
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

18.1	Typisches Feynman-Diagramm der QED: Elektron und Positron wechselwirken über den Austausch eines Photons.	4
18.2	Feuerball nach Gold-Gold-Kollision.	22
18.3	Quarkfamilie.	24
18.4	QCD-Phasendiagramm.	26
18.5	Quarkstern: HST-Bild des Quarkstern-Kandidaten RX J185635-3754.	29
18.6	Quasar-Sample mit Wirtsgalaxien, beobachtet mit dem HST.	30
18.7	Quasar QSO-PG1115+080 als Vierfachbild, beobachtet mit dem HST.	34

18 Lexikon Q

18.1 QPO

Das Akronym für quasi-periodische Oszillationen.

18.2 Quant

Die Quanten sind die kleinsten, diskreten Einheiten einer physikalischen Größe und gaben der Quantentheorie, einer der großen Theorien der modernen Physik des 20. Jahrhunderts, ihren Namen. Verschiedene physikalische Größen entpuppen sich als *quantisiert*, so beispielsweise die Energie, der Spin, Felder, der magnetische Fluss etc. Alle diese Größen können nur **diskrete Zustände** annehmen, also aus einem Wertebereich von Zahlen schöpfen, der nicht beliebig ist, sondern nur bestimmte Vielfache einer fundamentalen Einheit erlaubt. Diese Einheit ist das **Quant**.

18.2.1 quantisierte Elektronenzustände in Atomhüllen

Ein prominentes Beispiel sind die Zustände, die ein Elektron in einer Atomhülle annehmen kann. Diese Quantenzustände sind *diskretisiert* auf bestimmten Energiestufen. Übergänge, die ein Elektron von einer Energiestufe auf die andere unternehmen kann, sind mit der Absorption (Energiegewinn, Übergang auf eine energetisch höhere Stufe) oder Emission (Energieverlust, Übergang auf eine energetisch niedrigere Stufe) eines **Photons** verbunden. Diese Übergänge sind elektromagnetischer Natur. Deshalb wird auch das Feldquant der elektromagnetischen Wechselwirkung ausgetauscht, das Photon. Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes, also eine Beschreibung elektromagnetischer Vorgänge durch den Austausch von Feldquanten, bewerkstelligt die so genannte Quantenelektrodynamik (QED).

18.2.2 Apparat der Quantenfeldtheorien

Die Felder anderer Wechselwirkungen können ebenfalls quantisiert werden. Die starke Wechselwirkung findet so ihre adäquate Beschreibung in der Quantenchromodynamik (QCD) mit den Gluonen als Feldquanten, die schwache Wechselwirkung und elektroschwache Theorie haben die W- und Z-Teilchen (Weakonen) als Feldquanten und bei einer Quantengravitation postuliert man die Gravitonen.

Das allgemeine Konzept, das hinter all diesen Ausprägungen von Quantenfeldtheorien (QFT) steht ist die Eichtheorie. Die Feldquanten heißen **Eichbosonen** und sind als 'Boten-' oder Austauscheteilchen der jeweiligen Kraft anzusehen.

18.2.3 Quanten sind immer winzig

Quanten haben in gewöhnlichen physikalischen Einheiten der Makrophysik (Kilogramm, Joule etc.) winzige Beträge. Der **Quantencharakter** tritt also in der Regel erst auf den kleinen

Skalen der subatomaren Welt (fm, also 10^{-13} cm) in Erscheinung. Dies ist der tief liegende Grund dafür, dass die Quantenphysik erst im 20. Jahrhundert entdeckt wurde. Zum Nachweis der Quanten sind hochpräzise, experimentelle Anordnungen vonnöten.

18.3 Quantenchromodynamik

Die **Quantenchromodynamik (QCD)** ist die Quantenfeldtheorie (QFT) der starken Wechselwirkung. Sie beschreibt und erklärt, den Zusammenhalt der Atomkerne, der Nukleonen (Proton und Neutron) bzw. allgemein gesprochen der Hadronen.

18.3.1 Was Atomkerne zusammenhält

Die Existenz von Atomkernen war bis zum Aufkommen der QCD unverstanden, weil es nicht erklärbar war, wie Protonen, die sich aufgrund ihrer gleichnamigen elektrischen Ladung abstoßen, einen Verbund bilden konnten. Die Erklärung ist, dass die starke Wechselwirkung, die **sehr kurzreichweitig ist**, nämlich gerade auf einige '*Fermi*' (= Femtometer, 10^{-15} Meter, was gerade der Bereich der Kerndurchmesser ist) die elektromagnetische Abstoßung um ein Vielfaches übertrifft! Genau daher rührt ihre **Bezeichnung 'stark'**. Es stellte sich außerdem heraus, dass es eine weitere Substruktur gibt und viele Teilchen aus den Quarks aufgebaut sind. Man kennt sechs solcher Quarks, die sich in der Eigenschaft *Flavor* unterscheiden. Die Terminologie ist u, d, s, c, b, t, als Abkürzungen für *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*. Diese Bezeichnungen sind natürlich willkürlich und im Prinzip irrelevant. Sie dienen nur der Unterscheidung. Es gibt zu diesen sechs Quarks die jeweiligen **Antiquarks**, also weitere sechs Teilchen.

18.3.2 Massen und Ladungen der Quarks

- ◇ u: 5 MeV, $+2/3$ (in Einheiten der Elementarladung e)
- ◇ d: 10 MeV, $-1/3$
- ◇ s: 200 MeV, $-1/3$
- ◇ c: 1.5 GeV, $+2/3$
- ◇ b: 4.7 GeV, $-1/3$
- ◇ t: 180 GeV, $+2/3$

(Quelle: CERN-Homepage, Stand August 2002)

Das top-Quark wurde aufgrund seiner hohen Masse erst 1995 am FERMILAB experimentell nachgewiesen. Ebenfalls am FERMILAB wurde bereits 1977 das bottom-Quark entdeckt.

18.3.3 Hadronen, Mesonen, Baryonen

Es gibt eine Klassifikation der **Hadronen**, das sind alle Teilchen, die aus Quarks bestehen, in **Mesonen**, die aus zwei Quarks bestehen (einem Quark und einem Antiquark) und **Baryonen**, die aus drei Quarks bestehen. So sind Proton (Substruktur uud) und Neutron (udd) Hadronen, aber im Speziellen Baryonen.

18.3.4 Gluonen vermitteln starke Kraft

In der Gruppentheorie bezeichnet man die entsprechende Symmetriegruppe der starken Wechselwirkung als **spezielle, unitäre Transformationsgruppe SU(3)**. Diese Gruppe hat acht reelle, unabhängige Parameter die gerade die **Eichbosonen** repräsentieren. Daher hat die SU(3) **acht Gluonen**, die gerade die starke Wechselwirkung zwischen Trägern der **Farbladung** vermitteln. Die Teilchenphysiker nennen diese Gruppe auch die Farb-SU(3). Die Farbladung ist das Pendant zur *elektrischen Ladung* der Quantenelektrodynamik (QED), nur das hier nicht zwei (analog zu positiv und negativ) Zustände möglich sind, sondern drei, nämlich die Farben rot, grün und blau. Hier rührt die Bezeichnung $\chi\rho\tilde{\omega}\mu\alpha$, *chroma* von QCD her, dem griechischen Wort für *Farbe*. Im Gegensatz zur QED, wo das **Photon keine elektrische Ladung** trägt, liegt eine besondere Eigenschaft der Gluonen darin, dass sie Träger der Farbladung sind. D.h. Gluonen spüren selbst die starke Kraft, die sie übertragen!

18.3.5 Was Atomkerne zusammenhält

Der *Grundzustand* der QCD zeigt, dass die **chirale Symmetrie** gebrochen ist und erklärt außerdem das *Confinement* und die Massen der Quarks ('Farbladungseinschluss'). Mithilfe neuer Untersuchungen im Rahmen der **QCD-Gittertheorie** (*Lattice Quantum Chromodynamics*, LQCD) lässt sich nachweisen, dass ab Temperaturen oberhalb von etwa 150 MeV (vgl. auch *Bag-Konstante*) ein **Phasenübergang** einsetzt, der die chirale Symmetrie wiederherstellt, das *Confinement* aufhebt und so sämtliche Farbladungen freisetzt! Diese **Hochtemperaturphase** kennt man **Quark-Gluon-Plasma (QGP)** und vermutet, dass diese Plasmen tief im Innern von Neutronensternen bzw. Quarksternen realisiert sind. Hochenergiephysiker nehmen auch an, dass das QGP in einer Frühphase des Kosmos existiert habe. 2004 gelang Physikern am Teilchenbeschleuniger RHIC der experimentelle Nachweis des QGPs.

18.3.6 QCD und Stringtheorien

Interessanterweise bieten die Stringtheorien die Möglichkeit das *Regime starker Kopplung* der QCD zu berechnen. Die Störungstheorie der herkömmlichen Feldtheorien versagt hier. Die experimentellen Daten von Gold-Gold-Stößen am Teilchenbeschleuniger RHIC konnten mit den QCD-Strings sehr gut erklärt werden (*E.V. Shuryak*, Proceedings of Continuous Advances in QCD 2006, hep-ph/0608177).

18.4 Quantenelektrodynamik

Die Quantenelektrodynamik (QED) war historisch die erste Quantenfeldtheorie (QFT). Sie beschreibt die (relativistische) **Quantisierung des elektromagnetischen Feldes** und erweitert damit unser Verständnis elektromagnetischer Vorgänge, das bis dahin von der **klassischen Elektrodynamik** von *James Clerk Maxwell* (1831 - 1879) aus dem 19. Jahrhundert und der **Dirac-Theorie**, einer *relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik* (die u. a. das Positron vorhersagte), bestimmt war.

18.4.1 Ansatz an der Wellengleichung

Zur QED gelangt man, indem man von der Wellengleichung der klassischen Maxwell-Theorie ausgeht, allerdings mit dem Vektorpotential geschrieben in seiner relativistischen Form als Vierervektor. Die Wellengleichung ist dann formal eine **Klein-Gordon-Gleichung** für ein masseloses Teilchen, das Photon. Man zerlegt die allgemeine Lösung der Klein-Gordon-Gleichung in eine Summe aus ebenen Wellen. Schließlich identifiziert man das Vektorpotential mit dem **Feldoperator** und die Gewichte der ebenen Wellen mit den Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren. Anschaulich erzeugen die letztgenannten Operatoren, die typisch sind für den Formalismus der **Zweiten Quantisierung**, Photonen (Emission) oder vernichten sie (Absorption).

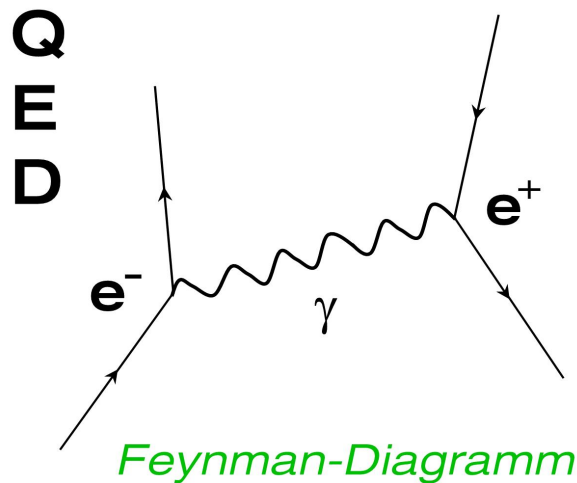


Abbildung 18.1: Typisches Feynman-Diagramm der QED: Elektron und Positron wechselwirken über den Austausch eines Photons.

18.4.2 Photon hat Spin 1

Die Photonen tragen Spin 1. Es handelt sich also um Bosonen (genauer gesagt intermediäre Vektorboson), die in beliebiger Zahl einen durch Quantenzahlen festgelegten Zustand besetzen dürfen (*kein* Pauli-Prinzip!). Weil das Photon masselos ist, kann der Spinvektor *nur zwei Einstellrichtungen* relativ zum Impulsvektor einnehmen: parallel oder antiparallel, aber nicht senkrecht dazu. Anschaulich entspricht dies den beiden **Polarisationsrichtungen** des Photons, nämlich rechts oder links zirkular polarisiert.

18.4.3 Photonen = Licht

Das Photon nennt man auch das bosonische **Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung** oder vektorielles Eichboson. Das so genannte Feynman-Diagramm 18.1 zeigt die Wechselwirkung zweier elektrischer Ladungen (hier Elektron und Positron) über den Austausch eines Photons, symbolisiert durch γ . Die elektromagnetische Wechselwirkung lässt sich im quantenfeldtheoretischen Bild auf die Absorption und Emission eines oder mehrerer Photonen reduzieren. In unserer alltäglichen Welt identifizieren wir das Photon mit *Licht* bzw. allgemein mit **elektromagnetischer Strahlung**.

18.4.4 Gruppe U(1)

Gruppentheoretisch basiert die QED auf der **unitären Transformationsgruppe U(1)**. Der Übergang von einem Elektron in ein Elektron kann durch Aussendung eines Photons geschehen, allerdings unterscheiden sich Anfangs- und Endzustand nicht. Der Übergang wird gruppentheoretisch mit einer 1×1 - **Matrix** beschrieben. Die Gruppenstruktur (siehe auch Symmetriegruppe) ist die einfachste unter den Quantenfeldtheorien und lässt nur ein Eichboson mit Spin 1 zu. Dieses Photon ist außerdem masselos, elektrisch neutral und bewegt sich *per definitionem* mit Lichtgeschwindigkeit, wie bereits die Maxwell-Theorie zeigte. Wenn zwei Teilchen, die Träger der **elektrischen Ladung** sind, miteinander wechselwirken, so wird im Quantenbild dieses (virtuelle) Teilchen ausgetauscht. Oder klassisch formuliert: es wirkt die **elektromagnetische Kraft**.

18.4.5 QED im Test

Im Jahr 2005 wurde ein Experiment durchgeführt, um die Quantenelektrodynamik abermals auf den Prüfstand zu bringen. Die Idee: In der QED gibt es so genannte *Zwei-Schleifen-Korrekturen* (engl. *two-loop corrections*). Darunter verstehen die Teilchenphysiker zwei virtuelle Teilchenpaare, die im Quantenvakuum entstehen und die eine elektromagnetische Wechselwirkung auf dem Quantenniveau anders gestalten, als wenn die Teilchenpaare nicht entstehen würden. Im Eintrag Feynman-Diagramme ist als zweites Bild eine *Ein-Schleifen-Korrektur* illustriert. Diese QED-Effekte höherer Ordnung sollten sich auch bei elektromagnetischen Übergängen bemerkbar machen und die Übergangsenergie geringfügig verschieben. Ideale Studienobjekte sind hier schwere Ionen wie z.B Uran, die jedoch extrem ionisiert werden müssen. Hochgeladene Ionen erzeugt man durch Beschuss des gering geladenen Ions mit energiereichen und intensiven Elektronenstrahlen. Am *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) wurde das schwere Ion U^{89+} , 'lithiumähnliches Uran', in einer Ionenfalle untersucht. Dabei wurde mit extremer Präzision ein Übergang des Ions im Ultravioletten mit hochauflösenden Spektrometern dokumentiert. Der Zwei-Schleifen-Beitrag aus Theorie (*Yerokhin & Shabaev*, PRA 2001) und diesem Experiment (*Beiersdorfer, Chen, Thorn & Träbert*, PRL 2005) stimmen bestens überein und bestätigt damit auch grandios die QED (Quelle: Physik Journal, Februar 2006).

18.5 Quantenfeldtheorie

Die Quantenfeldtheorie (QFT) ist ein modernes Konzept, das darauf abzielt, eine Naturkraft mit einem quantisierten Kraftfeld zu beschreiben.

18.5.1 Mehr als Quantenmechanik

Die Quantenfeldtheorie knüpft damit konsequent an die Quantenmechanik an, die diese Erfolge vorweisen kann

- ◇ Beschreibung der Atome: Wasserstoff-Problem, Periodensystem der Elemente, Orbitalmodell, chemische Bindung
- ◇ relativistischen Theorie des Elektrons und Existenz von Antimaterie gemäß der *Dirac-Theorie*, einer speziell relativistischen Erweiterung der Quantenmechanik

18.5.2 Feld: Welle & Teilchen

Quantenfeldtheorien liefern einen kompletten, formalen Apparat zur Beschreibung der Wechselwirkungen: Ansatz ist eine **Lagrange-Funktion** (*Lagrangian*) oder - mathematisch äquivalent - eine **Wirkung**. Mit den *Euler-Lagrange-Gleichungen* folgt daraus eine Feldgleichung. Sie ist die **Bewegungsgleichung** des betrachteten jeweiligen Kraftfeldes und enthält alle Informationen über den jeweiligen Wechselwirkungsprozess.

Die Bezeichnungen Teilchen, Feld und Welle werden synonym verwendet. Gemäß des **Welle-Teilchen-Dualismus** ist die Materie mal als Welle (z. B. Spalt-Experimente), mal als Teilchen (z. B. Photo-Effekt) interpretierbar und so zu beschreiben.

Der Begriff des Feldes wurde bereits in der klassischen Gravitationsphysik *Isaac Newtons* (Schwerkraftfeld, Gravitationsfeld) und später in der klassischen Elektrodynamik von *James Clerk Maxwell* verwendet (elektrisches, magnetisches, elektromagnetisches Feld). Ganz allgemein macht sich ein Feld durch seine **Kraftwirkung** auf ein eingebrachtes Probeteilchen bemerkbar. Voraussetzung dafür ist, dass das Teilchen das Feld überhaupt 'spürt', also eine **Wechselwirkung** zwischen Feld und Teilchen möglich ist. Das hängt von den Eigenschaften des Teilchens, nämlich von seinen Ladungen ab. Der Ladungsbegriff muss hier sehr allgemein verstanden werden und meint eine elektrische Ladung, eine Farbladung oder eine Masse ('gravitative Ladung'). In der Teilchenphysik nennt man diese und weitere Teilcheneigenschaften generell Quantenzahlen.

18.5.3 Kraft im Quantenbild

Die Wechselwirkung wird in den Quantenfeldtheorien selbst durch Trägerteilchen vermittelt, die immer ganzzahligen Spin tragen. Die Physiker nennen sie **Eichbosonen**, und es handelt sich um **Bose-Teilchen** (nach dem indischen Physiker *S.N. Bose*) oder **Bosonen**. Diese skalaren (Spin 0), vektoriellen (Spin 1) oder tensoriellen (Spin 2) Bosonen werden bei der Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen ausgetauscht und bewegen sich maximal (aufgrund der Speziellen Relativitätstheorie) mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c .

