liegen sehr weit entfernte Objekte, die beobachtet wurden: *Hu et al. (2002)* fanden mit dem Keck II 10m-Teleskop hinter dem Cluster *Abell 370* eine Galaxie mit der Bezeichnung *HCM 6A*. Für sie konnte eine Rotverschiebung von $z = 6.56$ abgeleitet werden (Papier: astro-ph/0203091).

Auch die am weitesten entfernten Gammastrahlenausbrüche liegen bei $z \sim 6$.

Im Februar 2004 wurde auf ähnliche Weise eine noch weiter entfernte Galaxie mit dem Keck-Teleskop entdeckt: Die betreffende Galaxie hat eine Entfernung von $6.6 < z < 7.1$. Die schwache Strahlung wird durch eine Gravitationslinse ungefähr um einen Faktor 25 verstärkt: der räumlich vorgelagerte Galaxienhaufen Abell 2218 ($z = 0.175$) erzeugt ein Dreifachbild von der Galaxie. Zum Zeitpunkt als die Galaxie ihre Strahlung aussandte, war das Universum gemäß aktueller kosmologischer Parameter gerade mal 750 Millionen Jahre alt! Die Galaxie ist deutlich kleiner als beispielsweise die Milchstraße (Durchmesser etwa 100 000 Lichtjahre), denn sie durchmisst maximal 1.2 kpc, entsprechend etwa 4000 Lj. Die Sternbildungsrate (engl. *star formation rate*,

SFR) kann aus dem (rotverschobenen) UV-Kontinuum abgeschätzt werden. Sie ist mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, aber 2.6 Sonnenmassen pro Jahr recht hoch (Quelle: *Kneib et al.*, astro-ph/0402319).

- ◇ Bei $z = 10.0$ befindet sich der **aktuelle Entfernungsrekordhalter**, der nur zwei Wochen nach der Galaxie mit $z = 7$ entdeckt wurde. Eine Kollaboration von Astronomen aus der Schweiz, Frankreich und Kalifornien beobachtete mit der Infrarot-Kamera ISAAC (*Infrared Spectrometer And Array Camera*) des *Very Large Telescope* (VLT) in Chile eine Infrarotquelle im Galaxienhaufen Abell 1835. Diese Galaxie mit der Bezeichnung **Abell 1835 IR 1916** hat eine gigantische Rotverschiebung von $z = 10$! Die Strahlung dieser Galaxie erreicht uns aus einer Zeit, als das Universum nur etwa 480 Millionen Jahre alt war. Auch bei dieser Beobachtung half eine Gravitationslinse im Vordergrund, die zu einer Helligkeitsverstärkung um den Faktor 25 bis 100 führte. Die Gesamtmasse dieser sehr jungen Galaxie wurde zu 500 Mio. Sonnenmassen (inklusive Dunkle Materie im Halo) abgeschätzt. Mit dieser Beobachtung rückt die Profi-Astronomie immer näher an das Dunkle Zeitalter, das durch die ersten Strahlungsquellen im Universum beendet wurde (Papier: *Pello et al.* 2004, astro-ph/0403025).
- ◇ Die ersten kosmischen Strahlungsquellen bzw. die ersten elementaren Bausteine, die sich vor der Reionisationsära gebildet haben müssen, siedelt man bei Rotverschiebungen von $15 < z < 30$ an. Diese ersten Lichtquellen beendeten das **Dunkle Zeitalter** (engl. *dark ages*) der Kosmologie. Die ersten Sterne rechnet man der Population III zu. Sie waren noch relativ metallarm und setzten sich großteils aus Wasserstoff und Helium zusammen.
- ◇ Bei $z = 1100$ war die Epoche der **Rekombination**, wo sich die Strahlung von der Materie entkoppelte und das Universum durchsichtig wurde. Das ist darauf zurückzuführen, dass sich die Atome bildeten (Protonen mit Elektronen rekombinierten) und damit der Streuquerschnitt für Photonen schlagartig abnahm. Eine Beobachtung des Universums mit elektromagnetischen Wellen führt daher maximal bis in diese Epoche zurück. Die **kosmische Hintergrundstrahlung** im Bereich der Mikrowellen, wie sie die Satelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*) und WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) messen konnten, ist gerade das Relikt, das uns aus dieser Ära des jungen Universums erreicht. Mit aktuellen kosmologischen Parametern (flaches Universum, Anteile der Dunklen Energie und Materie, Wert der Hubble-Konstanten) kann einer Rotverschiebung von 1100 ein Alter des Universums von etwa 400000 Jahren zugeordnet werden. Tiefer ins All, zu noch früheren Entwicklungsphasen des Universums könnten Astronomen nur mit Gravitationswellen blicken. Bisher konnten diese Verzerrungen der Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten nicht nachgewiesen werden. Die Physiker sind jedoch davon überzeugt, dass es sie geben muss.

