

Einstein sagt

Wissenswertes zu Kosmologie und Teilchenphysik

Albert Einstein und die bedeutendsten Theorien der Physik

Das Allerkleinste und das Allergrößte unserer Welt

Die zu betrachtenden Fragen beschäftigen sich mit dem Allerkleinsten und dem Allergrößten unserer Welt – den kleinsten Teilchen, aus denen der Kosmos besteht, den Kräften, die alles zusammen- und auseinanderhalten, dem Ursprung allen Seins, soweit er wissenschaftlich erforschbar ist, und den Theorien einer wahrhaften Endzeit.

Es entspricht weder meinen Absichten noch meinen Fähigkeiten, diese Darstellungen in Konkurrenz zu professionellen wissenschaftlichen Abhandlungen zu sehen, wie sie in großer Zahl im Internet zu finden sind.

In diesem Teil meiner Website möchte ich den interessierten Laien auf einem allgemeinverständlichen Niveau mit den interessantesten physikalischen Erkenntnissen und Fragen des 20. Jahrhunderts vertraut machen, soweit mir dies nach eingehendem Studium der aufgelisteten Literatur möglich ist.

Sicherlich werde ich niemals diese theoretische Tiefe erreichen, kann auch keine mathematischen Berechnungen anstellen. Doch ich konnte feststellen, dass populäre Darstellungen z.B. von John Gribbin oder Harald Fritzsch dem 'normalen Leser' ungemein interessante Einsichten vermitteln. Und ich denke nicht, dass ein Wissenschaftler etwas dagegen einzuwenden hat, wenn sein Wissen mit ziemlich einfachen Worten verbreitet wird.

Physik in der Sackgasse? – "Theorie der Zentrumswirkung"

Ich habe eine Menge Bücher und Webseiten gelesen und Diskussionen geführt. Und stehe vor der Frage, ob diese ganzen Theorien (Standardmodell, Urknall, Vakuum etc.) zutreffen. Vor allem frage ich mich dies:

- Wie fliegen Photonen durch "Nichts"?
- Ist die Quantentheorie nur Hokusfokus?
- Was ist Masse?
- Warum findet man immer genau die Teilchen, die man sucht?
- Rasen die Galaxien wirklich so auseinander, wie es gesagt wird?
- Gab es diesen seltsamen Urknall?
- Muss man nicht vielmehr zur Vorstellung eines allumfassenden Mediums zurückkehren, wie es bis Einstein angenommen wurde?
- Und sollte man nicht diese knallharten Aussagen, dieses "SO-IST-ES!", relativieren und z.B. sagen: "Es scheint so, als ob die Galaxien sich voneinander entfernten?"

Ich möchte auf den folgenden Seiten einen Einführungstext zur "[Theorie der Zentrumswirkung](#)" vorstellen, der nicht auf meinem Mist gewachsen sind, sondern von meinem E-Mail-Freund Holger Werner stammt und zu dem nach lange Diskussionen, Überlegungen und Gedankenexperimente geführt haben. Es gibt in vielen Veröffentlichungen Andeutungen, die zeigen, dass er so ganz falsch nicht liegen kann. Holger Werner ist auch der Programmierer des [Nuklidaten-Programms](#), das es hier zum Download gibt.

Inhalt

Einstein sagt – Inhaltsverzeichnis

[Startseite Einstein sagt](#)

[Inhaltsverzeichnis](#)

[Über Albert Einstein](#)

[Download Nukliddaten / Periodensystem](#)

Nukliddaten: Periodensystem und Nuklidkarte mit detaillierten Zerfallsdarstellungen

Die Themen:

[Die Spezielle Relativitätstheorie](#)

Raum und Zeit

[Die Allgemeine Relativitätstheorie](#)

Raum-Zeit und Masse

[Grundzüge der Quantenphysik](#)

Was ist drin im Atom? Was ist Licht?

[Teilchen & Kosmos, der Urknall](#)

Das Standardmodell der Physik. Die ersten drei Minuten

[Neuere Theorien, die erste Sekunde, Kosmische Perspektiven](#)

Dunkle Materie. Wie wird das enden?

[Die "Theorie der Zentrumswirkung"](#)

Ein Erklärungsversuch zu Vakuum – Medium – Teilchen – Kräfte etc.

[Literatursammlung](#)

[Links](#)

"Einstein sagt, alles ist relativ!"

Natürlich ist nicht alles relativ, denn etwas ist immer relativ zu etwas Festem. Doch wenn man ihn nicht so idiotisch alltäglich nimmt, bleibt der Gedanke angesichts des Treibens von allem in allem faszinierend.

Albert Einstein

Fast jeder hat schon einmal den merkwürdigen Witz gehört: "Einstein sagt, alles ist relativ!" Wer kennt nicht $E = mc^2$? Wenn auch kaum ein Laie wiedergeben kann, worin die wesentlichen Erkenntnisse Einsteins bestehen, so kennt doch jeder seinen Namen und das berühmte Foto eines alten, etwas wirren Mannes, der dem Fotografen und der Welt die Zunge herausstreckt. Wer war Albert Einstein, und was erforschte und fand er?

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren und starb am 18. April 1955 in Princeton, New Jersey, USA. Er begann sein Leben als Kaufmannssohn, baute in München und Aarau/Schweiz sein Abitur und studierte dann Mathematik und Physik in Zürich. 1900 schloss er mit dem Diplom 'Fachlehrer für Mathematik' ab. Im ersten Jahrzehnt arbeitete er als Beamter an dem durch ihn berühmt gewordenen Eidgenössischen Patentamt in Bern. In dieser Zeit machte er seine grundlegenden Entdeckungen.

Einstein veröffentlichte 1905 in der Zeitschrift "Annalen der Physik" mehrere Arbeiten, die ihn bis zur Nobelpreisverleihung führten: "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" begründete die Photonentheorie, wofür er 1921 den Nobelpreis erhielt; die Artikel "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" und "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?" führten ihn zur Speziellen Relativitätstheorie.

1909 wurde Einstein Professor für Theoretische Physik an der Uni Zürich, später auch in Prag. 1914 wechselte es nach Berlin, wo er bis zu seiner Emigration 1933 blieb. Von da an bis zu seinem Tod arbeitete Einstein am "Institute for Advanced Studies" in Princeton, New Jersey.

Sein Name bleibt wohl für alle Zeiten verbunden mit der Speziellen Relativitätstheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie, die er bis zu seiner Emigration entwickelte. In den Jahren in Amerika arbeitete er unermüdlich an seinen Theorien weiter.

Er suchte bereits damals nach einer Weltformel, und nahm regen Anteil an der Entwicklung der Quantentheorie, der er aber bis zuletzt ablehnend gegenüberstand. ("Gott würfelt nicht!") Ja – er bekämpfte sie über Jahrzehnte hinweg mit berühmt gewordenen Gedankenexperimenten (vor allem das EPR-Experiment) im Clinch mit Nils Bohr.

In den letzten Jahren ist verstärkt Kritik an seinen Theorien laut geworden. Einerseits scheinen alle Experimente seine Voraussagen zu belegen, andererseits wird auch all das nur ein weiterer Schritt auf dem Weg sein, die Welt zu erklären.

Spezielle Relativitätstheorie

Die Zeit im schnell bewegten Raumschiff vergeht langsamer.

Am Ende des 19. Jahrhunderts bewiesen zahlreiche Experimente, dass die Lichtgeschwindigkeit (c) völlig unabhängig vom Beobachter immer einen konstanten Wert von knapp 300.000 km/s aufweist.

Einstein erkannte als erster, dass diese Konstanz nur durch eine neue Betrachtung von Raum und Zeit erklärbar ist. Im klassischen mechanischen Weltbild Isaak Newtons, das eigentlich bis heute unser Alltagsdenken bestimmt und auch alle 'alltäglichen' Phänomene hinreichend erklärt, galten der absolute Raum und die absolute Zeit als unverrückbar konstante Werte.

Warum sollten Raum und Zeit irgendwie davon abhängen, wie schnell sich jemand darin bewegt?

Wenn zwei Radfahrer 10 km voneinander entfernt sind und sich treffen möchten, macht es sehr wohl einen Unterschied, ob Fahrer 1 und Fahrer 2 z.B. mit je 20 km/h aufeinander zufahren (Treff nach 15 min), oder ob Fahrer 1 auf einer Bank sitzt und wartet (Treff nach 30 min).

Wenn aber von einem fernen Stern Licht zu uns kommt, beträgt seine Geschwindigkeit c , egal ob wir auf dem Balkon stehen und zum Himmel blicken oder in einer Rakete auf den Stern zurasen. Für Einstein ist c eine universelle Naturkonstante.

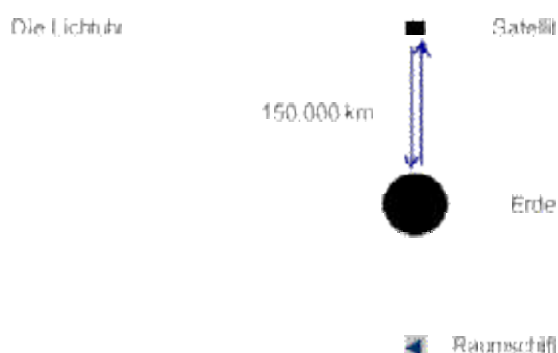
Dann aber kann etwas mit Raum und Zeit nicht stimmen.

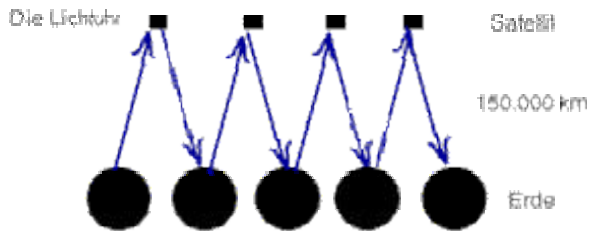
Die spezielle Relativitätstheorie macht drastische Aussagen über das Wesen des Raumes, der Zeit, der Masse und der Energie. Sie erklärt, warum c von nichts außer Licht erreicht oder überschritten werden kann, und das ist erst der Anfang, denn sie erklärt all dies nur in ruhenden oder gleichförmig bewegten Systemen. Alle Effekte sind in Experimenten bewiesen worden. Sie sind aber nur bei Objekten beobachtbar, die sich mit großer Geschwindigkeit bewegen. In beschleunigten Systemen kommen die Gravitationseffekte der Allgemeinen Relativitätstheorie zum Tragen, doch davon im nächsten Kapitel.

Zuerst 'bauen' wir uns eine **Lichtuhr**:

In 150.000 km Entfernung von der Erde 'steht' ein Satellit, der einen Laserstrahl reflektiert. Der Strahl braucht 1 Sekunde (s) von der Erde zum Satellit und zurück. Wir beobachten das Ganze aus unserem Raumschiff, das relativ zur Lichtuhr stillsteht.

Dann lassen wir die Lichtuhr weiterlaufen, werfen die Motoren an (Impulsantrieb), drehen eine Aufwärmrunde um das Sonnensystem und kommen zurück mit einer Geschwindigkeit von 270.000 km/s ($0,9 c$).





fliegt mit 270.000 km/s nach links  Raumschiff

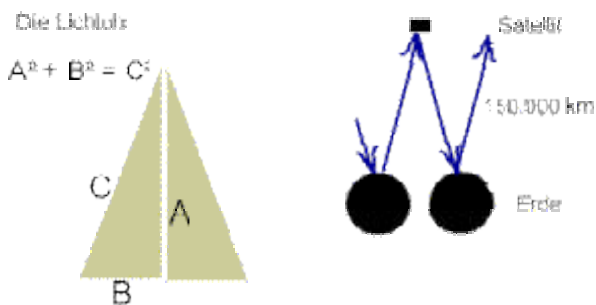
Nicht schlecht. Was sehen wir? Wir sehen die Lichtuhr (Erde und Satellit) mit $v = 0,9 c$ nach rechts rasen.

Die Lichtstrahlen beschreiben eine Zickzacklinie, da sich Erde und Satellit ein Stück nach rechts bewegen, während der Lichtstrahl unterwegs ist.

Wenn wir uns eine Strecke der Lichtuhr ansehen, können wir feststellen, dass der Lichtstrahl im System der Erde den Weg A zurücklegt, im System des Raumschiffs aber C.

Gedehnte Zeit

Geschwindigkeit = Weg / Zeit ($v = s / t$), wenn also c konstant ist und die zurückgelegte Strecke C im Raumschiffsystem länger, dann ist die benötigte Raumschiffzeit kürzer, d.h. **die Zeit im schnell bewegten Raumschiff vergeht langsamer!**



fliegt mit 270.000 km/s nach links  Raumschiff

C Weg des Lichts

B Weg des Raumschiffs

c Lichtgeschwindigkeit

v Raumschiffgeschwindigkeit

t Zeit des Flugs während 1 Strahls

Zeitdehnung, Zeitdilatation

Um welchen Faktor γ (Gammafaktor) wird die Zeit in Relation zur Raumschiffgeschwindigkeit v gedehnt?

$$A^2 + B^2 = C^2 \text{ also } \frac{A^2}{C^2} + \frac{B^2}{C^2} = 1$$

Der Faktor γ ist das Verhältnis von Weg C zu Weg A. Mit einfachen Umrechnungen des Satzes von Pythagoras ergibt sich Formel:

$$\text{also: } \frac{A}{C} = \sqrt{1 - \frac{B^2}{C^2}} \quad \gamma = \frac{C}{A} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{B^2}{C^2}}}$$

Vom Raumschiff gesehen legt das Licht mit Lichtgeschwindigkeit den Weg C zurück, während das Raumschiff in der gleichen Zeit den Weg B zurücklegt. Also verhält sich B zu C wie v zu c .

$$\frac{B}{C} = \frac{v}{c} \quad \text{wenn } v = s \times t \text{ dann } s = v/t, \text{ dann:} \quad C = \frac{c}{t} \quad \text{und} \quad B = \frac{v}{t}$$

$$\gamma = \frac{\Delta t'}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Die Zeit in einem schnell bewegten Objekt vergeht um diesem Faktor langsamer. Da c^2 riesengroß ist, muss v^2 eine vergleichbare Größe aufweisen, damit sich ein Effekt bemerkbar macht. 1000 m/s ist nichts! Bei 30.000 km/s "dauert" eine Sekunde 0,995 Sekunden, aber wer fliegt schon mit 30.000 km/s?

In unserem Raumschiff, dass mit 270.000 km/s oder 0,9 c fliegt, vergehen 0,436 Sekunden, während auf der Erde 1 Sekunde vergeht.

Und eben weil ein messbarer Effekt erst bei derartig hohen Geschwindigkeiten einsetzt, gilt in unserem Alltag, wenn wir nicht gerade auf der Enterprise anheuern können, näherungsweise nach wie vor die klassische Physik Newtons.

Die Zeitdehnung ist aber nicht der einzige Effekt, den die Spezielle Relativitätstheorie voraussagt. Auch der Raum bleibt nicht, wie er ist ...

Dem Photon schlägt keine Stunde.

Der Relativitätstheorie zufolge tritt im selben Maß (γ -Faktor) auch eine **Raumverkürzung** auf, und zwar nur in Bewegungsrichtung. Wenn unser Raumschiff 300 m lang und 50 m breit ist, so wäre es bei 0,9 c immer noch 50 Meter breit, aber nur noch etwa 130 Meter lang, von der Besatzung nicht zu sprechen. Auch diese skurrile Behauptung ist mittlerweile im zahllosen Experimenten bewiesen worden. Der erste Beweis gelang bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht. Bei Kollisionen von hochenergetischen Teilchen (Protonen) mit Luftmolekülen entstehen in etwa 15 km Höhe u.a. kurzlebige Myonen, die aufgrund ihrer Lebens-

dauer ohne die Zeitdilatation nur etwa 450 Meter weit kämen. Und doch erreichen sie ein Erde. Experimente in Teilchenbeschleunigern zeigten einen γ -Faktor von etwa 30. Ihre Geschwindigkeit liegt nahe bei c .

Invarianz – Raum-Zeit – Weltlinien

Der Raum der klassischen Physik ist homogen und isotrop, d.h. jeder Punkt und jede Richtung des Raumes sind gleichwertig. Man kann den Abstand zwischen zwei Punkten im Raum durch die Formel unten errechnen, indem man das Koordinatensystem an einen beliebigen Punkt des Raumes platziert.

Längen sind invariant bezüglich des gewählten Koordinatensystems.

Abstand zwischen zwei Punkten a und b in der klassischen Newtonschen Physik:

$$l^2 = (x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2$$

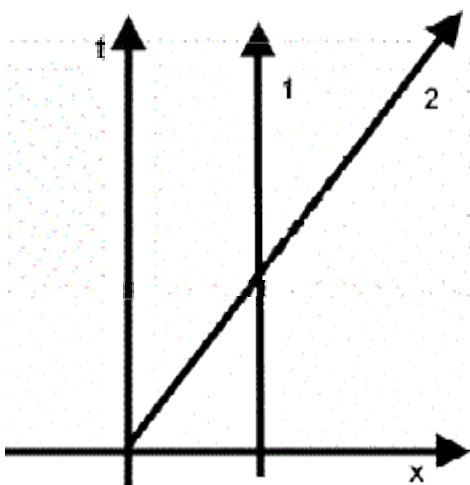
Jeder Punkt p ist durch seine Koordinaten (x_p, y_p, z_p) eindeutig festgelegt.

Die Einsteinsche Raum-Zeit hat drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension, sie ist **3+1-dimensional**; Raum und Zeit sind keine unabänderlichen, absoluten Werte, sondern untrennbar miteinander verknüpft, abhängig von der relativen Geschwindigkeit des betrachteten Systems. Es gibt keine Längeninvarianz. Wenn man aber die Raumkoordinaten mit den Zeitkoordinaten verbindet, erhält man die **Raum-Zeit-Invarianz**.

Raum-Zeit-Invarianz für Raum-Zeit-Strecke l:

$$l^2 = (ct)^2 - (x^2 + y^2 + z^2)$$

Wichtig: Auf Grund dessen, dass die zeitlichen und die räumlichen Koordinaten voneinander subtrahiert werden, kann man nicht einfach von einem vierdimensionalen Raum sprechen, in dem die Zeit eine beliebige Dimension darstellt.



Zur Darstellung von Ereignissen in der Raum-Zeit verwendet man Weltlinien-Diagramme: die x-Achse gibt die räumliche Entfernung an, die t-Achse die Zeit. Die Koordinaten sind so gewählt, dass y und $z = 0$ sind, denn eine vierdimensionale Zeichnung ist recht schwierig.

Pfeil 1: die Weltlinie eines Objekts, das an einem Punkt ruht.

Pfeil 2: die Weltlinie eines Objektes, das sich mit konstanter Geschwindigkeit von $x = 0$, $t = 0$ durch die Raum-Zeit bewegt.

Bewegt sich etwas mit 99,9% der Lichtgeschwindigkeit, so würde für dieses Etwas, während auf der Erde 1 Sekunde vergeht, nur 0,044 s vergehen. Und wer mit Lichtgeschwindigkeit fliegt (z.B. das Licht – ha ha!), für den steht die Zeit still.

Dem Photon ("Lichtteilchen") schlägt keine Stunde!

Ein Beispiel:

Auf der Erde explodiert ein Vulkan. 30 (irdische) Jahre später explodiert ein anderer Vulkan auf einem Planeten der 26 Lichtjahre entfernten Wega. Wir beobachten beide Ereignisse, und ein schnell fliegender Raumfahrer beobachtet beide Ereignisse, indem er in den 30 irdischen Jahren die 26 Lichtjahre Entfernung zurücklegt. Wie viel Zeit ist für ihn vergangen?

Raum-Zeit-Differenz l:

$$l^2 = 30^2 - 26^2$$

$$l = \sqrt{15^2} = 15$$

Von der Erde gesehen ist $t = 30$ Jahre und der räumliche Abstand 26 Lichtjahre; es ergibt sich die Zahl 15. Für den Raumfahrer vergehen 15 Jahre. Die räumliche Distanz ist 0, da er bei beiden Ereignissen anwesend ist, die Zeitdifferenz $t = 15$.

Je nachdem, von welchem System man dieses Geschehen verfolgt, d.h. wie schnell man sich auch in eine Richtung bewegt – die Zeitdifferenz ändert sich und die Entfernung auch, aber die Differenz der beiden ist konstant.

Zusammenfassend ergibt sich, dass der einzige Fixpunkt die Naturkonstante c ist. In der 3+1-dimensionalen Raum-Zeit sind sowohl der Zeitablauf als auch die Länge eines Objekts in Bewegungsrichtung von der relativen Geschwindigkeit des Systems abhängig.

Die weitreichendste Aussage jedoch macht Angaben über die Beziehung von Masse und Energie eines Objekts.

Um ein Land wie die Schweiz ein Jahr lang mit Energie zu versorgen, würde es ausreichen, wenn man einen Stein von etwas mehr als einem kg völlig in Energie umwandeln könnte.

Einstein leitete aus seinen Überlegungen ab, dass die Energie eines Körpers nur zu einem geringen Teil aus Bewegungsenergie besteht, vor allem aber aus 'innerer', inhärenter Energie, hervorgerufen durch die damals noch großteils unbekanntenen Bedingungen im subatomaren Bereich. Diese Energie lässt sich aus der Masse gewinnen (Kernkraftwerk), ebenso kann aus reiner Energie, z.B. aus Photonen, Materie entstehen.