18.5.4 Beispiele von QFTs

So beschreibt die **Quantenelektrodynamik (QED)**, die historisch die erste relativistische Quantenfeldtheorie war, die Wechselwirkung zwischen Teilchen die Träger der elektrischen Ladung sind. Z.B. tauschen zwei Elektronen, die beide negativ geladen sind, ein **Photon** aus, das ein Vektorboson ist. Das Photon ist im engeren Sinne das **quantisierte Feldteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung** oder auch das Eichboson der QED. Wir identifizieren es mit Licht bzw. Strahlung.

Die **schwache Wechselwirkung** erklärt den radioaktiven Beta-Zerfall und alle weiteren Prozesse, wo die schwache Naturkraft beteiligt ist. Diese kurzreichweitige Kraft vermittelt zwischen Hyperladungen.

In der Terminologie der QFT nennt man die bosonischen Austauschteilchen auch **Ströme**. So sind die positiv und negativ geladenen W-Teilchen der schwachen Wechselwirkung *geladene Ströme*, das Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung ein *neutraler schwacher Strom*, das Photon der QED ein *neutraler, elektromagnetischer Strom*. Alle drei Eichbosonen der schwachen Theorie fasst man als **Weakonen** zusammen.

Weitere Quantenfeldtheorien sind die **Quantenchromodynamik (QCD)**, eine Theorie der **starken Wechselwirkung**, die die Kernkräfte und den Zusammenhalt der Nukleonen beschreibt. Die starke Kraft wird vermittelt durch die Gluonen.

Am schwierigsten gestaltet sich derzeit die Ausarbeitung einer QFT der Gravitation, einer **Quantengravitation**. Es wurden vor allem zwei Varianten vorgeschlagen das Gravitationsfeld quantisiert zu beschreiben: die Stringtheorien und die Loop-Quantengravitation. Diese Theorien werden intensiv erforscht und bislang ist nicht klar, welche die Gravitation im Regime kurzer Abstände und starker Gravitationskräfte gut beschreibt. Die Stringtheorien fordern als Eichboson der Gravitation ein Tensorboson, nämlich das Graviton. Eine bewährte und bislang bestens bestätigte, allerdings nicht quantisierte Gravitationstheorie ist Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie.

18.5.5 Mit vereinten Kräften

Die Physiker versuchen nicht nur jede Kraft für sich genommen als QFT zu beschreiben, sie versuchen auch die Kräfte einheitlich zu beschreiben. Dies ist zu erwarten, wenn die Temperaturen höher werden, z. B. wenn wir von unserem lokalen Universum ausgehend uns dem Milieu des heißen Urknalls nähern.

Das erste Beispiel, das zeigte, dass sich Kräfte vereinheitlichen lassen, war die klassische Elektrodynamik: eine Vereinheitlichung von elektrischer und magnetischer Kraft. Mittlerweile ist die Vereinheitlichung auch in den Quantenfeldtheorien gelungen, nämlich bei der elektroschwache Theorie (Vereinheitlichung von elektromagnetischer und schwacher Kraft) und den Großen Vereinheitlichten Theorien (Vereinheitlichung von elektromagnetischer, schwacher und starker Kraft). Im letzten Fall muss noch mit experimentellen Befunden gezeigt werden, dass diese Theorie die Natur korrekt mit einer X-Kraft beschreibt. Im Fall der elektroschwache Theorie ist das perfekt gelungen, weil sie korrekt die Massen der W- und Z-Teilchen vorhersagte - Teilchen, die auch experimentell bestätigt werden konnten.

18.5.6 Feynman-Diagramme

Eine anschauliche Darstellung sämtlicher Wechselwirkungsszenarien verschiedener Teilchen wird durch die so genannten **Feynman-Diagramme** symbolisiert. Diese Darstellung geht jedoch weit über den illustrativen Aspekt hinaus: mit den Feynman-Diagrammen hat man direkt eine Rechnungsvorschrift zur Berechnung von **Wirkungsquerschnitten** (Ereignisraten), die die Physiker sofort hinschreiben kann, weil sie die Feynman-Regeln kennen. Die analytische und numerische Behandlung ist im Detail meist schwierig und bedarf anspruchsvoller Methoden und Computercodes, damit man ein Ergebnis erhält.

18.6 Quantengravitation

Hinter dieser Bezeichnung (oft abgekürzt mit **QG**) verbirgt sich der Versuch, eine quantisierte Theorie der Gravitation zu formulieren. Die Gravitation ist die letzte der vier fundamentalen Naturkräfte, zu der eine bewährte Quantenfeldtheorie (QFT) fehlt. Aber es gibt aussichtsreiche Anwärter auf eine Quantengravitation: Stringtheorien und Loop-Quantengravitation.

18.6.1 Motivation: Erfolge mit Quantenfeldtheorien

Der Siegeszug des Quantisierungsapparats der Quantenfeldtheorien begann mit der Beschreibung der elektromagnetischen Kraft (**QuantenElektroDynamik**), starken Kraft (**QuantenChromoDynamik**) und schließlich der schwachen Kraft und mündete in Vereinigungstheorien, wie elektroschwacher Theorie und **Grand Unified Theories**. Eine Vereinheitlichung **aller Wechselwirkungen** gelang bisher trotz jahrzehntelanger Anstrengungen nicht: Die Physiker suchen immer noch fieberhaft nach der *Unified Theory* (UT) oder auch *Theory Of Everything* (TOE) genannt.

18.6.2 Einsteins Gravitation

Das beste theoretische Konstrukt für die Gravitation ist bisher Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART). Sie ist jedoch eine klassische Theorie und trägt der Quantennatur der Materie nicht Rechnung. So gibt es keine Unschärfe von Ort und Impuls, keine Wahrscheinlichkeitsinterpretation (siehe auch Kopenhagener Deutung), keine Dekohärenz, keine Wellenfunktion in der Relativitätstheorie. Ihre Welt ist vierdimensional (drei Raum- und eine Zeitdimension) und die zentrale Aussage ist, dass Masse (=Energie) die Raumzeit krümmt. Das 'Wie?' beschreiben die Einsteinschen Feldgleichungen: die linke Seite enthält die gekrümmte Raumzeit in Form des Einstein-Tensors, die rechte Seite die Energieformen in der Raumzeit in Gestalt des Energie-Impuls-Tensors.

18.6.3 Was soll sie haben, die Quantengravitation?

Die Physiker postulieren in einer Quantenfeldtheorie der Gravitation ein **Tensorboson** als Austausch- und Botenteilchen, das **Graviton**. Tensoriell heißt, dass es **Spin 2** aufweist. Immer wenn die Gravitationskraft (in der Sprache der Newtonschen Gravitationsphysik) zwischen massebehafteten Teilchen wirkt, wird das Graviton ausgetauscht. Der Kern des Problems ist die **Renormierbarkeit** einer solchen Theorie. Es tauchen Unendlichkeiten auf, die man nicht ohne weiteres los wird.

18.6.4 Anwärter 1: Stringtheorien

Ein erster guter Ansatz besteht in den **Stringtheorien** bzw. der **M-Theorie**. Die M-Theorie ist ein übergeordnetes Konstrukt, für das es Anzeichen gibt, weil die fünf Stringtheorien mittels mysteriöser, mathematischer Relationen (den *Dualitäten*) verknüpft zu sein scheinen. Die M-Theorie ist bislang nur den Physikern nur ausschnittartig bekannt und hypothetisch. Diese Theorien enthalten 'automatisch' ein Spin-2-Teilchen - also das, was sich die Physiker für eine Quantengravitation gewünscht haben.

Die Stringtheorien haben noch eine weitere, faszinierende Eigenschaft: gegenüber der vierdimensionalen Raumzeit der ART sind weitere Dimensionen implementiert, die man als Extradimensionen bezeichnet. Das haben die Stringtheorien mit der Kaluza-Klein-Theorie gemein. Allerdings gibt es in der Natur bislang keine Evidenzen für weitere Raumdimensionen. Aus diesem Grund glauben die Stringtheoretiker, dass diese zusätzlichen Dimensionen auf kleinen Längenskalen kompaktifiziert sind. So macht sich ihr Einfluss erst bei kleinen Abständen bemerkbar. Z.B. wäre durch die Extradimensionen das klassische Newtonsche Gravitationsgesetz modifiziert und der charakteristische Abfall der Gravitationskraft mit r^{-2} könnte stattdessen einem r^{-4} -Gesetz folgen. Dies versuchen Physiker experimentell mit verschiedenen Methoden (beschrieben unter dem Eintrag Extradimension) zu verifizieren - bislang erfolglos.

Eine noch erstaunlichere Konsequenz der Extradimensionen ist die Reduktion der fundamentalen Planck-Skala von 10^{19} GeV auf den TeV-Bereich. Anschaulich würde die relative Stärke der Gravitation dann schon bei TeV-Energien derjenigen der starken Wechselwirkung entsprechen. In dieser so genannten **TeV-Quantengravitation** (engl. *TeV quantum gravity*), die die Stringtheoretiker mithilfe von Branen beschreiben, wird davon ausgegangen, dass die Gravitation in allen Dimensionen - den klassischen vier **und** den Extradimensionen - wirkt, während die Felder des Standardmodells der Teilchenphysik auf einen Unterraum, einer **3-Bran**, beschränkt sind. Das hätte zur Folge, dass bereits bei TeV-Experimenten in modernen Teilchenbeschleunigern Gravitonen angeregt werden könnten und diese womöglich in die Extradimensionen entkommen könnten (im Fachjargon: *escape to the bulk*). Der Experimentator würde einen verletzten Energieerhaltungssatz messen, weil diese Gravitonen Energie fortgetragen hätten. Solche Signaturen werden in den Teilchenbeschleunigern der neusten Generation gesucht. Ihr Nachweis wäre deshalb sensationell, weil die Physiker eine Spur hätten, die sie zum Ziel Quantengravitation leiten würde.

Die Stringtheorien bieten eine Reihe theoretisch betrachtet attraktiver Eigenschaften, aber gibt es eine Reihe von Phänomenen, für die die Natur bisher keine oder wenig Anhaltspunkte geliefert hat. Diese Bringschuld der Stringtheorien steht noch aus. Ein viel versprechendes Prinzip, das Gravitation und Stringtheorien verknüpft, ist die **AdS/CFT-Korrespondenz**.

18.6.5 Anwarter 2: Loop-Quantengravitation

Die Stringtheorien haben jedoch einen ernst zu nehmenden Konkurrenten: die **Loop-Quantengravitation (LQG)**. Diese quantisierte Gravitationstheorie folgt allein aus den Konzepten der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. Sie wurde seit etwa 1986 (*Ashtekar, Sen, Smolin, Jacobsen, Rovelli, Thiemann* und andere) entwickelt und hat eine radikal neue Sichtweise der Welt. Die Quanten dieser Theorie sind **Wilson-Loops** bzw. Spin-Netzwerke. Mit dieser Basis lassen sich sämtliche physikalische Größen beschreiben. Gemäß dieser Theorie ist die Raumzeit tatsächlich quantisiert in **Volumenquanten**, die Größenordnungen im Bereich der (nicht reduzierten) Planck-Skala haben. Darüber hinaus ist auch die **Zeit quantisiert**, in diskrete Portionen der Planck-Zeit. Die LQG kommt ohne Extradimensionen aus, erfordert auch keine Supersymmetrie (SUSY) und zielt nicht auf eine Vereinheitlichung der Naturkräfte ab, was sie deutlich von den Stringtheorien unterscheidet. Sollten sich weitere Raumdimensionen und SUSY-Teilchen weiterhin als nicht verifizierbar erweisen, so könnte sich die Loop-Quantengravitation als besserer Kandidat für eine Quantengravitation erweisen. Aber auch hier gilt: die LQG bietet attraktive Eigenschaften, hat aber keine experimentellen Stützen.

18.6.6 Strings oder Loops oder...?

Die Physiker verfügen also noch nicht über eine *bewährte* Quantengravitation, aber sie arbeiten daran, dass sich die Konzepte testen, stützen oder widerlegen lassen, um der Natur dieses Geheimnis zu entlocken.

18.7 Quantenkosmologie

Dieser Zweig der modernen Kosmologie verwendet Gesetzmäßigkeiten und Formalismen der Quantentheorie, um das Universum als Ganzes zu beschreiben.

18.7.1 Über den Ursprung der Welt

Vor allem ist sie eine wissenschaftliche Theorie der **Kosmogonie**, die also eine Entstehung des Universums zu erklären sucht. Die Urknall-Theorie ist hingegen streng genommen nur eine Theorie, die die Folgen des Urknalls erklärt und nicht dessen Ursache.

18.7.2 Der Kosmos als Wellenfunktion

Einen möglichen Zugang zur Quantenkosmologie eröffnet der *Hamilton-Formalismus*, den man auf die Einsteinsche Relativitätstheorie anwendet. Man verwendet den ADM-Formalismus, um die Raumzeit aufzubrechen und leitet die kanonischen Variablen aus der *Lagrange-Dichte* ab. Integration liefert die *Hamilton-Dichte*. Nun kann der *kanonische Quantisierungsapparat*, wie er auch exzessiv in den Quantenfeldtheorien angewendet wird, eingesetzt werden. Diesen Vorgang nennt man auch bisweilen **Dritte Quantisierung**. Auf diese Weise erhält man die kanonischen Vertauschungsrelationen und schließlich die Wheeler-DeWitt-Gleichung. Sie ist die relativistische (aber nicht kovariante!) Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung für die **Wellenfunktion des Universums**.

18.7.3 Von Vakuum- und Baby-Universen

Die Quantenkosmologen können nun viele Analogien der mikroskopischen Quantentheorie auf den Kosmos übertragen: so gelangen sie zu einem Formalismus mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren, in dem nun nicht mehr Teilchen, sondern ganze Universen erzeugt bzw. vernichtet werden! Die erzeugten Mehrteilchenzustände (*Fock-Zustände* in der Quantentheorie) können **Voids** (Vakuum-Universen) sein, wenn man eine Quantenfeldtheorie mit freiem Wheeler-DeWitt-Operator aufzieht oder **Baby-Universen** sein, wenn man zum nichtlinearen Wheeler-DeWitt-Operator übergeht. Es sei angemerkt, dass die hier beschriebenen Voids einen Bedeutungsunterschied zu den (beobachteten) Voids der Kosmologie haben.

18.7.4 Mehr Freiheiten

Ein attraktiver Aspekt einer Quantenkosmologie ist, dass Kopplungskonstanten wie die kosmologische Konstante als *dynamischer Parameter* aufgefasst werden können. Diese Eigenschaft wurde zur Lösung des Koinzidenzproblem motiviert und mündete in Quintessenz-Modelle. Aber auch andere Parameter, die wir in unserem Universum als fundamentale Naturkonstanten (G , h , c , Feinstrukturkonstante α etc.) ansehen, könnten in anderen Universen andere Werte annehmen.

18.7.5 Schöne, neue Quantenwelt

Die Implikationen einer Quantenkosmologie sind mehr als erstaunlich. Eine Übertragung des Teilchenbegriffs auf Universen entführt uns in eine phantastische Welt, wie sie vielleicht nicht mal im Science-Fiction-Genre gedacht wurde. Neben einer Vielfalt an Universen, was man oft als **Multiversum** bezeichnet, sollten Vernichtung und Erzeugung von Universen ebenso realisiert sein, wie **virtuelle Universen**, analog zu virtuellen Teilchen (die in der Atomspektroskopie bei der *Lamb-Shift* experimentell verifiziert wurden).

Der Gehalt einer solchen Theorie ist enorm, aber noch nicht völlig verstanden. So bereiten die Randbedingungen, die man an eine kosmische Wellenfunktion knüpfen muss, Probleme. Die Pioniere der Quantenkosmologie sind *Wheeler*, *Vilenkin*, *Linde*, *Hartle* und *Hawking*.

Im Ekpyrotischen Modell von *Steinhardt & Turok* (2001) werden Konzepte der Stringtheorien benutzt (Branenkosmologie), um die Ursache des Big Bang abzuleiten.

18.8 Quantenschaum

Diese etwas saloppe Bezeichnung meint die Illustration des Quantenvakuums aus plötzlich entstehenden Teilchenpaaren, die genauso plötzlich wieder verschwinden.

18.8.1 Das Vakuum blubbert

Die Grundlage dieses Vorgangs ist die **Heisenbergsche Unschärferelation** der Quantentheorie: Dieses Quantengesetz setzt zwei physikalische Größen, Ort und Impuls eines Teilchens oder Energie und Zeit, in Bezug zum Planckschen Wirkungsquantum h , einer Naturkonstante. Für das Folgende betrachte man die Unschärferelation am besten in der Form einer Energie-Zeit-Unschärfe: Die Heisenbergsche Unschärferelation gestattet, dass für kurze Zeit der **Energieerhaltungssatz verletzt** wird. Je größer die benötigte Energie, also je schwerer die Teilchenpaare sind, umso kürzer ist der Zeitraum ihrer Existenz.

18.8.2 So wird Schaum daraus

Die entstehenden und vergehenden Teilchen kann man bereits Quantenschaum (engl. *quantum foam*) nennen. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) krümmen die Teilchenmassen auch die umgebende Raumzeit. Das Resultat ist ein Durcheinander, das manchmal mit dem Begriff **Raumzeitschaum** bezeichnet wird.

18.8.3 Gibt es Singularitäten?

Eine Spekulation geht in die Richtung, dass die Singularitäten bestimmter Raumzeiten, wie im Innern Schwarzer Löcher, aus Quantenschaum bestehen. Die ART ist eine klassische, unquantisierte Theorie, die Krümmungssingularitäten - gewissermaßen so etwas wie Punktmassen - hervorbringt. Es ist allerdings fragwürdig, ob in der Natur tatsächlich solch idealisierten Objekte existieren. Es gibt im Rahmen der ART zwar die Singularitätentheoreme (von *Penrose* und *Hawking*), die Singularitäten vorhersagen, aber im Gegensatz dazu deutet die Unschärferelation an, dass jedwede idealisierten Gebilde wie Punktmassen oder Ringmassen (siehe auch Ringsingularität) durch Quanteneffekte 'aufgeweicht' werden müssen. Heisenbergs Unschärferelation wurde im Unterschied zu den Singularitätentheoremen tatsächlich mehrfach experimentell bestätigt. Dennoch sind diese Widersprüchlichkeiten bislang nicht gelöst worden. Die Physiker hoffen, dass eine robuste Quantengravitation diese Probleme löst.

18.8.4 lauernde Alternativen

Die Alternativen zum klassischen Schwarzen Loch, wie nicht-singulärer Gravastern und singulärer Holostern, sind deshalb quantengravitative Szenarien. Gravasterne vermeiden Idealisierungen und Unendlichkeiten. Auf diesem Gebiet ist jedoch noch viel Grundlagenforschung und Verständnis vonnöten.

