
Lexikon

der



Astrophysik

von



Andreas Müller

aus dem

Wissensportal für Astrophysik

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

April 2007

Abbildungsverzeichnis

23.1 Explosionsregion um den Velapulsar 2007.	4
23.2 Geometrie und Lichtkurve der Algolveränderlichen.	6
23.3 Vereinheitlichung: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).	10
23.4 Eine Radioantenne des Very Large Arrays in Socorro 2006.	12
23.5 Prinzip der interkontinentalen Interferometrie.	13
23.6 Das Very Large Telescope auf dem Paranal 1999.	14

23 Lexikon V

23.1 Vakuum

Das Vakuum wird historisch bedingt oft mit dem 'luftleeren Raum' gleich gesetzt. Möchte ein Experimentator oder Laborant ein Vakuum herstellen, bedient er sich einer Vakuumpumpe. Dieses Gerät saugt aus einem Behälter den Inhalt ab, vor allem darin enthaltene Luft. Selbst die besten Vakuumpumpen vermögen nicht alle Teilchen und Moleküle zu entfernen: ein Rest bleibt immer. Die Präparation eines **idealen Vakuums** ist also kein leichtes Unterfangen. Geht das überhaupt? Was ist eigentlich ein ideales Vakuum?

23.1.1 Quantenfluktuationen und Nullpunktsschwingung

Seit der Entwicklung der Quantentheorie in der modernen Physik des 20. Jahrhunderts ist klar, dass es ein ideales Vakuum im Sinne von 'Abwesenheit von Teilchen' nicht gibt! Das Quantenvakuum ist angefüllt mit **virtuellen Teilchen**, die im Rahmen der Heisenbergschen Unschärfe sich für kurze Zeit Energie 'aus dem Nichts' leihen können. Diesen Sachverhalt nennen Physiker auch **Vakuum- oder Nullpunktsfluktuationen**. Anschaulich kann man sich diese Fluktuationen mit einem 'Quantenpendel' vergegenwärtigen: Wir stellen uns ein schwingfähiges Gebilde vor, beispielsweise das Pendel einer Uhr. In der Quantenwelt wird solch ein Pendel durch den quantenmechanischen, harmonischen Oszillator beschrieben. Wie die Lösung des zugehörigen *quantenmechanischen Eigenwertproblems* zeigt, weist das Quantenpendel eine Nullpunktsschwingung auf. Dieses Phänomen überträgt sich in analoger Weise auf die Quantenfeldtheorien (QFTs). Die QFTs sind diejenigen Theorien, die zur Beschreibung der Elementarteilchenphysik verwendet werden und die in ihrer Gesamtheit auf das Standardmodell der Teilchenphysik führen.

23.1.2 Vakuum in Einsteins Theorie

Das Vakuum hat also eine komplizierte Struktur. Vom Standpunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) kann man ein **relativistisches Vakuum** sehr eindeutig formulieren: Hier muss der Energie-Impuls-Tensor verschwinden. Die rechte Seite der Einsteinschen Feldgleichungen ist also null und die Aufgabe besteht darin, nun Lösungen zu finden, für die der Einstein-Tensor verschwindet. Diese Lösungen nennt man **Vakuum-Raumzeiten** oder Vakuumlösungen der ART. Ein triviales Beispiel einer Vakuum-Raumzeit ist die Minkowski-Metrik, die die fundamentale, flache Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) ist. Etwa komplizierter sind die Vakuum-Lösungen in der ART, die gekrümmt sind. Hierzu gehören die Schwarzschild-Lösung oder die Kerr-Lösung, die bestimmte Schwarze Löcher mathematisch beschreiben.

In der relativistischen Kosmologie kennt man ebenfalls Vakuum-Raumzeiten, wie die **materiefreie de-Sitter-Lösung**. Freilich ist diese Raumzeit ohne Sinn für ein reales Universum, weil dieses doch Materie, z. B. uns selbst, enthält. Eine neue Form von regulären

Raumzeiten greift jedoch auf die de-Sitter-Raumzeit zurück: die Gravasterne, die man zu der Klasse der Vakuumsterne zählt. Das de-Sitter-Vakuum besteht nicht aus baryonischer Materie, sondern aus Dunkler Energie. Diese Energieform stellt nahezu den gesamten Teil der Masse des Gravasterns. Und: Die Anti-de-Sitter-Raumzeiten haben an Bedeutung in der modernen Feldtheorie gewonnen, siehe AdS/CFT-Korrespondenz.

23.1.3 Dunkle Energie & Quantenvakuum

Dunkle Energie ist eine rätselhafte Substanz und füllt anscheinend unser ganzes Universum aus. Sie ist mit 74% der dominante Anteil an allen darin enthaltenen Energieformen (baryonische Materie, Dunkle Materie und eben Dunkle Energie). Sie wirkt sich antigravitativ aus und ist dafür verantwortlich, dass das Universum expandiert. Dunkle Energie 'bläst' die Robertson-Walker-Metrik auf. Es war ein nahe liegender Ansatz, die Dunkle Energie als eine Manifestation des Quantenvakuums zu interpretieren: Das Universum ist in allen Bereichen angefüllt mit dem Quantenvakuum. Die entsprechende Energiedichte ist zwar sehr gering, wird jedoch zu späten Epochen des Kosmos dynamisch relevant. Wir leben im so genannten Dunkle Energie dominierten Kosmos (Rotverschiebung $z \sim 0$). Im frühen Universum hingegen war die Dunkle Energie dynamisch irrelevant, denn die Energiedichten von Strahlung und Materie bestimmten hier die Dynamik. Die Interpretation der Dunklen Energie als Quantenvakuum birgt jedoch ein schwer wiegendes quantitatives Problem: Die Energiedichte des Quantenvakuums liegt mit 10^{92} g/cm^3 etwa **120 Größenordnungen** über dem astronomisch beobachteten Wert von unter 10^{-29} g/cm^3 ! Diese gravierende Inkonsistenz brachte Alternativen auf den Plan: Dunkle Energie könnte ein leichtes Teilchen sein, z. B. das Cosmon, das Radion oder eine andere Form von Quintessenz. Diese Ansätze werden aktuell in der Kosmologie verfolgt, sind aber hypothetisch. Die astronomischen Beobachtungen legen derzeit nahe, dass die Dunkle Energie im Kosmos am besten mit Einsteins kosmologischer Konstante Λ assoziiert werden kann.