19.30.11 Großräumige Struktur

Mit diesen Informationen lässt sich **Kosmographie** betreiben: man erhält eine Karte von der großräumigen Struktur des Universums. Das haben Astronomen beispielsweise in dem Survey **2dF** getan. Sie nutzten das Anglo-Australien-Observatory (AAO) in Australien und bestimmten die Spektren von knapp 250000 Objekten. Zum Großteil waren das Galaxien, die alle zusammen etwa 1500 Quadratgrad Himmelsausschnitt abdecken. Das Bild 19.20 zeigt ein Resultat von 2dF, das sehr schön die großräumige Struktur im Komos zeigt. Es ist die räumliche Verteilung von Galaxien in einem fächerförmigen Ausschnitt des Himmels (Credit: 2dF Galaxy Redshift Survey, 2003). Jeder blaue Punkt ist eine Galaxie! Insgesamt zeigt dieser Ausschnitt knapp 63000 Galaxien. Im Kreuzungspunkt in der Bildmitte sitzt der irdische Beobachter. Je weiter man sich an den Fächerrand bewegt, umso höher sind Rotverschiebung und Entfernung - maximal $z \sim 0.2$. Beide Daten wurden rechts an den Achsen angegeben. Die Uhrzeit ist eine Winkelangabe der Position am Himmel. Wie man sieht, ist die Verteilung der Galaxien nicht gleichmäßig und homogen, sondern sehr unregelmäßig. Dieses Foto offenbart eine **wabenartige Struktur**, die aus einzelnen Galaxien, Galaxienhaufen und Supergalaxienhaufen an den Knotenpunkten der Waben besteht. Im Wabeninnern sind riesige