18.8.5 Schaum in der Kosmologie?

Die sich bildenden 'Blasen' aus Quantenschaum könnten nach einer spekulativen Vorstellung der Quantenkosmologie ganze Mini-Universen sein, die durch die Inflationsära zu großskaligen Makro-Universen aufgebläht wurden. Die meisten dieser Blasen dürften jedoch 'geplatzt' sein: es wird vermutet, dass nicht bei jeder die Inflationsphase starten könne.

18.9 Quantensprung

In der Quantentheorie, einer Theorie der modernen Physik des 20. Jahrhunderts, konnte nachgewiesen werden, dass zahlreiche physikalische Größen, wie Energie, Spin, Felder, magnetischer Fluss etc. nur **diskrete Zustände** annehmen können, d. h. der Wertebereich an Zahlen, den die Größe annehmen kann ist nicht kontinuierlich und beliebig, sondern auf Vielfache einer fundamentalen Einheit, dem **Quant**, beschränkt. Die Physiker sagen, die physikalische Größe sei *quantisiert*.

18.9.1 Grundlagen der Quantentheorie

Eine Zustandsänderung der physikalischen Größe kann im Formalismus der *Zweiten Quantisierung* sehr anschaulich mit **Erzeugung- und Vernichtungsoperatoren** notiert werden. Dabei ändert sich der Quantenzustand einerseits dadurch, dass er durch eine andere Wellenfunktion beschrieben wird und andererseits dieser Zustand (in der Regel, außer bei *Entartung*) durch einen anderen *Eigenwert* beschrieben wird. Der Eigenwert entspricht einer messbaren Größe, der *Observablen* und ist synonym mit dem Begriff Erwartungswert. Verkürzt kann dann ein Quantenzustand durch eine Zahl wiedergegeben werden, der so genannten Quantenzahl. In der Regel charakterisieren viele Quantenzahlen einen Quantenzustand. Als Beispiel möge die Teilchenphysik dienen, wo ein Teilchen durch die Quantenzahlen Spin, Ladung, Isospin, Seltsamkeit etc. eindeutig beschrieben ist. Die Quantenzahlen dienen dann einer Katalogisierung des Teilchenzoos.

18.9.2 Wenn Quanten hops gehen

Der Übergang von einem diskreten Quantenzustand in den anderen kann als 'Sprung' bezeichnet werden. In Operatorschreibweise werden diese Sprünge durch die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren bewerkstelligt: der Erzeugungsoperator fügt dem System ein Quant hinzu und stellt einen 'höheren' Quantenzustand her; der Vernichtungsoperator zieht dem System ein Quant ab und präpariert einen 'niedrigeren' Quantenzustand. Weil man sich diese diskreten Zustandsänderungen wie Schritte auf den Sprossen einer Leiter vorstellen kann, subsumiert man die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren manchmal auch unter dem Begriff 'Leiteroperatoren'. Es können nicht beliebig viele Quanten durch Vernichtungsoperatoren entnommen werden. Irgendwann ist ein Quantenzustand niedrigster Stufe erreicht, den man **Grundzustand** nennt und mit dem Quantenvakuum identifiziert.

18.9.3 'Das war der Quantensprung in der in unserem Unternehmen!'

Quantensprünge sind also nichts anderes als diskrete Zustandsänderungen in Quantensystemen. Dieser Begriff wurde nun der physikalischen Terminologie entlehnt, um in der Alltagssprache, besonders in der Wirtschaftssprache, einen revolutionären Fortschritt zu betiteln. Gerne werden innovative Technologien mit dem Attribut 'Quantensprung' apostrophiert. Streng genommen ist diese Entlehnung (rhetorisch gesprochen eine Analogie) eine semantische Fehlleistung, weil eine winzige Änderung in Quantensystemen, also Bereichen der Mikrophysik, mit einer ganz großen Veränderung in Makrosystemen gleich gesetzt wird.

18.10 Quantentheorie

Die Quantentheorie ist ein Oberbegriff aller physikalischen Theorien, die sich mit *Quantisierung* oder *Quantelung* beschäftigen. Quantelung ist die Eigenschaft, dass ganz verschiedene physikalische Größen (Energie, Drehimpuls, Ladung) Vielfaches eines kleinsten (**diskreten**) Betrages sind, dem **Quant**. Die Quantentheorie kann man in die Quantenmechanik, als Erweiterung der klassischen Mechanik, und die Quantenfeldtheorien einteilen, die die Quantisierung von Kraftfeldern zum Gegenstand haben.

18.10.1 Pioniere der Quantentheorie

Begründet wurde die Quantentheorie von dem deutschen Physiker *Max Planck* (1858 - 1947), der um die Jahrhundertwende die **elektromagnetische Strahlung schwarzer Körper** untersuchte. Ein schwarzer Körper (engl. *black body*) wird auf eine bestimmte Temperatur erhitzt und gibt dann eine charakteristische Strahlung ab (Schwarzkörperstrahlung, Plancksche Strahlung), die eindeutig mit der Temperatur des Körpers zusammenhängt (T^4 -Gesetz). Planck fand 1900 heraus, dass die Wärmestrahlung in diskrete Portionen gequantelt ist. Erst *Albert Einstein* (1879 - 1955) war kühn genug, um zu fordern, dass die Strahlungsenergie und elektromagnetische Strahlung **generell quantisiert** sei. Für diese *Lichtquantenhypothese* erhielt Einstein den Nobelpreis 1921. Deshalb gehört auch er zu den 'Vätern der Quantentheorie'.

18.10.2 Heute: Lichthäppchen

Die Strahlungsenergie E kann also nur in Vielfachen des **Planckschen Wirkungsquantums** h gemäß folgender Gleichung emittiert oder absorbiert werden

$$E = h\nu = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda}.$$

Das Wirkungsquantum ist eine der **fundamentalen Naturkonstanten** und eine sehr kleine Zahl: $h = 6.62608 \times 10^{-34}$ Js. h hat die Dimension einer *Wirkung* (Energie \times Zeit). An der Winzigkeit von h wird sofort einsichtig, dass die Quantennatur gerade in mikroskopischen, atomaren und subatomaren Bereichen wichtig wird. Die Entdeckung der **Energiequanten** wurde 1918 mit dem Nobelpreis für Planck honoriert. In der Folgezeit sollte viele Nobelpreise für Quantenphysiker vergeben werden, denn diese Theorie trat einen unvergleichlichen Siegeszug an.

18.10.3 Früher war alles besser - und vorhersagbar

Zur Zeit der Jahrhundertwende schien das physikalische Weltbild vollständig zu sein. Die wohl definierten Gesetze der Mechanik prägten eine **deterministische Welt**, die in bestimmten, prognostizierbaren, geordneten und kontinuierlichen Bahnen (*Kontinuitätsprinzip*) abließ. Mit der Quantentheorie musste man von dieser Sichtweise Abschied nehmen! Sie gestaltete das physikalische Weltbild völlig neu und inspirierte die Erkenntnistheorie mit den neuen Auffassungen von Diskretion und Indeterminismus sowie von Messung und Realität.

18.10.4 Das Wasserstoffproblem

Ein weiterer Meilenstein der Quantentheorie war eine erfolgreiche **Beschreibung des Atoms**, im Speziellen des Wasserstoffs. Als einfachstes Atom, wo ein negativ geladenes Elektron den positiv geladenen Atomkern (ein Proton) 'umkreist' (Bohr-Atommodell), konnten die Quantenphysiker das *Wasserstoffproblem* lösen. Wie haben sie das geschafft? Nun, die fundamentale Bewegungsgleichung der nicht-relativistischen Quantenmechanik ist die **Schrödinger-Gleichung**

$$\hat{H}\Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t).$$

Mit ihr gelang es, die diskreten Energiezustände des Elektrons (Atomschalen) abzuleiten und elektromagnetische Übergänge (Emission und Absorption) im Atom zu verstehen (Spektrallinien). Diese Theorie erklärt folglich die Wechselwirkung von Licht mit Atomen und die Lichtaussendung aus der Atomhülle. Viel Anerkennung auf diesem Gebiet gebührt dem dänischen Quantenphysiker *Niels Henrik David Bohr* (1885 - 1962), der dafür 1922 den Nobelpreis für Physik bekam.

18.10.5 Matrizen- und Wellenmechanik: zwei Seiten einer Medaille

Der deutsche Physiker *Werner Heisenberg* (1901 - 1976) und der österreichische Physiker *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961) entwickelten fast zeitgleich (1925 bzw. 1926) alternative, mathematische Beschreibungsweisen der Quantenmechanik: die **Matrizenmechanik** und die **Wellenmechanik**. Die bis dahin als unterschiedlich wahrgenommenen Phänomene Welle und Teilchen (*Newton*: Korpuskel) stellten sich als Erscheinungsformen ein und desselben quantenmechanischen Objekts heraus. Mal manifestiert sich dieses Objekt als Teilchen (z. B. beim Photoeffekt) und mal als Welle (z. B. bei Streuexperimenten an Spalten), beides sind gleichwertige Zustände eines Quants. Diese Ambivalenz nennt man in der Quantenphysik **Welle-Teilchen-Dualität**.

18.10.6 Operatoren

Die neue Sichtweise geht sogar noch weiter: Die Schrödinger-Gleichung ist eine partielle, nicht-lineare Differentialgleichung. In der Quantentheorie spricht man nun von *Operatoren* und meint damit mathematische Objekte, die auf einen Quantenzustand (eine Wellenfunktion Ψ) angewandt werden. Im Allgemeinen kann man die Reihenfolge der auf einen Zustand wirkenden Operatoren *nicht* vertauschen. In der Schrödinger-Gleichung ist der wichtigste Operator der Quantentheorie enthalten: der **Hamilton-Operator H** (*Hamiltonian*), der mit der Energie im Quantensystem zusammenhängt. In einem Zentralpotential, das ein kugelsymmetrisches Kraftfeld erzeugt, setzt sich der Hamilton-Operator aus der kinetischen und der potentiellen Energie zusammen. Gemäß dem Korrespondenzprinzip ist der in der kinetischen Energie enthaltene Impuls ein Operator. Der Impuls-Operator entspricht dem Gradienten (Nabla-Operator ∇), sein Quadrat dem Laplace-Operator $\nabla^2 = \Delta$ (bis auf Vorfaktoren). Die genaue Form der potentiellen Energie hängt vom quantenmechanischen System ab. Simple quantenmechanische Modellsysteme sind der *Potentialtopf* oder der *harmonische Oszillator*. Für diese Quantensysteme bestimmt man das **Spektrum des Hamilton-Operators** und meint damit die möglichen **Wellenfunktionen** (oder Eigenfunktionen, Ψ , 'Psi') und zugehörige **Energieeigenwerte**. Im Wasserstoffproblem geht als potentielle Energie das **Coulomb-Potential** ein, das wie das Newtonsche Gravitationspotential ein $1/r$ -Potential (ein Zentralpotential, s. o.) ist. Drehimpuls, Spin und Spin-Bahn-Kopplung (die Wechselwirkung von Drehimpulsen untereinander) müssen auch berücksichtigt werden.

18.10.7 Lösungsansatz für die Schrödinger-Gleichung

Für die Wellenfunktionen wird ein *Separationsansatz* gemacht, also die Koordinatenabhängigkeit zerlegt in Radialanteil (Koordinate r) und Winkelanteil (Poloidal- und Azimutwinkel). Erst dann ist das Wasserstoffproblem quantenmechanisch lösbar!

18.10.8 Teilchen, Wellenfunktion, Wahrscheinlichkeitswelle

Die resultierenden Lösungen in Form von (im Allgemeinen komplexwertigen) Wellenfunktionen werden in ihren *Absolutquadraten* betrachtet. Sie ist ein Maß für die **Aufenthaltswahrscheinlichkeit** des beschriebenen Teilchens. Der klassische Begriff der Bahn geht damit vollends verloren. Das Teilchen ist eine **Wahrscheinlichkeitswelle**. Im Orbitalmodell der Atome bilden die Orte verschiedener Wahrscheinlichkeit wolkenartige Strukturen oder Keulen, die man *Orbitale* nennt. Das Elektron ist demnach kein klassisch lokalisiertes Punktteilchen, das vergleichbar den Planeten um die Sonne um einen Atomkern kreist, sondern eine *Elektronenwelle*, die um den Atomkern 'verschmiert' ist!

Die physikalische Interpretation der Wellenfunktion und ihr Verhalten im **Messprozess** formt mit der Kopenhagener Deutung ein neues physikalisches Weltbild. Die wesentlichen Protagonisten dieser Deutung waren *Max Born* (1882 - 1970, Nobelpreis 1954), Heisenberg und Bohr.

18.10.9 Quantenstatistik: zwei Teilchengruppen machen eine komplexe Welt

Spätere Erkenntnisse auf dem Gebiet der Quantentheorie verbanden Statistische Physik und Quantennatur zur **Quantenstatistik**, die alle Teilchen fundamental in Bosonen und Fermionen unterscheidet. Eine wichtige Quanteneigenschaft der Teilchen ist der **Spin**. Anschaulich wird er häufig als *Eigendrehimpuls* aufgefasst. Die Teilchen rotieren um ihre eigene Achse mit diskreten Spins. Diese ist aber nur eine naive Hilfsvorstellung. Das Spin-Statistik-Theorem verknüpft den Teilchenspin mit der Statistik. Der englische Quantenphysiker *Paul Adrien Maurice Dirac* (1902 - 1984) erweiterte die Quantenmechanik um Konzepte der Speziellen Relativitätstheorie. In dieser **relativistischen Quantenmechanik** (*Dirac-Theorie*) folgt der Spin als natürliche Teilcheneigenschaft. Er ist also eine relativistische Eigenschaft! Ebenso begründete Dirac somit die Existenz von Antimaterie. Er fand zum bis dato bekannten Elektron (e^-) das Antiteilchen Positron (e^+). Die fundamentale Einteilung des Teilchenzoos in Bosonen und Fermionen stellt sich als wesentlich für den Aufbau der Materie heraus. So kann man das **Periodensystem der Elemente** nur mit dem Elektronenspin und dem Pauli-Prinzip erklären. Ohne den fundamentalen Unterschied zwischen Bosonen und Fermionen würden wir nicht in dieser komplexen, vielfältigen Welt leben!

18.10.10 Quantentheorie erklärt Radioaktivität

Die Kernphysik, im Speziellen die **Radioaktivität**, wurde durch die Quantentheorie befruchtet. So beschreibt der **Tunneleffekt** den **Alpha-Zerfall**. Hier können (positiv geladene) α -Teilchen (Heliumatomkerne) den Coulombwall des (ebenfalls positiv geladenen) Atomkerns durchtunneln, weil die Wellenfunktion bzw. Aufenthaltswahrscheinlichkeit des α -Teilchens außerhalb des Kerns zwar einen kleinen, aber *endlichen* Wert hat.

Der **Beta-Zerfall** wird durch die Theorie der schwachen Wechselwirkung erklärt, indem die geladenen Austauscheteilchen (W-Teilchen) der schwachen Theorie den Quarkgehalt von Proton bzw. Neutron ändern.

Schließlich wird die Emission hochenergetischer Lichtquanten, die **Gammastrahlung**, im Gamma-Zerfall verständlich, weil hochangeregte Tochterkerne aus radioaktiven (Alpha- oder Beta-) Zerfällen sich in energetisch tiefere Zustände des Atomkerns 'abregen'. Nicht nur die Zustände der Elektronen in den Schalen des Atoms werden quantentheoretisch beschrieben, sondern auch die der Nukleonen (Proton und Neutron) im Atomkern!

18.10.11 berühmte Quantenphysiker

Die Quantentheorie der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts hatte folgende, bedeutende Pioniere (alle bis auf Sommerfeld Nobelpreisträger) inklusive Arbeitsgebiet:

- ◇ der Deutsche *Arnold Sommerfeld* (1868 - 1951), Bohr-Sommerfeldsches Atommodell, Spektrallinien, Feinstrukturkonstante;
- ◇ der Neuseeländer *Ernest Rutherford* (1871 - 1937), Rutherfordsches Atommodell, α -Zerfall, Streuung;
- ◇ der Däne *Niels Bohr* (1885 - 1962), Bohr-Sommerfeldsches Atommodell, Bohrsche Postulate;
- ◇ der Österreicher *Erwin Schrödinger* (1887 - 1961), Wellenmechanik, Schrödinger-Gleichung als fundamentale Bewegungsgleichung der Quantenmechanik;
- ◇ der Deutsche *Max Born* (1882 - 1970), Kopenhagener Deutung, Quantenstatistik, Streutheorie;
- ◇ der Franzose *Louis de Broglie* (1892 - 1987), Welle-Teilchen-Dualismus, Materiewellen;
- ◇ der Österreicher *Wolfgang Pauli* (1900 - 1958), Pauli-Prinzip, Spin-Statistik-Theorem, Vorhersage des Neutrinos;
- ◇ der Deutsche *Werner Heisenberg* (1901 - 1976), Heisenbergsche Unschärferelation, Matrizenmechanik;

- ◇ der Italiener *Enrico Fermi* (1901 - 1954), Fermi-Statistik (Fermionen, Fermi-Energie), Kernspaltung, Neutronen;
- ◇ der Brite *Paul Dirac* (1902 - 1984), Dirac-Theorie des Elektrons, relativistische Quantenmechanik, Antimaterie;

18.10.12 Von der QM zur QFT

Die Gebiete dieser Protagonisten subsumiert man unter **Quantenmechanik (QM)**. Davon abgrenzen muss man einen weiteren Bereich der Quantentheorie, der einen modernen Zugang darstellt, nämlich die **Quantenfeldtheorie (QFT)**. Die QFT untersucht systematisch jede der vier fundamentalen Naturkräfte (Elektromagnetismus, schwache Wechselwirkung, starke Wechselwirkung, Gravitation) und versucht diese zu vereinigen (siehe auch Standardmodell und GUT). Die Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen zu einer **Urkraft** muss bei hohen Temperaturen im Frühen Universum, nur Sekundenbruchteile nach dem Urknall, vorgeherrscht haben. Dieser Zustand hoher Symmetrie zerfiel durch Symmetriebrechungen bis der aktuelle Zustand unserer Welt erreicht war.

