
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

3.1 System aus Bulk und 2 Branen.	27
---	----

3 Lexikon B

3.1 Balbus-Hawley-Instabilität

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

3.2 Bardeen-Beobachter

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

3.3 Baryogenese

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

3.3.1 Am Anfang von allem

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

3.3.2 Weitere Naturkräfte betreten die kosmische Bühne

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

3.3.3 Kleines Missverhältnis, große Wirkung!

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

3.3.4 Endlich Atomkerne & Atome!

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

3.3.5 Erste Sterne, erste Galaxien, Leben

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

3.4 Baryonen

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

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

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

3.5 baryonische Materie

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

3.5.1 Anteil baryonischer Materie

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

3.5.2 Rätselhafter Kosmos!

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

3.6 Bekenstein-Hawking-Entropie

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

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

3.6.1 Fläche des Horizonts Schwarzer Löcher

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

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

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

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

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

3.6.2 Entropiebegriff Schwarzer Löcher

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

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

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

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

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

3.6.3 Entropien in Zahlenbeispielen

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

3.6.4 Anlass für eine legendäre Wette

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

3.6.5 Entropien anderer Lösungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

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

3.6.6 Literatur:

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

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

3.7 Beobachter

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

3.7.1 Ein äußerst erfolgreiches Wechselspiel

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

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

3.7.2 Wissenschaftliche Revolutionen des 20. Jahrhunderts

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

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

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

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

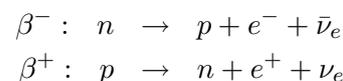
3.8 Beta-Zerfall

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

3.8.1 Was genau ist nun β -Zerfall?

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

Diese Vorgänge lassen sich in diesen zwei Zerfallsgleichungen zusammenfassen:



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

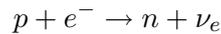
3.8.2 Schwach, aber oho!

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

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

3.8.3 Neutronisierung von Sternen

Der β -Zerfall kann auch in umgekehrter Reaktionsrichtung ablaufen:



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

3.9 Bezugssystem

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

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

3.10 Bianchi-Identitäten

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

3.10.1 Formen von Bianchi-Identitäten

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

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

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

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

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

oder in Kurzschreibweise:

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

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

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

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

3.10.2 Geometrische Interpretation der Energieerhaltung in der Physik!

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

$$\partial\partial = 0$$

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

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

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

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

3.10.3 Buchtipp

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

3.11 Big Bang

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

3.11.1 Säulen der Urknall-Theorie

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

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

3.11.2 Was war vor dem Urknall?

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

3.11.3 Big...

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

3.12 Big Bounce

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

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

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

3.13 Big Crunch

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

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

3.14 Big Rip

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

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

3.14.1 Exotische Energieform zerreißt das All!

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

3.14.2 Wie lange haben wir noch bis zum totalen Aufriss?

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

3.14.3 Beruhigende Worte

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

3.15 Big Whimper

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

Dramatischer als dieser Kltetod ist der Zerreitod im Big Rip. Der Hitzetod im Big Crunch lässt auch kaum Überlebenschancen, so dass in jedem Fall ein 'Großes Jammern' angesagt zu sein scheint.