23.2 Vakuumstern

Ein Oberbegriff für stellare Objekte, deren Inneres im Prinzip leer ist. Die spannende Frage ist, was '**Leere**' physikalisch eigentlich ist - dazu gleich mehr. Das Äußere des Vakuumsterns muss eine irgendwie geartete, aber wohldefinierte Berandung sein, zum Beispiel eine Materieschale, eine Oberfläche. Die Stabilität im Sinne des **hydrostatischen Gleichgewichts** muss natürlich ebenfalls gewährleistet sein.

23.2.1 Gravasterne

Die Gravasterne zählen zu den Vakuumsternen. Ihr Inneres ist dem dem Sinne ein Vakuum, weil es frei von gewöhnlicher, baryonischer Materie ist; allerdings ist es angefüllt mit Dunkler Energie. Sie entfaltet eine **antigravitative Wirkung** und stützt eine dünne Haut ultrarelativistischer Materie stützt. Anmerkung: Der Begriff ultrarelativistisch meint, dass die Schallgeschwindigkeit in der Schalenmaterie gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Die Materiehaut schließt sich außen an die Vakuumblase ('de-Sitter-Blase') an.

Inzwischen wurden neuere Gravasternlösungen mit anderen Vakuumkernen vorgeschlagen: Die Dunkle Energie im Innern des Gravastern könnte (zumindest in der theoretischen Beschreibung) auch in Form von Phantom-Energie vorliegen (Diplomarbeit *M. Vigelius*,

Landessternwarte Heidelberg 2004) oder auch als so genanntes Chaplygin-Gas (*Bilic, Tupper & Viollier* JCAP 0602, 013, 2006).

23.2.2 Holosterne

Die Holosterne dürfen auch zur Klasse der Vakuumsterne gezählt werden. Im Gegensatz zu den Gravasternen enthalten sie als Vakuumkern radiale, fraktionierte Strings.

23.2.3 Zum Vakuum im Vakuumstern

Der Terminus 'Vakuum' bezieht sich also lediglich auf eine gewisse Materielosigkeit im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART). Dann verschwindet nämlich der Energie-Impuls-Tensor, das Lambda-Glied verschwindet jedoch im Innern von Gravasternen nicht.

In einem absoluten Sinne gibt es ohnehin kein Vakuum, **keine absolute Leere**, sondern nur ein Quantenvakuum: Virtuelle Teilchenpaare und Nullpunktsfluktuationen füllen jeden Raumbereich aus. Hier beginnt jedoch die Domäne der Quantentheorie und der Quantengravitation wie der Stringtheorien oder Loop-Quantengravitation. Sie können eine neue Wahl für den Energie-Impuls-Tensor der ART inspirieren oder völlig neue Konzepte motivieren. Das führt auf Alternativen zum Konzept des klassischen Schwarzen Lochs der ART.

23.3 Vektorboson

Oberbegriff für Bosonen mit Spin 1. So sind zum Beispiel die Photonen, die Gluonen und die Weakonen Vektorbosonen.

23.4 Velapulsar

Vor 11000 Jahren explodierte ein Stern im Sternbild *Vela* (dt. *Segel* am Südhimmel) in einer Supernova. Wie bei allen Sternexplosionen breitete sich dabei eine Stoßwelle im interstellaren Medium aus. Die Überbleibsel dieser Explosion sind ein Supernovaremnant und ein rotierender Neutronenstern, ein Pulsar, der in diesem speziellen Fall *Velapulsar* getauft wurde.

Das Foto 23.1 zeigt eine etwa 100 Lichtjahre durchmessende, farbenprächtige Region um das Explosionszentrum (Credit: Digitized Sky Survey, ESA/ESO/NASA, *Davide De Martin*, Skyfactory, 2007). Die Supernova ist längst verloschen - doch die sich ausbreitende, nicht ganz kugelsymmetrische Schockfront ist deutlich um die Bildmitte herum sichtbar. An dieser Position befindet sich auch etwa der Velapulsar.

Die längliche Struktur links unten, nahe am Bildrand, ist der *Bleistift-Nebel* (engl. *Pencil Nebula*) mit der internationalen Katalogbezeichnung NGC 2736. Er ist Teil des Vela-Supernovaremnants.

23.4.1 Lesehinweis

Siehe zu diesem Begriff unter Pulsar.



Abbildung 23.1: Explosionsregion um den Velapulsar 2007.

23.5 Veränderliche

Der Begriff Veränderliche (engl. *variables*) meint in der Astronomie und Astrophysik veränderliche Sterne, die dadurch ausgezeichnet sind, dass sich ihre Helligkeit (nicht unbedingt die Leuchtkraft!) ändert.

23.5.1 Was ist die Zeitskala der Variationen?

Daneben können sich auch andere Zustandsgrößen des Sterns ändern. Typische Zeitskalen der Helligkeitsvariationen sind im Bereich von **Sekunden bis Monaten** und hängen vom jeweiligen Mechanismus ab, der die Variabilität hervorruft. Die Sternentwicklung, wie sie im Hertzsprung-Russell-Diagramm anhand von Entwicklungspfaden illustriert werden kann, lehrt, dass *alle* Sterne im Laufe ihrer Entwicklung Helligkeitsveränderungen unterliegen. Veränderliche Sterne zeigen jedoch Variabilitäten auf wesentlich kürzeren Zeitskalen als der Entwicklungszeitskala.

23.5.2 Beobachtungsmethode bei Veränderlichen

Die Beobachtung, Auswertung und Bestimmung von Veränderlichen geschieht mittels **Lichtkurven**, einer Auftragung der Helligkeit über der Zeit. Achtung! Helligkeit und Leuchtkraft sind nicht dasselbe: Helligkeit ist eine direkt beobachtbare Größe; Leuchtkraft ist so etwas wie die 'Helligkeit vor Ort des Sterns' und folgt erst mit bekannter Entfernung (siehe Distanzmodul) oder mit einem Sternmodell. Bei optischen Veränderlichen sind die Profiastronomen auf die Amateurastronomen angewiesen, weil die längerfristigen Beobachtungen ein und desselben Veränderlichen sehr zeitaufwendig ist. Das ist angesichts der teuren Beobachtungszeit an modernen Groß- oder satellitengestützten Teleskopen kaum mit Profinstrumenten zu leisten.