18.10.13 verrückte Quantenwelt

Die Quantentheorie offenbart eine Reihe seltsam anmutender Prinzipien (Unschärfe, Wahrscheinlichkeitswelle, Dualität) und Phänomene (Energiequantelung, Quantenvakuum, Tunneleffekt, Superfluide, Casimir-Effekt), die unserer Alltagswelt und der Auffassung, die von klassischer Physik geprägt ist, völlig entrückt scheinen. Dennoch oder gerade deswegen ist sie sehr erfolgreich und im atomaren bzw. subatomaren Bereich die momentan einzige Theorie, die eine adäquate und experimentell verifizierbare Beschreibung liefert. Insofern darf man vom wissenschaftstheoretischen Standpunkt die Quantentheorie als eine Theorie bezeichnen, die sich vielfach **bewährt** hat. Die Schwierigkeiten der Quantentheorie stecken in ihrer Unanschaulichkeit, was ein hohes Maß an Abstraktionsvermögen verlangt und darin, dass sie konzeptionell anders ist. Doch dadurch wird unsere Auffassung von dem, was Natur ist, revolutioniert! Ein **objektiver Beobachter** geht mit der Quantentheorie verloren! Die Unschärferelation lehrt uns, dass bereits die Beobachtung das beobachtete System beeinflusst und dessen Zustand ändert. Anschaulich ist es klar, denn *Beobachten* heißt, dass wir andere Testteilchen (z. B. Photonen, also Licht) benötigen, die mit der (subatomaren) Probe wechselwirken, z. B. zurück gestreut werden. Die Testteilchen sagen dem Experimentator durch ihre Eigenschaften, wenn sie beim Beobachter ankommen, in welchem Zustand die Probe ist. Die Crux im atomaren und subatomaren Bereich ist nur, dass die Testteilchen die Probe beeinflussen! Diese Wechselwirkung zwischen 'beobachtenden und beobachteten Teilchen' führt letztlich zur Unschärfe.

18.10.14 Bewegung ist Abfolge von Erzeugung und Vernichtung

Ein anderer Sachverhalt ist, dass die klassische, wohl bestimmte Bahn eines Teilchens **nicht** existiert. Sie *erscheint* uns nur so! Im quantentheoretischen Bild wird das Teilchen, das sich auf einer Trajektorie bewegt, an einen Ort und Zeitpunkt im Raum erzeugt, an einem anderen vernichtet und wieder erzeugt usw. Da dies auf der Quantenebene abläuft, die makroskopisch nicht beobachtbar ist, *erscheint* es uns so, als ob ein Teilchen eine Bahn durchläuft. Doch in Wahrheit gibt es in der Quantenwelt, also auch in der realen Natur, ein ständiges Kommen und Gehen, was mathematisch auch mit Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren beschrieben wird. Diese Operatoren genügen **kanonischen Vertauschungsrelationen: Kommutatoren** bei den Bosonen und **Antikommutatoren** bei den Fermionen. Diese Formulierung ist die Grundlage der *Zweiten Quantisierung*.

18.10.15 Übergang zur Quantenkosmologie

Die Konzepte der Zweiten Quantisierung wurden auch auf die Kosmologie übertragen. Diese Disziplin nennt man Quantenkosmologie. Die Existenz vieler Paralleluniversen ist eine zwingende Folge dieses

Ansatzes. In der Quantenkosmologie spricht man daher von einem **Multiversum**. Auch diese Forschung bewegt sich im spekulativen Bereich und ist reine Theorie. Bisher gab es keinen Hinweis aus astronomischen Beobachtungen, die quantenkosmologische Szenarien stützen.

18.10.16 Herausforderung Quantengravitation

Eine große Herausforderung für die Physik ist die **Verknüpfung der Quantentheorie mit der Allgemeinen Relativitätstheorie**. Die theoretischen Konzepte, die dieses Ziel verfolgen, heißen Quantengravitationen. Die aussichtsreichsten Kandidaten für eine Quantengravitation sind die Stringtheorien und - später hinzugekommen - die Loop-Quantengravitation. Mit diesen Theorien ist wieder ein revolutionäre Sichtweise der Welt der Physik verbunden. Sie unterscheiden sich jedoch in einem wesentlichen Punkt von der Quantentheorie und der Relativitätstheorie: Beide haben sich noch nicht bewährt! Deshalb müssen **Hypothesentests** durchgeführt werden, die Stringtheorien und/oder Loop-Quantengravitation mehr Gewicht verleihen - oder entkräften. Nur auf diese Weise rückt man diese neuen, theoretischen Konzepte aus dem Gebiet der Mathematik in das der Physik. Sie werden Theorien, die die Natur beschreiben.

18.10.17 Webtipp

- ◇ Nobelpreisträger der Physik: viele Eckdaten, Vorstellung des Arbeitsgebiets und Biographien in englischer Sprache

18.11 Quantenvakuum

Unter diesem Begriff versteht man den **Vakuuzustand der Quantenphysik**, den Zustand niedrigster Energie. Diese **Nullpunktenergie** ist immer größer als null, d. h. selbst wenn sich makroskopisch in einem physikalischen System 'scheinbar nichts tut', so ist es mikroskopisch 'immer in Bewegung'. Somit hat die Quantentheorie das Bild von der Natur auch hinsichtlich des Vakuums revolutioniert.

18.11.1 Nichts

Etwas weltlicher formuliert verbirgt sich hinter dem Quantenvakuum das **Nichts**. Die Quantentheorie entlarvt das Nichts als ein komplexes, strukturreiches Gebilde. Es stellt sich heraus, dass es prinzipiell unmöglich ist, einen Raumbereich völlig von Teilchen zu entleeren. Das widerspricht selbstverständlich jeder klassischen Denkweise - ist jedoch quantenphysikalisch richtig und erklärbar. In (nicht nur) diesem Aspekt bietet die Quantenphysik interessante Anknüpfungspunkte für eine philosophische Debatte.

18.11.2 Lösen der Bewegungsgleichung

Der genaue Zahlenwert für den niedrigsten Energiezustand (**Grundzustand**) hängt vom betrachteten Quantensystem ab. Die möglichen Zustände eines Quantensystems werden durch **Wellenfunktionen** dargestellt, die üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben Ψ (Psi) symbolisiert werden. Die Physiker erhalten die Wellenfunktionen durch Lösung der *Bewegungsgleichung* des Systems. Dies kann eine Schrödinger-Gleichung, eine Klein-Gordon-Gleichung, eine Soliton-Gleichung oder eine andere Differentialgleichung sein. Die Wellenfunktionen konstituieren dann das *Spektrum* des betrachteten Problems, das in **Vakuuzustände** und **angeregte Zustände** eingeteilt wird. Die Vakuuzustände sind Zustände niedrigster Energie und besonders stabil.

18.11.3 Observable & Vakuumerwartungswert

In der Quantentheorie gibt es eine Zuordnung zwischen dem Messwert (*Observable*), und dem *Erwartungswert*. Sie sind wohl definiert und führen auf den hier zentral zu diskutierenden

Vakuumerwartungswert.

18.11.4 Beispiel: der harmonische Oszillator

Der harmonische Oszillator der Quantenmechanik ist ein einfaches Modellsystem, das diese Eigenschaft zeigt: die Eigenwerte des Hamilton-Operators, der die Energie im System beschreibt, verrät die möglichen energetischen Zustände des Systems. Sie sind **quantisiert**, d. h. es können nur diskrete Werte (Energistufen) angenommen werden und nicht beliebige Werte eines Kontinuums. Der energetisch tiefstmögliche Zustand besitzt eine von null verschiedene Energie, die gerade $0.5 \times h/(2\pi) \times \omega$ ist (h : Plancksches Wirkungsquantum, ω : Kreisfrequenz). Der harmonische Oszillator vollführt dann eine **Nullpunktsschwingung**.

Die Eigenfunktionen des Hamilton-Operators charakterisieren gerade die Eigenzustände des Systems, die Wellenfunktionen. Im Bild der Quantisierung vermitteln zwischen den unterschiedlichen, diskreten Energieniveaus die Erzeuger- und Vernichteroperatoren. Sie erzeugen oder vernichten beim harmonischen Oszillator ein Schwingungsquant (bosonisches **Vibron**), wenn man von einem Energieniveau zum nächsten wechselt. Dies ähnelt den Sprossen einer Leiter, die man auf- oder hinuntersteigt, weshalb man Erzeuger und Vernichter auch salopp 'Leiteroperatoren' nennt.

18.11.5 Vakuumfluktuationen

Gemäß der **Heisenbergschen Unschärferelation** kann man bei der Interpretation als Energie-Zeit-Unschärfe dem Vakuum für sehr kurze Zeit Energie entziehen. Aus diesen Energieportionen können sich **virtuelle Teilchenpaare** bilden, bestehend aus Teilchen (z. B. Elektron) und zugehörigem Antiteilchen (z. B. Positron), die nach Verfließen der kurzen Zeiten wieder verschwinden. Diesen Vorgang nennt man auch **Vakuumpolarisation**. Das Quantenvakuum ist also bildlich gesprochen ein 'ständig brodelnder See aus Teilchen und Antiteilchen', die entstehen und vergehen. Ein anderer, oft bemühter Begriff ist der der **Vakuumfluktuationen**.

18.11.6 Aus virtuell werde real

Unter bestimmten Bedingungen (weitere Energiezufuhr, weitere Partner für Impulsübertrag) können diese virtuellen Teilchen materialisieren. Genau dieser Prozess findet wohl auch bei der Bildung von Hawking-Strahlung am Ereignishorizont Schwarzer Löcher statt. Dieses bisher rein theoretisch abgeleitete Phänomen folgt aus einer semiklassischen Berechnung, d. h. die Allgemeine Relativitätstheorie wird mit Erkenntnissen aus der Quantenphysik verquickt - allerdings **ohne** eine konsistente Quantisierung des Gravitationsfeldes.

18.11.7 Quantenvakuum in der Quantenkosmologie

Für die **Quantenkosmologie** ist das Quantenvakuum von besonderer Relevanz, weil sich daraus ein mikroskopisches Universum gebildet haben könnte, das über den Mechanismus der **Inflation** sehr schnell sehr groß wurde.

18.11.8 experimenteller Nachweis des Quantenvakuums gelungen!

Im Casimir-Effekt ist das Quantenvakuum experimentell nachgewiesen worden. Zwischen zwei Metallplatten ('Kastenproblem') fehlen bestimmte Moden (= Anregungszustände) **virtueller Photonen**, so dass der Quantendruck von außen, wo alle Moden existieren können, überwiegt und die **Casimir-Kraft** die Platten zusammendrückt (mehr Einzelheiten unter Casimir-Effekt).

18.11.9 falsches Vakuum

Unter einem *falschen Vakuum* versteht man in der Diskussion von **Higgs-Mechanismen** Gebiete, die sich nach einer Symmetriebrechung ausbilden und *endlichen Vakuumenergie* für das Higgs-Feld haben. Mit den falschen Vakua sind topologische Defekte verknüpft, in denen Energie 'topologisch eingeschlossen' ist. In vielfältiger Ausprägung (kosmische Strings, kosmische topologische Defekte mit dem Charakter Dunkler Energien) können diese Defekte von hoher Relevanz für die Kosmologie sein.

Auch in den Inflationsmodellen ist das falsche Vakuum bedeutsam, weil es eine exponentielle Expansion des Universums treibt.

18.11.10 Manifestiert sich das Vakuum kosmologisch als Dunkle Energie?

Die Dunkle Energie dominiert die späte Dynamik des Kosmos, wie es in unserem unmittelbaren, d. h. lokalen Universum der Fall ist. Sie macht mehr als zwei Drittel aller Energieformen im Kosmos (neben Dunkler Materie und baryonischer Materie) aus. Aber die Natur der Dunklen Energie ist ungeklärt! Als bislang beste Erklärung bietet sich das Quantenvakuum an, das sich auf der großen, globalen Skala des Kosmos in der Gestalt einer Dunklen Energie beschreiben lassen könnte. An sich eine paradoxe Vorstellung:

Das Nichts soll für eine beschleunigte Expansion des Universums sorgen!

Aber auf der kleinen Skala ist die Dunkle Energie schwach und irrelevant. Die mathematischen Details dieser attraktiven Hypothese sind allerdings unklar, zumal eine erste Berechnung große Unstimmigkeiten zutage gebracht hat.

18.12 Quantenzahlen

Als Quantenzahlen bezeichnen die Physiker sämtliche quantisierte Eigenschaften (*Freiheitsgrade*) eines Teilchens oder quantisierten Systems (Ein-, Zwei-, Mehrteilchensysteme).

18.12.1 So finden wir Quantenzahlen

Der tiefer liegende Zusammenhang, der eine Verwendung von Quantenzahlen rechtfertigt, ist die **Quantisierung** physikalischer Größen, die die Quantentheorie aufdeckte. Kennt man das Quant, also die kleinstmögliche Einheit der betreffenden physikalischen Größe, so genügt die Angabe einer Zahl, nämlich des **Vielfachen dieser Einheit**, die *Quantenzahl*, um den Zustand des Systems eindeutig zu charakterisieren. In der Regel beschreiben erst viele Quantenzahlen, die unterschiedlichen Eigenschaften zugeordnet sind, ein Teilchen oder System eindeutig. Also charakterisieren Quantenzahlen erst ein Teilchen, ein Organisationsprinzip, um Ordnung in den Teilchenzoo zu bringen. Genau diese Methode wenden die Teilchenphysiker dem *Particle Physics Booklet* an. Es handelt sich um eine Art 'Teilchenkatalog', der alle Teilchen namentlich vorstellt und dann ihre Eigenschaften in Form von Quantenzahlen listet.

18.12.2 Beispiele für Quantenzahlen

- ◇ Eine sehr anschauliche physikalische Größe und Quantenzahl ist die **elektrische Ladung** Q . Im *Millikan-Versuch* konnte die **Elementarladung** e abgeleitet werden. Man könnte dies als *Ladungsquant* bezeichnen. Ihr Zahlenwert ist $e = 1.602\,176\,462 \times 10^{-19}$ C (C steht für die SI-Einheit *Coulomb* der elektrischen Ladung). Entsprechend wird eine beliebige elektrische Ladung Q in Einheiten von e angegeben, also eine (in der Regel) ganze Zahl, die Quantenzahl. Dabei gilt die Vereinbarung, dass negative Ladungen ein negatives Vorzeichen und positive Ladungen ein positives Vorzeichen erhalten. So haben Elektronen $Q = -1$, Protonen und Positronen haben $Q = +1$ und die Quarks haben sogar drittelzahlige Ladungen, $Q = -1/3$ oder $Q = +2/3$ (wie man sieht haben Quarks drittelzahlige Ladungen!).

- ◇ Das Standardmodell der Teilchenphysik kennt weitere Ladungen: So wie Photonen an die elektrische Ladung koppeln, koppeln die Austauschteilchen (**Eichbosonen**) der schwachen Wechselwirkung, W^- , W^+ und Z^0 an die **schwache Ladung** g (oder *Kopplung*). Offensichtlich tragen Quarks und Leptonen ein g verschieden von null, da sie alle schwach wechselwirken. Zudem besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Elementarladung und schwacher Ladung, nämlich

$$e = g \sin \theta_W.$$

Leider wird der dabei auftretende **Weinbergwinkel** θ_W *nicht vom Standardmodell prognostiziert*, folgt aber aus den Großen Vereinheitlichten Theorien in einer SU(5)-Gruppentheorie. Die Teilchenphysiker ermitteln den Weinbergwinkel experimentell: Er folgt aus dem Massenverhältnis von W- zu Z-Teilchen der schwachen Wechselwirkung:

$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W.$$

Der Zahlenwert für den *quadrierten Sinus des Weinbergwinkels* ist 0.23143.

- ◇ In der elektroschwachen Theorie taucht die schwache Hyperladung Y auf, die mit der unitären Gruppe U(1) beschrieben wird. Das Konzept der Hyperladung wurde unabhängig voneinander von den Physikern *Murray Gell-Mann* und *Kazuhiko Nishijima* 1953 entwickelt. Die Nukleonen, Proton und Neutron, besitzen identische schwache Hyperladung, $Y = 1$ (siehe dazu auch letzte Gleichung unten).
- ◇ Der **Bahndrehimpuls** ist ebenfalls quantisiert und wird durch die **Bahndrehimpulsquantenzahl** l angegeben. l gibt die Vielfache von $\hbar/(2\pi) = 1.054\,571\,596 \times 10^{-34}$ Js an ($\hbar = 6.626\,068\,76 \times 10^{-34}$ Js ist das berühmte Plancksche Wirkungsquantum). Die Angaben sind wichtig, um Zustände von Elektronen in Atomen zu charakterisieren. Die historische Terminologie ist dabei: $l = 0$ heißt S-Zustand, $l = 1$ P, $l = 2$ D, $l = 3$ F, $l = 4$ G, entsprechend weiter im Alphabet.
- ◇ Der **Spin** s , mathematisch ebenfalls ein Drehimpuls, ist ebenfalls quantisiert und nimmt nur Vielfache von $\hbar/(4\pi)$ an. Quarks und Leptonen sind Fermionen und haben $s = 1/2$.
- ◇ Weitere quantisierte Drehimpulse sind der **Gesamtdrehimpuls** J , der **Isospin** I und der **schwache Isospin** T .
- ◇ Wichtige Quantenzahlen in der Teilchenphysik sind außerdem die **Seltsamkeit** S , **Leptonenzahl** L , **Baryonenzahl** B , **Bottomness** B^* , **Charmness** C etc.

18.12.3 Regel für Quantenzahlen

Allgemein gilt immer:

Die Quantenzahl eines zusammengesetzten Teilchens oder Systems ist die Summe der Quantenzahlen seiner Konstituenten.

Ein Beispiel für diese Regel wird bei den Hyperonen anhand der Seltsamkeit vorgestellt.

18.12.4 gute Quantenzahlen

'Gute' Quantenzahlen sind erhalten. Das ist eine wunderbare Eigenschaft, weil sie viele Rechnungen erleichtert. Aber da ist noch mehr: Diese Erhaltung von Quantenzahlen steht in Zusammenhang mit Symmetrien (auch *Noether-Theorem*). Auf der Basis der Gruppentheorie haben die theoretischen Physiker einen sehr eleganten, mathematischen Apparat gefunden. Das legt eine profunde Sicht auf die Natur frei: Gruppenstruktur, Symmetrien und Erhaltungsgrößen sind miteinander verwoben.