Ein Impuls, etwa ein Zusammenprall zweier Objekte, ist nicht vom Beobachter abhängig. Eine eventuelle Deformation ist objektiv feststellbar. Die Formel für den Impuls ist $m \times v$, und da v von der Geschwindigkeit des Beobachters abhängt, muss auch die Masse relativ sein! Wenn v durch den γ -Faktor verringert wird, muss die Masse um denselben Faktor zunehmen, damit der Impuls gleich bleibt.

Abkürzungen:

E – Energie

m – Ruhemasse (die herkömmliche Masse eines Objekts)

M – bewegte Masse

γ – relativistischer

Gammafaktor

v – Geschwindigkeit

c – Lichtgeschwindigkeit

Also ist die bewegte Masse $M = m \times \gamma$. Hier ist nach Einstein der Grund für die Unerreichbarkeit der Lichtgeschwindigkeit, denn wenn sich v an c nähert, geht M gegen unendlich, man bräuchte eine unendlich große Energie, das ist viel.

$$M = m \times \gamma = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Wie hängt die Masse mit der Energie zusammen?

In Newtons Mechanik ist die kinetische Energie proportional zur Ruhemasse: $E = 1/2 m \times v^2$, wenn v = 0, dann E = 0.

Auch in der Speziellen Relativitätstheorie ist die Energie proportional zur Masse, allerdings multipliziert mit der Konstanten c^2 .

$E = M c^2$ – das kennt jeder!

$$E = M c^2 = \gamma \times m \times c^2 = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Das bedeutet:

für v = 0: $E = m c^2$

für v fast = c: E geht gegen unendlich

für sehr kleine v: $E = m c^2 + 1/2 m v^2$

Das zeigt, dass die Energie eines Körpers zu einem minimalen Teil aus Bewegungsenergie und sonst aus der Energie seiner inneren Struktur (Atomkerne) besteht.

All diese Aussagen sind mittlerweile durch Experimente in Teilchenbeschleunigern völlig bestätigt worden.

Im nächsten Kapitel folgt eine Betrachtung der Aussagen der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#).

Allgemeine Relativitätstheorie

Vorab einige Grundlagen zur Gravitation

Newton stellte sich die Gravitation als Fernwirkung vor, indem z.B. die Sonne auf große Distanz auf die Erde einwirkt. Einstein widersprach dieser Auffassung und beschrieb die "Anziehung" so, dass die Sonne durch ihre Masse den Raum verändert, ein Kraftfeld erzeugt, in dem sich die Erde bewegt. Das Kraftfeld ist eine Eigenschaft der Raumes in der Umgebung der Masse. Die Masse verkrümmt den Raum, und auf Grund dieser Raumkrümmung bewegt sich die Erde nicht geradlinig weiter, sondern beschreibt ihre Bahn entlang der durch die Masse der Sonne hervorgerufenen Raumkrümmung.

Der Raum, das Vakuum

In der klassischen Physik ist das Vakuum ein leerer Raum, der sich gradlinig ins Unendliche erstreckt. Diese Auffassung teilt die moderne Physik nicht. Die heutige Ansicht ist ein Vakuum, das virtuell alle Elementarteilchen mit negativer Energie enthält. Die Naturgesetze sind nicht an die Materie gebunden, sondern bereits im Vakuum vorgegeben. Auch die Masse erscheint als ein Produkt des Vakuums (siehe [Quantenphysik](#)).

Das Äquivalenzprinzip

Einstein erkannte, dass Gravitation und Beschleunigung äquivalent sind. In einem der Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) entsprechend beschleunigten Raumschiff verlaufen alle Experimente gleich wie auf der Erde. Träge Masse (Beschleunigung) = schwere Masse (Gravitation) Die Gravitation verkrümmt die Raum-Zeit, und die Verkrümmung der Raum-Zeit bewirkt die Gravitation!

Auswirkungen der Raumkrümmung

Lichtkrümmung durch Gravitation. Licht folgt immer dem kürzesten Weg, doch in einer gekrümmten Raumzeit ist der kürzeste Weg keine Gerade. Einstein sagte voraus, dass das Licht von Sternen in scheinbarer Sonnennähe von der Masse der Sonne abgelenkt würde. Durch astronomische Beobachtungen während verschiedener Sonnenfinsternisse wurde diese Aussage seit 1919 vielfach bestätigt – ein erster Beweis für die Richtigkeit der Theorie.

Die Allgemeine Relativitätstheorie trägt ihren Namen deshalb, weil sie über die Spezielle Relativitätstheorie hinausgeht und die Gegebenheiten nicht nur in ruhenden oder mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegten Systemen erklärt, sondern eben allgemein in allen, auch beschleunigten Systemen. Im Vordergrund der Betrachtungen steht die Gravitation.

Newtons Gravitationskonstante G ist diejenige Kraft, die zwischen zwei je ein Kg schweren Körpern wirkt, die einen Meter voneinander entfernt sind.

$$G = \frac{6,67259 \text{ m}^3}{10^{11} \text{ kg} \times \text{s}^2}$$

Die Beschleunigung a zwischen diesen beiden Körpern beträgt:

$$a = \frac{6,67259m}{10^{11} s^2}$$

Raumeigenschaften.

Bestimmte geometrische Eigenschaften gelten nur im ungekrümmten, "euklidischen" Raum: Parallelen scheiden sich nicht; die Winkelsumme im Dreieck beträgt 180° ; der Satz des Pythagoras gilt; der Kreisumfang beträgt $2 \pi r$. Zeichnen wir z.B. ein gleichseitiges Dreieck von 1 m Seitenlänge auf den Asphalt, so beträgt die Winkelsumme $60^\circ + 60^\circ + 60^\circ = 180^\circ$. Nehmen wir aber den Globus und zeichnen ein Dreieck ein, das sich von zwei Punkten am Äquator bei 0° Ost und 90° Ost zum Nordpol erstreckt, so beträgt die Winkelsumme $90^\circ + 90^\circ + 90^\circ = 270^\circ$!

Dies ist eine Eigenschaft des positiv gekrümmten zweidimensionalen Raumes 'Erdoberfläche'.

Eine Raumkrümmung kann also gemessen werden, indem man die Winkel eines genügend großen Dreiecks berechnet. Man benötigt keine weitere Dimension dazu!

Ein positiv gekrümmter Raum ist eine Kugeloberfläche und ihre dreidimensionale Entsprechung; die Winkelsumme im Dreieck ist größer als 180° , der Raum ist endlich und in sich geschlossen. Ein negativ gekrümmter Raum entspräche einer Sattelfläche; die Winkelsumme ist kleiner 180° , der Raum ist unendlich und offen.

Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Begriffsklärung:

Metrischer Tensor; Krümmungstensor

Ein Vektor ist eine Größe, die durch einen Zahlenwert und eine Richtung bestimmt ist; ein Pfeil.

Ein Tensor ist die Verallgemeinerung des Vektorbegriffs.

Ein Vektor ist ein Tensor erster Stufe.

Einstein benutzt für seine Berechnungen den metrischen Tensor; er bestimmt die Abstandsverhältnisse, also die metrische Struktur des Raumes.

Der Krümmungstensor ist ein kompliziertes mathematisches Gebilde, das aus dem metrischen Tensor abgeleitet wird und die Krümmungseigenschaften jedes Punktes im Raum beschreibt.

Eine Geodäte ist die kürzeste Verbindung zweier Punkte im Raum, in der Ebene eine Gerade, in der Raum-Zeit eine gerade Weltlinie parallel zur t-Achse, die Weltlinie eines ruhenden Körpers. (siehe spez. Relativitätstheorie II) (Warum fliegt ein Flugzeug auf dem Weg von Frankfurt nach New York so weit nördlich? Weil es der Geodäte folgt und den kürzesten Weg nimmt, und das ist nicht einfach immer nach Westen.)

Und hier ist nun die Feldgleichung:

$$R_{ik} = k \times T_{ik}$$

Wie simpel diese kleine Formel aussieht, und doch kenne ich keinen, der mit ihr etwas berechnen könnte. Aber aus ihr leitet man z.B. die Theorien der Schwarzen Löcher ab.

Die Feldgleichungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen der Geometrie (Raum-Zeit) und der Materie an jedem Punkt im Raum. Die Materie krümmt die Raum-Zeit, die Raum-Zeit legt durch die Trägheit die Bewegung der Materie fest.

R ist der Krümmungstensor, abgeleitet aus dem metrischen Tensor. Er beschreibt die Raum-Zeit-Krümmung.

T ist der Materietensor. Er beschreibt die lokalen Energie-Impuls-Eigenschaften der Materie, d.h. die Materie- oder Energiedichte z.B. in einem cm³ Materie.

k ist die Einstein'sche Gravitationskonstante; sie ist

$$k = \frac{8\pi}{c^4} \times G$$

(G = Newtons Gravitationskonstante)

i und k sind Indices, die bedeuten, dass R und T aus mehreren Komponenten besteht. Es gibt 10 i-k-Kombinationen, so dass man 10 Gleichungen erhält.

Die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie sehen auf den ersten Blick ganz simpel aus, doch wir werden sie nicht ausrechnen, denn das könnte ich gar nicht. Aber wir können uns die qualitative Bedeutung dieser Formel ansehen: Allgemein sagt die Formel aus, dass die Krümmung der Raum-Zeit proportional zur Energiedichte an der betreffenden Raum-Zeit-Position ist.

Newtons Gravitationstheorie ist – als "Newtonscher Grenzfall" – in den Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie enthalten, ebenso die Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie.

Verbogene Zeit

Die Gravitation verändert die Struktur der Raum-Zeit und den Fluss der Zeit. Je stärker das Gravitationsfeld, umso langsamer vergeht die Zeit. Mit genügend feinen Instrumenten lässt sich dies in Experimenten mit Lichtstrahlen in einem 300 m hohen Turm feststellen. In 300 m Höhe ist die Gravitation etwas schwächer und die Zeit vergeht um 3 Billionstel Prozent schneller als am Boden!

An dieser Stelle verweise ich ausdrücklich auf die beiden hervorragenden Bücher von H. Fritzsch, der die Sachverhalte doch wesentlich besser erklären kann. (siehe [Literatur](#))

Gravitation im Kosmos

Im Universum ruft die Gravitation dramatische Veränderungen beim Tod von Sternen hervor. Natürlich entstehen die Sterne auch durch die Wirkung der Gravitation, indem aus kosmischem Gas und Staub immer größere Massenzusammenballungen werden.

So lange ein Stern 'lebt', besteht ein Gleichgewicht zwischen der Gravitation, die den Stern zusammenzieht, und dem Expansionsdruck der Kernfusionsprozesse im Inneren, d.h. der Stern ist über Milliarden Jahre stabil. Wenn der Kernbrennstoff Wasserstoff zur Neige geht, kommt die Kernfusion zum Erliegen und die Gravitation komprimiert den Stern, wenn er etwa die Masse der

Sonne hat, zu einem sog. glühenden 'Weißen Zwerg', später zu einer dichten Aschekugel von der Größe der Erde.

Der Mathematiker Schwarzschild berechnete bald nach Einstein die Feldgleichungen für einen kugelsymmetrischen Stern und begründete damit alle bekannten Überlegungen zu Neutronensternen und Schwarzen Löchern. All die kuriosen, eigentlich unvorstellbaren Theorien gehen auf seine Berechnungen zurück.

Hat ein sterbender Stern eine Masse von über 1,5 Sonnenmassen, werden die Kompressionskräfte so stark, dass die Atome zermalmt werden; Protonen und Elektronen werden unter Abgabe flüchtiger Neutrinos zu Neutronen. Es entsteht ein Neutronenstern mit einem Durchmesser von etwa 20 km!

Zu dieser Gattung gehören die Pulsare. Ein Stern von etwa 10 Sonnenmassen erfährt einen Gravitationskollaps – und wird zu einem Schwarzen Loch. Schwarzschild errechnete, dass die Raum-Zeit-Struktur eines extrem massereichen Objekts – eines Schwarzen Loches – eine gegen unendlich gehende trichterförmige Verkrümmung erfährt.

Würden wir uns – am Ende unseres Lebens! – einem Schwarzen Loch nähern, gäbe es kein Entrinnen, da die Masse des Schwarzen Loches ALLES, selbst Licht unwiederbringlich verschluckt. Aus den Berechnungen geht hervor, dass wir durch die trichterförmige Verkrümmung nie ins Zentrum des Schwarzen Loches kämen; nähert man sich einem bestimmten Radius, geht die zurückzulegende Strecke gegen unendlich. Dieser Radius ist der Schwarzschild-Radius oder Horizont des Objekts. Je näher man dem Horizont kommt, umso langsamer vergeht die Zeit, und am Horizont steht die Zeit still!

Wie auch immer die Berechnungen der Feldgleichungen aussehen mögen – auf jeden Fall bleibt festzuhalten, dass die Gravitation bei wachsender Masse immer stärker wird und die Zeit langsamer vergeht. Die Gravitation ist die dominierende Kraft im Universum, auch wenn sie relativ schwach ist – es braucht die gesamte Masse der Erde, damit ein Apfel vom Baum fällt!

Spätere Berechnungen mit anderen Bezugssystemen ergaben, dass es sehr wohl möglich ist, ins Schwarze Loch einzudringen.

Der Tod eines Riesensterns könnte so ablaufen:

Nach der Umwandlung der Materie in Neutronen geht der Zusammenbruch weiter. Die Neutronen verschmelzen zu einem Quark-Gas, dann folgt der Gravitationskollaps. Nun geht alles schnell. Bereits nach Stunden nähert sich der Radius dem Horizont an. Die Zeitverbiegung nimmt rasant zu; die Frequenz des abgestrahlten Lichtes verringert sich zu rot, infrarot, Radiostrahlung.

Dann ist Finsternis.

Alles, was sich dem Objekt nähert, wird unweigerlich hineingezogen und zerquetscht, keinerlei Materie hält stand. Würde eine Sonde hineingeschossen, so sähe es von außen aus, als ob sie unendlich langsam zum Zentrum fliegt und es nie erreicht (Horizont). Die Sonde selbst jedoch würde in ihrem eigenen Bezugssystem keinen Horizont spüren, sondern im Sekundenbruchteil hineinstürzen, ins Zentrum, in die Singularität, in der die gesamte Masse in einen Punkt unendlich hoher Dichte und Raum-Zeit-Verkrümmung konzentriert ist. Kein kleinstes Teilchen kann bestehen, kein Photon je entweichen.

Die Singularität ist die Abwesenheit jeglicher Eigenschaften.

In die Allgemeine Relativitätstheorie sind die Auswirkungen der Quantenphysik nicht integriert. Die Materie besitzt Quanteneigenschaften, und da die Gravitation aus der Raum-Zeit-Krümmung und diese aus der Materie resultiert, müsste man Raum und Zeit selbst Quanteneigenschaften zubilligen.

Max Planck verknüpfte die Gravitationskonstante G und die Lichtgeschwindigkeit zur Planck'schen Konstanten h . Er gab als kleinstes Längenintervall die Planck'sche Elementarlänge $= 1,616 \times 10^{-35}$ m an und als kürzestes Zeitintervall die Planck'sche Elementarzeit $= 5,391 \times 10^{-44}$ s.

Dies sind die einzigen physikalischen Größen auf der Basis von Naturkonstanten!

Möglicherweise endet der Sternenkollaps im Bereich der Planck'schen Elementarlänge. Auf diese Weise ließen sich die Unendlichkeiten vermeiden, nicht aber die unerklärlichen gigantischen Materiedichten.

Eine Vereinigung der Gravitation mit der Quantenphysik könnte ergeben, dass Materie und Gravitation nicht mehr klar zu trennen sind. Raum, Zeit und Materie würden sich als verschiedene Aspekte eines Grundphänomens erklären.

Schwarze Löcher, dunkle Materie

Weitere Überlegungen zu Schwarzen Löchern (SL)

Die beste Möglichkeit zur Entdeckung von SL bieten Doppelsternsysteme, bei denen sich ein SL und ein anderer Stern umkreisen. Das SL entzieht dem Stern große Mengen Gas, das komprimiert und aufgeheizt wird. Dabei entsteht messbare Röntgenstrahlung. Möglicherweise existieren Milliarden von SL, deren Massen zu einem kleinen Teil zu der ominösen Dunklen Materie im Kosmos beitragen könnten. Quasare – "quasi-stellare Licht- und Strahlungsquellen" – scheinen das Resultat des Kollapses riesiger Mengen Materie in ein SL. Sie scheinen so hell wie Sterne, obwohl sie in Entfernungen von ca. 10 Milliarden Lichtjahren die Zentren von Galaxien bilden. Für die Erzeugung der beobachteten Energien sind etwa eine Milliarde Sonnenmassen notwendig. Bei Quasaren handelt es sich wohl um den Gravitationskollaps der Zentralregion von Galaxien oder die Vereinigung mehrerer SL.

Einfluss der Quantenphysik auf SL

Laut Stephen Hawking ist es möglich, dass am Horizont des SL Photonen als virtuelle Teilchen entstehen und dem SL Energie in Form von Wärmestrahlung entziehen, indem eines der beiden Photonen vom Horizont verschlungen wird, das andere aber nicht. Hawking errechnet die Lebensdauer des SL auf etwa 10^{70} Jahre, lang, aber endlich. Die Strahlung verringert die Masse des SL, bis der Schwarzschild-Radius nur noch dem des Atomkern entspricht. Dann erfolgt eine gigantische Explosion.

Möglicherweise existieren SL, die noch von Urknall herrühren und jederzeit explodieren können, doch trotz intensiver Suche nach Gammastrahlen solcher Ereignisse konnte bisher nichts gefunden werden.

Gravitationswellen

Plötzliche Veränderungen der Raum-Zeit-Struktur sollten Gravitationswellen hervorrufen, mit Lichtgeschwindigkeit davoneilende Schwebungen der Raum-Zeit-Struktur. Die Verschmelzung zweier Neutronensterne zu einem SL lässt die riesige Energie von 10^{45} W/s als Gravitationswelle

frei. Auf der Erde sucht man mit Hilfe von Gravitationswellen-Interferometern nach solchen Wellen, konnte aber bisher keine feststellen.

Kosmische Aussichten

Hubble entdeckte, dass sich die meisten Galaxien voneinander fortbewegen (Rotverschiebung), d.h. nicht die Galaxien bewegen sich durch den Raum fort, sondern der Raum selbst dehnt sich aus. Friedmann errechnete aus den Feldgleichungen, dass das Universum nicht statisch sein kann; entweder nehmen Materiedichte und Raumkrümmung ab oder zu. Eine der aktuellsten Fragen der Astronomie ist, ob sich das Universum für alle Zeiten weiter ausdehnt oder ob es sich nach einem Wendepunkt wieder zusammenzieht.

Die Existenz von Schwarzen Löchern gilt als gesichert. Nicht zuletzt mit dem Hubble-Teleskop im Orbit gelangen sensationelle Aufnahmen ferner Galaxien.

Entscheidend ist dafür die Expansionsgeschwindigkeit und die Materiedichte im Kosmos. Möglich ist

Fall 1: eine permanente Expansion, ein "offenes Universum" mit negativer Raumkrümmung und zu geringer Materiedichte; keine Umkehr und Kontraktion;

Fall 2: ein "geschlossenes Universum" mit positiver Raumkrümmung und ausreichender Materiedichte; oder

Fall 3: der Grenzfall, indem die Expansion nach unendlich langer Zeit zum Stillstand kommt – ein euklidischer Raum ohne Krümmung.

Besondere Anmut verspricht keine der Möglichkeiten, doch davon später mehr im Kapitel "[kosmische Perspektiven](#)"

Die "kritische Massendichte" für den Grenzfall beträgt ca. 3 Wasserstoffatome pro m^3 .

Der Omega-Faktor Ω ist die reale durchschnittliche Massendichte geteilt durch kritische Massendichte.

$\Omega = 1$ bedeutet Grenzfall 3 $\Omega < 1$ bedeutet Fall 1 $\Omega > 1$ bedeutet Fall 2

Auf Basis der sichtbaren, leuchtenden Materie ist Ω nur einige % von 1; unter Einschluss aller denkbarer SL kaum mehr als 10 %.

Hier setzt die Suche nach der Dunklen Materie ein. Analysen der Struktur von Galaxien ergaben, dass etwa zehnmal soviel Dunkle Materie wie leuchtende Materie vorhanden sein muss. Sollten z.B. Neutrinos nicht wie angenommen masselos sein, könnten sie durch ihre Masse Ω nahe an 1 heranbringen. Das eigentlich Wunderbare scheint jedoch die Tatsache, dass Ω überhaupt in der Größenordnung von 1 ist, denn theoretisch könnte es auch zigtausendmal so groß sein.

Der Urknall

Nach den Friedmann-Berechnungen stand am Anfang von Raum, Zeit und Materie der Urknall, die Expansion aus einer Singularität mit unendlich hoher Dichte und Temperatur. Nach allgemeiner Übereinstimmung liegt der Urknall etwas 15 Milliarden Jahre zurück.

Bewiesen wurde die Urknall-Theorie und die hohe Ausgangstemperatur durch die Entdeckung der von der Theorie geforderten kosmischen Hintergrundstrahlung, das "Echo des Urknalls", die mit einer Temperatur von $2,7^\circ K$ den gesamten Weltraum nahezu gleichförmig erfüllt.

Quantenphysik

Grundzüge der Quantenphysik. Quantenphysik und Wirklichkeit.

Die Quantenphysik beschreibt das Verhalten sehr kleiner Objekte. John Gribbin berichtet in seinem Buch nach einer historischen Einführung die Auswirkungen der Quantentheorie, ausgehend von berühmten Gedankenexperiment um Erwin Schrödingers Katze. In einem verschlossenen Behälter ist eine lebende Katze mit einem Gefäß voller tödlichem Gift. Es gibt eine Vorrichtung, die das Gefäß zerbricht und die Katze tötet, falls ein bestimmter radioaktiver Prozess stattfindet. In unserer Alltagswelt ist die Wahrscheinlichkeit einfach 50%, dass die Katze überlebt.