23.5.3 Klassifizierung der Veränderliche - Kriterium: Zeit

Grob unterteilt man die Gruppe der Veränderlichen in **Eruptivveränderliche** und **regelmäßige Veränderliche**. Die erste Gruppe zeigt nur einmalige oder sporadische Helligkeitsausbrüche, während die zweite Gruppe periodisch wiederkehrende Helligkeitsvariationen zeigt. Die Gamma Ray Bursts, Novae, Supernovae und Hypernovae können zu den Eruptivveränderlichen gezählt werden. Klassische Eruptivveränderliche sind T Tauri Sterne, UV-Ceti-Sterne und RW-Aurigae-Sterne.

Die regelmäßigen Veränderlichen, sind sehr zahlreich und erhalten ihren Namen in der Regel nach dem **Prototyp** eines Sterns, bei dem das Phänomen zuerst beobachtet wurde. Hier kennt man beispielsweise die Algol-Veränderlichen (Prototyp im Sternbild *Perseus*), Mira-Veränderlichen (Prototyp im Sternbild *Cetus*, dt. *Walfisch*), Cepheiden oder *Delta-Cephei-Sterne* (Prototyp im Sternbild *Cepheus*), RR Lyrae Sterne (Prototyp im Sternbild *Lyra*, dt. *Leier*), *Delta-Scuti-Sterne* (Zwerg-Cepheiden), aber auch die Pulsare.

23.5.4 Klassifizierung der Veränderliche - Kriterium: Physik

Im Weiteren entscheidet man veränderliche Sterne nach dem **physikalischen Mechanismus**, der für die Helligkeitsvariation verantwortlich ist. Eine banale Ursache für die Helligkeitsvariabilität ist die Bedeckung durch einen anderen Stern, ein Prozess der in

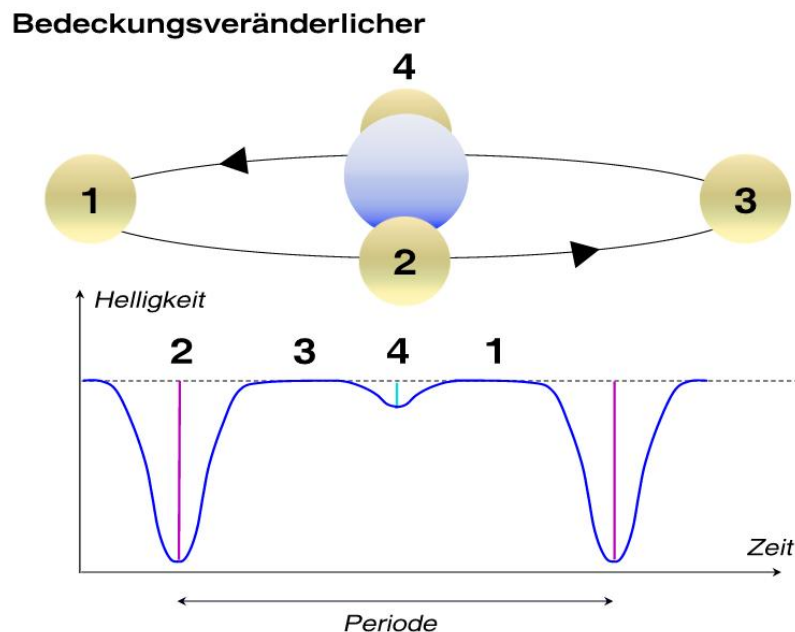


Abbildung 23.2: Geometrie und Lichtkurve der Algolveränderlichen.

Doppel- oder Mehrfachsternsystemen anzutreffen ist. Diese Gruppe von Veränderlichen heißt **Bedeckungsveränderliche**. Betrachten wir ein Doppelsternsystem (*Binär*), wo zwei Sterne um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen und mit dieser Umlaufbewegung eine Ebene aufspannen. Natürlich hängt die Bedeckung von der Position des Beobachters ab, weil unter kleinen Neigungen (Inklinationen) zur Senkrechten (Normalen) dieser Ebene keine Bedeckung, kein *Durchgang* (Transit) durch eine Sternscheibe, stattfindet. Bei hohen Inklinationen allerdings kann ein Stern den anderen verfinstern: die Helligkeit nimmt ab (nicht jedoch die Leuchtkraft des bedeckten Sterns!). Weil die Sterne eines Binärs sich auf Ellipsen in festen Umlaufzeiten umkreisen (Kepler-Gesetze), sind die Bedeckungsveränderliche auch regelmäßige Veränderliche. Sie sind aber keine intrinsischen Veränderliche, deren Helligkeitsvariation an einer physikalischen Zustandsänderung des Stern festgemacht werden könnte. Die historisch zuerst entdeckten Bedeckungsveränderliche waren die Algol-Veränderliche oder Algol-Sterne im Jahr 1670. Das Bild 23.2 illustriert Geometrie, Orientierung und den typischen Verlauf der Lichtkurve von Algol-Veränderlichen.

Pulsationsveränderliche sind ebenfalls regelmäßige Veränderliche, deren Variabilität tatsächlich mit einer Zustandsänderung des Sterns verbunden ist: einer Pulsation, das heißt einem Wechsel von Ausdehnung und Zusammenziehung des 'Plasmaballs' in radialer oder nichtradialer Richtung. Die bekanntesten Pulsationsveränderliche sind die Cepheiden und dessen Verwandte wie die RR Lyrae Sterne (Haufenveränderliche) und Delta-Scuti-Sterne. Die regelmäßige Helligkeitsvariation besitzt hier eine Abhängigkeit von der Pulsationsperiode, die durch Sternmodelle erklärt werden kann. Alle diese cepheidenartigen Sterne liegen im Hertzsprung-Russell-Diagramm auf dem *Instabilitätsast*. Bei Pulsaren hingegen pulsiert *nicht* die physische Sterngröße, sondern die regelmäßige Variabilität kommt durch Rotation einer räumlich gerichteten Strahlungsemission zustande - es ist ein so genannter Leuchtturmeffekt.