18.12.5 Verknüpfungen zwischen Quantenzahlen

Die Quantenfeldtheorien decken wichtige **Relationen zwischen Quantenzahlen** auf. Die *Gell-Mann-Nishijima-Formeln*

$$Q = I_3 + \frac{1}{2}(B + S + C + B^*)$$
$$Q = T_3 + \frac{Y}{2}$$

verknüpfen einige Quantenzahlen, wie die letzten beiden Gleichungen zeigen, nämlich entweder elektrische Ladung Q , dritte Komponente des Isospins I_3 , Baryonenzahl B , Seltsamkeit S , Charmness C und Bottomness B^* oder elektrische Ladung Q , Hyperladung Y und dritte Komponente des schwachen Isospins T_3 : (Quelle für Zahlenwerte: Particle Physics Booklet, Stand Juli 2002)

18.13 Quark-Ära

Die Quark-Ära kennzeichnet eine bestimmte frühe Entwicklungsphase des Universums, als die kosmische Urmaterie dominiert war von Quarks.

18.13.1 Es war heiß, sehr heiß!

Die typische Temperatur der Quark-Ära lag zu Beginn bei etwa 10^{22} Kelvin oder 10^9 GeV. Dieser Zustand herrschte etwa 10^{-23} Sekunden nach dem Urknall. In dieser Phase gab es noch keine Atomkerne, nicht einmal gebundene Zustände aus Quarks, die Hadronen (erst in der Hadronen-Ära). Diese Urmaterie war unstrukturiert und nur aus Elementarteilchen zusammengesetzt. Die **Quarks waren frei** und existierten zusammen mit den Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, den Gluonen, in einem Zustand namens Quark-Gluonen-Plasma (QGP). Bei einer Temperatur von 10^{12} Kelvin oder 100 MeV ist das QGP noch vorhanden.

18.13.2 Quarks & Leptonen

Neben dem primordialen QGP gab es freie Leptonen, wie Elektronen, Positronen, Myonen und Neutrinos. Alle diese Elementarteilchen wurden am Ende der GUT-Ära erzeugt, als die superschweren X-Bosonen und Y-Bosonen zerfallen waren.

18.13.3 Asymmetrie als Voraussetzung für unsere Existenz

Dabei stellte sich ein geringfügiges, aber hochrelevantes Missverhältnis zwischen Teilchen und Antiteilchen ein. Diese Asymmetrie ist wichtig, damit verständlich wird, weshalb es überhaupt baryonische Materie im Universum gibt (siehe Baryogenese).

18.13.4 Es wurde kalt, zu kalt!

Als das Universum etwa 10^{-5} Sekunden alt war und eine Temperatur von 200 MeV erreichte, konnten die Quarks nicht länger als freie Teilchen existieren. Sie schlossen sich zu Zweier- (Mesonen) und Dreiergruppen (Baryonen) zusammen (beide Teilchengruppen als Hadronen subsumiert). Diesen Phasenübergang nennt man **QCD-Phasenübergang** (engl. *QCD freezeout*) oder **Quark-Hadron-Übergang**. Er markiert das Einsetzen des *Quark confinements*, wo also die Quarks in Teilchenverbänden eingeschlossen wurden. Dieser Vorgang war abgeschlossen, als das Universum eine Sekunde alt wurde. Dann konnten die Baryonen in der Epoche der **primordialen Nukleosynthese** schließlich die ersten leichten Atomkerne bilden.

18.14 Quark-Gluonen-Plasma

Das Quark-Gluonen-Plasma (**QGP**) ist eine besondere und exotische Materieform, wie sie unter normalen, irdischen Bedingungen nicht vorkommt. Dieses Plasma besteht aus **quasi-freien Quarks und Gluonen**. Die Existenz des QGPs wurde vom Standardmodell der Teilchenphysik und der Quantenchromodynamik (QCD) vorhergesagt.

18.14.1 extreme Bedingungen

Allerdings bildet sich das Quark-Gluonen-Plasma nur unter extremen Bedingungen: Entweder muss die Materiedichte enorm hoch sein, und etwa fünf- bis zehnfache Kernmateriedichte, entsprechend 1.3 bis $2.5 \times 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$, betragen. Oder die Temperatur muss extrem hoch sein, bei etwa 10^{12} Kelvin! Das ist fast 70000mal heißer als im Mittelpunkt der Sonne! Mittlerweile ist das Quark-Gluonen-Plasma 'künstlich' in Teilchenbeschleunigern hergestellt und gesichert experimentell nachgewiesen worden.

18.14.2 Über Quarks und Gluonen

Das erstaunliche am QGP ist, dass die Quarks in **freier Form** existieren können. Unter normalen Bedingungen sind sie als Hadronen gebunden. Gebunden zu Zweiergruppen nennt man sie Mesonen, in Dreiergruppen Baryonen. Mittlerweile wurden sogar Quarks in Vierergruppen (Tetraquark) und Fünfergruppen (Pentaquark) experimentell nachgewiesen.

Die Bindung der Quarks wird in der Fachsprache *confinement* (engl. für 'Gefangenschaft', 'Einschluss') oder im Deutschen auch 'Farbeinschluss' genannt. Das Confinement wird unter den genannten extremen Bedingungen aufgebrochen und die Quarks sind asymptotisch frei. Sie wechselwirken gemäß der QCD, der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, miteinander über den Austausch von Gluonen. Diese bosonischen Botenteilchen, die die starke Kraft vermitteln, bilden zusammen mit den quasi-freien Quarks ein plasmaartiges Konglomerat, das *Quark-Gluonen-Plasma* genannt wird.

18.14.3 Welche Prognose gibt die Theorie?

Die Gleichungen der Quantenchromodynamik im Regime starker Kopplung lassen sich durch die **Gittereichtheorie** lösen. Dabei wird die Theorie auf einem euklidischen Raum-Zeit-Gitter diskretisiert - ein Verfahren, das übrigens Lösungsverfahren in der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik ähnelt (siehe auch AMR). Die Rechnungen der Gitter-QCD haben ergeben, dass der Phasenübergang bei $173 \pm 15 \text{ MeV}$ (oder etwa eine Billion Kelvin) stattfindet (z. B. *F. Karsch*, hep-lat/0412038).

18.14.4 Wir heizen auf - was geschieht?

Aufheizen bricht die Atomkerne in Nukleonen auf. Die Hitze stellt auch Energie zur Verfügung, die es gestattet, aus dem Quantenvakuum Teilchen entstehen zu lassen: vor allem Pionen. In diesem Stadium gibt es demnach Nukleonen und dazwischen Pionen. Schließlich überlappen die Pionen mit den Nukleonen, so dass es insgesamt zu einem **Netzwerk aus Quarks, Antiquarks und Gluonen** kommt. Am Ende füllt dieses Netzwerk den ganzen Raum aus - ein Zustand, den man *Perkolation* (lat. *percolo*: 'vollenden') nennt - und man erhält das **heiße QGP**.

18.14.5 Wir pressen zusammen - was geschieht?

Beim Komprimieren von Materie gibt es einen vergleichbaren Überlappungseffekt wie soeben beschrieben, nur dass sich danach ein **kaltes QGP** ausbildet.

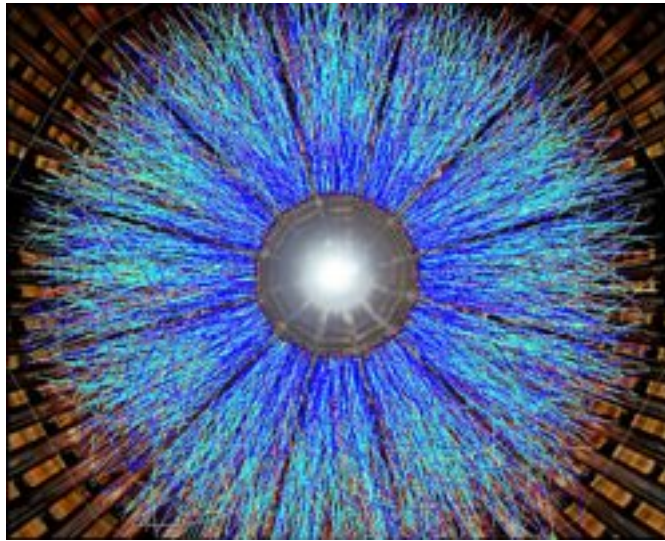


Abbildung 18.2: Feuerball nach Gold-Gold-Kollision.

18.14.6 natürliches Vorkommen des QGPs

Die Extrembedingungen, mehrfache Kernmateriedichte und ein Billion Kelvin hohe Temperaturen, findet man in der Natur nach aktuellem Kenntnisstand nur in zwei Fällen. Im Universum, etwa eine Mikrosekunde nach dem Urknall, als der Feuerball noch klein und heiß genug war, erwarten die Physiker ein heißes QGP. Hingegen erwarten sie im Innern von kompakten Objekten, nämlich bei den Neutronensternen oder eventuell auch bei Quarksternen, dass ein kaltes QGP im Innern entsteht

18.14.7 So stellen Physiker das QGP künstlich her

Die Physiker versuchten schon seit einiger Zeit das QGP experimentell in Teilchenbeschleunigern herzustellen. In einigen wenigen Aspekten entspricht dieses Experiment einem **Urknall im Labor**. Dazu benutzen die Teilchenphysiker schwere Ionen, wie Gold- oder Bleiionen. Diese Elemente enthalten besonders viele Teilchen im Atomkern, etwa 200 dieser so genannten Nukleonen pro Atomkern. Schwere Elemente eignen sich für diese Experimente, weil sie bereits viele Teilchen für einen Zusammenstoß mitbringen, hohe Bewegungsenergien besitzen, wenn sie beschleunigt werden (kinetische Energie wächst linear mit der Masse) und einen größeren Querschnitt zur Kollision haben. Die schweren Ionen werden aufeinander geschossen und sollen für extrem kurze Zeiten das QGP in einem winzigen Raumpunkt erzeugen: die so genannte **Energiedichte** ist die zentrale Größe in der Teilchenbeschleunigerphysik. Ziel ist es in einem kleinen Volumen viel Energie (in Form von schnellen Teilchen) zu deponieren. Bei einer Kollision von einem Goldion auf ein anderes werden **auf einmal 400 Nukleonen** in einem winzigen Würfel der Kantenlänge von einem Femtometer (10^{-13} cm) vereinigt. Die Temperaturen dabei sind enorm hoch und betragen etwa 1.8×10^{12} Kelvin! Kurzzeitig entsteht ein so genannter **nuklearer Feuerball**. Das klingt dramatisch, aber die *totale Energie* (etwa 200 GeV pro Nukleonenpaar) ist nicht viel größer, als diejenige kinetische Energie, die frei wird, wenn eine Augenwimper aus einer Höhe von 60 Zentimetern auf den Boden fällt!

Die Physiker können das QGP jedoch nicht direkt messen, sondern müssen aus den **hadronischen Schauern** die Existenz des QGP rekonstruieren. Nach einer kurzen Existenz des Plasmas aus Quarks und Gluonen, 'zerplatzt' der Feuerball in eine Vielzahl von Teilchen: neben den Nukleonen (Protonen und Neutronen), entstehen auch Photonen und natürlich auch Pionen sowie Kaonen etc. Mit *hadronischen Schauern* bezeichnen die Kernphysiker die neuen Teilchen, die sich aus den Fragmenten der Kollision bilden. Weil ein Feuerball zu einigen tausend Teilchen 'hadronisiert', ist die Detektion und

Datenanalyse außerordentlich anspruchsvoll. Die Abbildung 18.2 vermittelt einen Eindruck davon: sie zeigt tausende Hadronen als bunte Fäden, die nach einer Gold-Gold-Kollision im STAR-Experiment am RHIC entstanden sind (Credit: *Berkeley Lab*, 2005). Die oben genannte Phasenübergangstemperatur von etwa 170 MeV folgt experimentell aus der Analyse der produzierten Hadronenhäufigkeiten mit etwa 10% Unsicherheit - eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

18.14.8 Unfall zweier Pfannkuchen

Erste Hinweise auf die Bildung des Quark-Gluonen-Plasmas gab es schon an der europäischen Teilchenbeschleunigeranlage CERN, wie im Jahr 2000 bekannt gegeben wurde. Der gesicherte Nachweis gelang am US-amerikanischen Teilchenbeschleuniger RHIC, dem *Relativistic Heavy Ion Collider*. Hier nutzen die Physiker zur Herstellung des QGP einen 2.4 Meilen umfassenden Ring, an dem es sechs (magnetisch geführte) Kreuzungspunkte gibt. An den Kreuzungen können sich die Teilchenkollisionen ereignen. Die Atomkerne erreichen relativistische Geschwindigkeiten, also Geschwindigkeiten, die mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit (knapp 300000 km/s) vergleichbar sind. Aufgrund der Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie und der damit verbundenen Lorentz-Kontraktion erscheinen die an sich (im Ruhesystem) kugeligen Kerne im Laborsystem stark abgeflacht in Bewegungsrichtung. Die Kollision findet demnach eher zwischen zwei scheibenartigen Gebilden (Fachausdruck *pancakes*, also 'Pfannkuchen') statt. In der Theorie kann die Kollision schwerer Atomkerne mit den Methoden der Hydrodynamik beschrieben werden. Damit können die experimentellen Daten gut wiedergegeben werden.

Erste Ergebnisse am RHIC wurden aus Gold-Deuteron-Kollisionen im März 2003 gewonnen. Das viel leichtere Deuteron ist ein Verbund aus einem Proton und einem Neutron, dem Atomkern des *Deuteriums*, schwerem Wasserstoff. Das viel kleinere Deuteron schießt durch den viel größeren Goldatomkern wie eine Gewehrkegel. Dabei werden Quarks herausgerissen, die schließlich **Teilchen-Jets** erzeugen. 'Teilchen-Jet' meint in diesem Zusammenhang die oben angesprochenen 'Teilchenschauer'. (Anmerkung: Die Teilchenjets sind nicht zu verwechseln mit den kosmischen Jets der Astrophysik! Sie sind sich nur morphologisch ähnlich.)

18.14.9 Durchbruch am Teilchenbeschleuniger RHIC

Im Jahr **2004** wurde eine Erfolgsmeldung verbreitet: Am Teilchenbeschleuniger RHIC konnte mit den Detektoren PHENIX und STAR das Quark-Gluonen-Plasma nachgewiesen werden!

In den Spektren der aus dem Feuerball erzeugten Teilchen finden sich auch Hinweise darauf, dass einige schnelle Teilchen in der dichten QGP-Schicht abgebremst werden. Die Dichte der Gluonen kann daraus abgeschätzt werden und führt zu einem Zahlenwert, dass sich in einem Zylinder mit dem Durchmesser eines Goldatomkerns und der Höhe eines Femtometers **etwa tausend Gluonen** befinden!

18.14.10 fundamentales Verständnis der Natur

Aus diesen experimentellen Erfolgen der Teilchenphysik ergeben sich bestimmt vorerst keine industriellen Anwendungen, die den neuen Materiezustand zu nutzen vermögen. Denn dafür sind die Herstellungsbedingungen zu extrem und das QGP zu kurzlebig. Aber es bedeutet einen Durchbruch sowohl für die experimentelle, als auch die theoretische Kernphysik. Die Erforschung der starken Wechselwirkung ist nun unter völlig neuen Voraussetzungen möglich. Es ist insbesondere ein Erfolg der Quantenchromodynamik, deren Prognose bestätigt werden konnte. Die Herstellung und Vermessung des QGPs auf der Erde kommen auch der Astronomie zugute, weil sich aus den Experimenten neue Beschränkungen für das frühe Universum und das Innere von Neutronensternen ergeben. Letztendlich nutzen diese Entdeckungen der ganzen Physik, weil sie in ein neuartiges Verständnis der fundamentalen Wechselwirkungen und dem Aufbau der Materie münden.

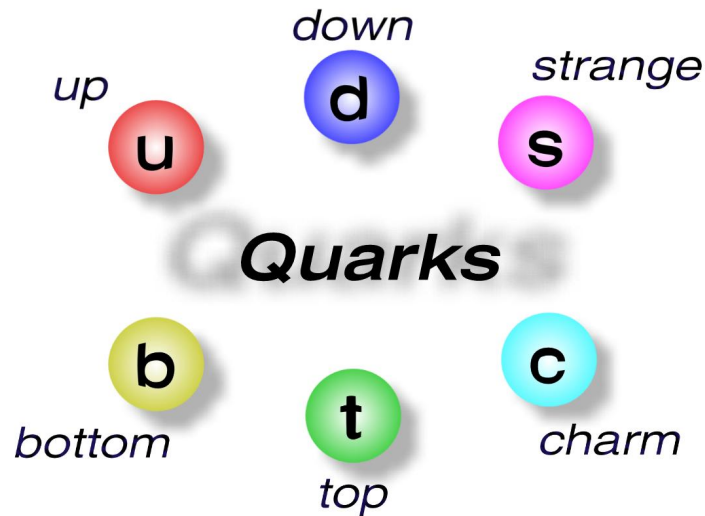


Abbildung 18.3: Quarkfamilie.

18.14.11 Literatur

- ◇ **Extreme Materie** von *Peter Braun-Munzinger & Jochen Wambach*, Physik Journal, Oktober 2006
- ◇ **Flüssige Quarkmaterie** von *Johanna Stachel*, Physik Journal, Juni 2005
- ◇ Experimental and Theoretical Challenges in the Search for the Quark Gluon Plasma, *STAR Kollaboration*, 2005
- ◇ Formation of dense partonic matter at relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC, *PHENIX Kollaboration*, 2004

18.15 Quarks

Quarks sind neben den Leptonen dem Standardmodell der Teilchenphysik folgend die **fundamentalen Bausteine der Materie**. Die Physiker sind derzeit überzeugt, dass sie nicht mehr teilbar sind und keine weitere Substruktur aufweisen. Im Prinzip ist das ein moderner Atomismus im Sinne *Demokrits*. Diese Eigenschaft umreißt man mit dem Begriff 'Punktförmigkeit' und muss dabei wissen, dass idealisierte Punkte an sich nicht mit der Quantentheorie verträglich sind. Denn das Heisenbergsche Unschärfeprinzip verbietet die Existenz idealisierter Punkte.

18.15.1 Ursprung des Wortes 'Quark'

Die Etymologie des Namens *Quark* geht auf den amerikanischen Elementarteilchenphysiker *Murray Gell-Mann* (*1929) zurück: er entlehnte dem Roman *Finnegans Wake* (1939) des irischen Dichters *James Joyce* diesen Begriff. Dort heißt es gleich zu Anfang eines dreizehnzeiligen Gedichts: 'Three quarks for Muster Mark! [...]'. Der Begriff *quark* war hier ein onomatopoetisches Kunstwort, das *Joyce* in Anlehnung an die Laute einer Krähe wählte und das sich auf andere Worte im Vers des Gedichts reimte.

18.15.2 sechs Quarks

Die drei Quarks passten hervorragend zur damals bekannten Zahl subatomarer Partikel, die die Nukleonen konstituieren. Erst später stellte sich heraus, dass es insgesamt **sechs Quarks** gibt, die alle experimentell nachgewiesen werden konnten (zuletzt, 1995, das schwerste Quark, das *top*-Quark).