In der Quantenwelt ist keine der beiden Möglichkeiten real, solange man nicht in den Behälter schaut. Es ist nicht so, dass man es einfach nicht weiß. Vielmehr wird die Katze weder getötet noch nicht getötet. Sie befindet sich in einem unbestimmten Zustand. Die Quantentheorie lehrt, dass nichts real ist, wenn man es nicht beobachtet.

Der Weg zur Quantentheorie.

Licht

Isaak Newton hielt das Licht für einen "Strom von Korpuskeln", also Teilchen. Huygens beschrieb das Licht als "Wellen im leuchtenden Äther", also als Wellen. Beide Theorien erklärten ganz gut die Effekte des Lichts wie Beugung und Brechung. Im 19. Jahrhundert setzte sich die Wellentheorie durch. Young zeigte, dass sich beim Licht wie bei Wasserwellen Interferenzen bilden, Muster aus hellen und dunklen Streifen. Maxwell beschrieb die Lichtwelle als elektromagnetische Strahlung mit wechselnden Feldern. Damit galt die Wellentheorie als bewiesen.

Literatur:

John Gribbin. Auf der Suche nach Schrödingers Katze

Lederman, Schramm. Vom Quark zum Kosmos

Wissenstand vor der Quantenphysik.

Atom

Materie besteht aus unteilbaren Atomen. Atome eines Elements sind identisch. Atome können nicht erzeugt oder zerstört, aber durch chemische Reaktionen zu Molekülen (chem. Verbindungen) neu angeordnet werden.

Gas stellte man sich als kleine, harte Kugeln in Bewegung vor. Ihr Verhalten ließe sich durch die Gesetze der Mechanik statistisch beschreiben.

Elektron

Thomson zeigte, dass der Kathodenstrahl in einer Vakuumröhre (dein VGA-Bildschirm) aus negativ geladenen Teilchen, den Elektronen besteht.

Ionen

Wenn Atome elektrisch neutral sind, herausgeschlagene Elektronen aber negativ geladen, so muss der Rest des Atoms positiv geladen sein. Die positive Strahlung besteht aus sehr viel schwereren Teilchen, den ionisierten Atomen.

Röntgenstrahlen

Röntgen entdeckte eine Sekundärstrahlung des Kathodenstrahls auf einem fluoreszierenden Schirm. Der Schirm emittiert die Röntgenstrahlung (hochenergetische elektromagnetische Wellen) nur, wenn er durch Strahlung angeregt wurde.

Radioaktivität

Uran gibt Strahlung ab, ohne zuvor angeregt worden zu sein. Curie und Rutherford zeigten, dass die Radioaktivität zur Umwandlung eines Elements in ein anderes führt. Man unterschied:

α -Teilchen, vierfache Masse des Wasserstoffatoms, doppelt positiv geladen, Heliumkern.

β -Strahlen, Elektronen

γ -Strahlen, hochenergetische elektromagnetische Wellen

Das Innere des Atoms

Rutherford beschoss dünne Metallfolien mit α -Teilchen. Er fand, dass die meisten ungehindert hindurch gingen, einige aber abgelenkt oder reflektiert wurden. Er erklärte das mit der positiven Ladung des Atomkerns und folgerte, dass die positive Ladung des Atoms in einem winzigen Kern konzentriert sein muss. Rutherfords Atommodell ist ein Kern mit ganzzahliger positiver Ladung, umgeben von einer Elektronenwolke mit derselben negativen Ladung.

Ein gibt nur ein kleines Problem: Rutherfords Atommodell ist im Gegensatz zum Atom selbst instabil. Bewegte elektrische Ladung, die beschleunigt wird, gibt Energie als Strahlung ab. Würde sich das Elektron wie in einem Planetensystem um den Kern bewegen, müsste es wegen der Kreisbeschleunigung Energie abgeben und auf einer Spiralbahn in den Kern stürzen.

Doch wie können der Kern und die Elektronen feste Orte im Raum einnehmen, ohne durch die elektrische Anziehung zusammenzustürzen? Die Lösung liegt in der Wechselbeziehung zwischen Materie und Strahlung.

Der Schwarze Körper

Ein heißes Objekt strahlt elektromagnetische (el-m) Energie ab, je heißer, umso kürzer die Wellenlänge, umso größer die Energie. Die Schwingungen eines geladenen Bestandteils der Atome erzeugen el-m Wellen. Ein "schwarzer" Körper – er kann auch rot- oder weißglühend sein – absorbiert alle Strahlung.

Im Labor ist ein schwarzer Körper ein Hohlraum (Kugel) mit einem kleinen Loch, durch das Strahlung eindringt. Die Strahlung wird so lange im Inneren reflektiert, bis sie völlig absorbiert ist. Durch diese Erwärmung wird erst Wärmestrahlung, später hochenergetische Strahlung abgegeben. An einem weiteren kleinen Loch wird das Spektrum dieser Strahlung gemessen. Das Spektrum hängt allein von der Temperatur ab. Die meiste Energie wird immer in einem mittleren Frequenzbereich abgegeben. Bei Erwärmung verschiebt sich dieses Maximum zu höheren Fre-

quenzen, bei sehr hohen Frequenzen bricht es ab. Die alte Theorie jedoch sagt bei höchsten Frequenzen unendlich hohe Energie voraus.

Max Planck entwickelte eine Formel, die den Effekt bei hohen Energien mit der alten Theorie verband. Boltzmanns Berechnung ergab, dass Energie mathematisch zerstückelt wird und die Stücke als reale Größen betrachtet werden müssen, die man der Wahrscheinlichkeitsrechnung unterwerfen kann. Das bedeutet, dass die elektrischen Oszillatoren im Atom Energie nur in Portionen bestimmter Größe – in **QUANTEN** – aussenden oder aufnehmen können.

Max Planck stellte diese Formel auf:

$$E = h \times \nu$$

ν ist die Frequenz

h ist die Planck'sche Konstante = $6,55 \times 10^{-27}$ erg x s, eine sogenannte Wirkung.

Planck zeigte, dass es Beschränkungen der Gültigkeit der klassischen Physik gibt. Er sagte nicht, dass die Strahlung selbst quantisiert sei.

Lenard fand, dass nicht nur Elektronen, sondern auch Licht einen Kathodenstrahl auslösen kann, d.h. Licht führt Atomen Energie zu und löst Elektronen heraus. Mehr Licht führt zu mehr Elektronen immer gleicher Energie, eine höhere Frequenz führt zu schnelleren Elektronen (Photoeffekt).

Einstein wandte Plancks Formel $E = h \times \nu$ auf die Strahlung an. Er postulierte:

"Licht tritt in Quanten auf. Licht einer Frequenz ν tritt in Quanten auf, die alle die gleiche Energie $h \times \nu$ haben. Intensiveres Licht bedeutet mehr Quanten (= Photonen) gleicher Energie. Eine andere Frequenz (Farbe) des Lichts verändert die Energie der Photonen.

Dafür bekam Einstein 1921 den Nobelpreis.

Nun stand man vor einer neuen Aufgabe: Die Wellentheorie und die Teilchentheorie des Lichts mussten verschmolzen werden.

Entropie

Warum springt ein Stein nicht hoch, wenn man ihn erwärmt? Wegen des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. "Natürliche Prozesse laufen stets in Richtung zunehmender Unordnung (Entropie) ab."

Eigentlich sind alle physikalischen Prozesse umkehrbar, doch in der Natur geschieht dies nicht. Boltzmann erklärte, dass bei statistischer Betrachtung eine verschwindend geringe Wahrscheinlichkeit besteht, dass der Stein doch springt oder die Luft eines Raums sich in die Ecken zurückzieht. (Statistische Interpretation der Thermodynamik)

Die Entropie ist nicht kosmisch absolut, sondern statistisch; in einem riesigen Raum in sehr langer Zeit kann auch das Unwahrscheinliche geschehen.

Erklärung der Schwarzkörperstrahlung mit Quanten

Das Maximum im jeweils mittleren Frequenzbereich entsteht durch eine große Zahl von Oszillatoren mit genug Energie für Quanten mittlerer Größe, während die Oszillatoren bei niedrigen Fre-

quenzen Strahlung mit in der Summe sehr niedriger Energie aussenden und die hohen Frequenzen sehr hohe Energien benötigen, die nur wenige Oszillatoren haben.

Das Bohr'sche Atommodell

Nils Bohr verband Rutherfords instabiles Modell mit der Quantentheorie. Warum stürzt das Elektron nicht unter Abgabe von Strahlung in der Kern? Weil die Energie nicht in stetiger Strahlung, sondern in Portionen fester Größe – in Quanten – abgegeben und aufgenommen wird! Die Aufenthaltsorte des Elektrons im Atom entsprechen ganzzahligen Vielfachen der elementaren Quanten. Nun ließ sich auch das Spektrum des Wasserstoffatoms (H) erklären.

Wasserstoff als einfachstes Element hat ein sehr einfaches Spektrum. Bohr integrierte die Planck'sche Konstante h in die Gleichungen, die das Wasserstoffatom beschreiben sollten.

Wie kann ein Atom eine scharfe Spektrallinie hervorrufen? Wenn ein Elektron ein Energiequant h mit der Frequenz ν aufnimmt/abgibt, erhöht/verringert sich seine Energie um $E = h \times \nu$. Wenn ein Atom ein Photon absorbiert, wird die Energie $h \times \nu$ dazu benutzt, ein Elektron im Atom auf ein höheres Energieniveau zu heben. Beim Zurückfallen des Elektrons wird das selbe Quant wieder ausgesendet. Die möglichen Energieniveaus des H-Atoms können berechnet werden. Die atomare Energieeinheit ist das Elektronenvolt (eV). 1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft.

Um ein Elektron aus einem H-Atom herauszuschlagen, braucht man 13,6 eV. Die Energien von Teilchen bei radioaktiven Vorgängen beträgt einige MeV (Megaelektronenvolt).

Bohrs Atommodell mit der Quantentheorie zur Erklärung der Atomprozesse sowie Einsteins Wahrscheinlichkeitsrechnung der Atomtheorie blieben die Voraussetzungen für die weitere Entwicklung.

Spektroskopie

Weißes Licht enthält Strahlung aller Wellenlängen; mit einem Prisma kann man ein Spektrum erzeugen – die Auffächerung des weißen Lichts in alle farbigen Bestandteile. Dringt weißes Licht durch ein Gas oder eine Flüssigkeit, so absorbieren die Elemente des Materials bestimmte Frequenzen. An deren Stelle bleibt das Spektrum dunkel.

Das Spektrum der Sonne ist durch scharfe, dunkle Linien gekennzeichnet, die bestimmten Frequenzen entsprechen. Jedes Element hat seine eigenen scharfen Spektrallinien. Die Linien sind scharf, weil jedes Atom des Elements Energie der gleichen Frequenz absorbiert oder aussendet.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Eine 100-Watt-Glühbirne braucht $6,2 \times 10^{12}$ eV pro Sekunde!

Atomare Größenordnungen, Bohrs Atommodell

Atom:

ein winziger Kern, umschwirrt von Elektronen, mit Protonen (p) und Neutronen (n) in gleicher Zahl und Elektronen (e) in unterschiedlicher Zahl (Isotope).

Die Protonenzahl bestimmt das Element.

Die Elektronen bestimmen das chemische Verhalten des Elements.

Die Neutronen tragen zur Masse und zur Stabilität des Kerns gegen die elektromagnetische Abstoßung bei.

Die Masse von p und n beträgt etwas das 2000fache der Masse e.

Atomgewicht A:

Anzahl der Protonen + Neutronen

Kernladungszahl Z:

Anzahl Protonen (= Ordnungszahl)

Isotope

Wasserstoff: 1p + 0n + 1e

Deuterium: 1p + 1n + 1e

Tritium: 1p + 2n + 1e

Helium: 2p + 2n + 2e

Je mehr Protonen ein Atom enthält, umso mehr Isotope gibt es. Radioaktivität ist eine Erscheinung instabiler Isotope. Der β -Strahl ist ein Elektron, das entsteht, wenn sich ein Neutron durch die Schwache Kernkraft in ein Proton wandelt. Das α -Teilchen ist ein Heliumkern, der frei wird, wenn sich instabile Kerne in stabile aufspalten.

Energieniveaus des Elektrons



In heißem Gas geht, bringt es die Elektronen vom Grundzustand auf höhere Energieniveaus. Dabei entstehen durch Absorption dunkle Spektrallinien.

Der Übergang von n_1 nach n_2 setzt die Absorption von $E = h \times \nu$ voraus, der Rückfall in den Grundzustand gibt genau dieses Quant wieder ab. Es gibt keine Zwischenstufen!

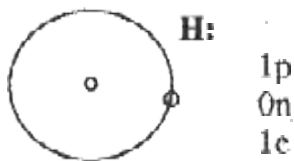
Einstein erkannte die Ähnlichkeit des radioaktiven Zerfalls von Atomen mit den Energiezuständen im Atom und wandte die statistischen Verfahren auf die Energieniveaus an. Er berechnete die Wahrscheinlichkeiten für den "Aufenthalt" der Elektronen auf bestimmten Quantenzahlen (n_1 , n_2 ...). Einstein vermutete, die statistische Betrachtung sei nur vorübergehend, denn: "Gott würfelt nicht!" Doch es gibt keinen tieferen Grund als den Zufall, warum ein Atom radioaktiv zerfällt

oder warum ein Elektron in einen anderen Energiezustand übergeht! In der Quantenwelt verschwindet die Kausalität!

Diese Vorgänge lassen sich nie vorhersagen, aber eine genügend große Menge eines radioaktiven Elements hat eine "Halbwertszeit", eine statistische Zeit, nach der die Hälfte der Probe zerfallen sein werden. Doch niemand kann sagen, ob ein bestimmtes Atom zu irgendeiner Zeit zerfällt oder nicht!

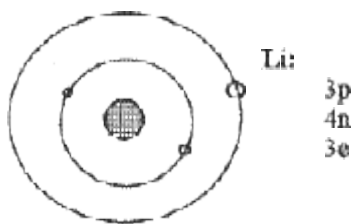
Chemisches Verhalten

Die Wechselwirkungen zwischen den Elektronen bestimmen das chemische Verhalten der Atome.



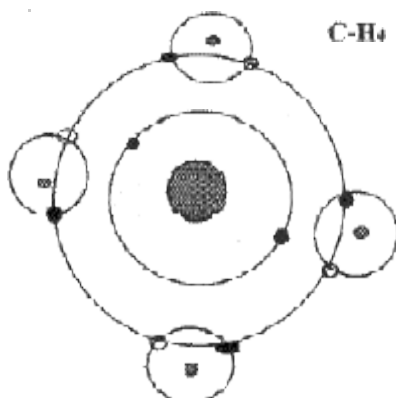
Bohrs Erklärung des Periodensystems:

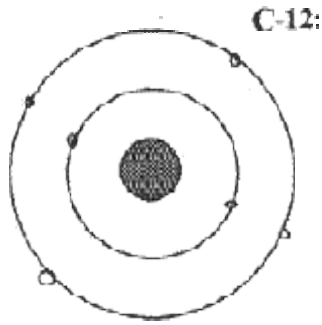
Beginnend bei H steigt die Zahl der p und e. Das erste e bei H nimmt den Grundzustand ein. Das zweite e bei He nimmt einen ähnlichen Zustand ein. Für weitere e ist auf diesem Energieniveau kein Platz. (Erklärung folgt später.)



Das dritte e bei Li ist nicht so eng an den Kern gebunden. Li hat wie H ein e auf der äußeren Energieschale; seine chemischen Eigenschaften ähneln dem H.

Das nächste Element mit ähnlichen Eigenschaften hat wieder ein e auf der äußeren Schale: Na mit 11 e; 2 e auf dem Grundniveau, 8 e auf dem zweiten Energieniveau und 1 e außen. Das e auf der dritten Schale ist noch weniger stark an den Kern gebunden, die Reaktionsfreudigkeit steigt. Das chemische Verhalten wird durch die Elektronen in den äußersten Schale bestimmt.





6p + 6n + 6e

C-H₄ (Methan; Kohlenwasserstoff) ist eine besonders stabile Verbindung. Durch die Überlappung der äußeren Schalen des C- und der vier H-Atome sind die gemeinsamen Schalen gefüllt. Die Atome "wünschen" gefüllte Schalen. Deshalb kommt in der Natur Wasserstoff als H₂ vor, He aber immer allein.

Kochsalz, NaCl: Na gibt das eine äußere e ab und wird zum Na⁺ Ion; Cl nimmt das e in seine äußere Schale auf und wird zum Cl-Ion. Nun haben beide volle äußere Schalen. Durch elektrische Anziehung bilden sie ein NaCl-Molekül.

"Doppelnatur" des Lichts und der Materie. Lichtteilchen. Photonen und Elektronen

Wie kann Licht zugleich Teilchen und Welle sein??

Compton untersuchte im Experiment die Streuung von Röntgenstrahlen an Elementen, also die Wechselwirkungen von Photonen und Elektronen, und bewies die Existenz des Photons. Das Photon prallt auf das Elektron. Das Elektron nimmt Energie und Impuls vom Photon auf und fliegt in einem bestimmten Winkel davon. Das Photon verliert Energie (= Frequenzänderung!) und fliegt in einem anderen Winkel davon. Diese Wechselwirkung entspricht genau der Beschreibung im Sinne von Teilchen. Das Photon tritt als Teilchen mit $E = h \times \nu$ auf.

Energie des Strahlungsquants: $E = h \times \nu$

Impuls des Strahlungsquants: $p = h \times \nu / c$

Messung der Energie des Lichtteilchens an seiner Frequenz:

durch die spezielle Relativitätstheorie beträgt die Energie eines Photons:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2, \text{ bei Ruhemasse} = 0 \gg E = p \times c$$

Die Wellennatur-Beweise des Lichts bleiben davon unberührt.

Elektronenwellen

De Broglie fragte sich, wenn Lichtwellen sich wie Teilchen verhalten – warum sollten dann Elektronen sich nicht wie Wellen verhalten? Elektronen kommen in "Bahnen" mit ganzen Zahlen vor, wie bei Wellen. Das Bild einer stehenden Welle auf einer Kreisbahn um den Kern kann die Quantelung der Energiezustände erklären. Im Experiment wurde die Beugung von Elektronenwellen am Kristallgitter untersucht. Elektronen wurden wie Wellen gebeugt. Sie sind also wie Photonen

Teilchen und Welle. Später wurden auch die Welleneigenschaften von Protonen und Neutronen bewiesen.

Eine schwingende Gitarrensaite ist eine stehende Welle. Ihre Obertöne sind ganzzahlige Vielfache des Grundton.

Alle Wellen und Teilchen sind "eine Mischung aus Teilchen und Welle". In der Alltagswelt dominiert völlig die Teilchenkomponente der Materie, doch in der Welt des sehr Kleinen verhalten sich die Dinge nicht so. Alle Bilder und Analogien des Atom sind falsch!

Pauli und das Ausschließungsprinzip

Ungeklärt war die Aufspaltung der Spektrallinien in Multipletts, in viele dicht nebeneinander liegende Linien. Wolfgang Pauli erklärte sie mit dem Elektronen-Spin. Er schrieb den Elektronen vier Quantenzahlen zu; drei waren im Bohr'schen Atommodell Angaben zu "Bahnimpuls", Form der Bahn" und "Orientierung". Pauli fügte den Spin hinzu. Damit ließen sich die Multipletts erklären.

Pauli fand auch heraus, warum der niedrigste Quantenzustand nur zwei Elektronen aufnehmen kann, der zweite aber acht usw. Das Ausschließungsprinzip oder Pauli-Prinzip besagt, dass zwei Elektronen im Atom niemals die selben Quantenzahlen haben können.

Das Pauli-Prinzip gilt für alle Materieteilchen wie Elektronen, Protonen oder Neutronen. Sie haben einen halbzahligen Spin, also $\pm 1/2, 3/2, 5/2$. Die Teilchen heißen Fermionen.

Teilchen mit ganzzahligem Spin verhalten sich völlig anders. Dies sind die Bosonen, die "Kraftteilchen" wie z.B. Photonen. Sie können in beliebiger Zahl erschaffen werden, etwa beim Licht Einschalten.

Der Spin ist keine Eigendrehung der Elektronen, sondern eine rein abstrakte quantenmechanische Funktion. Er kann beim Elektron nur die Werte $+ 1/2$ und $- 1/2$ haben. Der Spin kommt ganz- und halbzahlig vor, ändert sich aber immer nur ganzzahlig!

Nur dank dieses Prinzips existieren überhaupt verschiedene Atome und Elemente. Die Gesamtzahl der Fermionen im Kosmos kann nicht verändert werden!

Kraftteilchen. Das Standardmodell der Physik (siehe Kapitel [Teilchen und Kosmos](#)) erklärt die Welt als Wechselwirkungen von Materieteilchen und Kraftteilchen.

Matrizen, Wellen, Mathematik. Heisenberg

Heisenberg begrenzte seine Theorien auf im Experiment beobachtbare Dinge; Elektronen haben keine "Bahnen". Bei allen beobachtbaren Merkmalen von Atomen und Elektronen geht es um zwei Zustände, z.B. wenn sich ein Elektron 'auf ein anderes Energieniveau begibt'. Er suchte nach Formeln für den Zusammenhang von Paaren von Zuständen und fand bei der Multiplikation solcher Zahlenpaare, dass

$\mathbf{a \times b \text{ ungleich } b \times a}$ ist, was ihn zur Verwendung von Matrizen führte.