Mira-Veränderliche oder Mira-Sterne sind regelmäßige Pulsationsveränderliche mit

außerordentlich langen Perioden von hundert bis zu tausend Tagen. Es handelt sich um Rote Riesensterne, deren Helligkeit variiert, weil sie eine instabile Brennphase auf dem *Asymptotischen Riesenast* (engl. *Asymptotic Giant Branch*, AGB) durchlaufen - siehe auch AGB-Sterne.

Die **Kataklysmischen Veränderliche** (engl. *Cataclysmic Variables*, CVs) sind hingegen Doppelsternsysteme, bei denen eine Komponente ein kompaktes Objekt, nämlich ein Weißer Zwerg ist und ein Massentransfer von einem normalen Begleitstern (meist ein Riesenstern) stattfindet. Diese Akkretion auf die kompakte Komponente geschieht entweder dann, wenn die Oberfläche des normalen Sterns bis zum inneren Lagrange-Punkt (verschwindende Gesamtgravitationskraft) des Systems oder darüber hinaus reicht (*Roche lobe overflow*, siehe auch Roche-Volumen). Oder aber der Sternenwind, der vom normalen Stern oder Riesenstern abgeblasen wird, fällt auf die kompakte Komponente (*Windakkretion*). Typischerweise sind CVs kleine Binärsysteme, wo die Umlaufzeiten wenige Stunden betragen. Bei der Akkretion wird Röntgenstrahlung emittiert. In der theoretischen Astrophysik beschreibt man diese Systeme mit den Gleichungen der Hydrodynamik und Magnetohydrodynamik.

23.6 Vereinheitlichung

Vereinheitlichung oder *Unifikation* ist eine erfolgreiche Strategie, die in der modernen Physik verfolgt wird. Physiker versuchen verschiedene Phänomene in der Natur einheitlich zu beschreiben. Diese Strategie als Leitprinzip ist ästhetisch und pragmatisch, denn sehr viele unterschiedliche Sachverhalte können mit demselben Apparat formuliert werden. Letztlich offenbart dies eine **tiefe Einsicht in die Natur**, weil es zeigt, dass Vieles nach immer wiederkehrenden Prinzipien funktioniert. Man kann sagen, dass **Selbstähnlichkeit** ein fundamentales Naturgesetz ist. Dies ist auch die Basis für *Interdisziplinarität*, denn selbstähnliche Prinzipien können so fachübergreifend ausgetauscht werden. Der Betrachter empfindet dies als ästhetisch. Warum das so ist, ist eher eine philosophische und psychologische Frage (*'Finde schön, was so ist wie Du.'*).

23.6.1 Etappenziele der Vereinheitlichung in der Physik

Newton

Die Vereinheitlichung der Physik zieht sich wie ein roter Faden durch die Geschichte der Physik: Als erste Vereinheitlichung wird heute, wenn auch trivial erscheinend, die **Newtonsche Gravitationstheorie** angesehen. Im 17. Jahrhundert gelang es dem englischen Physiker, Mathematiker und Astronom *Sir Isaac Newton* irdische Kräfte (fallende Körper) und kosmische Kräfte (Planetenbewegung) zu vereinheitlichen und als wesensgleich anzuerkennen. Vor dem Hintergrund seiner Zeit ist das eine enorme gedankliche Leistung, weil er die menschliche Erfahrungswelt 'Erde' mit der göttlichen Welt 'Himmel' gleichsetzte. Die Entwicklung des adäquaten mathematischen Formalismus (zeitgleich, aber unabhängig voneinander mit dem deutschen Mathematiker *Gottfried Wilhelm Leibniz*), der Infinitesimalrechnung, war eine weitere seiner herausragenden Leistungen.

Maxwell

Im 19. Jahrhundert folgte dann die zweite große Vereinheitlichung der Physik in Form des **Elektromagnetismus** durch *James Clerk Maxwell*. Elektrische und magnetische Phänomene

konnten in Gestalt der Maxwell-Gleichungen zusammengefasst werden. Magnetische und elektrische Felder können auf der Grundlage dieser Theorie ineinander verwandelt werden und die Unterscheidung ihres Wesens ist hinfällig. Aus den Maxwell-Gleichungen folgt auch, dass (Licht oder allgemeiner gesprochen Strahlung) eine elektromagnetische Welle ist, die sich auch im Vakuum ausbreiten kann.

Einstein

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die **Relativitätstheorie** von *Albert Einstein* entwickelt. In dieser Theorie wurden die physikalischen Begriffe *Masse* und *Energie* vereinheitlicht. In der berühmten Gleichung $E = mc^2$ kommt dies zum Ausdruck. Gleichwohl vereinheitlichte die Einsteinsche Theorie *Raum* und *Zeit* zur *Raumzeit*.

Kaluza & Klein

Die **Kaluza-Klein-Theorie** wurde ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts, kurz nach der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelt (ART). Einsteins ART wurde hier mit Maxwells Elektrodynamik verknüpft - Schönheitsfehler: die Kaluza-Klein-Theorie erfordert eine räumliche Extradimension. Die Erfolge der Quantentheorie ließen die Kaluza-Klein-Theorie in Vergessenheit geraten. Erst Ende des 20. Jahrhunderts erinnerten sich die Stringtheoretiker an diese äußerst interessante 5D-Feldtheorie, die viele Aspekte (wie die Kompaktifizierung) birgt, die heute wieder als bedeutsam erachtet werden.

Planck & Kollegen

Ebenfalls Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die **Quantentheorie** ausgearbeitet. Die Quantenelektrodynamik (QED) kann als quantisierte Weiterentwicklung der klassischen Elektrodynamik Maxwells verstanden werden. Das Austauschquant dieser elektromagnetischen Wechselwirkung, das Vektorboson, ist das Photon. Aus heutiger Sicht ist die QED die erste Quantenfeldtheorie (QFT) gewesen, die entwickelt wurde. Später ist es gelungen, auch die anderen fundamentalen Wechselwirkungen in der Natur (bis auf die Gravitation) unter einheitlicher Perspektive durch Austauschteilchen (*intermediäre Bosonen*) zu beschreiben, die zwischen verallgemeinerten Ladungen (elektrische Ladung, schwache Ladung, Farbladung, Masse als gravitative Ladung) vermitteln. Durch den Austausch intermediärer Bosonen 'spüren' (generalisierte) Ladungsträger Kräfte.