18.15.3 Eigenschaften der Quarks

Vom physikalischen Standpunkt handelt es sich bei den Quarks um punktförmige Fermionen mit Spin $1/2$, die Träger **drittelzahliger elektrischer Elementarladungen** ($+2/3$ oder $-1/3$) und der so genannten **Farbladung** sind. Die 'Farbe', zu verstehen als hypothetisches Merkmal (nicht als tatsächliche Färbung!), ist ein weiterer Freiheitsgrad und begründete gerade den Namen der Quantenchromodynamik (QCD) (grch. *chroma*: Farbe). Die Farbladung ist gewissermaßen ein Analogon zur elektrischen Ladung und ein weiteres Unterscheidungsmerkmal für Teilchen.

Man kennt sechs Quarks, die sich in der Eigenschaft *Flavor* (dt. 'Geschmack') unterscheiden (siehe Grafik 18.3). Die Terminologie ist u, d, s, c, b, t, als Abkürzungen für *up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom* und *top*. Diese Bezeichnungen sind natürlich willkürlich und im Prinzip irrelevant. Sie dienen nur der Unterscheidung. Es gibt zu diesen sechs Quarks die jeweiligen **Antiquarks**, also weitere sechs Teilchen.

18.15.4 Massen und Ladungen der Quarks

- ◇ u: 5 MeV, $+2/3$ (in Einheiten der *Elementarladung e*)
- ◇ d: 10 MeV, $-1/3$
- ◇ s: 200 MeV, $-1/3$
- ◇ c: 1.5 GeV, $+2/3$
- ◇ b: 4.7 GeV, $-1/3$
- ◇ t: 180 GeV, $+2/3$

(Quelle: CERN-Homepage, Stand August 2002)

Das **top-Quark** wurde aufgrund seiner hohen Masse erst 1995 am FERMILAB experimentell nachgewiesen. Ebenfalls am FERMILAB wurde bereits 1977 das bottom-Quark entdeckt.

18.15.5 Willkommen im Hadronenzoo

Alle Hadronen bestehen aus Quarks, deren Unterklassen, die Baryonen aus drei und die Mesonen aus zwei Quarks. Neuerdings sind neue Teilchen dazu gekommen, die aus mehreren Quarks bestehen. So kennt man mittlerweile das Tetraquark, das aus vier Quarks besteht und das Pentaquark, das sich sogar aus fünf Quarks zusammensetzt.

18.15.6 freie Quarks

Unter normalen, d. h. irdischen, Bedingungen ist die **chirale Symmetrie** gebrochen und die Quarks sind eingeschlossen (*confinement*) und nur *asymptotisch frei*. Bei hohen Temperaturen ab etwa 170 MeV oder bei hohen Drücken wird jedoch die chirale Symmetrie restauriert: die Quarks (und Gluonen) sind quasi-frei (*deconfinement*), und es entsteht eine neue Materiephase, die **Quark-Gluonen-Plasma (QGP)** heißt. Von diesem Zustand stark wechselwirkender Materie glaubt man, dass er im Innern von Neutronensternen, Magnetaren und Quarksternen realisiert ist. Auch Sekundenbruchteile nach der Entstehung unseres Universums im Urknall war das Milieu in einem geeigneten Zustand in Dichte und Temperatur, um das QGP hervorzubringen. 2004 wurde experimentell das QGP am Teilchenbeschleuniger RHIC nachgewiesen.

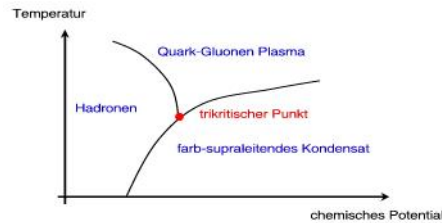


Abbildung 18.4: QCD-Phasendiagramm.

18.16 Quarksterne

Bei sehr hohen Massendichten, die vergleichbar sind mit denen im Innern von Neutronensternen, erwarten Physiker, dass sich salopp gesagt 'die Nukleonen überlappen' und ein Übergang in Quarkmaterie stattfindet. Bereits vor vier Jahrzehnten wurde darüber nachgedacht, dass eine solche Materieform im Innern kompakter Sterne vorkommen könnte: in Quarksternen.

18.16.1 ultradichte Materie

Befassen wir uns zunächst mit extrem dicht gepackter Materie: Kern- und Teilchenphysiker sind an **Phasendiagrammen** der Quantenchromodynamik (QCD) interessiert. Wie in der klassischen Thermodynamik von Gasen geben Phasendiagramme darüber Auskunft, unter welchen thermodynamischen Bedingungen, d. h. ab welchen Dichten und Temperaturen, ein Übergang von der einen Phase in die andere stattfindet (**Phasenübergang**). Ein einfaches Beispiel eines Phasenübergangs ist das Gefrieren von Wasser, das dabei von der flüssigen in die feste Phase übergeht.

Um nun auf analoge Weise QCD-Phasendiagramme zu bekommen, müssen die Physiker sie mit geeigneten Methoden berechnen. Ein wesentliches Modell ist das **MIT Bag-Modell**, das entwickelt wurde, um aus den Quarks die Massen der Hadronen abzuleiten (*Chodos et al.*, 1974). Die QCD kann numerisch auf dem Gitter gelöst werden (*Lattice Quantum Chromodynamics*, LQCD). Aus diesen Rechnungen resultieren Vorstellungen über Quarkmaterie und Zustandsgleichungen unter extremen Bedingungen.

18.16.2 Phasen dichter Materie

Bei hohen Dichten, etwa mehrfacher Kernmateriedichte und tiefen Temperaturen, kondensiert die Materie zu **Quarkpaaren**, was man in Analogie zur BCS-Supraleitung der Festkörperphysik **Farbsupraleitung** nennt. Die Quarks befinden sich in einem *Fermi-See* und solche an der *Fermi-Oberfläche* sind quasi frei.

Die drei Phasen in der QCD sind die **hadronische Phase**, die **Quark-Gluonen-Phase** und die **farbsupraleitende Phase**. Am **trikritischen Punkt** sind diese Phasen koexistent und stehen miteinander im Gleichgewicht, wie das QCD-Phasendiagramm 18.4 zeigt.

Daneben soll es aber noch eine im wörtlichen Sinne 'fremdartige Phase' geben: die **Strange-Materie** (siehe dazu Seltsamkeit). Diese Materie kommt *in natürlicher Form nicht auf der Erde* vor. Die Nukleonen bestehen aus den vertrauten up- und down-Quarks. Der US-amerikanische Physiker *Edward Witten* (* 1951) postulierte, dass nicht etwa die hadronische Phase, also Quarks eingeschlossen in einem Verbund, dem **Grundzustand der QCD** gleichkommen, sondern quasi-freie Quarkmaterie, die zu gleichen Teilen aus u-, d- und s-Quarks bestehe (*strange matter hypothesis*). Das MIT Bag-Modell wurde zum *Effektivmassen-Bag-Modell* erweitert, um diese **Quarkphasen** zu beschreiben (*Schertler et al.*, 1998). Dabei gelang es, eine einfache Zustandsgleichung der Strange-

Materie abzuleiten:

$$P = \frac{1}{3} (\rho c^2 - 4B).$$

Neben der Materiedichte ρ und der Vakuumlichtgeschwindigkeit c enthält sie die so genannte **Bag-Konstante** B , die anschaulich der Energie entspricht, die nötig ist, um aus dem Vakuum ein Hadron zu erzeugen. Sie wird in der Theorie häufig als freier Parameter angenommen, der zwischen 96 und 208 MeV fm⁻³ variiert.

Nimmt man einen Wert von $B = (145 \text{ MeV})^4$ an, so zeigt sich mithilfe der Zustandsgleichung, dass ab einer besonders hohen Dichte, etwa ab $4 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$, die gerade oberhalb der **Kernmateriedichte** liegt, die Strange-Materie frei existieren kann - der Druck P verschwindet dann.

18.16.3 kompakte Sterne

Neben irdischen Experimenten in Teilchenbeschleunigern bieten kompakte Objekte ein wichtiges 'Fenster' in das Verständnis des Aufbaus **ultradichter Materie**. Daten aus Teilchenbeschleunigern und astronomische Beobachtungsdaten können mit den Rechnungen verglichen werden.

Das Innere von Neutronensterne ist ein natürlicher Ort, an dem solch extremen Materiedichten erreicht werden (unter dem Eintrag Neutronenstern befindet sich eine Darstellung der Neutronensternschalen mit entsprechender Dichte).

Allerdings werden verschiedene kompakte Sterne unterschieden, je nachdem aus welchem Materiegemisch sie bestehen:

- ◇ **Neutronensterne** sind im strengen Sinne rein hadronisch, d. h. sie bestehen nur aus der hadronischen Phase, z. B. einer Neutronenflüssigkeit (siehe dazu auch Fermionensterne).
- ◇ **Hybridsterne** bestehen aus einer hadronischen Phase und einer Quarkphase.
- ◇ **Quarksterne** (auch Q-Sterne genannt) bestehen an sich nur aus einer Quarkphase.
- ◇ **Diquark-Sterne** sind hier noch ein Spezialfall, die aus einer farbsupraleitenden Phase bestehen.
- ◇ **seltsame Sterne** (oder Strange Stars) bestehen aus Strange-Materie.

Außerdem unterscheidet man zwei Typen von Strange Stars, solche mit Kruste (engl. *crust strange stars*) und solche ohne Kruste (engl. *bare strange stars*). Im letzten Fall grenzt die Quarkmaterie direkt an die Umgebung des Sterns, was zu seltsamen Effekten führt.

18.16.4 Unterscheidungskriterium Sternmasse

Wie bei den Weißen Zwergen die Chandrasekhar-Grenze, lässt sich auch bei Sternen aus Strange-Materie eine **maximale Masse** ableiten, bevor auch der Quarkstern im dominanten Gravitationskollaps in sich zusammenfällt:

- ◇ Eine **perturbative QCD-Rechnung** (pQCD) liefert 1.32 Sonnenmassen bei einem Radius von nur 7.2 km.
- ◇ Eine **nichtperturbative QCD-Rechnung** führt auf den viel größeren Wert von 3.2 Sonnenmassen.
- ◇ Das **Bag-Modell** liefert einen intermediären Wert von 1.98 Sonnenmassen bei 10.78 km Radius.

Eine astronomische Messung der Sternmasse sollte daher Aufschluss geben über den Typen des kompakten Sterns.

18.16.5 Unterscheidungskriterium Sternradius

Eine Beimischung von Quarkmaterie 'weicht' die Zustandsgleichung auf, so dass Quarksterne (bei gleicher Masse) kompakter sein können als Neutronensterne, die aus einer reinen Hadronenphase bestehen (*Schertler et al.* 2000). Eine genaue Messung des Sternradius sollte deshalb Klarheit darüber verschaffen können, um welchen kompakten Stern es sich handelt.

18.16.6 Masse-Radius-Beziehungen

Zur Unterscheidung von Neutronensternen und Quarksternen kann man die beiden Unterscheidungskriterien Sternmasse und Sternradius auch in der **Masse-Radius-Beziehung** zusammenfassen. Zum Glück sind diese Relationen für beide Klassen sehr unterschiedlich:

- ◇ $M \sim R^{-3}$ für Neutronensterne,
- ◇ $M \sim R^{+3}$ bei den kompakteren Quarksternen aus Strange-Materie.

18.16.7 astronomische Tests

Die Messung der Sternradien ist das erste Hindernis in der Astronomie: die kompakte Sterne sind so klein und so weit weg, dass Astronomen sie nicht mit Teleskopen auflösen können (siehe dazu auch Auflösungsvermögen). Aus der Stellarphysik ist aber bekannt, dass die Leuchtkraft (siehe dort für die entsprechende Gleichung) mit dem Quadrat des Sternradius anwächst. Die scheinbare Helligkeit kann mühelos astronomisch beobachtet werden; die Leuchtkraft folgt dann erst mit bekannter Entfernung mittels des Distanzmoduls und der Effektivtemperatur, die ihrerseits aus dem beobachteten Spektraltyp folgt.

Auf diese Weise wurden einige Kandidaten für kompakte Sterne beobachtet, die noch kleiner, noch kompakter zu sein schienen, als typische Neutronensterne. Die Hypothese war daher, dass es sich dabei um Quarksterne oder seltsame Sterne handeln müsse. Diese Gebilde können noch kleinere Radien erreichen, weil sie besonders hohe Dichten haben.

18.16.8 Der Fall RX J185635-3754

Der Röntgenstern **RX J185635-3754** wurde 1992 mit dem erfolgreichen, deutschen Röntgensatelliten ROSAT am Südhimmel im Sternbild *Corona Australis* (dt. *Südliche Krone*) entdeckt. Im Jahr 1997 entstand die optische Aufnahme 18.5 von RX J185635-3754 (siehe Pfeilmarkierung) mit dem Weltraumteleskop Hubble (Credit: *Fred Walter*, State University of New York at Stony Brook und NASA, 1997).

Im Jahr 2002 wurde RX J185635-3754 mit dem US-amerikanischen Röntgenteleskop Chandra beobachtet. Mit einer Entfernung von nur 200 Lichtjahren und einer Effektivtemperatur von etwa 700000 Grad (hundertfach heißer als die Sonne!) folgte ein Radius von nur etwa 4 bis 8 Kilometern (*Drake et al.* 2002, astro-ph/0204159). Dieser sehr kleine Radius sorgte seinerzeit für Wirbel, legte er doch einen sehr guten Quarksternkandidaten nahe.

Die optischen Nachbeobachtungen ließen jedoch bald Zweifel an der Quarksterninterpretation aufkommen: zum einen musste die Entfernung zu 450 Lichtjahren nach oben korrigiert werden; zum anderen wurde vermutlich ein so genannter *Hot Spot* mit hoher Röntgenhelligkeit auf der Neutronensternoberfläche mit Chandra beobachtet. Aktuell wird daher von den Neutronensternforschern favorisiert, dass RX J185635-3754 ein ganz normaler, isolierter Neutronenstern mit deutlich größeren 34 km Durchmesser sei.

Das legen auch neue Beobachtungen nahe, die italienische Astronomen mit den europäischen Röntgenteleskop XMM-Newton durchgeführt haben (*Tiengo & Mereghetti*, ApJ 657, L101, 2007): sie entdeckten erstmals, dass RX J185635-3754 variiert wie ein **Pulsar** mit einer Periode von sieben Sekunden! Das schmälert die Quarksternhypothese, weil ein solches Pulsieren charakteristisch für Neutronensterne ist.

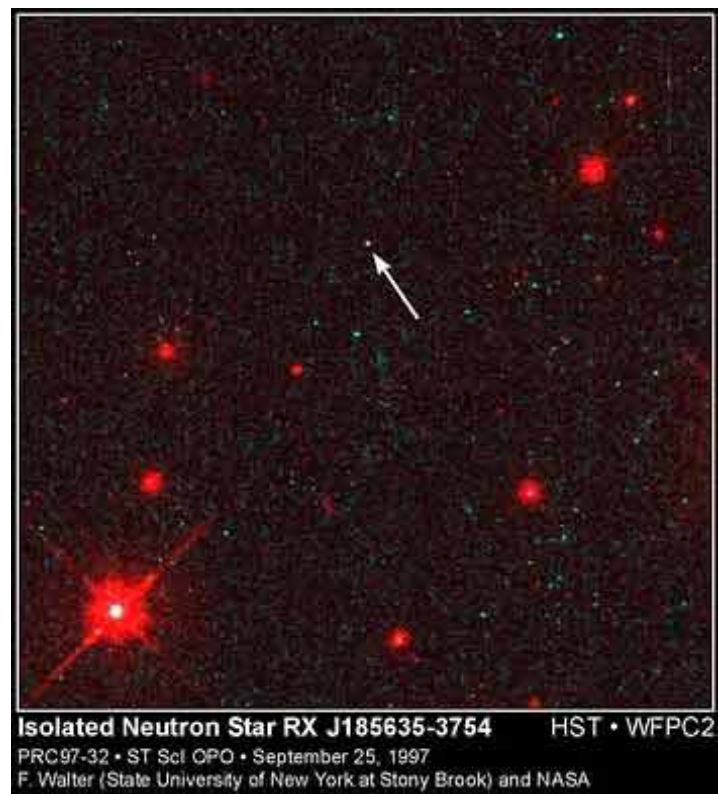


Abbildung 18.5: Quarkstern: HST-Bild des Quarkstern-Kandidaten RX J185635-3754.

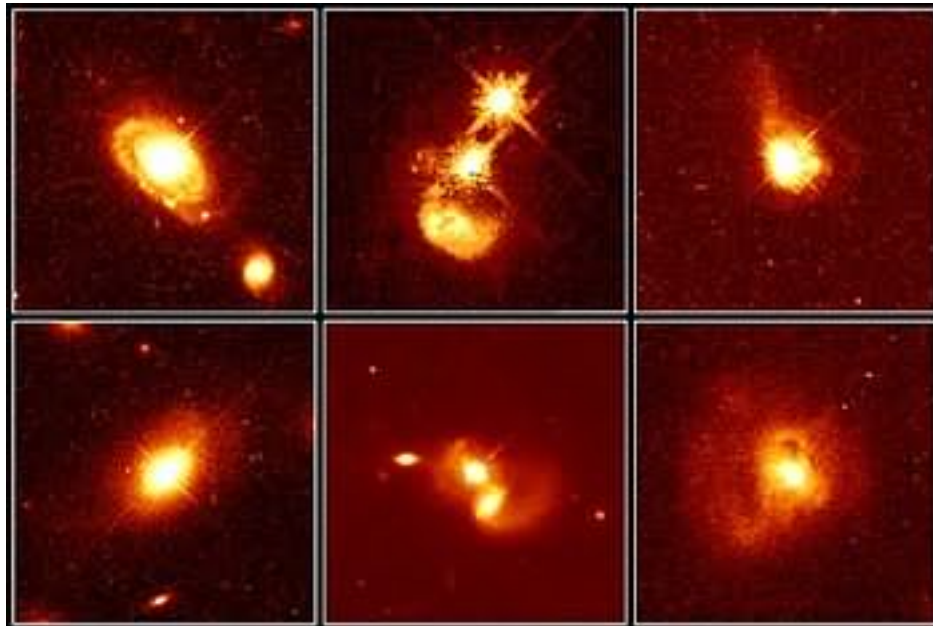


Abbildung 18.6: Quasar-Sample mit Wirtsgalaxien, beobachtet mit dem HST.