Heisenberg, Born und Jordan schufen die Matrizenmechanik.

$\mathbf{p \times q - q \times p = h/2\pi i}$, wobei p und q Quantenvariablen sind, z.B. das quantentheoretische Gegenstück zu Lage und Impuls.

Paul Dirac entwickelte die vollständige Form der Quantenmechanik. Er erkannte dieses "**a x b ungleich b x a**" als von fundamentaler Bedeutung. Dirac fand die Gleichungen der klassischen Mechanik als Sonderfall mit $h = 0$ in der Quantenmechanik enthalten und baute auch die Spezielle Relativitätstheorie in die Quantenmechanik ein.

Schrödinger berechnete die Energieniveaus mit Wellenformeln, während die Quantenmechanik vom Elektron als Teilchen ausging. Es zeigte sich, dass alle Berechnungen äquivalent und nur unterschiedliche Ansichten der gleichen mathematischen Welt sind. Doch Schrödingers Wellen sind ebenso abstrakt wie Diracs Quantenzahlen.

Wie kann ein Photon oder ein Elektron zugleich Teilchen und Welle sein?

Vorerst erkläre ich es mir so: "Teilchen" und "Welle" sind nur Bilder, Symbole für etwas, was wir z.B. "Photon" nennen. Sie beschreiben Teilaspekte von etwas, das wir in seiner Gesamtheit nicht erfassen können.

Elementare Erkenntnisse und Theorien

Komplementarität der 'Teilchen'

Ein fundamentales Wesen wie das Elektron ist weder Teilchen noch Welle. Unter gewissen Umständen verhält es sich, als sei es eine Welle, unter anderen wie ein Teilchen. Kein Experiment könnte zeigen, dass es zugleich Teilchen und Welle ist.

Statistische Deutung der Wellenfunktion

Born stellte fest, das allgemeine jeder Welle sei die Wellenfunktion. Er nahm an, die Teilchen seien real, würden aber von der Welle gelenkt. Die Stärke der Welle an einem Punkt im Raum sei ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen dort anzutreffen.

Heisenberg leitete aus seinen Berechnungen ab, dass der Quantenmechanik eine Unbestimmtheit innewohnt, d.h. es handelt sich nicht um Messfehler, sondern er zeigte, dass man niemals zugleich etwa den Ort und den Impuls eines Elektrons messen kann.

Je genauer man der Ort eines Elektrons kennt, umso ungewisser ist sein Impuls (wohin es fliegt) und umgekehrt. Dies ist die **Heisenbergsche Unschärferelation**.

Die Unschärferelation ist keine Messungenauigkeit, sondern eine prinzipielle Unmöglichkeit!

Sie misst den Betrag, um den sich die komplementären Eigenschaften des Elektrons oder andere physikalische Größen sich überlappen. Je mehr man über den Wellenaspekt der Realität weiß, umso weniger weiß man über das Teilchen.

Kopenhagener Deutung der Quantenphysik.

Bohr sagte, Experimente sind Fragen an die Quantenwelt, wurzeln aber in der klassischen Physik. Um atomare Prozesse zu beobachten, muss man in sie eingreifen. Es ist sinnlos zu fragen, was Atome tun, wenn man sie nicht beobachtet. Dies ist die vielzitierte "**Kopenhagener Deutung**"; sie beinhaltet Unbestimmtheit, Komplementarität, Wahrscheinlichkeit und Störung der beobachteten Systems durch den Beobachter.

Es gibt kein Modell des Atoms und der Elementarteilchen. Die Gleichungen der Wellenmechanik können für statistische Vorhersagen verwendet werden. Bei der Messung eines Ereignisses sagen die Quantengleichungen, wie groß die Wahrscheinlichkeiten für weitere Ereignisse bei Wiederho-

lung des Experiments sind. Die Quantentheorie sagt nicht, wie Atome aussehen oder was sie tun, wenn wir sie nicht beobachten.

Antimaterie

Dirac fand rechnerisch die Antimaterie. Die Energie eines Teilchens mit der Masse m und dem Impuls p ist:

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

(wenn $p=0 \gg e = mc^2$)

Die Energie kann positiv oder **negativ** sein!

$$E = \pm mc^2$$

Es ergeben sich zwei Energieniveaus. Nach der Theorie müssten die Elektronen in den niedrigsten nicht besetzten Energiezustand fallen, und ein negativer Energiezustand ist niedriger als jeder positive. Warum also fallen Elektronen nicht in negative Energiezustände und verschwinden im Nichts? Elektronen sind Fermionen, und wenn sie nicht in negative Energiezustände fallen, dann müssen diese Zustände bereits besetzt sein. Dirac beschrieb den "leeren Raum" als ein Meer von Elektronen mit negativer Energie.

Wenn man einem Elektron mit negativer Energie genügend Energie zuführt, müsste es "in die reale Welt" hinaufspringen, doch es hinterlässe im Meer negativer Energie eine Lücke. Diese Lücke müsste dieselbe Masse wie ein Elektron haben und sich wie ein positiv geladenes Teilchen verhalten.

1932 untersuchte Anderson kosmische Strahlung in einer Nebelkammer und fand Teilchen mit der Masse des Elektrons und positiver Ladung – **Positronen** (e^+).

Die Tatsache, dass Teilchen aus Energie erzeugt werden können, führte zu einem völlig neuen Begriff des Teilchens. Aus Energie kann jedes Teilchen erzeugt werden, wobei man auch sein Antiteilchen, die Lücke im Meer negativer Energie erzeugt. Wenn ein Teilchen mit seinem Antiteilchen zusammenkommt, zerstrahlen sie unter Freisetzung aller Energie in einem Schauer aus γ -Strahlung.

Mittlerweile umfasst der 'Teilchenzoo' über 200 Teilchen, die alle in Beschleunigern erzeugt werden können; die meisten sind instabil. Später fand man das Antiproton und das Antineutron. Die Überfülle dieser Teilchen musste von etwas Fundamentalere bestimmt sein.

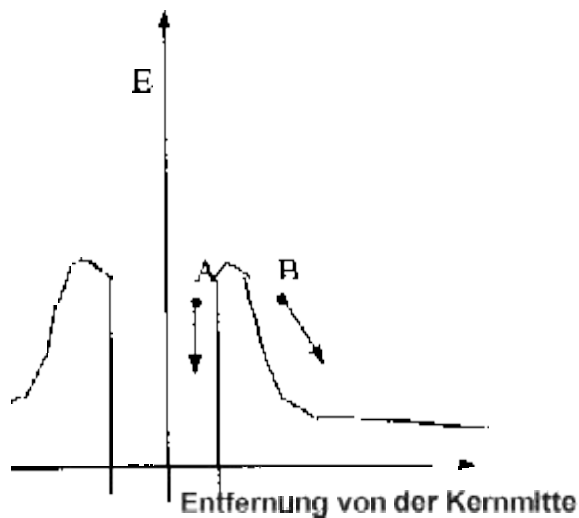
Das Innere des Kerns

Der Kern ist 10^5 mal kleiner als das Atom. Die positiv geladenen Protonen (p) werden durch die starke Kernkraft oder starke Wechselwirkung, die nur über sehr kurze Reichweiten wirkt, entgegen ihrer elektromagnetischen Abstoßung zusammengehalten. Auch die Neutronen (n) sind für die Stabilität des Kerns verantwortlich. Die größte Protonenzahl eines stabilen Kerns hat Uran-238 (92 Protonen, 146 Neutronen). Der stabilste Kern ist Eisen-56. Alle leichteren Kerne nehmen 'gern' Nukleonen (p und n) auf; die schwereren geben sie 'gern' ab, um zu Eisen zu werden. In Sternen werden die leichtesten Kerne unter Abgabe von Energie in Richtung Eisen aufgebaut (Kernfusion).

Bei Supernovaereignissen geht viel Gravitationsenergie in die Kernprozesse ein, so dass die schweren Elemente bis zum Uran gebildet werden. Wenn die schweren Kerne sich zu Eisen zu-

rückentwickeln, wird unter Abgabe von α -Teilchen, e^- , e^+ und p Energie freigesetzt, die aus aufgespeicherter Energie vergangener Supernovae stammt.

Stardust. Bist du dir bewusst, dass jedes Atom außer Wasserstoff und Helium, mit dem du jemals Kontakt hast, Sternenstaub ist?



Potentialwall im Kern

Wenn ein Kern ein α -Teilchen aussendet, verhält er sich nach den Regeln der Quantenmechanik und der Unschärferelation. Im Kern hält die starke Wechselwirkung die Nukleonen zusammen. Wenig außerhalb wird ein α -Teilchen durch die elektromagnetische Kraft abgestoßen. Die graphische Darstellung dessen ist ein Potentialwall. Ein Teilchen A muss im Kern bleiben, außer es hat genug Energie, um den Wall zu überwinden. Die Quantenunschärfe erlaubt einen Tunneleffekt von A nach B und B nach A.

Nach der klassischen Mechanik haben Nukleonen nicht genug Energie, um den Potentialwall zu überwinden. Aber in der Quantenmechanik besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein α -Teilchen sich außerhalb befindet. Aus der Unschärferelation geht hervor, dass die Energie eines Teilchens nur innerhalb ΔE während des Zeitraum Δt bestimmt werden kann. $\Delta E \times \Delta t$ größer als h -quer.

Für sehr kurze Zeit kann sich das Teilchen Energie "borgen", den Wall überwinden, die Energie zurückgeben und den Kern verlassen. Unter dem Aspekt der Unbestimmtheit des Ortes ist ein Teilchen knapp innerhalb der Barriere knapp außerhalb. Durch diesen reinen Quanteneffekt kann das Teilchen durch den Wall tunneln. Darauf beruht der radioaktive Zerfall.

Kernspaltung

Ein Kern zittert, vergleichbar einem Wassertropfen, hin und her. Führt man dem Kern Energie zu, etwa durch Neutronenbeschuss, kann die Schwingung so extrem werden, dass der Kern sich spaltet. Es entstehen zwei kleinere Kerne mit konstanter Protonenzahl, α - und β -Teilchen und Neutronen.

Kettenreaktion

Diese Neutronen lösen weitere Spaltungen aus. Jede Spaltung eines U-235-Atoms setzt etwa 200 MeV frei. Ungehemmt ist dieser Prozess in der Atombombe, gesteuert im Spaltungsreaktor, wo

ein Material überschüssige Neutronen absorbiert. Die freiwerdende Energie ist noch immer gespeichert von Sternener Explosionen.

Kernfusion

Eine Kernfusion ist die Verschmelzung von Wasserstoff- zu Heliumkernen (und zu schwereren Kernen), wie sie in den Sternen geschieht. Bisher konnte man zwar die Wasserstoffbombe bauen, bei der die Kernfusion mittels einer Uranspaltungsreaktion gezündet wird, doch die geregelte Nutzung ist schwierig.

Kleine Kerne müssen so nah zusammengeführt werden, damit die elektromagnetische Abstoßung überwunden wird und die starke Kernkraft die Nukleonen zusammenzieht. Vor allem beim in Gang halten der Reaktion nach den ersten Kernverschmelzungen bestehen wegen der immensen Expansionskräfte technische Probleme.

Praktische Quantenphysik

Maser und Laser

Wenn Elektronen vom angeregten Zustand auf das Grundniveau zurückfallen, setzen sie ein Energiequant – ein Photon – mit einer ganz bestimmten Wellenlänge frei. Ein angeregtes Atom kann durch ein Photon zu diesem Rückfall angeschubst werden (induzierte Emission), wenn das Photon genau die selbe Wellenlänge hat wie die erwünschte Strahlung. Bei vielen Atomen kann ein einziges Photon eine Lawine von Strahlung mit identischer Frequenz und in Phase auslösen. Es entsteht eine scharf gebündelte Strahlung mit der gesamten Energie, da sich keine Wellenberge und -täler aufheben.

Man kann Atome so anregen, dass sie nur auf ein schmales Band angeregter Energiezustände übergehen. Auslöser ist dann eine schwache Strahlung mit richtiger Frequenz, Ergebnis ein viel stärkerer Strahl.

Zuerst gelang die Umsetzung auf der Wellenlänge der Mikrowellen, der Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Entsprechend ist der Laser das Synonym auf Frequenzen des sichtbaren Lichts (Light ...)

Allgemein gilt, dass inkohärente Energie hineingesteckt wird; heraus kommt kohärentes Licht aus einem reinen Strahl von hoher Energie.

Halbleiter

Halbleiterphysik ist so alltäglich geworden und wäre doch undenkbar ohne Quantenphysik. Halbleiter sind Festkörper, deren Eigenschaften zwischen elektrischen Leitern und Nichtleitern liegen. Isolatoren sind Substanzen, die keinen Strom leiten, weil die Elektronen in den Atomen fest an die Kerne gebunden sind. Atome in elektrischen Leitern haben Elektronen, die nur lose an die Kerne gebunden sind und sich in Energiezuständen fast an der Grenze des Potentialwalls befinden. Zwischen den Atomen gehen die Potentialwälle ineinander über, und die Elektronen auf den hohen Energiezuständen können ungehindert durch das Metall wandern.

Nach der Fermi-Dirac-Statistik können diese Elektronen nicht in tiefere Energiezustände fallen, da alle Positionen besetzt sind. Die Festigkeit der Metall liegt daran, dass die Elektronen wegen des Ausschließungsprinzips nicht mehr zusammengepresst werden können. Die Energieniveaus in Festkörpern werden nach den quantenmechanischen Wellengleichungen berechnet. Die eng an

den Kern gebunden Elektronen befinden sich im Valenzband des Festkörpers, die frei beweglichen im Leitungsband.

In einem Isolator sind alle Elektronen im Valenzband, im Leiter sind einige in das Leitungsband übergegangen. Bei einem Halbleiter ist das Valenzband voll, und zwischen Valenzband und Leitungsband besteht nur eine Energiedifferenz von ca. 1 eV.

So kann ein Elektron leicht in das Leitungsband gelangen, hinterlässt im Valenzband aber eine Lücke, die sich dort wie eine positive Ladung verhält. Ein Halbleiter kann somit in beiden Bändern Strom leiten.

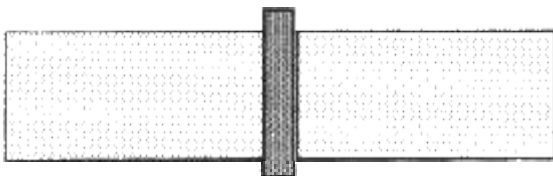
Künstliche Halbleiter werden z.B. aus Germanium (Ge) mit vier Elektronen in der äußeren Schale erzeugt, indem man dem Ge Arsenatome beimischt, die außen fünf Elektronen haben. Das jeweils überzählige Elektron geht ohne Lücke in ein Leitungsband über; es entsteht ein n-Halbleiter. Daneben versetzt man Ge mit Gallium, das drei Elektronen in der äußeren Schale hat, was zu einem Valenzband mit positiven Ladungen führt, einem p-Halbleiter.

Fügt man beide zusammen, entsteht durch den positiven Ladungsüberschuss an der einen Seite der Barriere und durch den negativen an der anderen ein elektrischer Potentialunterschied, der die Elektronen in eine Richtung drängt. Solch eine Diode lässt Strom nur in einer Richtung durch; eine Verfeinerung, die Leuchtdiode, sendet Licht aus. Eine Photodiode lässt Strom nur fließen, wenn Licht auf den Halbleiter fällt.

Werden drei Halbleiter zu p-n-p oder n-p-n zusammengefügt, entsteht ein Transistor, der einen schwachen Elektronenfluss an der n-p-Stelle verstärkt. Die weitere Entwicklung führte zu integrierten Schaltungen.

Supraleiter

Ein Supraleiter ist ein Material, das elektrischen Strom ohne erkennbaren Widerstand leitet. Dies ist die größte Annäherung ans Perpetuum mobile. Die Elektronen verbinden sich zu Paaren und wandern gemeinsam. Ein solches Paar kann sich wie ein Boson verhalten. Quecksilber verliert unter 4,2°K seinen elektrischen Widerstand. Dies beruht auf einer Wechselwirkung paariger Elektronen mit den Atomen des Kristallgitters. Ein Elektron tritt in Wechselwirkung mit dem Kristall, und dadurch verändert sich die Wechselwirkung des Kristalls mit dem anderen Elektron. Die Elektronen, die sich normalerweise abstoßen, können so eine lockere Verbindung eingehen, die ausreicht, um den Wechsel zur Bose-Einstein-Statistik zu erklären. (ganzzahliger Spin des e-Paares)

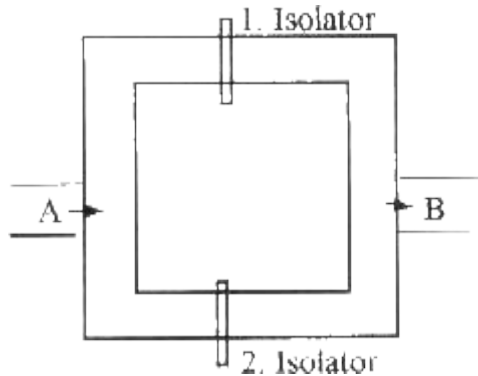


Das Phänomen tritt nur bei Temperaturen von 1°K bis 10°K auf. Ein guter elektrischer Leiter ist kein guter Supraleiter, weil hier die Elektronen ungehindert ohne Wechselwirkung durch das Kristallgitter kommen. Supraleiter können Strom ohne Energieverlust übertragen. An ihrer Oberfläche bilden sie Ströme, die Magnetfelder abschirmen.

Werden zwei Supraleiter durch einen Isolator getrennt, so können die Elektronen nach den Quantenregeln die Barriere durchtunneln, wenn sie dünn genug ist.

Wenn über die Barriere ein elektrischer Potentialunterschied besteht, so entsteht an solchen Übergängen kein Strom. Wenn aber keine Spannung besteht, kommt es doch zu einem Strom!

Doppelter Josephson-Übergang:



Analog zum Doppelspaltexperiment mit Licht entstehen am Doppelten Josephson-Übergang Interferenzen von Elektronen.

Auch Heliumatome können sich zu "Pseudo-Bosonen" verbinden. Es entsteht Supraflüssigkeit von flüssigem Helium. Wenn man Kaffee umrührt, kommt die Flüssigkeit durch eine Form der Reibung, die Viskosität, zum Stillstand. Wenn Helium unter 2,17°K gekühlt wird, hört die Drehbewegung nicht auf! Die Flüssigkeit kann über den Rand des Gefäßes kriechen und fließt umso leichter durch eine Röhre, je enger diese ist.

All dies lässt sich mit der Bose-Einstein-Statistik der Bosonen erklären. Die praktische Anwendung ist begrenzt, aber es ist eine Gelegenheit, Quantenprozesse zu betrachten. Auch sichtbare Mengen verhalten sich hier nach den Quantenregeln.

Tiefere Zusammenhänge der Quantenphysik

Zufall und Unbestimmtheit

Die Heisenbergsche Unschärferelation gilt als die zentrale Eigentümlichkeit der Quantentheorie. Begriffe wie Ort, Spin oder Geschwindigkeit haben nicht die gleiche Bedeutung wie im Alltag. Doch wie kann man diese beiden Welten in Beziehung setzen?

Heisenberg leitete aus $p \times q - q \times p = h/2\pi i$ ab, dass $\Delta p \times \Delta q > h$ für jedes Paar von konjugierten Variablen gilt, also Variablen, die, miteinander multipliziert, Einheiten der Wirkung ergeben, also Energie \times Zeit. In der Mikrowelt gibt es noch immer die klassischen Begriffe der Alltagswelt, aber in einem durch die Unbestimmtheit eingeschränkten Sinn.

Wir können Dinge nur sehen, wenn wir sie betrachten, d.h. Lichtquanten werden von den Dingen zurückgeworfen und gelangen in unser Auge. Ein Haus wird von Photonen nicht erheblich gestört, ein Elektron dagegen schon. Um es zu sehen, benutzt man elektromagnetische Energie kurzer Wellenlänge wie γ -Strahlen, doch ein Photon der γ -Strahlung, das von einem Elektron abgelenkt wird und von der Versuchsanordnung entdeckt werden kann, verändert den Ort und den Impuls des Elektrons.

Doch darüber hinaus sagt die Quantenmechanik, dass es ein Elektron mit einem präzisen Ort und Impuls überhaupt nicht gibt.

"Wir können die Gegenwart in allen Bestimmtheitsstücken prinzipiell nicht erkennen." Die Quantentheorie löst sich hier von der Determiniertheit der klassischen Ideen.

Kopenhagener Deutung (KD)

Das Prinzip der Unbestimmtheit gilt nicht im gleichen Sinne, wenn wir in der Zeit vorwärts und rückwärts gehen. Es gibt einen eindeutigen "Pfeil der Zeit". Die Unbestimmtheitsrelation sagt aus, dass wir die Zukunft nicht vorhersagen können. Sehr wohl aber kann man ein Experiment machen, aus dem sich eindeutig berechnen lässt, welches Ort und Impuls eines Elektrons zu einem früheren Zeitpunkt waren. Es ist ein fundamentales Wesen der Quantenwelt, dass sich die Zeit aus einer bekannten Vergangenheit in eine unbestimmte Zukunft bewegt.

Was geschieht bei einer experimentellen Beobachtung?

Man hat zu akzeptieren, dass der Beobachter das Beobachtete verändert. Der Beobachter ist Teil des Experiments. Es gibt kein "Uhrwerk", das wie in der klassischen Vorstellung weitertickt, wenn man wegsieht.