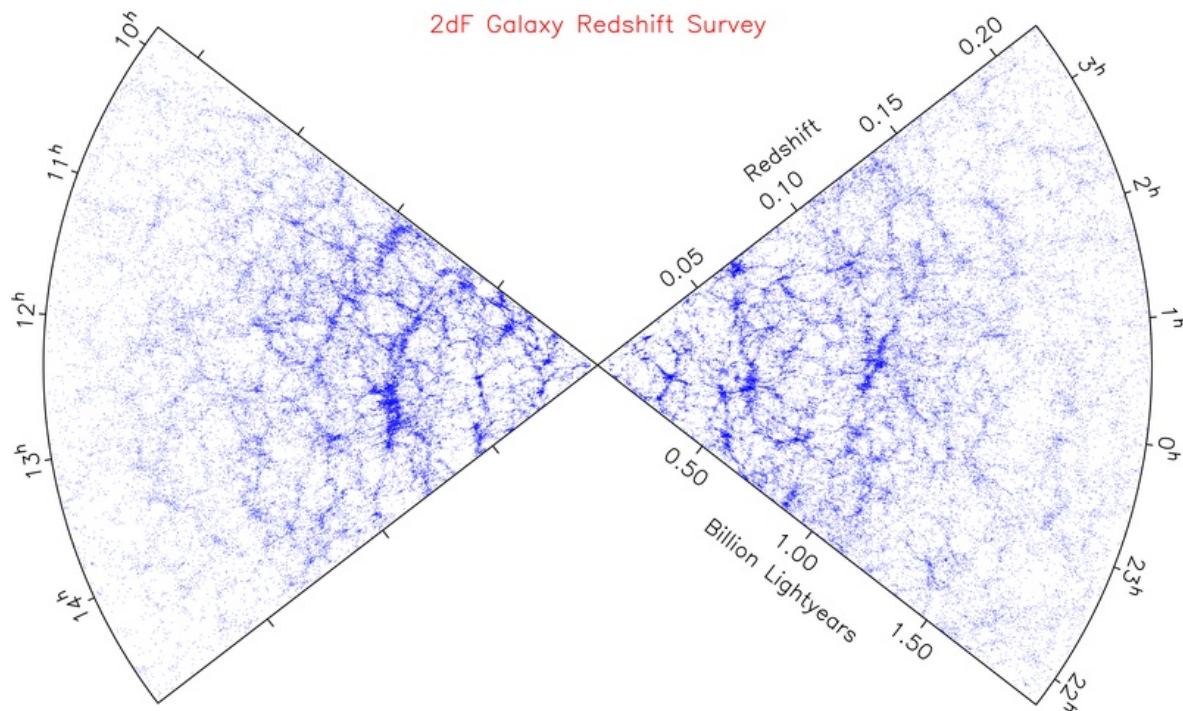


Abbildung 19.20: Galaxienverteilung beobachtet im Survey 2dF, 2003.

‘Leerräume’, die **Voids**. Die unregelmäßige Verteilung ist hauptsächlich ein Resultat der Gravitation, weil sie dafür sorgt, dass sich Massen anziehen und mit der Zeit verklumpen. Wie im Eintrag Dunkle Materie gezeigt wird, konnte kürzlich auch die (zu kleinen Rotverschiebungen hin zunehmende) Verklumpung der Dunklen Materie direkt beobachtet werden.

Das Bild zeigt auch, dass mit zunehmender Rotverschiebung immer weniger blaue Punkte zu sehen sind. Das ist im Wesentlichen ein instrumenteller Effekt und kein kosmologischer: Je weiter die Galaxie entfernt ist, umso mehr nimmt die Helligkeit ab, so dass viele Galaxien im Survey einfach nicht beobachtet werden können. Das Ziel solcher Studien ist daher, die Beobachtungstechnik so weit zu verbessern, dass die Astronomen noch tiefer in das Weltall blicken können (zu noch höheren z), so dass auch dort die großräumige Struktur studiert werden kann.

19.30.12 astronomische Messung der Rotverschiebung

Experimentell kann man sich Zugang zur wichtigen astronomischen Größe *Rotverschiebung* verschaffen, indem man Spektren detektiert (**Spektrographie**) und dort bekannte Spektrallinien identifiziert. Der Astronom *Maarten Schmidt* deutete 1963 auf diese Weise die Emissionslinien der **Quasare** als Linien besonders hoher Rotverschiebung, so dass Quasare (damals wie heute) zu den am weitesten entfernten Objekten gehören. Aufgrund der großen Entfernung sind gerade die Spektren von Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) relevant, weil sie aufgrund ihrer enormen Leuchtkraft überhaupt noch detektierbar sind. Besonders charakteristisch und leicht zu erkennen ist in diesen Objekten die **Lyman-Kante des Wasserstoffs** (*Lyman- α* , *L α*). Aufgrund der kosmischen Expansion ist diese Kante zum roten Ende hin verschoben. Vergleicht man diese beobachtete Wellenlänge mit der Laborwellenlänge, also der Wellenlänge im irdischen Labor bei $z = 0$, so liefert der Quotient gerade den Rotverschiebungsfaktor g und damit auch die Rotverschiebung z .

19.31 Rotverschiebungsfaktor

Der Rotverschiebungsfaktor g ist so definiert, dass man den Quotienten der Frequenz von Photonen im Beobachtersystem zu der im Emittersystem bildet. Im Prinzip entspricht das dem Verhältnis von der zeitlichen Komponente des Photonenimpulses im Beobachter- zu dem im Emittersystem. Der Rotverschiebungsfaktor g ist ein alternativer Parameter zur Rotverschiebung z . Wie man von einer Größe auf die andere transformiert, zeigt diese Gleichung

$$g \equiv \frac{\nu_{\text{obs}}}{\nu_{\text{em}}} = \frac{\lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{obs}}} = \frac{1}{1+z}.$$

In der Analyse von Spektren hat sich eingebürgert, den Rotverschiebungsfaktor zu verwenden, während man in der Kosmologie die Rotverschiebung verwendet, vor allem, um die Entfernung zu parametrisieren.