18.16.9 Fazit

Zurzeit gibt es keinerlei gute Kandidaten für Quarksterne oder seltsame Sterne in der Astronomie. Doch die astronomische Forschung wird durch immer bessere Satellitenprojekte (wie z. B. die geplanten, europäischen Missionen eROSITA und XEUS) auf experimenteller Seite vorangebracht, ebenso wie die theoretische Erforschung, die zu einem immer besseren Verständnis von ultradichter Materie führt.

18.16.10 Literatur

- ◇ **Gibt es Quarksterne?** von *Markus Thoma* (MPE), in *Astronomie heute*, September 2006

18.17 Quasare

Quasare sind die wohl bekanntesten Vertreter unter den Aktiven Galaktischen Kernen (AGN), vermutlich auch dadurch bedingt, dass sie immer wieder in den Medien auftauchen. Sie haben eine extreme Leuchtkraft: die leuchtkräftigsten Quasare erreichen 10^{47} erg/s - das entspricht hundert Billionen Sonnenleuchtkräften und übertrifft normale Galaxien bei weitem! Im Prinzip zeigen Quasare diese Aktivität bei allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Quasare sind einem breitem Publikum bekannt für ihre unglaublich hohen Entfernungen im Bereich von Millionen bis Milliarden Lichtjahren. Das bedeutet gleichermaßen, dass sie sich sehr früh im Universum gebildet haben müssen. Die Modelle für Galaxienentstehung sind daher für Kosmologen eine Herausforderung.

18.17.1 Quasar vs. QSO

Klären wir zunächst die Namen: Quasar ist ein Kunstwort aus *quasi-stellare Radioquelle*, d. h. Quasare sind **radio-laut** (hohe Radioleuchtkraft). Die Abkürzung QSO steht für *quasi-stellares Objekt*, die **radio-leise** sind (geringe Radioleuchtkraft). Die Begriffe Quasar und QSO werden oft gleichbedeutend in der Literatur verwendet, bezeichnen aber eigentlich verschiedene, kosmische Objekte! Oft wird Quasar als Oberbegriff für beide verwendet.

18.17.2 Entdeckungsgeschichte

Quasare wurden 1960 radioastronomisch entdeckt (3C 48, 16.^{mag}). Optisch erschienen sie zunächst sternartig: Sie sahen aus wie ein Lichtpunkt, der nicht mit Teleskopen aufgelöst werden konnte. Das Weltraumteleskop Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST) fotografierte 1996 schließlich erstmals die **Wirtsgalaxien der Quasare** (Abbildung 18.6, Credit: *Bahcall et al.*, STScI/NASA, 1996). Somit war klar, dass Quasare die hellen Kerne von Galaxien sind: Quasare sind eingebettet in Wirtsgalaxien (engl. *host galaxies*). Im Falle der Quasare können die Wirtsgalaxien jeden Hubble-Typ haben. Eine besondere Häufung stellt man allerdings bei den elliptischen Galaxien, also sehr entwickelten Sternsystemen, fest.

18.17.3 Der Quasar-Motor

Vom Standpunkt der theoretischen Astrophysik sind die Quasare hochinteressante Studienobjekte. Das größte Rätsel: Woher kommt diese unglaubliche Leuchtkraft? Schnell war klar, dass die Beobachtung nicht mit thermonuklearer Fusion, wie sie im Innern von Sternen abläuft, zu erklären ist.

Die Theoretiker stellten bereits Mitte bis Ende der 1960er Jahre, also bald nach der Entdeckung der Quasare, ein physikalisches Modell vor. Zu den Pionieren dieser Idee zählen die russischen Astrophysiker *Yakov B. Zel'dovich & Igor D. Novikov* (1964), der österreichische Kernphysiker *Edwin E. Salpeter* (1964) und der britische Astrophysiker *Donald Lynden-Bell* (1969). Sie erklärten die enorme Helligkeit durch die **Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch**. Genau das ist das heute fest verwurzelte **Paradigma für alle AGN**. Akkretion ist der effizienteste Mechanismus, um aus durch Gravitation gebundene Materie Strahlungsenergie herzustellen. Wie das im Detail funktioniert, wird im Eintrag Eddington-Leuchtkraft vorgerechnet. Quasare sind dabei nahe am Eddington-Limit.

Das Schicksal der Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt, wird mit modernen Hochleistungsrechnern simuliert. Bei diesen Supercomputer-Simulationen kommen Methoden der Magnetohydrodynamik und der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Einsatz. In der Nähe des Lochs wird es sehr heiß, so dass die einfallende Materie zu einem Plasma wird, das aus Elektronen und Ionen besteht. Dieses Plasma bewegt sich unter dem Einfluss von elektrischen Feldern und Magnetfeldern auf dem Hintergrund der gekrümmten Raumzeit in ein Schwarzes Loch. In der Astrophysik ist mittlerweile klar, dass dabei die Rotation des Loches eine wesentliche Rolle spielt (siehe Kerr-Lösung). Die Akkretion ist assoziiert mit wichtigen magnetischen Effekten im Akkretionsfluss, z. B. mit der magnetischen Rotationsinstabilität und mit dem magnetischen Herauskatapultieren von Materie, die dann zu relativistischen AGN-Jets gebündelt wird. Das Szenario ist detailliert unter dem Eintrag zu supermassereichen Schwarzen Löchern beschrieben.

Die Spektren dieser einfallenden Materie folgen in der Theorie mit einem zweiten Schritt: die nun bekannte Dynamik des Plasmas wird genutzt, um Strahlungsprozesse (Comptonisierung, Synchrotronstrahlung, Bremsstrahlung; allgemein Strahlungstransport) auszurechnen. Besser, aber numerisch deutlich aufwendiger, ist die direkte Kopplung von kovariantem Strahlungstransport an hydrodynamische oder magnetohydrodynamische Gleichungen. Aktuell arbeiten die theoretischen Astrophysiker weltweit daran, dieses Problem konsistent zu lösen. Die ersten Arbeiten auf dem Gebiet der allgemein relativistischen Magnetohydrodynamik (**GRMHD**) sind von *Koide et al.* 1999, *De Villiers & Hawley* 2002, *Gammie et al.* 2003, *Semenov et al.* 2004.

18.17.4 Quasare und Radiogalaxien sind verwandt

Astronomen zählen bei der Gruppe der radioleisen QSOs deutlich mehr Vertreter als bei den radiolauten Quasaren. Die Aktivität im Radiobereich lässt sich auch auf die intrinsische Helligkeit in allen Spektralbereichen, die so genannte **bolometrische Leuchtkraft**, übertragen. Die radioleisen QSOs scheinen mit den schwächeren AGN-Typen, wie den Seyfertgalaxien, verwandt zu sein. Hingegen sind die radiolauten Quasare, wie der **Prototyp 3C 273**, verwandt mit den radioleuchtkräftigen Radiogalaxien, wie Cyg A.

Sogar die **Morphologie** von Quasaren und Radiogalaxien ist auffallend ähnlich und nutzt dieselbe Nomenklatur für beobachtbare Radiostrukturen: *Core*, *Hot Spot*, *Lobe* und *Jet* (Begriffe erläutert unter FR-Klassifikation). Die verblüffende Ähnlichkeit unterscheidet sich nur durch die Längenskala. Auf der Homepage des *Very Large Arrays* (VLA), einer Anordnung von 27 Radioteleskopen in New Mexico (USA), die interferometrisch hochaufgelöste Radiobilder erzeugen können, kann man farbenprächtige Bilder betrachten, die klar die verwandte Morphologie belegen

18.17.5 AGN Typ-1 und Typ-2

Betrachtet man die Spektren der Seyfertgalaxien und der Quasare, so kann man sie im Wesentlichen in zwei Klassen einteilen. Bald wurde vorgeschlagen, dass diese **Zweiteilung** (*Dichotomie*) das Resultat eines Orientierungseffektes ist (*Antonucci & Miller*, ApJ 1985; *Antonucci*, ARA& A 1993): in einem Abstand von einigen pc vom Zentrum des AGN befindet sich ein ausgedehnter, molekularer Staubtorus. Dieser 'kalte Materieschlauch' ist schwer zu durchdringen für optische Strahlung und weiche Röntgenstrahlung. Ist der AGN nun zufällig so orientiert, dass der irdische Beobachter von oben in die Kernregion blicken kann, so versperrt der Staubtorus nicht die Sicht. Der Neigungswinkel (*Inklination*) zwischen Symmetrieachse des Torus und der Blickrichtung ist klein. In diesem Fall sprechen die Astronomen von einem **AGN Typ-1**.

Bei hoher Inklination jedoch, also Winkeln zwischen etwa 60 und 90°, blickt der Beobachter mehr oder weniger auf die Kante des Staubtorus: der Blick in das Zentrum des AGN ist versperrt. Somit sagen die Astronomen zu dieser aktiven Galaxie **AGN Typ-2**.

Genau dieser Effekt ist auch in den Spektren zu sehen, so dass Astronomen mit optischer Strahlung und weicher Röntgenstrahlung die AGN klassifizieren können. Bei Röntgenspektren von AGN Typ-2 fehlt der Anteil an niederenergetischer Röntgenstrahlung, weil er durch Streuung im Staubtorus verloren ging. Astronomen stellen insgesamt fest, dass Typ-1-Quasare (kleine Inklination) etwa 90% aller Quasare ausmachen; die restlichen 10% sind Typ-2-Quasare (hohe Inklination). Die Typ-1-Typ-2-Nomenklatur hat sich vor allem bei Seyfertgalaxien und Quasaren durchgesetzt.

Die Astronomen haben festgestellt, dass die Klassifizierung unterschiedlich ausfallen kann, je nachdem ob der AGN optisch oder per Röntgenstrahlung klassifiziert wurde. Das ist natürlich nicht erwünscht. Ursache dafür sind Störeffekte, beispielsweise durch die Wirtsgalaxie. Eine gute Wahl ist eine Kombination: nahe AGN werden mit Röntgenstrahlung klassifiziert und weit entfernte AGN optisch (*Szokoly et al.* 2004).

Die aktuelle Forschung zeigt, dass ein rein geometrischer Effekt **nicht** ausreicht, um die beiden AGN-Typen zu erklären: Mit dem japanischen Röntgensatelliten ASCA wurden etwa 230 helle AGN beobachtet (*Ueda et al.* 2003). Besonderes Interesse galt für AGN, die harte Röntgenstrahlung emittieren. Nun stellte sich der Trend heraus, dass der Anteil der AGN Typ-2 abnimmt, wenn die Leuchtkraft des AGN zunimmt! Dieser Leuchtkrafteffekt ist nicht geometrisch erklärbar. Eine mögliche Erklärung bestünde darin, dass ein sehr leuchtkräftiger Quasar seine Umgebung mit dem heftigen Strahlungsdruck 'leer fegt'. Auf diese Weise würde auch der blockierende Staubtorus verschwinden und damit der Typ-2.

18.17.6 spektrale Eigenschaften

Die visuellen Helligkeiten der Quasare sind enorm und gehen bis -23. Magnitude bei den hellsten Vertretern. Weitere spektrale Eigenschaften sind starkes blaues Kontinuum, Infrarot- und UV-Exzesse, hohe zeitliche Variabilitäten der Quellen, *keine* Absorptionslinien, aber sehr breite Emissionslinien. Inzwischen entdeckten Röntgenastronomen sogar die heiße Emissionslinie von Eisen in den Spektren bei 6.4 bis 6.7 keV Ruheenergie. Die Linie gibt Aufschluss über den inneren Akkretionsfluss in unmittelbarer Nähe zum zentralen, superschweren Schwarzen Loch. Sie wird in der Diagnostik der AGN genutzt, um die Neigung der Standardscheibe, die Plasmakinematik, die Lochrotation etc. abzuleiten.

18.17.7 Quasare sind extrem weit entfernt

Die Anordnung der Emissionslinien im Spektrum der Quasare war bei ihrer Entdeckung zunächst sehr rätselhaft. Der Astronom *Maarten Schmidt* erkannte 1963, dass es sich um an sich bekannte Emissionslinien handelt, die allerdings im Spektrum **hochrotverschoben** wurden. Der Grund für diese seltsame spektrale Eigenschaft liegt in der Expansion des Universums selbst. Die Quasare sind so weit von der Erde entfernt, dass sich die kosmologische Rotverschiebung bemerkbar macht. Die Photonen, die der Quasar aussendet, bewegen sich durch eine expandierende Raumzeit, der Robertson-Walker-Metrik. Deshalb bewegen sich alle kosmologisch entfernten Quellen von der Erde weg: sie 'schwimmen' mit der expandierenden Raumzeit. Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt dann, dass die Spektren stark rotverschoben sind. Die elektronischen Übergänge der strahlenden Atome im Quasar liegen aufgrund der hohen Distanz dieser Objekte in ganz anderen Spektralbereichen, wenn sie beim irdischen Beobachter ankommen: so kann die *Lyman-Alpha-Kante* ($\text{Ly}\alpha$), die üblicherweise (d. h. im Ruhesystem) im Ultravioletten liegt, bei einem Quasar mit $z = 5.0$ bis in den optischen Bereich verschoben werden! Damit war klar, dass Quasare **extragalaktische Objekte** sind. 1963 wurde ein weiterer Quasar, 3C 273, von *Hazard*, *Mackey* und *Shimmings* entdeckt, die ihn mithilfe der *Mondbedeckungsmethode* auf bis zu einer Bogensekunde genau am Himmel lokalisierten - damals eine Sensation. 3C 273 im Sternbild *Jungfrau* (*Virgo*) gehört zu den hellsten und nächsten Quasaren und ist etwa 2.1 Milliarden Lichtjahre (640 Mpc) entfernt. In seiner Nachbarschaft zeigt er einen etwa zwei Bogensekunden langen, relativistischen Jet.

18.17.8 Entfernungsrekorde

Der aktuell **am weitesten entfernte AGN** ist ein Quasar mit der Bezeichnung SDSS J1148+5251 und liegt bei einer Rotverschiebung von $z = 6.41$ (*Fan et al.* 2003, *Willott et al.* 2003). Diese Entfernung wird nur noch von einer nicht aktiven, sehr jungen Galaxie bei $z = 10$ geschlagen, dem aktuellen Rekordhalter mit der größten Entfernung zur Erde (*Pello et al.* 2004). Die $\text{Ly}\alpha$ -Linie des Wasserstoffs, die sonst im UV liegt, fand man bei einer ebenfalls sehr weit entfernten Galaxie, SDSS 1030+0524, im nahen Infrarot (NIR) bei 885 nm. SDSS J1148 weist eine noch stärker rotverschobene Linie auf. *Fan et al.* von der Universität *Princeton* konnten 2001 im *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) mit einem digitalen, automatischen Teleskop in New Mexico drei unglaublich weit entfernte Objekte beobachten, bei denen es sich allesamt um Quasare handelt. Sie haben die Katalogbezeichnungen SDSS 1030+0524, SDSS 1306+0356 und SDSS 0836+0054 und in dieser Reihenfolge die Rotverschiebungen $z = 6.28$; 5.99 und 5.82. Diese Objekte sind soweit entfernt, dass wir in eine Zeit zurückschauen, wo das Universum erst 700 Millionen Jahre alt (6% des heutigen Alters) war und noch dichter war und sogar noch **neutrales Wasserstoffgas** in der Umgebung der Quasare vorlag!

18.17.9 Als die Welt noch neutral war

Die **Epoche der Reionisation** war also zu diesem Zeitpunkt ($z \sim 6$) noch nicht abgeschlossen: die intensive Strahlung der Quasare ionisierte nach und nach das umgebende, intergalaktische Medium, bis schließlich durch eine signifikante Anzahl ionisierender Objekte das ganze Universum reionisiert war. Die **erste Ionisation** war kurz nach dem Urknall, als das Universum noch sehr klein, dicht und heiß war. Bei $z \sim 1100$, entsprechend nur etwa 400000 Jahre nach dem Urknall, war die **Epoche der Rekombination**, wo das Universum genug abgekühlt war, dass sich Elektronen und Protonen zu den ersten (neutralen) Atomen zusammenschließen (*rekombinieren*) konnten. Bei diesem Prozess entstanden **primordiale Elemente**, wie Wasserstoff, Helium und Lithium (siehe primordiale Nukleosynthese).

Im Spektrum der Quasare erkennt der Astronom das neutrale, intergalaktische Umgebung unzweifelhaft daran, dass hier die so genannten **Gunn-Peterson-Tröge** (engl. *Gunn-Peterson troughs*) auftreten. Im Spektrum haben diese Features eine Trog-Form: unterhalb der $\text{Ly}\alpha$ -Kante wird die Kontinuumsstrahlung stark unterdrückt. Der physikalische Grund besteht darin, dass die optische Tiefe des umgebenden neutralen Mediums besonders groß ist und deshalb dieser Bereich im Spektrum

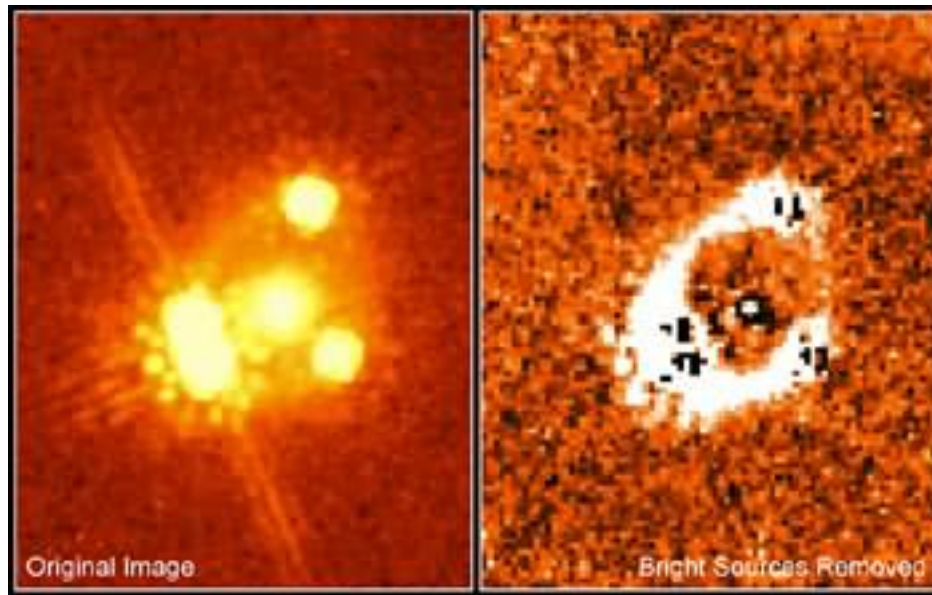


Abbildung 18.7: Quasar QSO-PG1115+080 als Vierfachbild, beobachtet mit dem HST.

verschwindet.