3.16 Birkhoff-Theorem

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

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

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

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

3.17 Blandford-Payne-Szenario

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

3.17.1 Magnetfelder von akkretierten Plasmen

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

3.17.2 Produktion eines Scheibenwinds

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

3.17.3 Energiespender: rotierende und magnetisierte Scheibe

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

3.17.4 Was treibt den Jet?

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

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

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

3.18 Blandford-Znajek-Mechanismus

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

3.18.1 Gravitomagnetismus

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

3.18.2 Paarbildung in der Ergosphäre

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

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

3.18.3 Alternative von Roger Penrose

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

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

3.19 Blauverschiebung

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

3.19.1 Raumzeit und Bewegung formen eine Linie

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

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

3.19.2 Blau- vs. Rotverschiebung - Antagonisten der Spektroskopie

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

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

3.19.3 Viele Teilchen, viele Freiheiten

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

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

3.19.4 So schnell wie das Licht...

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

3.19.5 Schwerkraft zieht an der Linie

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

3.19.6 Expandierender Kosmos zerrt an der Lichtwelle

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

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

3.19.7 Blaue Brüder

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

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

3.19.8 Ein Blick in rasende Strahlen

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

3.20 Blazar

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

3.20.1 Eigenschaften dieser Höllenmaschinen

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

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

3.20.2 Schneller als das Licht - nicht wirklich

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

3.20.3 Ein Kamel von einem Spektrum

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

3.20.4 Gigantische zentrale Motoren: superschwere Löcher

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

3.20.5 Blazar Distanzrekord

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

3.20.6 Blaue Quasare

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

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

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

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

3.21 BL Lac Objekt

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

3.21.1 Praktisch extragalaktisch

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

3.21.2 Alter Trick: Aus Schwankung folgt Größe

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

3.21.3 Weitere Merkmale

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

3.22 Bogenminute

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

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

3.23 Bogensekunde

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

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

3.24 Bosonen

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

3.24.1 Spin, der Entscheider

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

3.24.2 Andere Teilchen, andere Sitten

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

3.24.3 Willkommen im Bosonen-Zoo

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

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

3.25 Bosonenstern

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

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

3.25.1 Physik im Bosonenstern

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

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

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

3.25.2 Entstehung

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

3.25.3 Stabilität

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

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

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

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

3.25.4 Fall 1: Bosonenstern ohne Selbstwechselwirkung

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

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

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

3.25.5 Fall 2: Bosonenstern mit Selbstwechselwirkung

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

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

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

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

3.25.6 Fall 3: rotierende Bosonensterne

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

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

3.25.7 Gibt es Bosonensterne - falls ja, wo?

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

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

3.25.8 Quellen & wissenschaftliche Veröffentlichungen

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

3.26 Boyer-Lindquist-Koordinaten

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

3.26.1 Spezialkoordinaten verraten Eigenschaften der rotierenden Raumzeit

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

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

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

3.26.2 Vor- und Nachteile der Boyer-Lindquist-Koordinaten

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

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

3.26.3 Originalpublikation

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

3.27 Bran

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

3.27.1 Branen haben unterschiedliche Dimension

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

3.27.2 Branen als Teilchen oder als Schwarzes Loch

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

3.27.3 Auch Strings halten den Rand

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

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

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

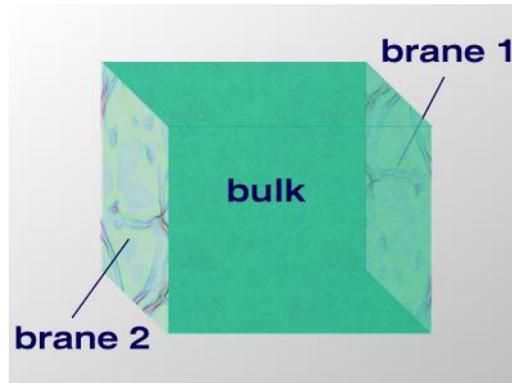


Abbildung 3.1: System aus Bulk und 2 Branen.

3.27.4 Ein ganzer Kosmos auf der Bran

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

3.27.5 Vortrag im Wissensportal

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

3.28 Brans-Dicke-Theorie

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

3.28.1 Wozu eine kompliziertere Gravitationstheorie?

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

3.29 Brauner Zwerg

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

3.29.1 Herausforderung an die Beobachtung

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

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

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

3.29.2 Bekannte Vertreter Brauner Zwerge

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

3.29.3 Dunkle Materie

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

3.29.4 Auch im All gibt's MACHOs

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

3.30 Brill-Wellen

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

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

3.30.1 Ein Gezitter in der Raumzeit

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

3.30.2 Wo laufen'se denn?

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

3.30.3 Kollaps zum Loch

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

3.31 Bulk

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

3.31.1 Ursprung von Bulk und Bran

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

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

3.31.2 Grundidee

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

3.31.3 Prominente Szenarien mit Bulk

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

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

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