23.6.2 Vereinheitlichungen von Quantenfeldtheorien

Die erste Vereinheitlichung von Quantenfeldtheorien war die **elektroschwache Theorie**. Die Konzepte der QED konnten mit denjenigen der schwachen Wechselwirkung vereinheitlicht werden. Die Physiker *Sheldon Lee Glashow*, *Steven Weinberg* und *Abdus Salam* konnten so in der elektroschwachen Theorie neue Teilchen und deren nicht verschwindenden Ruhemassen vorhersagen! Dabei handelte es sich um die beiden W- und das Z-Teilchen, die intermediären Bosonen der schwachen Wechselwirkung, die auch tatsächlich entdeckt wurden - ein unglaublicher Erfolg der Unifikation.

Die Erfolge des Vereinheitlichungsgedankens spornten weiter an, auch die anderen Wechselwirkungen in eine einheitliche Formulierung einzubetten. Den Physikern gelang es, auch die starke Wechselwirkung als dritte Kraft mit der elektroschwachen Theorie zu

'verheiraten': das Resultat sind die **Großen Vereinheitlichten Theorien (GUT)**. Die zentrale Aussage der GUT ist, dass ab Energien von 10^{16} GeV die schwache, starke und elektromagnetische Wechselwirkung wesensgleich sind: Teilchenphysiker nennen sie die X-Kraft. Eine Konsequenz der GUT ist auch, dass es keinen Unterschied mehr gibt zwischen Quarks und Leptonen, den fundamentalen Konstituenten der Materie! In der Kosmologie sind die Astrophysiker von der Gültigkeit des berühmten Urknall-Modells überzeugt. Die GUT-Ära herrschte nach diesen Ideen kurz nach der Inflationsära vor. Als das Universum etwa 10^{-36} Sekunden alt und etwa 10^{27} Kelvin heiß war, verschwand die X-Kraft und die Symmetriebrechung splittete sie auf.

Elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung versammeln sich unter der Bezeichnung **Standardmodell der Teilchenphysik**. Bis auf das Higgs-Boson wurden alle Teilchen dieses 'Teilchenzoos' experimentell gefunden! Im neuen Teilchenbeschleuniger *Large Hadron Collider* am CERN, der Ende 2007 in Betrieb genommen wird, setzen die Forscher große Hoffnungen auch das letzte Teilchen des Standardmodells zu entdecken.

23.6.3 Eichtheorien

Die Quantenfeldtheorien etablierten eine neue Sprache für alle Wechselwirkungen. Die intermediären Bosonen sind **Eichbosonen** (Eichfelder) und können in eine Eichtheorie (engl. *gauge theory*) eingebettet werden. Eine Theorie bzw. eine Wechselwirkung ist eindeutig durch die Angabe ihrer **Lagrangedichte** oder alternativ des **Wirkungsfunktionals** festgelegt. Mathematisch folgt daraus eindeutig die Feldgleichung der Theorie. Die Feldgleichung wird als Bewegungsgleichung **dynamischer Felder**, der Naturkräfte in Quantenform, verstanden.

23.6.4 ultimative Vereinheitlichung zur Theorie von Allem

Bisher ist es allerdings nicht gelungen, die Gravitation konsistent mit den anderen drei quantisierten Kräften zu beschreiben. Der Apparat der Quantenfeldtheorien versagt bei der Schwerkraft. Dennoch gibt es bereits einen Namen für das entsprechende Austauscheteilchen der Gravitation: das Graviton. Die **Vereinigte Theorie** (engl. *Unified Theory*, UT) oder **Theorie von Allem** (engl. *Theory Of Everything*, TOE), die die Gravitation in quantisierter Form in die GUT einbindet, wird nach wie vor gesucht. Unter der Bezeichnung **Quantengravitation** werden diejenigen Theorien zusammengefasst, die den Versuch unternehmen, das Gravitationsfeld zu quantisieren. Bisher werden dafür ausschließlich die **Stringtheorien** favorisiert. Allerdings ist es den Stringtheoretikern noch nicht gelungen, stringtheoretische Aspekte in überzeugender Weise mit dem wohl verifizierten Standardmodell zu harmonisieren, z. B. Massen von beobachteten Teilchen aus der Theorie abzuleiten. Eine besondere heiße Spur, die einen Durchbruch in der physikalischen Forschung verspricht, ist die **AdS/CFT-Korrespondenz**. Sie konnte zu einer **Dualität von Eichung und Gravitation** verallgemeinert werden. Diese Aspekte werden zurzeit intensiv erforscht.

Mittlerweile wird eine weitere Möglichkeit verfolgt: Sie heißt **Loop-Quantengravitation** (LQG). Die LQG leistet weniger als die Stringtheorien, weil sie nur versucht die Gravitation zu quantisieren, aber elektromagnetische, starke und schwache Kraft gar nicht berücksichtigt. Aber das, was die LQG leistet, klingt sehr viel versprechend. Die LQG basiert auf den Konzepten, die Einsteins Theorie diktiert: Kovarianz und Diffeomorphismusinvarianz. Besonders attraktiv ist die LQG dadurch, dass ihr eine überzeugende Quantisierung der