18.17.10 Quasare im Doppelpack

1979 wurde das **Quasar-Paar QSO 0957+561** entdeckt. Beide Quasare zeigen erstaunlicherweise sehr ähnliche Spektren. Dies konnte man darauf zurückführen, dass es sich in Wirklichkeit um Abbilder ein und desselben Objekts handelt! Durch den Gravitationslinseneffekt gelangt das Licht des Quasars auf zwei verschiedenen Lichtwegen zum Beobachter. Eine Gravitationslinse ist ein massereiches Objekt, z. B. ein Galaxienhaufen, der zwischen Quasar und der Erde lokalisiert ist und nach der Allgemeinen Relativitätstheorie Licht abzulenken vermag: Licht folgt gekrümmten Nullgeodäten. Die leichten spektralen Unterschiede erklären sich dadurch, dass auf den beiden Lichtwegen unterschiedliche Bedingungen herrschen können, wie beispielsweise unterschiedliche Dichte des intergalaktischen Mediums (IGM) und somit unterschiedliche Extinktion.

18.17.11 .. oder lieber vier!

Die Abbildung 18.7 zeigt im linken Feld eine Infrarotbeobachtung mit dem Weltraumteleskop *Hubble*, ein besonders schönes Exemplar eines *gelingen Quasars*: Ein **Vierfachbild eines Quasars**! Die Gravitationslinse ist eine schwere, elliptische Galaxie. Der Quasar hat die Katalogbezeichnung PG 1115+080. Im rechten Feld wurden die vier Quasarbilder und die linsende Galaxie abgezogen. Die **ringförmige Helligkeitsverteilung** ist das gravitativ beeinflusste Licht der Wirtsgalaxie des Quasars. Die Strahlung wird durch die Krümmung der Raumzeit verbogen (Fachausdruck: *Lichtaberration*) und bildet den berühmten Einstein-Ring, hier im Infraroten bei einer Wellenlänge von 1.6 Mikrometern (Credit: *Impey et al.*, STScI/NASA 1998).

18.17.12 echte Doppelquasare

Es gibt allerdings auch tatsächlich ein intrinsisches **Paar von Quasaren**, QQ 1145-071, der 1987 entdeckt wurde. Ebenso besteht das Objekt LBQS 0103-2753 in einer Entfernung von $z = 0.848$ aus einem **Binär-Quasar**, die sich in einem Abstand von nur 0.3 Bogensekunden bzw. 2.3 kpc

umkreisen (*Shields et al.* 2001, astro-ph/0104236). Dies ist eines der wenigen Beispiele, wo sich zwei supermassereiche Schwarze Löcher unmittelbar umkreisen und vielleicht in einem katastrophalen Ereignis verschmelzen können.

18.17.13 weitere bekannte Quasare und QSOs

3C 273, 3C 48, QSO 1229+204, QSO 0046-293, QSO 0910+564, QSO 0101-304, QSO 0000-263, QSO 2203+292, QSO 0051-279, QSO 0957+561 und QQ 1145-071.

18.18 quasi-periodisch

In der Astronomie verwendet man einige Eigenschaftswörter, um das zeitliche Verhalten der Strahlungsemission oder der Helligkeit einer kosmischen Quelle zu charakterisieren.

18.18.1 Definition von quasi-periodisch

Das Attribut *quasi-periodisch* kann nicht so klar definiert werden; wörtlich würde man damit eine Helligkeitsvariation betiteln, die **zeitlich in etwa regelmäßig wiederkehrt**. Es ist zwar kein strenger Zyklus über lange Zeiten beobachtbar, aber es gibt dennoch Perioden über ein kurzes Zeitintervall.

18.18.2 Eine Frage der Perspektive

Die Beurteilung, welchen Charakter die Helligkeitsvariation hat, ist **abhängig vom Beobachter**. Die Ursache dafür ist die Relativität des Zeitbegriffs, denn die Relativitätstheorie führt zu Effekten wie der Zeitdilatation.

Die Klassifikation ist ebenfalls eine **Frage der Zeitskala**. Typische Perioden liegen im Bereich von Minuten bis Stunden.

18.18.3 Beispiele

Die Bezeichnungsweise ist in der Astronomie an sich nur bei den Quasi-periodischen Oszillationen gebräuchlich, die in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, oft jedoch bei Röntgendoppelsternen beobachtet werden.

18.18.4 weitere Bezeichnungen

Andere Bezeichnungen für die Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens sind periodisch, persistent und transient.

18.19 Quasi-periodische Oszillationen

Die Quasi-periodischen Oszillationen (engl. *quasi-periodic oscillations*, **QPOs**) sind zeitlich wiederkehrende Phänomene, die Astronomen in Lichtkurven, z. B. bei Röntgendoppelsternen, beobachten.

18.19.1 Die Fourier-Analyse

Es bietet sich an, diese Lichtkurven (Intensität über Zeit) mit einem mathematischen Verfahren zu studieren, der so genannten **Fourier-Transformation**. Nach einer Fourier-Transformation sind die Lichtkurven nicht mehr in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, sondern von der Frequenz. Mathematiker sagen das so: Die Fourier-Transformierte befindet sich im Frequenzraum. Die resultierenden Spektren nennen die Astronomen **Power Density Spektren** (PDS) oder kurz *Power Spektren*.

18.19.2 Was bringt die Prozedur?

Charakteristische Variabilitäten in der Lichtkurve (Periodizitäten, Quasi-Periodizitäten), die immer wieder etwa dieselbe Frequenz haben, können in den PDS als Spitzen ('Peaks') mit bestimmter Frequenz entlarvt werden. Das ist eine sehr bequeme und exakte Identifikation, die sich im Zeitraum (vor der Fourier-Transformation) deutlich schwieriger und ungenauer gestalten würde.

18.19.3 charakteristische Frequenzen der Akkretionstheorie

Die QPOs spiegeln sich in den Spektren als Variabilitäten wider, deren Verhalten nicht ganz, aber etwa periodisch ist. Sie können mit der Theorie der Akkretion beschrieben werden, weil man Effekte im **Akkretionsfluss** (eventuell einer Standardscheibe) um ein kompaktes Objekt mit den QPOs assoziiert. Die Interpretation ist schwierig. Es gibt *drei charakteristische Frequenzen*, die mit QPOs verknüpft werden können:

- ◇ die **Keplerfrequenz**, also diejenige Frequenz, die der Umlaufzeit um das kompakte Objekt zugeordnet ist (siehe Kepler-Gesetze);
- ◇ die **radiale Epizykelfrequenz**, eine charakteristische Frequenz, die resultiert, wenn man einen Kreisorbit geringfügig in radialer Richtung stört (siehe auch Epizykel);
- ◇ und die **vertikale Frequenz**. Sie resultiert aus vertikalen Störungen der Bahn.

Weiterhin wird seit wenigen Jahren die **Lense-Thirring-Frequenz** (als vierte, mögliche Frequenz) diskutiert. Die Astronomen vermuten, dass sie eine gewichtige Rolle in den QPOs von Mikroquasaren spielt. Der Drehimpuls eines rotierenden, stellaren Schwarzen Lochs erzeugt ein so genanntes *gravitomagnetisches Feld*. Dies ist ein Effekt von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, der mit dem Oberbegriff **Gravitomagnetismus** bezeichnet wird. Das gravitomagnetische Feld wirkt sich auf umlaufende Testteilchen oder auch den Akkretionsfluss aus und führt zur **Lense-Thirring-Präzession**.

18.19.4 Was zappelt denn da?

QPOs sind sicherlich mit einer variablen Akkretionslösung assoziiert. Die Astrophysiker favorisieren Instabilitäten im Akkretionsstrom (siehe z. B. magnetische Rotationsinstabilität), die zur Anregung von **lokalen Störungen im Akkretionsstrom** - so genannte *Blobs* - führen. Diese Störungen können eine Zeit lang mit einer der charakteristischen Frequenzen schwingen und wieder verschwinden.

Alternativ ist es denkbar, dass die Übergangsregion zwischen kalter, optisch dicker, aber geometrisch dünner Standardscheibe (SSD) zu einem heißen, optisch dicken und geometrisch ausgedehntem Objekt wie beispielsweise dem ADAF ein räumlich (präzise gesagt radial) oszillierendes Gebilde formt. Die Zeitskala ist typischerweise so groß, wie die Umlaufzeiten der Materie um das Zentrum am betreffenden Radius (*Kepler-Zeitskala*). Diese Akkretionslösungen sind **bimodal** und oszillieren zwischen ADAF und SSD (*José Gracia* 2003).

Typische Frequenzen liegen im kHz-Bereich bei den Mikroquasaren oder anderen stellaren Quellen. Bei den deutlich größeren Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) sind sie nicht zu beobachten, weil die Frequenzen zu klein werden. Salopp und stark vereinfacht gesagt: der innere Akkretionsstrom um stellare Löcher piepst, aber derjenige um superschwere Löcher brummt.

18.20 Quelle

Quelle (engl. *source*) ist ein typischer Fachbegriff der **Astronomie** und meint ein beliebiges, kosmisches Objekt, das elektromagnetische Strahlung, Teilchen und/oder Gravitationswellen abgibt. Der Astronom kann diese Quelle mit einem geeigneten, empfindlichen Detektor oder Teleskop beobachten. Entsprechend gibt es Bezeichnungen wie Radioquelle, Röntgenquelle, Gammaquelle, Neutrinoquelle, Protonenquelle etc.

Der Begriff *Quelle* ist auch in der **Feldtheorie** gebräuchlich und meint hier den Erzeuger des Feldes. So sind Massen die Quellen der Gravitation, und elektrische Ladungen sind die Quellen des elektromagnetischen Feldes.

In beiden Bedeutungen wird der Begriff Quelle in diesem Lexikon verwendet.

18.21 Quintessenz

Die Etymologie dieses Begriffs meint eigentlich das 'fünfte Seiende' (lat. *quinta essentia*). Das bezieht sich auf ein fünftes Element neben den vier bekannten Erde, Wasser, Feuer und Luft, die die frühe griechische Naturwissenschaft kannte. Das neue, fünfte Element **Äther** wurde von *Aristoteles* eingeführt. Die Alchemie kannte diese Substanz als **Spiritus**, den Stoff des Lebens. Der Äther erlangte zur Jahrhundertwende ins 20. Jahrhundert noch einmal Berühmtheit, weil seine Existenz als Trägermedium der elektromagnetischen Wellen - analog zu Luft als Medium bei akustischen Wellen - gefordert wurde. Im **Michelson-Morley-Experiment** suchten die Physiker vergeblich nach diesem Weltäther - *Albert Einstein* klärte dieses Problem ganz einfach dadurch, dass es gar keine Notwendigkeit für einen Weltäther gebe. Das Resultat des Michelson-Morley-Experiments ist in völliger Übereinstimmung mit Einsteins Relativitätstheorie, einer bis heute mehrfach bestätigten und bewährten, physikalischen Theorie.

18.21.1 Quintessenz in der Kosmologie

In der Kosmologie erlebte der Begriff Quintessenz eine Renaissance: Der Kosmologe *Paul Steinhardt* und Kollegen belebten dieses Wort neu, weil sie eine zeitlich veränderliche Dunkle Energie augenzwinkernd als fünftes Element neben den vier anderen wesentlichen Ingredienzen der Kosmologie, nämlich Materie ('Erde'), Strahlung ('Feuer'), Neutrinos ('Luft') und kalte Dunkle Materie ('Wasser') einordnen wollten. Unter Quintessenz versteht man eine Alternative zum Konzept einer kosmologischen Konstante: die kosmologische Konstante wird als *fester, konstanter Wert* einer Vakuumenergiedichte interpretiert, die das Universum homogen ausfüllt (siehe dazu auch Quantenvakuum). Die Quintessenz hingegen ist eine **zeitlich veränderliche** Dunkle Energie, die *inhomogen* den Raum ausfüllt. Mit der Ausdehnung des Universums nimmt die Energiedichte in Quintessenz-Modellen ab. Die Zustandsgleichung der Dunklen Energie zeigt einen **hohen negativen Druck**, was ihre Interpretation als Antigravitation nahe legt. Diese Antigravitation treibt das Universum auseinander und resultiert in der **beobachtbaren, kosmischen Expansion** (Supernova- und WMAP-Daten).

18.21.2 Motivation zur Quintessenz

Motiviert war dieser neue, zeitabhängige Ansatz der Dunklen Energie im Quintessenz-Modell im Wesentlichen durch zwei Probleme:

- ◇ Das **Problem der kosmologischen Konstante** besteht in der Kleinheit ihres Wertes. Die korrespondierende Energiedichte liegt im Bereich von Millielektronenvolt (meV) und ist damit von der Masse her vergleichbar mit dem hypothetischen Axion. In der Physik ist es schwierig zu erklären, weshalb diese Dunkle Energie fast null, aber eben nicht exakt null ist.
- ◇ Das **Koinzidenzproblem** besteht darin, dass die Größenordnungen von der Energiedichte der Dunklen Energie gerade mit derjenigen der übrigen Dunklen Materie und baryonischen Materie in der aktuellen Epoche (zufällig?) übereinstimmt.

18.21.3 Die Lösung der Probleme: Quintessenzen

Beide Probleme können durch eine zeitliche Entwicklung der Energiedichte der Dunklen Energie gelöst werden! Die neuen Schwierigkeiten, die man sich damit einhandelt, stecken in der genauen Wahl des Ansatzes für die Quintessenz. Mathematisch stellt sich die Quintessenz als Energiedichte

eines sich *zeitlich langsam entwickelnden Skalarfeldes* dar. Dieses Skalarfeld ist Bestandteil einer Lagrangefunktion, die die komplette Dynamik des Universums für alle Zeiten festlegt.

Ein möglicher Ansatz für ein solches Skalarfeld heißt **Cosmon**, das als extrem leichtes Teilchen interpretiert wird (*C. Wetterich* 1987). Seine Masse läge bei nur 10^{-33} eV! Dieser winzige Wert erklärt, weshalb das Cosmon noch nicht in hochpräzisen irdischen Experimenten wie den Teilchenbeschleunigern aufgetreten ist: es versinkt sozusagen im Rauschen unterhalb der Empfindlichkeit. Auf kosmischen Skalen macht sich diese fein verteilte Energie jedoch bemerkbar. Das Cosmon als Skalarfeld koppelt im einfachsten Falle *nur* an die Gravitation und *nicht* an Baryonen und Leptonen. Mit diesem Ansatz formulieren die Kosmologen einen Satz gekoppelter Feldgleichungen für Hubble-Parameter, Skalarfeld und Energiedichte. Dann vergleichen sie die sich ergebende Dynamik des Modell-Universums mit der tatsächlich beobachteten Dynamik des Universums, um zu entscheiden, wie gut der Skalarfeldansatz ist.

Gegenstand der Erforschung von Quintessenz-Modellen ist, ob der Ansatz eines *exponentiellen Potentials* für das Skalarfeld richtig ist, ob auch die Kopplung des Feldes an Dunkle Materie berücksichtigt werden muss oder ob so genannte *kinetische Terme* in der Lagrangefunktion enthalten sind.

In einem Modell, das man **Spintessenz** nennt, nimmt man sogar an, dass das Skalarfeld komplexwertig ist und rotiert (engl. *spinning field*). Die Rotation nimmt dabei mit der Expansion des Universums ab (*L.A. Boyle, R.R. Caldwell & M. Kamionkowski*, 2001, astro-ph/0105318).

Außerdem existieren Modelle mit so genannter **erweiterter Quintessenz** (engl. *extended quintessence*). Hier koppelt das Skalarfeld auch an den *Ricci-Skalar* (Krümmungsskalar, siehe auch Krümmungs- oder Riemann-Tensor). Kosmologen nennen das auch **NMC-Quintessenz** (für *Non-Minimal Coupling*), weil die Kopplung des Skalarfelds an die skalare Krümmung nicht klein ist. Eine Folge dieses Ansatzes ist, dass nicht nur die Dunkle Energie zeitlich und räumlich variiert, sondern auch eine der fundamentalen Naturkonstanten, nämlich die **Gravitationskonstante G** (*Perrotta et al.*)!

Von so genannten **Tracking-Lösungen** (engl. *tracking solutions*) spricht man bei Quintessenz-Modellen, die sehr unempfindlich gegenüber Anfangsbedingungen sind, um den Wert der aktuellen, 'gemessenen' Dunklen Energie zu erreichen.

18.21.4 Entscheidung durch die Astronomie

Die Kosmologen hoffen, dass die Beobachtung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Verteilung der so genannten akustischen Peaks in *Power-Spektren*) und von weit entfernten Supernovae vom Typ Ia (gute Standardkerzen, die eine Veränderung der absoluten Helligkeit aufgrund einer variablen Dunklen Energie verraten würden) Beschränkungen auf Modelle mit kosmologischer Konstante oder eines bestimmten Quintessenz-Modells bringen.

Die **aktuellen Messungen** an weit entfernten Supernovae und die Daten des Mikrowellen-Satelliten WMAP sprechen eher für die kosmologische Konstante Λ als für die Quintessenz, allerdings kann letztere nicht ausgeschlossen werden. Die Permanenzmessungen an weit entfernten Supernovae Typ Ia ergaben bisher nämlich keine zeitliche Variabilität der kosmologischen Konstante (*Wang & Tegmark* 2004, astro-ph/0403292, *Riess et al.* 2004, astro-ph/0402512, *Riess et al.* STScI/NASA 2006).

Die Phantom-Energie (*Caldwell et al.*, 2003) ist eines der drastischsten Modelle mit zeitlich veränderlicher Dunkler Energie: es unterscheidet sich wesentlich von den Lambda- und Quintessenz-Kosmologien darin, dass die Expansionsrate des Universums nicht konstant bleibt oder stetig abnimmt, sondern zunimmt! Das hat fatale Folgen: den Big Rip des Universums. Die Beschränkung aus aktuellen Daten ist, dass sich der Big Rip frühestens in 50 Mrd. Jahren ereignen könnte, aber die Phantom-Energie wird aufgrund der aktuellen Beobachtungsdaten nicht favorisiert.

In der **experimentellen Kosmologie** wird weiterhin auf der Grundlage immer besserer Daten geprüft werden, inwiefern kosmologische Konstante, Quintessenz-Modelle, Phantom-Energie oder andere Formen Dunkler Energie in Frage kommen. Ab dem Jahr 2008 wird der ESA-Mikrowellen-Satellit PLANCK neue und noch präzisere Daten liefern - vielleicht mit einem neuen Favoriten unter den Dunklen Energien?

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