19.31.1 Doppler-Effekt vs. Expansion der Raumzeit

Die Rotverschiebung in einem Spektrum zwischen Ruhewellenlänge und beobachteter oder Laborwellenlänge (siehe auch Laborsystem) kann verschiedene physikalische Ursachen haben. Führt man sie auf eine Relativbewegung zurück, die den Abstand zwischen Emitter und Beobachter vergrößert, so spricht man vom **Doppler-Effekt**. Die **kosmologische Rotverschiebung** wird so interpretiert, dass sich entfernte kosmische Quellen von der Erde weg bewegen, weil sie von der expandierenden Raumzeit des Universums mitgezogen werden (vergleiche Friedmann-Weltmodell). Dennoch sollte man die Doppler-Bewegung qualitativ von einer eingebetteten Bewegung in einer expandierenden Raumzeit unterscheiden. Denn im Unterschied zu einer Bewegung im Sinne der klassischen Mechanik (mit statischem Hintergrund) ist der expandierende Kosmos ein dynamischer Bezugsrahmen. Lokal ($z \sim 0$) wird dieser kosmische, großskalige Prozess von Blauverschiebungen überlagert, weil sich nahe Galaxien, wie der Andromedanebel auf die Milchstraße zu bewegen.

19.31.2 Gravitationsrotverschiebung: Schwerkraft zieht am Licht

Die Rotverschiebung kann auch von einzelnen starken Gravitationsquellen bewirkt werden, weil sie die Raumzeit in ihrer Umgebung stark krümmen und Strahlung am Entkommen zu hindern suchen. Diese **gravitative Rotverschiebung** heißt im Allgemeinen Gravitationsrotverschiebung. Solche Effekte sind besonders interessant bei kompakten Objekten, wie Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Was die Gattung der letztgenannten Objekte betrifft, so hat *Brandon Carter* 1968 mithilfe des Hamilton-Jacobi Formalismus Ausdrücke für die Photonenimpulse im ZAMO-System für die Kerr-Metrik rotierender Schwarzer Löcher hergeleitet. Transformiert man diese ZAMO-Impulse über eine Lorentz-Transformation ins Ruhesystem der Materie, so liefert der Quotient gerade den Rotverschiebungsfaktor (g -Faktor).

19.31.3 relativistisch verallgemeinerter Dopplerfaktor g

Der so *relativistisch verallgemeinerte Dopplerfaktor* (alternativ auch **verallgemeinerter Rotverschiebungsfaktor** genannt) beinhaltet dann sämtliche relativistischen Effekte, die in der Umgebung Schwarzer Löcher eine Rolle spielen. Zu diesen Effekten zählen der **Doppler-Effekt**, (Forward- und Back-) **Beaming** sowie **Gravitationsrotverschiebung**. Sie beeinflussen die Strahlung, die nahe Schwarzer Löcher emittiert wird besonders stark. Auch das **Geschwindigkeitsfeld des emittierenden Plasmas** (Rotation, Drift, Akkretion, Ejektion, Wind) hinterlässt Spuren in der Strahlung. All das ist im relativistisch verallgemeinerten Dopplerfaktor der Kerr-Geometrie enthalten – eine Diskussion dieses speziellen Themas gibt es im Wissensportal in dem Webartikel Schwarze Löcher – Das dunkelste Geheimnis der Gravitation, Kapitel *Die Kerr-Lösung*, Abschnitt *Der g -Faktor – all inclusive* und in dem Papier *Relativistic emission lines from accreting black holes – The effect of disk truncation on line profiles* von A. Müller & M. Camenzind, erschienen in A&A 413, 861, 2004.