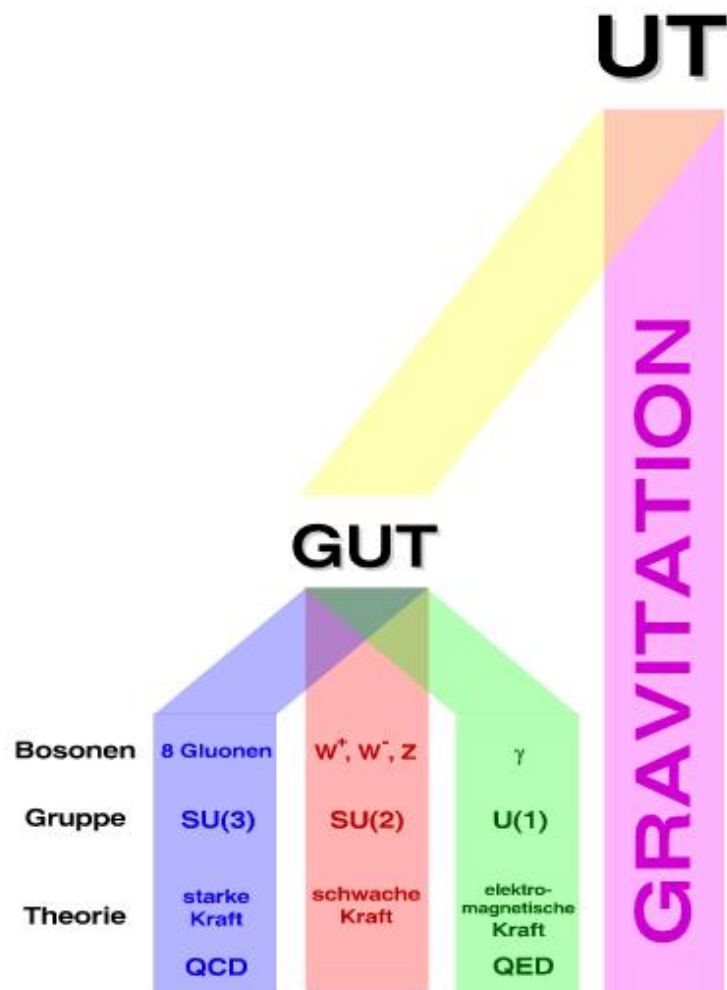


Abbildung 23.3: Vereinheitlichung: Grand Unified Theories (GUT) and Unified Theories (UT).

Raumzeit in so genannte Wilson-Loops gelingt. Auf der Planck-Skala resultiert eine körnige Struktur in Volumenquanten. In gewisser Weise ist es für die Forscher beruhigend auf mindestens zwei Quantengravitationen bauen zu können, doch muss sich irgendwann eine Möglichkeit der Falsifikation oder Verifikation (*Bewährung*) bieten.

23.6.5 Was tun mit der Weltformel?

Es bleibt abschließend die Frage nach der **Praktikabilität von Vereinheitlichung**. Man kann folgende Fragen stellen: Wie weit geht Vereinheitlichung? Wie nützlich ist Vereinheitlichung? Was tun mit der **Weltformel**? Die Zusammenstellung vieler physikalischer Theorien hat gezeigt, dass es nicht unbedingt sinnvoll sein kann, die Gleichungen einer mächtigen, unifizierten Theorie auf alltägliche Problemstellungen der Physik anzuwenden. So wird z. B. die aufwendigere, relativistische Rechnung nur dort praktiziert, wo relativistische Effekte maßgeblich werden. Ansonsten reicht die Newtonsche Theorie. So verlieren alte Theorien auch nicht an Gehalt oder Wichtigkeit. Schon gar nicht kann man davon sprechen, dass alte Theorien 'falsch' seien. Das ist wissenschaftstheoretisch betrachtet Blödsinn! *Jede* Theorie hat eben ihren beschränkten Anwendbarkeitsbereich.

Weltformel ist ein plakativer Begriff für den 'heiligen Gral der Teilchenphysik': eine Unifikation aller Naturkräfte. Wie hier dargelegt, haben die Physiker eine solche Theorie noch nicht gefunden. Mit Fug und Recht darf man bereits die **Feldgleichung von Einsteins ART als Weltformel** bezeichnen - sie ist zwar nicht quantisiert und berücksichtigt auch nicht die anderen Naturkräfte, aber sie beschreibt die *Welt als Ganzes* im Rahmen der relativistischen Kosmologie sehr erfolgreich (siehe Friedmann-Weltmodell).

Geht man wie die Teilchenphysiker weiter, so deuten die Erfolge der Unifikationen in den Quantenfeldtheorien in der Tat so etwas wie eine Weltformel im Sinne der UT an. Nehmen wir an, wir hätten die UT in Form einer Lagrangedichte, oder äquivalent einer Feldgleichung, vorliegen. Der Nutzen dieser Weltformel wäre nur von **erkenntnistheoretischer Natur**. *In Praxi* muss diese kompakte Formulierung auf das vorliegende Problem 'herunter gebrochen' werden - dann handelt man sich wohl alle Komplexität der untergeordneten Theorien wieder ein und hat de facto naturwissenschaftlich vermutlich nichts gewonnen. Vielleicht hat man auf einer anderen Geistesebene etwas gewonnen: In der Vereinheitlichung zur Weltformel mag es zu einer Vereinheitlichung mit ganz neuem Charakter kommen: der **Vereinheitlichung von Physik und Philosophie**.

23.7 Viele-Welten-Theorie

Die Existenz vieler Welten ist eine Folge der alternativen **Interpretation des quantenmechanischen Messprozesses** und stammt von *H. Everett* (1957). Sie besagt, dass mit jeder Messung einer quantenmechanischen Messgröße (*Observablen*) eine Aufspaltung in alle möglichen Realisierungen der Messgröße, also in viele Welten, stattfindet. Eingebettet in den Formalismus der Quantenkosmologie verspricht diese Deutung die Existenz von Paralleluniversen. Dies wurde natürlich bisher nicht nachgewiesen - weder direkt, noch indirekt.

Die Kopenhagener Deutung (ursprünglich von *Max Born* 1925/26) ist eine andere Interpretation, die nicht so weit geht, wie die 'Viele-Welten-Theorie'. Es ist wohl sprachlich nicht angebracht, hier von einer Theorie zu sprechen; angemessen ist vielmehr die Bezeichnung 'Viele-Welten-Hypothese'.



Abbildung 23.4: Eine Radioantenne des Very Large Arrays in Socorro 2006.

23.8 VLA

Das *Very Large Array*, kurz VLA, ist eine Anordnung aus 27 einzelnen Radioteleskopen mit je 25 Metern Durchmesser und 230 Tonnen Gewicht. Eine der Radioantennen zeigt das Foto 23.4. Alle Antennen sind auf dem Beobachtungsgelände in der Form eines riesigen Ypsilons angeordnet. Mit diesem Array können interferometrisch hochaufgelöste Radiobeobachtungen durchgeführt werden. Das VLA gehört zum *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) und steht in Socorro, New Mexico, USA. Die 27 Antennen können über ein Verfahren der Apertursynthese zu einem Riesenteleskop mit einem Äquivalentdurchmesser von 130 Metern zusammenschaltet werden. Die Auflösung im Radiobereich bei der höchsten Frequenz von 43 GHz kann so bis zu 0.04 Bogensekunden oder **40 Millibogensekunden** (mas) betragen. Dies würde einer Detektion eines Golfballes in 150 Kilometern Entfernung entsprechen! Leider emittieren sie normalerweise keine Radiowellen - es sei denn thermische Radiowellen bei geeigneter Temperatur des Balls.