Wir beobachten ein Atom mit einem Elektron im Energiezustand A. Dann betrachten wir es erneut und finden ein Elektron im Energiezustand B. Wir vermuten, dass ein Elektron von A nach B gesprungen ist, vielleicht weil wir es betrachtet haben. Wir wissen nicht einmal, ob es das gleiche Elektron ist. Und wir wissen nicht, was es tut, wenn wir es nicht betrachten. Aus den Quantengleichungen entnehmen wir die Wahrscheinlichkeit, dass wir nach Antwort A beim nächsten Mal die Antwort B erhalten. Die Quantenspringerei ist lediglich unsere Interpretation. Manchmal finden wir A, dann wieder B, und die Frage, was dazwischen liegt, ist völlig sinnlos. Das ist ein fundamentales Merkmal der Quantenwelt.

Eddington sagte, was wir wahrnehmen, ist in hohem Maß von unseren Erwartungen geprägt. Wir sehen nur die Ergebnisse von Experimenten. Niemand hat jemals einen Kern gesehen. Wenn wir nicht sagen können, was ein Teilchen tut, wenn wir es nicht betrachten, können wir auch nicht sagen, ob es existiert, wenn wir es nicht betrachten!

In der Quantenwelt bekommt man, was man sieht, und nichts ist real. Worauf man hoffen kann, sind Selbsttäuschungen, die miteinander übereinstimmen. Und selbst diese Hoffnungen werden durch einfache Experimente zunichte gemacht.

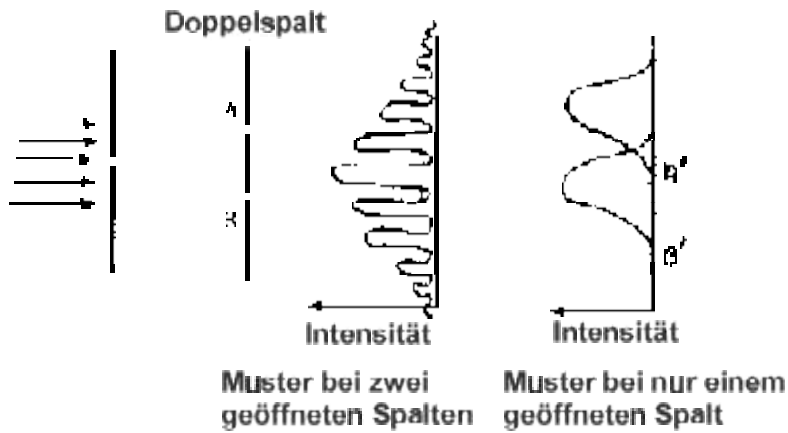
Das Doppelspalt-Experiment

Richard Feynman erarbeitete die QED, die Quantenelektrodynamik, die Gleichungen der quantentheoretischen Fassung des Elektromagnetismus. Er sagte, das grundlegende Element der Quantentheorie ist das Doppelspalt-Experiment. Dieses Phänomen ist auf klassische Art absolut unerklärlich und birgt den Kern der Quantenmechanik in sich.

Doppelspalt

Von einer Elektronenquelle geht ein Elektronenstrahl durch einen Spalt, dann durch einen Schirm mit zwei Spalten. Dahinter steht ein Detektor (Bildschirm). Das gleiche Experiment mit Wasser ergibt durch Interferenz ein Muster aus Wellenbergen und -tälern, ebenso mit Licht.

Was geschieht mit den Elektronen? Auch bei den Elektronen ergibt sich dasselbe Interferenzmuster.



Es geschieht genau das, was man erwartet: bei nur einem geöffneten Spalt ergibt sich das Muster A' oder B', bei beiden geöffneten Spalten das bekannte Interferenzmuster. Aber was tun die Elektronen dabei? Teilen sie sich auf und gehen als Wellen zur Hälfte durch Spalt A und zur Hälfte durch Spalt B?

Was geschieht mit jedem einzelnen Elektron?

Eine Welle als ausgebreitetes Objekt kann beide Spalten passieren, doch das Elektron selbst scheint ein wellenartiges Teilchen zu sein. Es müsste also den einen oder anderen Spalt zweifelsfrei passieren. Doch selbst, wenn die Elektronenquelle nur noch einzelne Elektronen die Versuchsanordnung passieren lässt, bleibt das Interferenzmuster bestehen!

Dies ist das zentrale Rätsel der Quantenwelt. Baut man der Versuch um, um festzustellen, durch welchen Spalt das Elektron geht, gehen die Elektronen wie "normale" Teilchen durch einen der Spalte. Auch nach Tausenden von Elektronen entsteht kein Interferenzmuster, sondern nur zwei helle Flecke. Überwachen wir den Durchgang nicht, so scheint das Elektron zu merken, dass beide Spalte offen sind und geht durch beide.

In diesem Zusammenhang spricht man von **Wahrscheinlichkeitswellen**, mit denen man z.B. vorhersagen kann, wohin in einem Strahl von Elektronen einzelne Teilchen fliegen. (?)

Nach der KD, die vor allem auf Nils Bohr zurückgeht, handelt es sich bei einem Teilchen um eine "kollabierende Wellenfunktion". Durch das Experiment gehen "Wahrscheinlichkeitswellen" und kollabieren auf dem Bildschirm zum Teilchen.

Die vielzitierte "Kopenhagener Deutung" galt fünfzig Jahre lang als die einzige akzeptierte Deutung der Quantenwelt. Zahlreiche Experimente zu ihrer Widerlegung führten immer wieder nur zu deren Bestätigung. In den vergangenen zwei Jahrzehnten kamen alternative Theorien auf, deren Skurrilitäten aber noch weiter gingen.

Kern der Kopenhagener Deutung sind:

- die Unbestimmtheit (Unschärferelation)
- das Zusammenbrechen der Wellenfunktion
- der mit dem Experiment verbundene Beobachter und die **Nichtlokalität**

Unserer gewohnten Realitätsauffassung liegen drei Annahmen zugrunde:

- Es gibt reale Dinge, die existieren unabhängig davon, ob wir sie beobachten oder überhaupt existieren.

- Man kann aus sich wiederholenden Ergebnissen allgemeingültige Schlussfolgerungen ziehen.
- Keine Wirkung kann sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Diese "lokal-realistische" Auffassung der Welt steht im Widerspruch zur KD.

Mehr Experimente, mehr Theorien (Futter für Suchmaschinen)

Die KD der Quantenphysik soll mathematisch absolut sauber funktionieren. Alle Experimente bis in die 90er Jahre bestätigten ihre Auffassung. Doch was sollen solche Aussagen wie "Etwas existiert nur, wenn ich es beobachte." oder "Teilchen als Zusammenbruch der Wellenfunktion"? In den vergangenen Jahrzehnten wurden faszinierende Experimente ersonnen und durchgeführt und neue alternative Theorien erstellt, die ich hier kurz andeuten möchte. Doch letztlich fand ich immer nur neue Fragen, und keine Theorie stellte mich zufrieden.

Das ERP-Paradoxon

Zwei Teilchen wechselwirken und fliegen auseinander. Wenn die KD stimmt, gibt es eine Fernwirkung zwischen den beiden Teilchen.

Schrödingers Katze

In einer verschlossenen Kiste sind eine radioaktive Quelle, ein Detektor, eine Flasche mit Gift und eine gedachte Katze. Die Wahrscheinlichkeit für ein zerfallendes Atom ist 50%. Zerfällt es, wird die Giftflasche zerstört und die Katze getötet. Schaut man nach, ist es entweder geschehen oder nicht. Was ist, wenn man nicht nachschaut? Bis dann ist die Katze tot und lebendig.

Das teilnehmende Universum. Wheelers **Experiment der verzögerten Entscheidung**

Das Spin-Paradoxon bewies die Fernwirkung des ERP-Experiments.

Das Rätsel der Polarisation

Der Bell-Test bewies 1982 die Nichtlokalität.

Ergebnis: Ein völlig neues Weltbild. Teilchen, die irgendwann in Wechselwirkung waren, bleiben Teile eines Systems. Alles bis zurück zum Urknall ist untrennbarer Bestandteil eines einzigen Systems.

Eine andere, die KD einschließende Theorie ist die "**Viele-Welten-Interpretation**". Alle Möglichkeiten sind in parallelen, von einander völlig isolierten Universen verwirklicht.

Die neueste mir bekannte Theorie ist **John Cramers Transaktionsinterpretation**. (siehe: John Gribbin. Schrödingers Kätzchen und die Suche nach der Wirklichkeit.)

"Ein Emitter schickt eine Angebotswelle in die Zukunft und in die Vergangenheit. Sie wird von einem Absorber aufgefangen, der gleichsam als Echo eine Bestätigungswelle in der Zeit rückwärts zum Emitter und in die Zukunft sendet. Angebotswelle und Bestätigungswelle heben einander überall im Universum auf, nur nicht auf dem direkten Weg zwischen Emitter und Absorber." usw.

Feynman

Ich beende an dieser Stelle unbefriedigt – ist das so ungewöhnlich? – die Betrachtung der Quantenwelt. Nicht, ohne auf Richard Feynman hinzuweisen, der mit seinen bahnbrechenden Arbeiten die Tür öffnete zur Quantenelektrodynamik.

(siehe: Richard P. Feynman. QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie.)

Die Theorie beschreibt "alle Phänomene der physikalischen Welt mit Ausnahme der Gravitation und der Radioaktivität".

Teilchen & Kosmos

Das Standardmodell der Physik. Der Urknall. Die ersten drei Minuten

Subatomare Teilchen

Die erste Begegnung mit subatomaren Teilchen erfolgte bei der Untersuchung der natürlichen Radioaktivität, bei der α -, β - und γ -Teilchen freigesetzt werden, und der kosmischen Strahlung, deren Teilchen tausend- bis millionenfach höhere Energien aufweisen.

Der Nachweis solcher Teilchen geschieht bei der Kollision mit Atomen und anderen subatomaren Teilchen, wobei auftretende Signale untersucht werden. Der Weg führte von Geigerzählern und Nebelkammern, in denen die eintreffenden Teilchen durch Ionisation von Gasmolekülen Spuren hinterlassen, zu Blaskammern in Beschleunigeranlagen. Bei der kosmischen Strahlung handelt es sich meist um hochenergetische Protonen, die mit den Atomen in der oberen Atmosphäre kollidieren, wobei Sekundärstrahlung entsteht.

Der Begriff der Energie

Der Energieerhaltungssatz besagt, dass die Summen der Energien eines Prozesses z.B. einer Bewegung gleich bleiben.

Der Impulserhaltungssatz besagt, dass in einem geschlossenen System der Gesamtimpuls in jede beliebige Richtung erhalten bleibt.

Die Bewegungsenergie einer sich langsam bewegenden Punktmasse ist $E = 1/2 mv^2$. Objekte haben immer auch eine potentielle Energie durch ihre Lage in einem Feld oder durch Kräfte wie etwa eine Feder und innere chemische Energie, die generell alle ineinander umgewandelt werden können.

Maßkala für die Energie

1 Joule ist die potentielle Energie der Masse eine Kilogramms in einem Meter Höhe.

1 Joule = 1 Wattsekunde (Ws)

1 Kilowattstunde = $3,6 \times 10^6$ Joule

1 Elektronenvolt (eV) ist die Energie, die man braucht, um 1 Elektron auf 1 Volt zu bringen.

1 Joule = 6×10^{18} eV

Im subatomaren Bereich:

Die Ruheenergie eines Teilchen ist:

$$E_0 = m_0 \times c^2$$

Die relativistische Massenzunahme eines Teilchens ist:

$$m = \frac{m^0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Die Gesamtenergie eines Teilchens ist $E = mc^2$

Ist v viel kleiner als c , dann ist die Energie eines Teilchens die Summe aus Bewegungs- und Ruheenergie:

$$E = 1/2 mv^2 + m_0c^2$$

Die bisher erwähnten Teilchen sind das Proton, das Neutron, das Elektron und das Photon. Zusätzlich wurden die Antiteilchen erwähnt, das Antiproton, das Antineutron und das Positron. Weiterhin kam zur Sprache, dass wir zwischen Fermionen (Materieteilchen) und Bosonen (Kraftteilchen) unterscheiden.

Welche Teilchen gibt es sonst noch? Und woraus bestehen sie?

MeV = Megaelektronenvolt

GeV = Gigaelektronenvolt

Masse des Elektrons $m_e = 0,511 \text{ MeV}$

Masse des Protons $m_p = 938 \text{ MeV}$

Masse des Neutrons $m_n = 939 \text{ MeV}$

Neue Teilchen, neue Kräfte

Das Neutron

Bei Versuchen mit α -Teilchen (Heliumkernen) fand man starke Strahlung ohne Ladung, das Neutron mit etwa der gleichen Masse wie das Proton.

Die Entdeckung des Neutrinos

Chadwick untersuchte den β -Zerfall (Elektronen) und stellte ein kontinuierliches Spektrum der Energien der Elektronen fest. Dies schien dem Energieerhaltungssatz zu widersprechen.

$A \gg B + e^-$ wobei A das Atom vor dem β -Zerfall und B das selbe Atom danach ist. Die Gesamtenergien von A und B blieben gleich, während die Elektronenenergie unterschiedliche Werte annahm. Damit wurde der Energieerhaltungssatz verletzt. Schließlich fand man ein weiteres Teilchen, das Neutrino, das für die Energiedifferenzen verantwortlich war. Das Neutrino (ν) hat keine Ladung, keine oder ein äußerst geringe Masse und durchdringt Materie fast ungehindert.

$$A \gg B + e^- + \nu$$

Starke Kernkraft und Bindungsenergie

Aus der Tatsache, dass die Kerne aus Protonen und Neutronen trotz der positiven Ladungen der Protonen zusammenhalten, schloss man auf die starke Kernkraft (starke Wechselwirkung). Man stellte auch fest, dass es in unterschiedlichen Atomen unterschiedliche Bindungsenergien pro Nukleon gibt.

Wasserstoffatom (H) im Ruhezustand:

$$E = m_p c^2 + m_e c^2$$

Die Masse von Wasserstoff ist aber ein wenig geringer als die Masse von Proton + Elektron.

Bindungsenergie (H):

$$(m_H - m_p - m_e) \times c^2 = 13,6 \text{ eV}$$

Bei allen Atomen ist die Gesamtmasse etwas geringer als die Masse der Bestandteile. Die Bindungsenergie steigt mit wachsender Nukleonenzahl rasch an, hat bei ca. 60 Nukleonen (Eisen) den größten Wert und fällt bei schwereren Kernen langsam ab.

Daraus folgt, dass bei Spaltung schwerer Kerne und bei Fusion leichter Kerne Energie frei wird.

Fermi und die schwache Kernkraft

Fermi entdeckte bei seinen Untersuchungen des β -Zerfalls eine weitere fundamentale Kraft, die schwache Kernkraft. Fermi untersuchte den β -Zerfall unter Verwendung der QED (Quantenelektrodynamik), in der Kraft zwischen geladenen Teilchen als Photonen-Austausch betrachtet wird. Er beschrieb die schwache Kernkraft (schwache Wechselwirkung) als die Kraft, die den β -Zerfall bewirkt.

Fermis Name ist in dem Begriff Fermionen verewigt. Man unterscheidet Materieteilchen, Fermionen mit halbzahligen Spin, die der 'Fermi-Pauli-Statistik' folgen, von Kraftteilchen mit ganzzahligen Spin, Bosonen, die sich nach der 'Bose-Einstein-Statistik' verhalten.

Müonen

Bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung wurde 1936 ein neues Teilchen entdeckt, das Müon (μ). Seine Masse beträgt etwas 100 MeV; es ist Hauptbestandteil der kosmischen Strahlung auf Meereshöhe, kann tief in die Erde eindringen und wird nicht von der starken Wechselwirkung beeinflusst. Das Müon ist instabil. (Am Müon wurde auch Einsteins Spezielle Relativitätstheorie bewiesen, denn wegen der Geschwindigkeit in Relation zur mittleren Lebensdauer des Müon dürfte es nie die Erdoberfläche erreichen ohne Zeitdilatation.)

Die schwache Wechselwirkung beeinflusst alle Teilchen außer denen mit extrem geringer Masse. Sie ist für den spontanen Zerfall von Teilchen verantwortlich. Die Lebensdauer von Teilchen wird durch die Halbwertszeit, in der die Hälfte der Teilchen zerfällt, angegeben, oder durch die mittlere Lebensdauer, nach der nur noch 37% der Teilchen vorhanden sind. Die mittlere Lebensdauer des Müons beträgt $T_{\mu} = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$.

Müonenzfall

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2 \nu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + 2 \nu$$

Pionen

1947 fand man das Pion (π) mit einer Masse von 140 MeV. Müonen entstehen beim Zerfall von Pionen,

$$\tau_{\pi} = 10^{-8} \text{ s}$$

Pionenzfall:

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

Das Standardmodell der Physik

In den ersten Augenblicken des "Urknalls" war der Kosmos so heiß und dicht, dass nur die elementarsten Formen der Materie bestehen konnten. Die Frage nach den wirklich elementaren Grundbausteinen verbindet Kosmologie und Teilchenphysik. In Teilchenbeschleunigeranlagen werden die Bedingungen aus der Anfangsphase des Universums nachgeahmt.

Das Standardmodell der Physik enthält Quarks, Leptonen und Bosonen. Quarks und Leptonen scheinen elementare und unteilbare Teilchen zu sein. Quarks sind die Bestandteile u.a. der Protonen, Neutronen und Mesonen und werden von der starken Wechselwirkung zusammengehalten. Leptonen sind u.a. Elektronen, Müonen und Neutrinos. Sie reagieren nicht auf die starke Wechselwirkung. Die Bosonen, z.B. Photonen, übertragen verschiedene Kräfte zwischen den Elementarteilchen.

Teilchenbeschleuniger

In Beschleunigermaschinen können geladene Teilchen elektrisch beschleunigt werden. Mittels Magnetfeldern werden sie auf konstanten Bahnen gehalten und zur Kollision mit anderen Teilchen gebracht (Kollider) oder auf ein festes Target (Ziel) geschossen.

Bei ausreichender Energie wird ein Schwarm von Teilchen erzeugt, der von Detektoren analysiert werden kann. Die wichtigste Größe ist dabei die Energie der beschleunigten Teilchen. Zur Kollision werden meist Elektronen und Positronen, Elektronen und Protonen, Protonen und Protonen sowie Protonen und Antiprotonen gebracht.

Das Müon-Neutrino

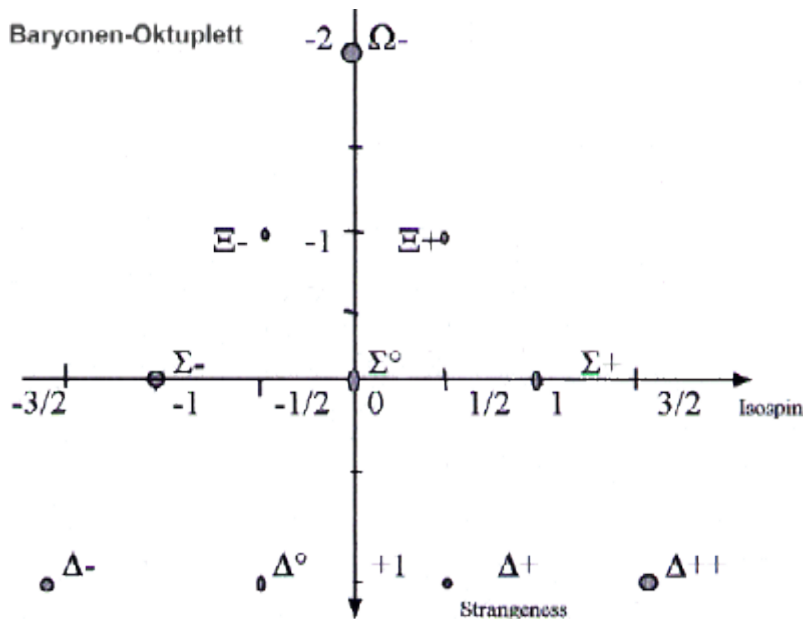
Neutrinos reagieren extrem selten mit anderen Teilchen. Sie werden nur von der schwachen Wechselwirkung beeinflusst. Neutrinos werden beim radioaktiven Zerfall zusammen mit Elektronen erzeugt. Andererseits entstehen Neutrinos beim Zerfall von Pionen in Müonen. Doch es handelt sich nicht um die selben Neutrinos. In der Umkehrung der Prozesse können die einen bei der Kollision mit Protonen wieder Elektronen erzeugen, die anderen produzieren mit Pionen Müonen. Man unterscheidet somit Elektron-Neutrinos (ν_e) und Müon-Neutrinos (ν_{μ}). Sie unterscheiden sich voneinander durch den "Flavor", der beim Standardmodell eine entscheidende Rolle spielt.

Für Quarks und Leptonen gibt es je sechs verschiedene Flavors, experimentell unterscheidbare Teilchen der selben Familie.

Murray Gell-Mann und der Achtfache Weg

In den 60er Jahren kannte man bereits fast 100 Teilchen, die hauptsächlich durch die starke Wechselwirkung entstanden. Man nennt sie "Hadronen" (griechisch: stark).

Gell-Mann fand in Anlehnung an das Periodensystem der Elemente ein System, um die Hadronen zu ordnen. Viele der Teilchen ließen sich in Familien von acht oder zehn Mitgliedern ordnen. Gell-Mann bezeichnete seine Entdeckung in Anlehnung an den Buddhismus als den Achtfachen Weg.



Die Teilchen wurden aufgrund der Symmetrie ihrer Quanteneigenschaften zusammengefasst. Diese Quanteneigenschaften, sei es der Isospin, die Strangeness oder der Flavor, betrachten wir am besten als rein abstrakte, mathematische Eigenschaften.