19.31.4 Kosmologie

Die **kosmologische Rotverschiebung** z kann aus Spektren astrophysikalischer Objekte bestimmt werden, indem man die beobachtete Wellenlänge oder Frequenz mit der des Ruhesystems ins Verhältnis setzt. In der Analyse vergleicht man charakteristische Spektrallinien oder spektrale Komponenten (z. B. Lyman-Alpha-Kante) im Ruhesystem und im Beobachtungssystem. Die Rotverschiebung z ist aufgrund des Hubble-Effekts ein **Maß für die Entfernung** der Objekte: je weiter sie entfernt sind, umso höher ist z . Dies ist das Hubble-Gesetz mit einer Proportionalitätskonstante, der **Hubble-Konstante** (sprachlich besser: **Hubble-Parameter**, da sie *nicht zeitlich konstant* ist über große Zeiträume). Bei bekannten kosmologischen Parametern (Hubble-Parameter, Materieinhalt des Universums, Dunkle Materie, Dunkle Energie bzw. kosmologische Konstante) erhält man einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Rotverschiebung z und Entfernung. Da diese Parameter einer 'gewissen Mode' bzw. Streubreite unterlagen und mit vielen Publikationen und Beobachtungen über die Jahre wechselten, gibt man mittlerweile oft nur z als Entfernungsindikator an. Den **Entfernungsrekord** hält zurzeit eine Galaxie bei $z \sim 10$. Bei diesen Entfernungen schaut man so weit in die Vergangenheit des Universums, dass man neutrale Bereiche im intergalaktischen Medium erkennt, also vor die **Epoche der Reionisation**.

Die räumliche Verteilung von z im Universum belegt bis auf lokale Blauverschiebungseffekte die **Fluchtbewegung der Galaxien**. Sie 'schwimmen' mit dem expandierenden 'Raumzeit-Strom'. Dies ist neben der kosmischen Hintergrundstrahlung (auch Drei-Kelvin-Strahlung) das schwerwiegendste Argument für den Urknall und falsifiziert alle Modelle von Statischen Universen.

19.32 r-Prozess

Der r-Prozess ist einer derjenigen Mechanismen, denen wir die Vielfalt an Elementen im Universum verdanken. Zur Klärung werden wir etwas weiter ausholen: Üblicherweise werden Elemente in der thermonuklearen Fusion im Innern von Sternen fusioniert. In der Frühphase des Universums, war es einmal so klein und so heiß, dass es selbst wie ein riesiger Fusionsreaktor funktionierte. In dieser Phase, die man primordiale Nukleosynthese ('urzeitliche Verschmelzung von Kernen') nennt, entstanden die *primordialen Häufigkeiten* der leichten Elemente. Sie waren nicht besonders schwer: einfacher Wasserstoff ($H-1$), Deuterium (ein Wasserstoffisotop: schwerer Wasserstoff, $H-2$, manchmal auch mit D symbolisiert), Helium (die zwei Isotope $He-3$ und $He-4$) und Lithium ($Li-7$).

19.32.1 Bei Eisen ist Schluss!

Aus diesen anfangs nur leichten Elementen gewinnt man mit den ersten entstandenen Sternen in der stellaren Nukleosynthese dann nach und nach die schweren Elemente. Aber dies funktioniert nur **bis zum Element Eisen** (Fe), weil bei der Fusion schwererer Elemente keine Energie mehr frei wird, was ungünstig für die Stabilität des Fusionsobjektes ist.

19.32.2 Dann übernimmt der r-Prozess u. a.

Phänomenologisch gleicht der r-Prozess dem **s-Prozess**, dem zweiten Prozess, dem wir die sehr schweren Elemente verdanken. Atomkerne fangen also Neutronen aus der Umgebung ein. Aber die Neutronendichten sind deutlich höher als im s-Prozess, typisch bei 10^{20} cm^{-3} , also 100 Trillionen Neutronen in einem Kubikzentimeterwürfel! Die Kerne werden mit Neutronen übersättigt. Stoppt der Neutronenfluss, so zerfallen einige der Neutronen im übersättigten Kern über den β^- -Zerfall, d. h. es werden Protonen im Kern erzeugt. Als Folge dessen ist die Ordnungszahl (Kernladungszahl Z) angestiegen: ein **neues, schwereres Element** ist entstanden.