Mit dem VLA wurden viele Durchbrüche in der astronomischen Beobachtung erzielt, z. B. die **erste Beobachtung eines Einstein-Rings** 1988.

23.9 VLBI

Diese Abkürzung steht für *Very Long Baseline Interferometry*, also Interferometrie mit sehr langen Basislinien (einige tausend Kilometer) und ist ein Verfahren der Apertursynthese in der **Radioastronomie**. Dabei schalten die Radioastronomen verschiedene Radioteleskope, die auf die gleiche Radioquelle ausgerichtet sind, **transkontinental**, d. h. weltweit, zusammen (siehe Grafik 23.5). Unter dem Fachbegriff *Basislinie* verstehen die Astronomen dabei den räumlichen Abstand der Teleskope ('Luftlinie').

23.9.1 Anforderung: präzise und synchronisierte Uhren

Dabei müssen die Teleskope sehr genau synchronisiert sein, damit die Beobachtungsinformation gleichen Zeiten zugeordnet werden kann. Aus diesem Grund

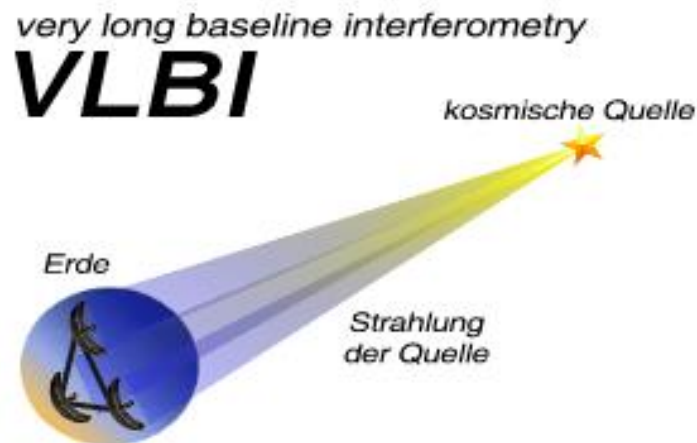


Abbildung 23.5: Prinzip der interkontinentalen Interferometrie.

steht bei jedem Teleskop eine Atomuhr, damit das Zeitmaß der an der Interferometrie teilnehmenden Teleskope genau abgeglichen werden kann.

23.9.2 Wozu der Aufwand?

Der Sinn dieser sehr aufwendigen Interferometrie ist es, das räumliche **Auflösungsvermögen** enorm zu steigern, um eine Quelle genauer zu vermessen. Winzige Strukturen können mit dieser Technologie abgebildet werden. Die Beobachtungsfotos werden mit den Erwartungen aus theoretischen Rechnungen und Computersimulationen verglichen.

23.9.3 Beobachtungskandidaten

Mit solchen VLBI-Beobachtungen konnte das Zentrum der Milchstraße radioastronomisch sehr genau kartiert werden. Dort wurde eine helle Radiopunktquelle gefunden, die die Radioastronomen Sgr A* genannt haben. Es ist das Zentrum unserer Heimatgalaxie, und die Astronomen sind davon überzeugt, dass dort ein supermassereiches Schwarzes Loch von etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen sitzt (Arbeiten der Genzel-Gruppe am MPE, siehe auch Web-Artikel Das größte Schwarze Loch der Milchstraße). Astronomen erwarten, dass mittels Radio-VLBI die Schwärze des Loches, die aufgrund der starken Gravitationsrotverschiebung entsteht, in etwa fünf Jahren nachgewiesen wird!

Eine weitere Quelle, die von großem Interesse für die Radioastronomen ist, ist der Aktive Galaktische Kern M87. VLBI mit Millimeterradiowellen erreichen räumliche Auflösungen, die in der Entfernung von M87 (16 Mpc) nur wenige zehn Schwarzschild-Radien betragen! Das ist ein Forschungsgebiet der VLBI-Gruppe am MPI für Radioastronomie in Bonn. Damit ist es möglich die unmittelbare Umgebung des supermassereichen Schwarzen Loches in M87 zu studieren, und dabei zu beobachten, wie es den relativistischen Jet herausschießt. Diese Untersuchungen sind bedeutsam für die Physik der aktiven Galaxie (AGN) und die relativistische Magnetohydrodynamik, weil die Astrophysiker herausfinden wollen, ob AGN-Jets durch den Blandford-Payne-Mechanismus oder den Blandford-Znajek-Mechanismus (oder einer Kombination aus beidem) erzeugt werden.



Abbildung 23.6: Das Very Large Telescope auf dem Paranal 1999.

23.9.4 Weblinks

- ◇ Infrarot-/Submillimeter-Gruppe am MPE
- ◇ VLBI-Gruppe am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn

23.10 VLT

Hinter dieser Abkürzung verbirgt sich eines der leistungstärksten, optischen Teleskope überhaupt, das *Very Large Telescope*. Es handelt sich um vier Einzelteleskope der 8-Meter-Klasse, die sich auf dem Berg *Cerro Paranal* (2635 Meter) in der Atacama Wüste im Norden Chiles (Südamerika) befinden. Ein Foto dieses auch landschaftlich reizvollen Ortes der modernen Astronomie ist in Abbildung 23.6 zu sehen (Credit: ESO/VLT 1999). Das VLT wird von der Europäischen Südsternwarte (*European Southern Observatory*, ESO) betrieben und hat vor allem die Zielsetzung **optische Interferometrie** nach dem Vorbild des VLA im Radiobereich durchzuführen. Diese Methode, VLTI für *Very Large Telescope Interferometer* genannt, ermöglicht dann auch im Optischen bzw. Infraroten eine Auflösung, die sogar besser ist als die des Weltraumteleskops Hubble (*Hubble Space Telescope*, HST). Dieser Nachweis konnte u. a. mit der Infrarotkamera NICMOS erbracht werden. Derzeit wird der Nahinfrarot-Spektrograph SINFONI intensiv und erfolgreich benutzt.