Seine Theorie sagte ein neues Teilchen mit besonders exotischen Eigenschaften voraus, das Omega minus (Ω^-), das dann gefunden wurde und die Theorie bestätigte. Doch was steckt hinter dieser Anordnung?

Die Quark-Hypothese

Gell-Mann und Zweig schlugen 1964 eine grundlegende Teilchenstruktur vor, aus der sich alle bekannten Teilchen zusammensetzen. Gell-Mann beschrieb die Elementarteilchen, die er Quarks nannte, und aus denen sich alle Hadronen zusammensetzen, als Teilchen mit sehr seltsamen Eigenschaften. Sie haben keine ganzzahligen Ladungen, sondern $\pm 1/3$ oder $\pm 2/3$ der Elementarladung. Auch die weiteren Eigenschaften eines Protons oder Neutrons müssen sie jeweils zu einem Drittel aufbringen.

Alle bekannten Hadronen sind aus drei dieser Grundbausteine zusammengesetzt. Jede Quarkart lässt sich durch einen Flavor charakterisieren: up (u), down (d), strange (s), charme (c), top oder truth (t) und bottom oder beauty (b).

u, c und t haben eine Ladung von $+2/3$; d, s und b von $-1/3$.

Selbstverständlich gibt es dazu die Antiquarks mit der jeweils umgekehrten Ladung.

Die Baryonen (Materieteilchen) bestehen aus drei Quarks, die Bosonen (Kraftteilchen) aus einem Quark und einem Antiquark, soweit sie Fermionen sind.

Kompliziert, was, aber bald folgt zur Übersicht ein Grafik dazu. Bleibt die Frage, ob die Quarks wirklich existieren oder nur ein mathematisches Hilfsmittel sind ...

Der experimentelle Nachweis der Quarks

1968 bis 1972 wurde die Existenz der Quarks bei Elektronen-Protonen-Kollisionen bewiesen. Die Daten zeigten, dass die Elektronen an kleinen Bestandteilen der Protonen gestreut wurden. Feynman nannte sie Partonen, und er war überzeugt, dass im Inneren des Protons noch andere Bestandteile sein mussten, die sich später als die Gluonen erwiesen, die die starke Wechselwirkung vermitteln.

Die Quarks erwiesen sich als existent und punktförmig, so dass sie als wirklich elementar und unteilbar gelten. Die Punktförmigkeit der Quarks spielt auch eine Rolle bei der Erklärung des Urknalls, denn ausgedehnte Teilchen wie Protonen könnten nicht so dicht gepackt sein, wie es die Theorie verlangt.

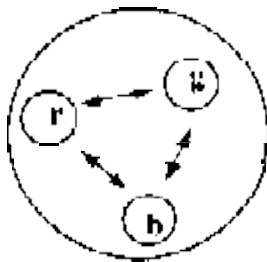
Die Quarks sind im Inneren der Teilchen fest eingeschlossen (Quarkeinschluss). Isolierte Quarks konnten niemals festgestellt werden.

Teilchen	Symbol	Quark-zusammensetz.	Ladung
Baryonen (qqq)			
Proton	p	uud	$+2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$
Neutron	n	udd	$+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$
Lambda	Λ	uds	$+2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$
Lambda-c	Λ_c	udc	$+2/3 - 1/3 + 2/3 = +1$
Omega-minus	Ω^-	sss	$-1/3 - 1/3 - 1/3 = -1$
Mesonen (q\bar{q})			
Pion	Π^+	$u\bar{d}$	$+2/3 + 1/3 = +1$
Pion	Π^-	$\bar{u}d$	$-2/3 - 1/3 = -1$
Pion	Π^0	$(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}$	$1/3 - 2/3 - 1/3 + 1/3 = 0$
Kaon	K^+	$u\bar{s}$	$+2/3 + 1/3 = +1$
Kaon	K^-	$\bar{u}s$	$-2/3 - 1/3 = -1$

Zusammensetzung verschiedener Teilchen und resultierende Ladung

Quarks.

Baryon



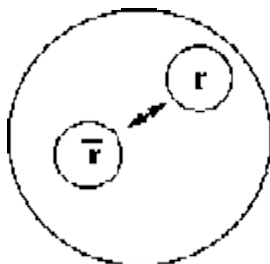
Quarktriplett

Farbladung

Neue Elektron-Positron-Kollisionen wurden durchgeführt. Bei der paarweise Vernichtung der Leptonen (e^- , e^+) wird genug Energie frei, um Pionen, Protonen und Antiprotonen zu erzeugen. Auf Grund der Ergebnisse führte Gell-Mann eine neue Quantenzahl ein, die Parallelen zur elektrischen Ladung hat, aber mit der starken Wechselwirkung verbunden ist. Die neue Ladung hat drei Zustände; man nennt sie Farbladung (rot, blau, grün). Diese Bezeichnung hat nichts mit realen Farben zu tun, sondern ist rein abstrakt.

Insgesamt ist ein Teilchen farbneutral, d.h. die Baryonen haben immer drei Quarks mit je einer Farbladung; Mesonen haben ein Quark mit einer bestimmten Farbladung und ein Antiquark mit der Antifarbe. Nur die beschriebenen Kombinationen können farbneutral sein.

Meson



Quarkduplett

Auch ein Widerspruch der Baryonenstruktur mit dem Pauliprinzip löst sich durch die unterschiedliche Farbladung auf, denn ohne die Farbladung wären z.B. die beiden u-Quarks des Protons im selben Quantenzustand, was das Ausschließungsprinzip verbietet. Da die Farbladungen für die starke Wechselwirkung verantwortlich sind, wurde für die Theorie der starken Wechselwirkung der Name Quantenchromodynamik (QCD) eingeführt.

Neue Teilchen

1974 fand man ein neues Teilchen mit der Masse von ca. 3 GeV, d.h. der dreifachen Protonenmasse. Das neue Teilchen, das man J oder Ψ nannte, ist sehr langlebig. Nur wenn das Ψ aus einer neuen, unbekanntenen Art von Materie bestand, war kein Zerfall in Teilchen der u – d – s – Kombinationen zu erwarten.

Man hatte ein neues Quark gefunden, das charme (c).

Das neue Quark war bereits vermutet worden, denn man kannte damals 3 Quarks und vier Leptonen, und man hielt eine vergleichbare Symmetrie für wahrscheinlich. Nun bestand das Modell aus zwei Familien von Elementarteilchen:

1. Generation: $u - d - e - \nu_e$

2. Generation: $c - s - \mu - \nu_\mu$

1978 wurde ein weiteres Teilchen entdeckt mit einer Masse von ca. 10 GeV, das Y, das aus dem b-Quark und dem Anti-b besteht. Sofort vermutete man darauf das 6. Quark, das t.

1976 fand man ein neues Lepton, das Tau (T), das schwerer als das Müon ist, sonst aber ähnliche Eigenschaften hat. Nun nahm man noch dazu ein Tau-Neutrino (ν_T) an, und das Standardmodell der Physik war komplett.

3. Generation: $t - b - T - \nu_T$

Standardmodell. Gluonen. Elektroschwache Vereinheitlichung.

Die Teilchen des Standardmodells

Genera- tion	Leptonen				Quarks			
	Name	Symbol	MeV	Ladung	Name	Symbol	MeV	Ladung
I	Elektron- Neutrino	ν_e	ca. 0	0	up	u	5	+2/3
	Elektron	e^-	0,5	-1	down	d	7	-1/3
II	Muon- Neutrino	ν_μ	ca. 0	0	charme	c	1500	+2/3
	Müon	μ	105	-1	strange	s	ca. 150	-1/3
III	Tau- Neutrino	ν_τ	ca. 75	0	top/truth	t	> 41.000	+2/3
	Tau	τ	1784	-1	bottom/ beauty	b	ca. 5000	-1/3

Tabelle der Leptonen und Quarks

Die Summe der Ladungen der Teilchen einer Generation ist stets null, wobei die Quarks in drei Farbladungen vorkommen. $3 \times 2/3 + 3 \times -1/3 - 1 = 0$. Jede Generation scheint eine Art schwerere Kopie der vorangegangenen zu sein. Unsere sichtbare Welt besteht nur aus der ersten Generation, doch sind die anderen ebenfalls unverzichtbare Bestandteile der Welt.

Unterscheidung der stabilen und langlebigen Teilchen

Fermionen (halbzahliger Spin, Pauli-Prinzip, Materieteilchen)

Hadronen (reagieren auf starke WW.)

Baryonen

p

n

Λ

Σ^+ Σ^- Σ^0

Ξ^0 Ξ^-

Δ^- Δ^0 Δ^+ Δ^{++}

Ω

Leptonen (reagieren nicht auf starke WW.)

e^-

ν_e

μ^-

ν_μ

τ^-

ν_τ

Bosonen (ganzzahliger Spin, kein Pauli-Prinzip, Kraftteilchen)

Hadronen

Π^- Π^0 Π^+

K^- K^0 K^+

Ψ

Y

γ

g (Gluon)

W^- W^+ Z^0

Unterscheidung der stabilen und langlebigen Teilchen

Gluonen und die starke Wechselwirkung

Die physikalischen Wechselwirkungen (WW) werden über Austauschbosonen vermittelt. Bei der elektromagnetischen WW übernimmt das Photon (γ) diese Rolle. Als Träger der starken WW vermutete man zunächst die Mesonen, aber die starke WW wirkt nicht zwischen den Nukleonen, sondern zwischen den Quarks. Das Austauschboson zwischen den Quarks ist das Gluon.

Die Gluonen sind wie die Photonen masselose Bosonen mit Spin 1. Im Gegensatz zu den Photonen haben sie aber eine Farbladung, während die Photonen keine elektromagnetische Ladung besitzen. Dies ist der Grund, warum die Kraft zwischen den Quarks mit wachsendem Abstand stärker wird, denn eine stärkere Kraft ist gleichbedeutend mit mehr Gluonen. Deshalb lassen sich Quarks nicht trennen.

Quarks im Inneren von Hadronen sind umso schwächer gebunden, je näher sie beisammen sind. Bei geringen Entfernungen verhalten sie sich wie freie Teilchen. So könnten die Quarks beim Urknall frei gewesen sein, als alle Materie zu einer ungeheuer dichten "Quarksuppe" zusammengepresst war. Wenn ein Quark eine Gluon emittiert oder absorbiert, ergibt die Kombination der Farbladungen wieder eine Quarkfarbe. Man geht von acht verschiedenen Gluonen aus.

Die elektroschwache Vereinheitlichung

Träger der schwachen WW sind die intermediären Vektorbosonen W^- , W^+ und Z^0 . Sie sind nicht masselos, was zu erheblichen theoretischen Schwierigkeiten führte. Einsteins Forschen galt über Jahrzehnte einer "vereinheitlichten Feldtheorie". In den letzten Jahren gelang als Teillösung die Vereinheitlichung der elektromagnetischen WW mit der schwachen WW zur elektroschwachen WW.

Die Vereinheitlichung dieser beiden WW scheint schwierig: Die elektromagnetische WW hat eine unendliche Reichweite, die mit dem Quadrat des Abstandes der Ladungen abnimmt. Die schwache WW wirkt nur im Atomkern, sie tritt bei allen Fermionen auf. Sie verwandelt ein Quarkflavor in ein anderes, so dass z.B. ein Proton zu einem Neutron wird ($uud \gg udd$). Das bedeutet, dass die schwache WW für den β -Zerfall verantwortlich ist.

Die Theorie sagte, dass beide WW unterschiedliche Erscheinungen der gleichen Kraft sind. Der Unterschied beruht auf der Masse der Vektorbosonen. Das Photon erlaubt eine unendliche Reichweite, während die Vektorbosonen durch ihre Masse nur eine sehr kurze Reichweite haben.

Während das ungeladene Photon einen neutralen Strom erzeugt, entstehen durch die geladenen Vektorbosonen ein geladener Strom. Ein Teilchen ändert beim Emittieren eines W-Teilchens seine Ladung um eine Einheit. Das andere Teilchen absorbiert mit dem Boson die Ladung. Das schwache Boson ist eigentlich nur ein Photon, allerdings mit einer Masse von über 100 Protonenmassen!

Die Kräfte/Wechselwirkungen im Standardmodell:

Kraft	Reichweite	Stärke <small>im Abstand von 10^{-12} 10 cm im Vergleich zur starken Kraft</small>	Träger	Ruhemasse (GeV/c ²)	Spin	Ladung
Gravitation	unendlich	10^{-38} 10	Graviton (vermutet)	0	2	0
Elektromagnetismus	unendlich	10^{-2} 10	Photon	0	1	0
schwache Kraft	10^{-16} < 10 cm	10^{-13} 10	intermediäre Vektorbosonen W ⁺ / W ⁻ / Z ⁰	81/81/93	1	+1 / -1 / 0
starke Kraft	10^{-13} ca. 10 cm	1	Gluon	0	1	0

Die Kräfte im Standardmodell

Symmetrien

Das Konzept der Symmetrie ist Basis für das Verständnis der physikalischen Grundkräfte und ihrer Vereinheitlichung. Im Bereich der Elementarteilchen findet man gewaltige, scheinbar ungeordnete Bewegungen vor, die man mit Hilfe von Symmetrien zu erfassen sucht. Symmetrie hängt eng mit der Erhaltungssätzen zusammen. Ein physikalisches System ist invariant gegenüber äußeren Einflussfaktoren, wenn Änderungen dieser Faktoren keine beobachtbaren Effekte bewirken.

Translationssymmetrie (Verschiebung) bedeutet, dass Systeme verschoben werden können, ohne dass sich im System etwas ändert. Weitere geometrische Symmetrien sind die Drehung von Kreisen, die Rotation von Kugeln, die Drehung von Quadraten um 90 Grad.

Der Impulserhaltungssatz entspricht einer Translationsinvarianz.

Also gibt es im Kosmos keinen bevorzugten Ort, der Raum ist homogen. Denkt daran, wenn Ihr wieder jammert: "Ich bin hier am Arsch der Welt!" Die Ergebnisse von Experimenten hängen nicht vom Standort im Raum ab. Gleichungen müssen so aufgebaut sein, dass sich bei der Addition eines Werts a zu einer Koordinate an der allgemeinen Form nichts ändert.

Ähnlich hängt die Erhaltung des Drehimpulses mit der Isotropie zusammen, der Symmetrie der Raumrichtungen (Rotationsinvarianz). Der Energieerhaltungssatz hat die Symmetrie des Zeitflusses und die Invarianz der Gleichungen bezüglich zeitlicher Veränderungen zur Folge.

Es gibt auch Erhaltungssätze ohne räumlichen Bezug, mit denen weitere Symmetrien verknüpft sind. Die Symmetrie zur Erhaltung der elektrischen Ladung ist die Eichsymmetrie. Sie verlangt, dass die mathematische Beschreibung des Elektromagnetismus in Bezug auf bestimmte Transfor-

mationen quantenmechanischer Größen invariant sein muss. Die Eichsymmetrie ist so grundlegend, dass man alle Wechselwirkungen in irgendeiner Form für eichsymmetrisch hält.

Ich empfehle hier besonders noch einmal dieses Buch:

L.M. Lederman, D.N. Schramm, Vom Quark zum Kosmos, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, 1990

Sehr technische, aber leicht verständliche Darstellung der "Teilchenphysik als Schlüssel zum Universum"; Teilchenbeschleuniger; Einführung ins sogenannte Standardmodell

Auf der Teilchenebene gibt es weitere Symmetrien: Die Parität (P), die Zeitumkehr (T) und die Ladungskonjugation (C). Diese Symmetrien können gebrochen werden. Parität ist Spiegelsymmetrie, d.h. die Natur auf atomarer Ebene unterscheidet nicht zwischen links und rechts. Die P-Symmetrie wird bei der schwachen WW verletzt.

Zwischen Teilchen und Antiteilchen gibt es eine Symmetrie, die man Ladungskonjugation nennt (C-Symmetrie). Auch sie wird von der schwachen WW verletzt. Oft besteht bei Verletzung der P- oder C-Symmetrie bei der schwachen WW dennoch Symmetrie, wenn eine kombinierte Transformation stattfindet, also Paritäts- und Ladungsumkehr, doch auch diese CP-Symmetrie kann verletzt werden.

Bei allen Ereignissen, deren Gleichungen die Zeit in der Form t^2 enthalten, besteht die Zeitumkehrinvarianz (T-Symmetrie), d.h. man kann ein gefilmtes Ereignis vorwärts und rückwärts betrachten, ohne dass festzustellen ist, welcher Vorgang ursprünglich gefilmt wurde; beide Versionen sind möglich. Pauli vermutete, dass es in der Natur eine CPT-Symmetrie gibt. Wenn man alle Teilchen eines Experiments in Antiteilchen verwandelt, das System spiegelt und dann das Vorzeichen der Zeit umkehrt, bleibt das Ergebnis unverändert. Die CPT-Symmetrie ist eng mit der relativistischen Invarianz in Einsteins Gleichungen verbunden. Man ist überzeugt, dass die CPT-Invarianz nicht gebrochen werden kann.

Weitere Erhaltungssätze gelten für die Leptonen- und Baryonenzahl im Kosmos. Man geht davon aus, dass die Gesamtzahl der Leptonen und Baryonen unveränderlich ist. Das bedeutet, dass ein Proton niemals spontan zerfallen kann, also eine unendliche Lebensdauer hat. In aufwendigen Experimenten tief unter der Erde konnte bisher kein Protonenzerfall nachgewiesen werden. Die Lebensdauer des Proton beträgt mehr als 10^{32} Jahre. Wenn das Proton zerfallen könnte, hätten die Quarks nur eine endliche Lebensdauer und könnten sich in Leptonen umwandeln.

Symmetriebrechung: das Higgs-Teilchen

Die elektroschwache Vereinheitlichung beruht auf dem Konzept, Kräfte als Bosonenaustausch zu beschreiben. Der Schlüssel zur Theorie liegt in der Art, wie die Bosonen ihre Masse erhalten. Warum sind die intermediäre Vektorbosonen mehr als hundert mal schwerer als ein Proton, während das Photon masselos ist? Die Symmetrie der schwachen und der elektromagnetischen WW wird durch die Masse der Vektorbosonen gebrochen.

Die Eichsymmetrie ist die entscheidende Grundlage, um alle WW im Kosmos zu erklären. Die Austauscheteilchen (Eichbosonen) müssen masselos sein. Da die W- und Z-Teilchen nicht masselos sind, suchte man nach einer Symmetriebrechung, die den Teilchen zu ihrer Masse verhilft.

Das Higgsfeld wurde eingeführt. Dieses Feld hat weder Richtung noch Spin (ein Skalarfeld) und unterscheidet sich von allen bekannten Feldern. Die WW führt dazu, dass der Raum bei niedrigen Temperaturen nicht leer, sondern mit Higgs-Teilchen angefüllt ist! Die W und Z wechselwirken mit den Higgs-Teilchen und erhalten so ihre Masse. Bei hohen Temperaturen verändert sich die

WW: Der Raum ist nicht mehr mit Higgs-Teilchen angefüllt. Die Massen der W und Z werden kleiner, und die Symmetrie mit dem Photon kommt zum Vorschein.

Im frühen Universum herrschte vor dem kritischen Übergang ein Zustand eines "falschen Vakuums", in dem der Raum selbst eine Energie zu haben scheint. Ursache dafür ist das Higgsfeld. Die kritische Energiegrenze liegt bei 100 GeV, also der Masse der Vektorbosonen.

Das Higgsfeld verleiht auch den Quarks und Leptonen ihre Masse. Doch warum ist das Müon um Größenordnungen schwerer als das Elektron? Warum hat jedes Teilchen eine andere Masse und das Photon keine? Scheinbar haben alle Teilchen gegenüber dem Higgsfeld unterschiedliche Beziehungen. In der elektroschwachen Theorie führt das Higgsfeld zu Symmetrie bei hohen Temperaturen, die bei niedrigen verloren geht.

Die nötige Energie zur Erzeugung eines Higgs-Teilchens konnte bisher nicht erreicht werden. Die Frage nach der Existenz des Higgsfeldes und des Higgs-Teilchens ist von großer Bedeutung für die Urknalltheorie.

Eine Vakuumfluktuation?

Ist das Universum eine Vakuumfluktuation? Es könnte sein, dass das Universum als ganzes nur eine Vakuumfluktuation ist, die, aus einem Feuerball geboren, sich ausdehnt, wieder zu einem Feuerball schrumpft und verschwindet. Wenn die Energiebilanz des Kosmos Null ist, wenn also die Massenenergie und die negative Gravitationsenergie sich aufheben, könnte das Universum sehr lange existieren. Aus Berechnungen ergab sich, dass eine solche Vakuumfluktuation sehr klein wäre, doch dann fand die Kosmologie eine Möglichkeit, wie sich dieses winzige Universum in weniger als einem Augenblick fast zur heutigen Ausdehnung aufblähen konnte.

Inflation und Universum

Nach der neuesten Interpretation der Symmetriebrechung könnte die gebrochene Symmetrie die treibende Kraft gewesen sein, die das als Vakuumfluktuation entstandene Quantenuniversum zur Expansion brachte. In der sehr heißen, sehr dichten Anfangsphase waren alle Wechselwirkungen in einer einzigen symmetrischen Wechselwirkung vereinigt. Bei Abkühlung/Ausdehnung wurde die Symmetrie gebrochen, und die Wechselwirkungen trennten sich. Dabei müsste immense Energien freigesetzt worden sein, wobei sich das Universum exponential ausdehnte.

Dabei wurde ein Gebiet von der Größe eines Protons in viel weniger als einer Sekunde auf eine Größe vergleichbar zur Ausdehnung des heutigen Universums aufgebläht.