19.32.3 r wie richtig schnell

Die Wahrscheinlichkeit für den Einfang von Neutronen durch die Kerne ist deutlich größer, so dass die Zeitskala des r-Prozesses bei wenigen Zehntel Millisekunden liegt. Dieser Schnelligkeit (engl. *rapidity*) verdankt der r-Prozess seinen Namen. Die Schnelligkeit bewirkt auch, dass der r-Prozess sogar noch bei sehr schweren Kernen funktioniert, obwohl diese relativ schnell zerfallen. Auf der Nuklidkarte schließt sich deshalb der r-Prozess an den s-Prozess an und bewegt sich nahe am Stabilitätstal, aber im oberen Bereich.

19.32.4 r-Prozess braucht Sternexplosionen!

In der Astrophysik können nun die auslaufenden Schockwellen von Supernovae (klassischer Kernkollaps, Typ II) das interstellare Medium so sehr verdichten, dass die relevanten, hohen Neutronendichten erzeugt werden. Die schwersten Elemente (schwersten Metalle) stammen also aus r-Prozessen in Sternexplosionen. Ordnet man die nuklearen Prozesse nach der Schwere der Elemente, die sie erzeugen, von leicht nach schwer, so ergibt sich: thermonukleare Fusion, s-Prozess, r-Prozess.

Daneben spielt der p-Prozess, eine Protoneneinfangreaktion, eine untergeordnete Rolle. Er führt zur Erzeugung weiterer 32 stabiler, schwerer Metalle, allerdings mit geringer Isotopenhäufigkeit.

19.32.5 Empfohlene Quelle

Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Arbeitsgruppe Nukleare Astrophysik

19.33 RRAT

Das Akronym RRAT steht für *Rotating RAdio Transients*, also rotierende Radiotransienten. Das sind neue entdeckte stellare, transiente Radioquellen, die als **neue Population** von Neutronensternen entdeckt wurden. Weitere Erklärungen gibt es im Eintrag Pulsar.

19.34 RR Lyrae-Sterne

Es handelt sich um einen Typus **veränderlicher Sterne**, der sehr verwandt ist mit den Cepheiden. RR Lyrae Sterne wurden nach ihrem Prototyp im Sternbild *Lyra* (dt. *Leier*) benannt. Die Astronomen nennen sie auch *Haufenveränderliche*, weil sie besonders häufig in Kugelsternhaufen zu finden sind.

19.34.1 Eigenschaften

RR Lyrae-Sterne sind besonders alte Sterne der Population II, die regelmäßig variable Lichtkurven aufweisen. Physikalisch gesehen, handelt es sich um schnell pulsierende Riesensterne (Spektralklasse **A**), in denen Helium im Sternkern brennt. Sie haben typische Perioden kleiner als ein Tag, so dass man als Hobby- oder Amateurastronom einen oder zwei Zyklen in nur *einer* Nacht beobachten kann. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm besetzen die RR Lyrae-Sterne den Instabilitätsast, weil sie pulsieren und so instabile Sternphasen durchlaufen.

19.34.2 praktische Perioden-Leuchtkraft-Relation

Wie die *Cepheiden* weisen die RR Lyrae-Sterne eine **Perioden-Leuchtkraft-Beziehung** auf, die es gestattet aus der beobachteten Periode der Lichtkurve auf die **absolute Leuchtkraft** M zu schließen. Mit der ebenfalls beobachteten **scheinbaren Helligkeit** m folgt über das Entfernungsmodul die Distanz d des Sterns gemäß $d = 10^{1+0.2(m-M)}$. Daher sind die Haufenveränderliche - ebenso wie die *Cepheiden* - gute Standardkerzen, allerdings nur brauchbar bis Distanzen von etwa 0.5 Mpc, während *Cepheiden* noch viel weiter verwendbar sind, bis 20 Mpc.

19.34.3 zum Prototypen

Der Prototyp RR Lyrae hat eine Periode von 13 Stunden und 36 Minuten, in der die Helligkeit von 7.1 auf 8.1 Magnituden variiert. Diese **Helligkeitsschwankungen** bis maximal 2 Magnituden sind typisch für alle RR Lyrae-Sterne.

19.35 Ruhesystem

Siehe dazu Eintrag Lorentz-Faktor.

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