Die vier Einzelteleskope (*Unit Telescopes*, UT1 bis UT4) tragen Namen in der Mapuche-Sprache der Indios:

- ◊ UT1: ANTU ('Sonne'),
- ◊ UT2: KUEYEN ('Mond'),
- ◊ UT3: MELIPAL ('Kreuz des Südens') und
- ◊ UT4: YEPUN ('Venus').

Viele deutsche Forschungsinstitute sind an zahlreichen Projekten am VLT beteiligt. So hat die Landessternwarte Heidelberg beispielsweise in Kollaboration die Spektrographen *Focal Optical Reducer Spectrograph* FORS 1 und FORS 2 beigesteuert. Mit diesen Instrumenten wurde Deep Fields aufgenommen, also extrem lang belichtete Aufnahmen von dunklen Himmelsarealen. Wie bei den *Hubble Deep Fields* (HDF) zeigen die *FORS Deep Fields* (FDF) eine Fülle extragalaktischer Systeme. Mit diesen Galaxien werden Statistiken erstellt, die der Kosmologie zugute kommen.

23.11 VLTI

Eine Methode der Apertursynthese, angewendet im Optischen am VLT. Das Akronym bedeutet *Very Large Telescope Interferometer* und besteht aus den vier Einzelteleskopen UT1 bis UT4 mit 8.2 Metern Durchmesser und kleineren Hilfsteleskopen (*Auxiliary Telescopes*, ATs) mit je 1.8 Meter Durchmesser auf der Plattform des Bergs *Cerro Paranal*. Die Längen der Basislinien betragen etwa 200 Meter. Wenn das Verfahren funktioniert, ist eine optische Auflösung im Bereich von Millibogensekunden (mas) möglich! Bisher funktioniert VLTI nur mit zwei 8.2 Meter Einzelteleskopen und wurde an hellen Sternen (Sirius und α *Hydrae*) getestet.

23.11.1 Weblink

- ◊ VLTI-Website der ESO

23.12 Voids

Voids sind großskalige Leer- oder Hohlräume im Universum.

23.12.1 Riesenlöcher im All? Wer sagt das?

Beobachtungen (vergleiche Kosmographie), wie z. B. 2dF, und hydrodynamische bzw. magnetohydrodynamische Simulationen auf Hochleistungsrechnern (*Supercomputern*) zeigen, dass das Universum großräumig nicht homogen ist, sondern eine **Wabenstruktur** besitzt. Die Voids sind gerade das leere Innere der Waben und mit etwa 50 bis 100 Mpc Durchmesser gehören sie zu den **größten Inhomogenitätsstrukturen** überhaupt. Die mittlere Dichte der Galaxienverteilung sinkt auf etwa 20% des üblichen Werts ab! Auf den Wabenrändern sitzen Galaxien, Galaxienhaufen und Galaxiensuperhaufen. Letztere finden sich an den Knoten angrenzender Waben.

23.12.2 Schwerkraft strukturiert den Kosmos

In der Kosmologie sind die Forscher u. a. am Zustandekommen der großskaligen Struktur des Universums (engl. *large-scale structure*, **LSS**) interessiert. Die Ausbildung von 'Lücken' in Form von Voids kann man durch folgenden Entwurf verstehen: Die Materie im Universum besteht aus baryonischer (eigentlich besser gesagt: hadronischer) Materie und vor allem aus der Dunklen Materie. Dunkle Materie gibt es etwa fünfmal häufiger als gewöhnliche, baryonische Materie. Zu Beginn sei dieses Materiekonglomerat homogen verteilt. Die Massen ziehen sich nun untereinander an, stoßen sich aber nie ab. Das ist ein tiefgründiger Wesenunterschied zwischen gravitativer und elektromagnetischer Kraft! Es gibt eben keine 'negativen Massenladungen'. Die homogene Verteilung wird deshalb über lange Zeiträume völlig umstrukturiert. Das Phänomen sich anziehender Massen bezeichnen die Astrophysiker als **gravitative Instabilität**. Zu jedem gegebenen Satz von lokaler Massendichte, Temperatur und Mischung von Atomsorten gehört eine bestimmte Jeans-Masse. Wird sie überschritten, kollabiert die Massenansammlung. Daraus können Riesenmolekülwolken und schließlich Sterne entstehen. Die Molekülwolken sind sehr massereich und **fragmentieren** zu Monolithen kleinerer Masse.

Typischerweise zeigen sich fadenförmige Strukturen, die **Filamente**, die die Wabenwände konstituieren können. Das Einwirken der gravitativen Instabilität über lange Zeit dünnt demnach Gebiete aus, die abseits der Filamente sind. Daraus formieren sich die Voids.

23.12.3 Achtung, Verwechslungsgefahr!

Voids sind nicht gleich Voids. Es gibt folgenden Bedeutungsunterschied: Die Voids der Quantenkosmologie bezeichnen Vakuum-Universen, also eine Art quantenmechanischen Grundzustand. Aus diesen gewinnt man formal durch Anwendung eines Erzeugungsoperators andere Universen.

23.13 VSOP

Very Long Baseline Interferometry Space Observatory Programme (VSOP) ist das wohl ehrgeizigste Verfahren der Apertursynthese im Bereich der Radiowellenlängen. Es handelt sich um eine Kollaboration des *Institute of Space and Astronautical Science* (ISAS) und des *National Astronomical Observatory* (NAO) in Japan.

Dabei soll das Konzept des VLBI auf den Weltraum ausgedehnt werden, indem **weltraumgestützte Radioantennen** die Basislinien des Interferometers enorm vergrößern, nämlich auf Ausdehnungen in der Größenordnung der dreifachen Basislängen, die erdgebunden möglich sind!

Bereits am 12. Februar 1997 wurde der erste VSOP-Satellit HALCA gestartet und eine 8-Meter-Radioantenne erfolgreich im Erdorbit ausgesetzt (Apogäum 21 000 km, Perigäum 560 km). VSOP-Beobachtungen wurden in Verbindung mit irdischen Radioteleskopen auch schon durchgeführt. Die Beobachtungsfrequenzen liegen bei 1.6 GHz (18cm), 5 GHz (6cm) und 22 GHz (1.3cm).

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