Die Inflationstheorie erklärt, warum die Massendichte des Kosmos so nah beim kritischen Wert $\Omega = 1$ liegt. Diese kritische Massendichte ist der entscheidende Punkt in der Frage, ob sich der Kosmos eines Tages wieder zusammenzieht oder ewig weiterwächst.

$\Omega = 1$ würde bedeuten, dass die Ausdehnung irgendwann einfach zum Stillstand kommt. Und das war's dann.

Zusammenfassung.

Das Standardmodell der Physik besagt, dass alle Materie aus 12 Fermionen besteht, die sich in 6 Quark- und 6 Leptonenflavors unterteilen lassen. Diese Materieteilchen unterliegen 4 Wechselwirkungen. Träger dieser Wechselwirkungen sind 12 Bosonen (ohne die Gravitation), das Photon, 3 Vektorbosonen und 8 Gluonen.

Die Wechselwirkungen können bei hohen Temperaturen vereinheitlicht werden. Die elektroschwache Vereinheitlichung benötigt das Higgsfeld. Eine weitere Vereinheitlichung mit der starken Wechselwirkung wird in den "Großen Vereinheitlichungstheorien" versucht. Eine allumfassende Theorie (TOE: Theory of Everything) will auch die Gravitation einbeziehen.

Der Urknall

Mit der Weiterentwicklung der astronomischen Geräte wurde der Einblick in die Zusammenhänge des Kosmos immer klarer. Spektralanalysen des Lichts ferner Galaxien und Vergleiche der Helligkeit erlaubten, das Bild immer mehr auszuweiten. Hubble bewies, dass die Spiralnebel unabhängige Galaxien sind. Die Milchstrasse, unsere eigene Galaxie, erstreckt sich über eine Entfernung von 100.000 Lichtjahren. Fernste Galaxien sind mehr als 10 Milliarden Lichtjahre entfernt. Hubble fand, dass fast alle Galaxien sich von uns fortbewegen (Rotverschiebung).

Die Rotverschiebung beweist die andauernde Ausdehnung des Kosmos. Es ist nicht so, dass die Galaxien auseinander fliegen, sondern der Raum selbst expandiert. Ausgehend von Hubbles Berechnungen ergibt sich aus der Expansion ein Alter des Kosmos im Bereich von 10 bis 25 Mrd. Jahren. In allgemeiner Übereinstimmung geht man von ca. 15 Mrd. Jahren aus.

Die Radioastronomie eröffnete neue Betrachtungsfelder. So wurden starke Licht- und Radioquellen, die Quasare, in größerer Entfernung als die meisten Galaxien entdeckt.

Stationärer Zustand oder Urknall?

Was ist die Ursache der Expansion? Manche gingen von einem stationären Zustand des Universums aus, wobei durch ständig neu erzeugte Materie der Raum zwischen den Galaxien aufgefüllt wird. Damit bliebe die Dichte des Universums unverändert (stationär).

Andere vermuteten einen Urknall, bei dem das Universum aus einem Zustand extrem hoher Dichte und Energie entstand. In diesem Fall nimmt die Dichte mit der Zeit ab.

Gamov stellte fest, dass bei einem Urknall Strahlung entstanden ist, die noch immer vorhanden sein muss, da nichts aus dem Kosmos entkommen kann. Beim stationären Zustand dürfte dagegen keine solche Strahlung vorhanden sein. Er sagte auch, dass beim Urknall durch Kernverschmelzung Elemente entstanden, die noch heute vorhanden sind. Ein Viertel der Masse des Kosmos besteht aus Helium-4, das Helium-3-Isotop wurde nur in Spuren erzeugt. Der He-4-Anteil gilt neben der Hintergrundstrahlung als ein Beweis für die Urknalltheorie.

Die kosmische Hintergrundstrahlung

Penzias und Wilson entdeckten die kosmische Hintergrundstrahlung als universelles Rauschen im Radiobereich. Nach der Urknalltheorie erfüllte das anfänglich heiße und dichte Plasma den Kosmos mit einer Flut aus Strahlung von hoher Energie. Mit Abkühlung und Ausdehnung des Kosmos wurde die Wellenlänge länger. Nach Gamov sollte die Strahlung heute eine Wellenlänge von einigen Millimetern haben, was der Strahlung eines Schwarzkörpers bei 3° K entspricht. Auch die Vorhersagen zur Nukleosynthese wurden bestätigt. Der Anteil von Deuterium, Helium-3 und Lithium-7 entsprach genau den vorhergesagten Werten.

Mitte der 70er Jahre war die Urknalltheorie allgemein anerkannt. Spätere Messungen ergaben, dass die Hintergrundstrahlung bis auf einige Zehntel Prozent homogen und isotrop ist.

Offenes oder geschlossenes Universum?

Was sagt die Deuteriumhäufigkeit über die zukünftige kosmische Entwicklung? Deuterium hat neben dem Proton ein Neutron. Beim Urknall konnte Deuterium nur in Spuren erzeugt werden, aber dieser Anteil ist ein Hinweis auf die anfängliche Dichte. Deuterium hat einen sehr zerbrechlichen Kern. Es kann in Sternen zwar zerstört, aber nicht aufgebaut werden. Alles Deuterium stammt vom Urknall.

Der Anteil von Deuterium zu Wasserstoff ist 1 : 100000. Daraus schloss man, dass die Dichte der Materie zu Beginn der Kernreaktionen nur etwa 10% der kritischen Dichte ausmachte. Die Kritische Dichte ist eine Grenze, die verschiedene Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung des Kosmos trennt.

Liegt die kosmische Dichte über der kritischen Dichte, dann wird die Gravitation die Ausdehnung stoppen und den Kosmos wieder zusammenziehen. Dies wäre ein geschlossenes Universum. Liegt die Dichte unter dem Wert, geht die Expansion immer weiter; das Universum ist offen.

Wenn der Kosmos allein aus der gewöhnlichen Masse (Galaxien) besteht, wird er sich für immer ausdehnen. Offen ist jedoch die Frage nach der dunklen Materie, über die bekannt ist, dass sie existiert, aber nicht, woraus sie besteht. Ein Teil davon sollte aus Protonen und Neutronen bestehen, doch wenn die dunkle Materie, wie man vermutet, mehr als zehnmal soviel Masse wie die leuchtende Materie der Galaxien besitzt, muss sie anders beschaffen sein als die gewöhnliche Materie.

Vermutlich liegt die Dichte des Universums sehr nahe beim Wert der kritischen Dichte.

Offene Fragen.

Ist das Universum offen oder geschlossen?

Woraus besteht die dunkle Materie?

Warum hat das Universum drei räumliche und eine zeitliche Dimension?

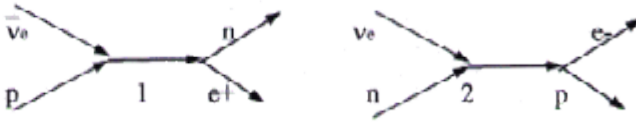
Warum dehnte sich der Raum zum Zeitpunkt des Urknalls aus?

Woher kommt die Materie/Masse im Kosmos?

Wo ist die Antimaterie geblieben?

Woher kommen die Strukturen im Raum aus dem anfangs homogenen Zustand?

Das Standardmodell des Urknalls.

Zeit	Temperatur/ Energie	Ereignisse
10^{-43} s	10^{32} / 10^{19} GeV	frühester Zeitpunkt; Planckzeit. Vereinheitlichung aller WW
10^{-33} s	10^{27} K	Inflationsphase. Gravitation spaltet sich ab. Ursprung aller Materie.
10^{-13} s	10^{16} K	Elektroschwacher Übergang
10^{-6} s	10^{13} K / 1 GeV	Temperatur entspricht dem Inneren des Atomkerns. Die Quarksuppe verbindet sich zu Baryonen und Mesonen.
10^{-2} s	10^{11} K	Strahlung beherrscht das Geschehen. e^-/e^+ -Paare bilden sich und zerstrahlen. Protonen und Neutronen sind ein verschwindender Bestandteil der Ursuppe. Auf ein Proton kommt 1 Milliarde Photonen.
		
		Permanente Zusammenstöße und WW, bis die Temperatur auf 3×10^{10} K sinkt. Solange ist die Zahl der Protonen und Neutronen etwa gleich. $M_n = M_p + 1,3$ MeV
10^{-1} s	3×10^{10} K	Nun spielt der Masseunterschied von p und n eine Rolle, denn die Energie der Teilchen reicht noch aus, um n in p zu verwandeln (2), aber nicht mehr umgekehrt (1). Dann gibt es 38 % Neutronen und 62 % Protonen.
1 s	10^{10} K / 1 MeV	Neutrinos wechselwirken nicht mehr mit dem Rest des Kosmos. 24 % Neutronen. Photonen können immer seltener e^-/e^+ -Paare bilden. e^- und e^+ zerstrahlen stärker, als neue entstehen.
14 s	3×10^9 K	Es entstehen keine e^-/e^+ -Paare mehr. 17 % Neutronen.
3 min	10^9 K	Deuterium, He-3, He-4 und Lithium-7 -Kerne werden gebildet. Neutronen: 14 %, alle im gebundenen Zustand.
10.000 - 100.000 Jahre	10^4 K / 1 eV	Plasma aus Kernen und Elektronen bildet Atome. Photonen bewegen sich frei durch den Raum (Hintergrundstrahlung). Die Ereignisse im Kosmos werden von der Materie und nicht mehr von der Strahlung bestimmt. Die Materie beginnt, sich unter der Gravitation zu Sternen und Galaxien zusammenzuziehen.

Ablauf nach dem Standardmodell

Kosmische Perspektiven

Wie wird das enden?

Mein intensives Lesen über all die Sachverhalte, die ich in "Einstein sagt" angesprochen habe, endete etwa 2001, einerseits wegen Zeitmangels, aber vor allem aus Frustration. Die Erkenntnisse, die ich mit jedem neu gelesenen Buch dazugewann, nahmen proportional ab. Zuletzt las ich immer neuere Ergänzungen zu Theorien und immer abstrusere Konstruktionen, die mir auf meiner Suche nach INHALT nicht mehr weiterhalfen. Eigentlich trieb mich in der ganzen "Studienzeit" nicht so sehr der Wunsch nach wissenschaftlicher Erkenntnis, sondern vielmehr die Suche nach irgendeinem tieferen geistigen Hintergrund unserer fragwürdigen Existenz.

Seit mir mein kindlicher Glaube abhanden gekommen ist, habe ich in der Welt nie mehr eine geistige Heimat gefunden. Aber ich habe vieles gelesen, erlebt und erfahren: ein atemberaubend schönes und widerwärtiges abstraktes Mosaik aus leuchtenden Farben und verfaulten Gerüchen, dessen tieferer Sinn nicht zu greifen ist.

Serben foltern Bosnier, Löwen fressen Antilopen, Menschen rennen hinter Götzen und Sekten her und FEIERN, bis die Schwarte kracht. Der 11. September 2001. Sterne explodieren als Supernova oder verdämmern zu einem kalten Stück Eisen. Wahrscheinlich wird alles immer weiter auseinander treiben, die Lichter gehen aus, ab und zu kommt mal ein einsames Photon vorbei.

Ab und zu kommen auch mal die Zeugen Jehovas vorbei. Ich spreche mit ihnen, weil sie freundlich sind und meinen Respekt haben, aber ... Vielleicht ist auch alles ganz anders, und ich sehe es nur nicht. Was soll's. Einstweilen begnüge ich mich damit, wie Kwai-Chang Cane aus der Serie "Kung-Fu" oder der Lehrer aus dem "Club der toten Dichter", den Tag zu nutzen und nicht zu viel nachzudenken.

Hier folgt noch ein kurzer Abriss über die kosmischen Perspektiven und die neusten Erkenntnisse und Theorien, von denen ich gelesen habe.

Im Gegensatz zu all den schwer verständlichen Zusammenhängen, die ich bisher zu schildern versuchte, hängt die Frage nach den Zukunftsaussichten des Universums nur an diesem Ω (Omega). Ich finde, der Name ist genial gewählt. Die Frage: Ist Ω kleiner, größer oder gleich eins.

Sollte sich wirklich genug dunkle Materie finden, dass die Masse aller Teilchen die kritische Masse übersteigt, ($\Omega > 1$), so wird die Gravitation das Universum erst sehr langsam, am Schluss aber mit atemberaubender Geschwindigkeit wieder zusammenziehen, wie es in dem Buch von Paul Davies, Die letzten drei Minuten, eindrucksvoll geschildert wird. Ob dann alles in einem Punkt unendlicher Energie und Dichte verschwindet? Oder wieder neu anfängt?

Sollte der nicht eben unwahrscheinliche Grenzfall zutreffen, dass $\Omega = 1$ ist, zumal der Wert auf jeden Fall recht nahe bei 1 liegt, so wird gar nicht viel geschehen: nach sehr langer Zeit wird die Expansion des Kosmos durch die Gravitation abgebremst, und alles kommt zum Stillstand. Das Ergebnis sieht ähnlich aus wie ...

Wenn $\Omega < 1$ ist, wenn also die Gravitation nicht ausreicht, um die Expansion zu stoppen, dann geschieht das Erbärmlichste, was ich mir vorstellen kann. Wir werden es nicht erleben, denn es dauert 10^n Jahre: Der Kosmos dehnt sich immer weiter aus. Das allein wäre nicht so schlimm, aber irgendwann wird das ganze Material verheizt sein; die Galaxien sind so weit auseinander getrieben, dass sie nicht mehr zu sehen sind, die Sterne haben ihren Kernbrennstoff verbraucht, explodieren oder verdämmern, irgendwann gibt es vielleicht mal eine kleine Explosion, aber nie-

mand wird es sehen. Alles wird kalt, sehr kalt. Zum Schluss werden auch die Protonen zerfallen, und ein Rest von Strahlung ...

Um ehrlich zu sein, ich habe die genauen Zusammenhänge vergessen oder verdrängt, und ich sehe auch nicht mehr in den Büchern nach. Jeder, dem ich bisher davon berichtete, sagte nur:

"Was juckt dich das? Wir erleben es eh nicht!"

Aber ich hätte ein besseres Gefühl, wenn ich wüsste, da ist dieser Garten, in dem sich alle vertragen und keiner krank wird, und ich käme da rein und dürfte in der "Cozmic Band" mitspielen. Aber das ist eine andere Geschichte.

Neuere Fragen und Theorien

Zum Schluss reiche ich noch einige neuere Fragen und Theorien nach. Sie betreffen vor allem "die erste Sekunde" und die Inflation.

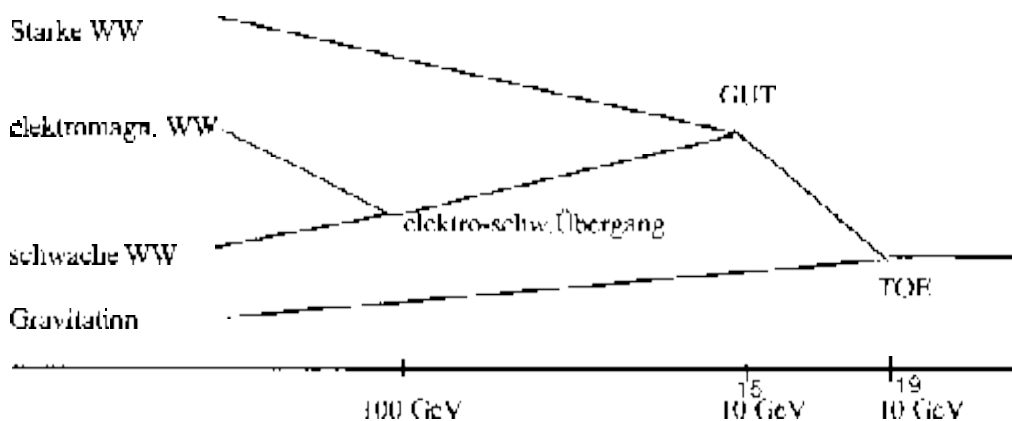
April 2005: Ich lese die Bücher eben wieder. Habe nichts Neues erfahren, aber das Alte wieder etwas besser verstanden. Papst Johannes Paul II. starb und wurde betrauert; Papst Benedikt XVI. folgt ihm nach. Viele Stunden unbeschreiblicher Bilder im TV; millionenfache Liebe und Verehrung. Diese beiden wunderbaren Menschen widerlegen mir viel von der genannten Sinnlosigkeit.

Februar 2008: Mittlerweile sehe ich das alles nicht mehr so düster. Selbsterhaltung? Eine Erkenntnis? Mir wird immer deutlicher, dass diese empfundene Sinnlosigkeit des Lebens und des ganzen Kosmos eine der tödlichsten Krankheiten unserer Gegenwart ist. Ich bin weit davon entfernt, jemanden bekehren zu wollen, aber in genau einem wichtigen Punkt klärt sich der Nebel:

Ich kann mir immer weniger vorstellen, dass alles, was existiert, durch blinden Zufall aus dem Nichts entstanden sein soll und wieder dorthin zurückkehren muss! Diese komplexe Welt setzt meiner Ansicht nach einen Schöpfer voraus.

Autos sind auch nicht zufällig von selbst entstanden.

Neuere Theorien zur ersten Sekunde



Vereinheitlichung der Wechselwirkungen (WW)

Die Vereinigung von Mikro- und Makrokosmos. Die große Vereinheitlichung

Die fundamentale mathematische Eigenschaft zur Vereinheitlichung der Wechselwirkungen und zur Weiterentwicklung des Standardmodells ist die **Eichsymmetrie**. Eichsymmetrie besagt, dass Felder zur Beschreibung der WW geeicht werden. Die Austauschbosonen einer eichsymmetrischen Kraft sind masselos. Die Bosonen der schwachen WW brechen durch ihre Massen die Symmetrie bei niedrigen Energien; bei hohen Energien über 100 GeV (beim Urknall oder in Beschleunigern) jedoch nicht.

Bei 10^{15} GeV vereinigen sich die starke und die elektroschwache WW (GUT – Great Unified Theories); bei 10^{19} GeV könnte in einer allumfassenden Theorie (TOE – Theory of Everything) auch die Gravitation einbezogen sein. Derartige Energien sind in Beschleunigern nicht zu erreichen, aber das Universum durchlief eine Anfangsphase mit solcher Energiedichte.

Was geschieht bei den Vereinheitlichungsenergien mit den Elementarteilchen?

Quarks, Leptonen und Bosonen scheinen wie punktförmige Teilchen zu wechselwirken. Erst die vier WW geben der Materie Form. Wenn die vier WW vereinheitlicht sind, kann Materie keinerlei Struktur haben.

Die Verringerung der Zahl der Kräfte erfordert mehr Elementarteilchen. Man kam auf die Idee, dass auch Quarks aus kleineren Teilchen bestehen könnten und nannte sie Präonen. Nach diesem Modell wird jedes Quark aus zwei Präonen gebildet, eines für die Farbladung und eins für den Flavor.

Alles konzentriert sich auf die Frage: Gibt es eine einzige Kraft, die sämtliche Teilchen und ihre Wechselwirkungen erklärt? – Die Suche nach der Weltformel. Eine allumfassende Theorie müsste die Umwandlung von Fermionen in Bosonen einbeziehen. Die theoretische Lösung heißt Supersymmetrie (SUSY). Dabei wird eine neue Art von Materie postuliert. Jedem Fermion wird ein Boson als Partner zugewiesen. Die Zahl der Teilchen verdoppelt sich. Bisher konnte jedoch noch kein derartiges Teilchen nachgewiesen werden.

Etliche Fragen kann das Standardmodell nicht beantworten:

Der Ursprung der Materie

Die leichten Elemente entstanden nach dem Urknall durch Nukleosynthese. Aus der Häufigkeit dieser Elemente lässt sich die kosmische Massendichte der "gewöhnlichen" Materie abschätzen, ebenso anhand der Galaxiebewegungen. Nicht gelöst ist die Frage nach der dunklen Materie.

Die Suche nach Antimaterie

Wenn ein Teilchen erzeugt wird, entsteht auch sein Antiteilchen. Doch wo ist die Antimaterie? Offensichtlich bestehen alle Galaxien aus Materie, denn nirgends im Kosmos stellt man Energien aus Paarvernichtungen fest. Woher kommt diese Asymmetrie?

Die Nichterhaltung der Baryonen

Die fehlende Antimaterie kann mit der GUT erklärt werden. Bei hinreichend hohen Temperaturen, wenn die drei WW vereinigt sind, ist die Zahl der Baryonen nicht mehr konstant, und Quarks können sich in Leptonen umwandeln. Dann zerfallen auch die Protonen. Bei ungebrochener Symmetrie muss es Austauschteilchen gegeben haben, die Quarks und Leptonen ineinander umwandeln. Man vermutet X- und Y-Bosonen mit Massen von 10^{15} GeV, die von einem Higgsfeld

nach 10^{-35} Sekunden erzeugt wurden. Unter heutigen Bedingungen spielen solche Prozesse keine Rolle, und das Proton hat nach Voraussagen der GUT eine Lebensdauer von 10^{32} Jahren.

Unter Berücksichtigung der gebrochenen CP-Symmetrie der schwachen WW kann in der Anfangsphase ein geringer Überschuss von Teilchen gegenüber Antiteilchen entstanden sein. Bei genügend hohen Temperaturen zerfallen die X-Bosonen in Quarks und Antiquarks in gleichem Maß wie umgekehrt. Bei Abkühlung und Ausdehnung des Kosmos stellt sich ein Ungleichgewicht ein, weil Quarks sich dann nicht mehr in X-Bosonen verwandeln können. Dabei entstand ein minimaler Überschuss an Quarks gegenüber Antiquarks.

Nach 10^{-35} Sekunden (10^{28} °K) war die Zahl der Quarks etwa so hoch wie die der Photonen. Die Asymmetrie blieb bestehen. Die (Anti-)Quarks verbanden sich zu (Anti-) Baryonen. Durch Paarvernichtung zerstrahlten alle zu Photonen, nur der winzige Überschuss an Quarks fand keinen Zerstrahlungspartner und blieb erhalten. Bei 10^{12} °K konnten sich die Photonen nicht mehr in Baryonen verwandeln. Ein Proton oder Neutron unter zehn Milliarden Photonen blieb übrig, woraus die gesamte Materie im Kosmos entstand. Ohne diese Asymmetrie bestünde der Kosmos nur aus Strahlung.

Fragen und die Antwort: Inflation

Die Anfangsbedingungen im Kosmos

Die vereinheitlichten Theorien können das Rätsel vom Ursprung der Materie lösen, aber es gibt weitere Fragen: Wie konnte sich im Kosmos eine großräumige Homogenität entwickeln, während sich zugleich Materieansammlungen bildeten? Wie konnte der Kosmos sein hohes Alter erreichen? Gibt es magnetische Monopole?

Eine Lösung bietet die Theorie einer kosmischen Inflation, die dafür sorgte, dass sich das anfängliche Universum sehr viel schneller ausdehnte als danach.

Das Problem der großräumige Homogenität (Horizontproblem)

Die 3°K-Hintergrundstrahlung ist homogen (gleichförmig) und isotrop; sie hat aus allen Richtungen des Himmels die gleiche Intensität. Die Abweichungen betragen weniger als 0,01 %. Dies trifft auch für Regionen zu, die so weit voneinander entfernt sind, dass das Licht die Distanz seit dem Urknall nicht zurückgelegt haben kann.

Wie kann die Strahlung so gleich sein, wenn zwischen den Punkten kein Signal übermittelt werden konnte? In der Urknallkosmologie wird das Universum als homogen und isotrop vorausgesetzt, doch wie kam es zu diesem bemerkenswerten Zustand?

Das Problem der inhomogenen Massenverteilung

Warum ist die Materie im Kosmos ungleichmäßig verteilt? Während im großen Maßstab der Kosmos völlig homogen erscheint, gibt es im "kleinen" Maßstab Materiekonzentrationen in Form von Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen. Die Materie muss sich also abgesondert und zusammengezogen haben. Die Erklärung sind Dichtefluktuationen, wobei durch kleine Abweichungen Bereich höherer Dichte entstanden und durch die Gravitation zu Galaxien anwuchsen. Doch woher kommen diese Dichtefluktuationen?

Das Problem der Rotation

Wieso rotiert das Universum nicht? Warum hat das Universum kein Zentrum, sondern nur gleichwertige Punkte?

Das Problem der Monopole

Die GUT erklären die überschüssigen Quarks als den Ursprung der Materie, doch es gibt einen Schönheitsfehler: Die GUT fordern die Existenz von magnetischen Monopolen. Solche Monopole sind noch nie beobachtet worden. Nach der Theorie müssten ebenso viele Monopole wie Nukleonen entstanden sein. Sie müssten eine magnetische Ladung und eine Masse von 10^{17} GeV haben. Warum gibt es sie dann nicht?

Das Problem des Alters und der Dichte

Das Alter des Kosmos wird zwischen zehn und zwanzig Milliarden Jahre angenommen. Nach der Standardtheorie des Urknalls ist die Dichte mit einer dynamischen Zeitskala gekoppelt. Die heutige Dichte hat sich in der angegebenen Zeit entwickelt.

Die kritische Dichte Ω liegt nahe bei 1. Im ersten Moment des Universums muss sie noch viel näher bei 1 gelegen haben, denn nach ca. 15 Mrd. Jahren kann man noch immer nicht erkennen, ob der Wert größer oder kleiner als 1 ist.

Wäre der ursprüngliche Ω -Wert bei 0,5 oder bei 2 gelegen, so wäre das Universum längst zusammengestürzt oder ins Unendliche expandiert.

Bei 10^{-43} s, der kleinsten vorstellbaren Zeiteinheit (Planckzeit, Zeitquant) wäre die Veränderung von Ω in solch kleinen Schritten vorangegangen, dass die Lebensdauer des Kosmos in beiden Fällen sehr kurz gewesen wäre. Nur bei einem Wert in der Nähe von $\Omega = 1$ ist eine lange Entwicklung möglich.

10^{15} Jahre ist um 60 Zehnerpotenzen (10^{60}) größer als 10^{-43} s. Wäre Ω anfangs in der 60. Dezimalstelle von 1 abgewichen, würde erst jetzt eine Differenz erkennbar. Auch aufgrund astronomischer Beobachtungen muss Ω im Bereich zwischen 0,1 und 2 liegen.

Das Universum ist bis heute erhalten geblieben, weil die expansive Kraft, die Ω gegen Null gehen lässt, und die Gravitationskraft, die Ω ins Unendliche wachsen lässt, sich exakt die Waage halten. $\Omega = 1$ entspricht einem Universum mit euklidischer Geometrie und einer Raumzeit mit einer verschwindenden Krümmung. Doch warum lag Ω in der Frühphase so nah bei 1?

Die Lösung: Inflation

Die beschriebenen Probleme hängen mit den Anfangsbedingungen des Universums zusammen. Mit dem von A. Guth 1980 entwickelten Konzept einer kosmischen Inflation lassen sich die Probleme lösen. Inflation bedeutet, dass in einer frühen Phase die Expansion extrem schnell vor sich ging. Die Inflation fand zur Zeit der GUT-Epoche statt, als die drei WW vereinheitlicht waren.

Die Expansionsgeschwindigkeit hängt mit der Energiedichte von Masse und Strahlung zusammen. Aus $E = mc^2$ ergibt sich, dass je höher die Energiedichte ist, umso größer auch die Expansionsrate wird. Nach dem Standardmodell nahm die Energiedichte und damit die Expansionsrate mit der Zeit ab, weil sich die gleiche Energie über einen immer größeren Raum verteilen konnte. Bliebe die Dichte konstant, wäre auch die Expansion konstant, d.h. die Energiedichte müsste trotz wachsender Entfernungen gleich bleiben. Dies wäre möglich, wenn der Raum selbst eine hohe Energiedichte enthielte. Solch ein energiehaltiger Raum ist das Higgsfeld.

Das Universum expandiert aus einem Zustand völliger Symmetrie, bis es eine kritische Temperatur erreicht und ein Higgsfeld in Erscheinung tritt. Dieses Feld verleiht dem Raum eine Energiedichte, bis die Trägerteilchen der vereinheitlichten Grundkräfte eine Masse bekommen und die Eichsymmetrie gebrochen wird. Nun sinkt die Energiedichte des Raumes – die Vakuumenergie – gegen null und die Expansion verläuft "auf normale Weise" weiter. Die Voraussetzung für eine kosmische Inflation ist ein "falsches Vakuum", das zwar keine Materie, aber eine von Null abweichende Energiedichte enthält.

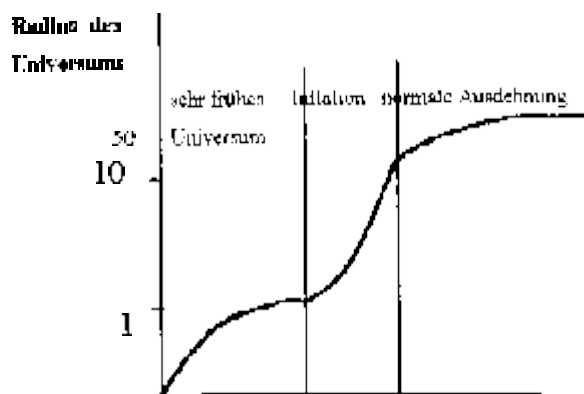
Inflation & Theorien

In der Frühphase bis 10^{-35} s war die Strahlung so hoch, dass sich die zusätzliche Vakuumenergie kaum auf die Expansion auswirkte. Die Energiedichte nahm ab. Durch die "Abkühlung" wurde eine kritische Temperatur erreicht, bei der die Vakuumenergie nicht mehr vernachlässigbar war. Diese Energie ermöglichte die kosmische Inflation bis zur Symmetriebrechung, die das falsche Vakuum in ein klassisches ohne Energiedichte überführte.

Dabei wurden enorme Energien frei. Es konnten Teilchen entstehen; die starke und die elektroschwache WW trennten sich. Die Expansion verlangsamte sich.

Wie hängt die Inflation mit den Anfangsbedingungen zusammen? Wie lassen sich mit diesem Konzept die genannten Probleme lösen?

Die vakuumgetriebene Inflation führte in extrem kurzer Zeit zu einer gewaltigen Größenzunahme des Kosmos. Die Ausdehnung nahm um mehr als 50 Zehnerpotenzen zu. Die Inflation setzte ein, als der Kosmos 10^{-35} s alt war. Alle 10^{-35} s verdoppelte sich die Größe, bis zum Ende der Inflationsphase bei 10^{-32} s etwa tausend mal. Das bedeutet einen Vergrößerungsfaktor von 10^{50} in der Zeit von 10^{-35} s bis 10^{-32} s !!



Eine derartige Expansion kann die Probleme der Anfangsbedingungen lösen. Die großräumige Homogenität und die Konstanz der Hintergrundstrahlung lassen sich erklären. Der Raum vor der Inflation war so klein, dass alles darin in kausaler Verbindung war. Der Radius betrug nur 10^{-35} Lichtsekunden. Aus diesem winzigen Raum ist das gesamte Universum hervorgegangen.

Der Radius des Universums nahm während der Inflationsphase in Sekundenbruchteilen exponential zu.

Während dieser Phase blieb die Energiedichte trotz extremer Ausbreitung durch das Higgsfeld konstant.

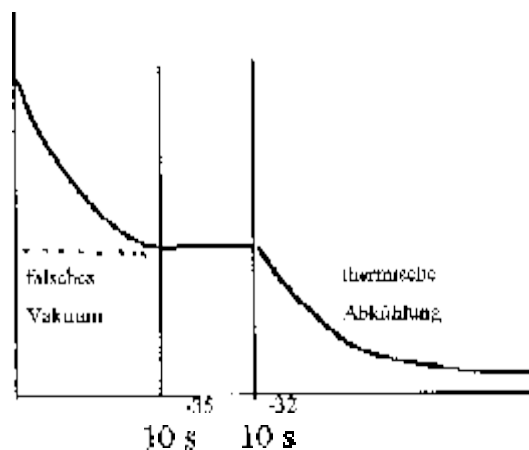
Das Altersproblem wurde gelöst, weil die Inflation den Raum derart aufblähte, dass jede lokale Umgebung mit gekrümmter Geometrie nach tausendfacher Verdopplung flach wird. Ω nimmt den

Wert 1 an, der ein Alter von 15 Mrd. Jahren zulässt. Auch das Problem der Rotation ist gelöst, denn die Raumkrümmung bestimmt die eventuelle Rotation.

Für das Rätsel der Monopole gibt es diese Erklärung: Vor der Inflation wurde ein Monopol pro Horizontvolumen gebildet, d.h. ein Monopol im kausal zusammenhängenden Volumen des Universums, also überhaupt nur ein Monopol. Nach dem Standardmodell käme man auf 10^{80} Monopole, was der Zahl der Protonen entspricht. Doch nach der Inflationstheorie ist der Kosmos aus einem einzigen Horizontvolumen hervorgegangen, weshalb auch nur ein Monopol zu erwarten ist.

Was geschah mit den Baryonen? Die Baryonen wurden erst nach der Inflationsphase gebildet. Voraussetzung für das Inflationsmodell war die Erkenntnis, dass die Baryonen aus einem Ungleichgewicht der Kräfte entstanden, das die Umwandlung der Quarks und Leptonen beherrscht.

Energieerhalt des Universums



Die Inflation erklärt die Entstehung des Universums mit Naturgesetzen ohne vorgegebene Annahmen, doch bleiben noch Fragen offen: Wie kamen die Dichtefluktuationen zustande, die zur Bildung der Galaxien führte? Wie wurde die Inflation gestoppt? Wie kann der Phasenübergang zur gebrochenen Symmetrie stattgefunden haben?

Solange das Higgsfeld im Zustand des falschen Vakuums bleibt, führt die ungeheure Energie zur Inflation. Mit Hilfe der Unschärferelation konnte das Higgsfeld die Energiebarriere durchtunneln und in den echten Vakuumzustand übergehen. Dadurch hörte die Inflation auf, und die Feldenergie wurde zur Bildung zahlloser Teilchenpaare verwendet. So könnte die gesamte Materie aus dem Inflationsvorgang entstanden sein.

Ein vollständiger Phasenübergang kann nur stattfinden, wenn sich die Raumbereiche berühren. Doch die Inflation treibt den Raum schneller auseinander, als die Symmetrie gebrochen wird. Hier könnte eine Erklärung für die Inhomogenitäten (Galaxien) liegen. Man spricht in Analogie zum Wasser von Blasen. Für einen vollständigen Phasenübergang müssten alle Blasen zusammenkommen.

Blasenuniversen

Nach einer neuen Theorie könnte sich der Phasenübergang langsam und gleichmäßig vollzogen haben. Das ganze Universum könnte aus einer einzigen Blase bestehen, was enorme Konsequenzen für die Existenz anderer "Blasenuniversen" ohne Verbindung zueinander mit sich brächte. Im "Raum dazwischen", der unüberbrückbar wäre, wären alle Kräfte vereinheitlicht. Nichts wäre stabil.

In der Theorie der Blasenuniversen gibt es allerdings keine befriedigende Erklärung für die Entstehung der Galaxien. Keine anfänglichen Inhomogenitäten können die Inflationsphase überstanden haben. Also liegt die Ursache der Massenkonzentration innerhalb einer Blase. Eine Erklärung auf der Basis zufälliger Quantenfluktuationen in der GUT- Theorie, als der Kosmos kleiner als ein Tennisball war, führt nicht zu Galaxien, sondern zu Schwarzen Löchern. Allerdings lassen sich Energiekonzentrationen in fadenartigen Strukturen (Strings) als Überreste des GUT-Phasenübergangs ableiten, kleine "Röhren", die ein hochenergetisches Vakuum, eingebettet in normales Vakuum, einschließen. Diese Strings könnten die Keime für die Entstehung der Galaxien gewesen sein. Die astronomischen Beobachtungen zeigen außerordentlich große Strukturen im Raum – Galaxienhaufen und Leerräume, die schwer durch zufällige Dichtefluktuationen zu erklären sind.

Inflation und Supersymmetrie

Die das Geschehen korrekt beschreibende GUT könnte durch supersymmetrische Modelle der großen Vereinheitlichung gefunden werden. Die SUSY kann ein Weg der Vereinheitlichung der GUT mit der Gravitation sein, aber um den Preis eines neuen Teilchenzoos mit enormen Massen. Wenn die Inflationstheorie zutrifft, ist Ω mit großer Genauigkeit = 1. Da die gesamte Menge der Baryonen nur für $\Omega = 0,1$ bis $0,2$ ausreicht, müsste die Materie im wesentlichen nichtbaryonisch sein – und vielleicht vorwiegend aus SUSY-Teilchen bestehen, die dunkle Materie? Auch die Neutrinos könnten, falls mindestens einer der drei Neutrinoarten eine Masse von ca. 20 eV besitzt, die dunkle Materie ausmachen. Wenn in einem der neuen Beschleuniger eine Neutrinomasse festgestellt werden könnte, wäre erstmals die ferne Zukunft des Kosmos bekannt.

Protonenzerfall

Die GUT sagen den Protonenzerfall voraus, wobei das Proton in die schwersten Quarks übergeht, die seine Masse zulässt. Bisher konnte aber auch mit 10^{32} Protonen während Jahren der Experimente kein Zerfall registriert werden. Die Entscheidung über die GUT-Voraussage ist noch nicht gefallen.

Gravitation. Schöpfung. Zeit. Singularitäten.

Gravitation und allumfassende Theorie (TOE)

Die TOE sagt eine Vereinheitlichung der Gravitation mit den anderen WW für die Zeit vor der GUT-Epoche voraus. Alle Kräfte waren eins und quantisiert, als nach 10^{-43} s bei 10^{32} °K eine Dichte von 10^{92} g/cm³ vorlag. Jeder Punkt wurde auf der Stelle zu einem Schwarzen Loch, das sofort wieder explodierte. Da jedes Schwarze Loch Raumzeitbereiche innerhalb und außerhalb seines Horizonts trennt, entstand eine verwickelte Raumzeitstruktur. Auch die Raumzeit war quantisiert. An dieser Stelle stößt die physikalische Erklärung an eine vielleicht unüberwindliche Grenze: die Planckzeit, das Zeitquant, das der Quantenunschärfe unterliegt, ist nicht untersuchbar. Jede "Zeit davor" hat keinen Sinn. Anfangsbedingungen sind nicht auszumachen, wenn alle Wechselwirkungen vereint sind und alle Reaktionen in zwei Richtungen ablaufen.

Vielleicht ist die Theorie der Superstrings, dass die Elemente der Raumzeit keine Punkte, sondern "Schleifen" (Strings) sind, ein Schlüssel zur TOE.

Der Augenblick der Schöpfung

Im Augenblick der Schöpfung war das ganze Universum innerhalb der Abmessungen einer Planckschen Länge untergebracht. Die Frage, wie das Universum entstanden ist, lässt sich auf das

Olberssche Paradoxon reduzieren: Warum enthält ein kaltes, dunkles Universum heiße, leuchtende Sterne?

Entropie

In allen physikalischen Systemen fließt Wärme vom heißen zum kälteren Gegenstand. Dabei wächst die Unordnung, die Entropie. Der stabile Endzustand ist durch eine konstante Temperatur und beliebige Bewegungen aller Teilchen gekennzeichnet. Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik muss die Entropie ständig zunehmen. Die Entropie ist ein Maß für die Verfügbarkeit von Wärme zur Verrichtung von Arbeit. Wenn die Temperatur überall gleich ist, kann keine Wärme fließen, keine Arbeit verrichtet werden.

Das Universum befindet sich in einem Zustand niedriger Entropie. Wie ist das Universum so eingerichtet worden, dass es so wenig Entropie aufweist, dass nach 15 Mrd. Jahren noch immer Sterne zu sehen sind?

Der Ursprung der Zeit

Boltzmann, von dem die Sätze der Thermodynamik stammen, entwickelte eine statistische Mechanik zur Beschreibung des Verhaltens von Gasen. Bei statistischer Betrachtung ist auch das Unwahrscheinliche möglich, allerdings mit verschwindend geringer Wahrscheinlichkeit. Gas könnte sich in die Ecken eines Raumes zurückziehen; ein Eiswürfel im Wasser könnte aus der Umgebungsluft Wärme abziehen und das Wasser zum Sieden bringen. Es ist extrem unwahrscheinlich, doch in einem unendlich großen Universum können alle Möglichkeiten unendlich oft geschehen.

Boltzmann verband diesen Ansatz mit der geringen Entropie des Kosmos und meinte, der "wirkliche" Zustand müsse der eines thermodynamischen Gleichgewichts sein, in dem Zeit keine Bedeutung habe, da sich nichts verändert. Es gäbe aber statistische Prozesse, die den Zustand geringer Entropie schufen, und das ganze Universum könnte eine statistische Schwankung aus dem Gleichgewichtszustand sein.

Paul Davies meinte, dass die Zeit erst durch die Inflation ihre Bedeutung bekam. Das Urchaos stellt einen Zustand hoher Entropie dar, doch nach der Inflation herrscht gravitationsbedingt eine niedrige Entropie. Wärme kann fließen, und Zeit läuft ab, indem sich das Universum verändert.

Das Quantenuniversum

Boltzmanns Bild des Universums war eigentlich ein stationäres Universum. Fred Hoyle entwickelte sein "Steady-State-Modell" so weiter, dass es dem späteren Inflationsmodell sehr nahe kam. Vielleicht entstand das Universum nicht aus einer Singularität unendlich hoher Dichte und Energie, sondern als Quantenschwankung aus dem Nichts. Tryon sagte, das Universum sei eine Vakuumschwankung. Basis dafür sei der Gedanke, dass in einem geschlossenen Universum die Energiebilanz null sein muss, indem die negative Gravitationsenergie die gesamte Massenenergie aufhebt.

Nach der Unschärferelation kann alles, was die Energie null hat, beliebig lange existieren. Wenn die Energie null ist, braucht nicht einmal Energie vom Vakuum geborgt werden. Eigentlich müsste aber eine solche Vakuumschwankung unter dem Einfluss der Gravitation schnell zu einer Singularität zusammensacken.

Das Inflationsmodell brachte auch hier neuen Auftrieb. Man braucht nur einen winzigen Bereich geschlossener Raumzeit und Energie, der dann durch die Inflation aufgebläht wird. Am Ende wird

die Gravitation siegen, und alles wird in der Singularität verschwinden. Die Quantenunschärfe kann den "Schöpfungsaugenblick" zumindest am besten erklären.

Stephen Hawking dagegen geht noch weiter und erklärt, dass das Universum vielleicht selbst im Schöpfungsaugenblick keine Grenze hatte. Zur Beschreibung des ganzen Kosmos dient ihm eine quantenmechanische Wellenfunktion.

Singularitäten

Singularitäten (S.) sind die Grundlage von Stephen Hawkings Beiträgen zur Wissenschaft. Singularitäten sind Punkte, in denen Materie sowie Raum und Zeit entweder ausgelöscht sind oder – wie im Urknall – erschaffen werden.

Die Standardgleichungen der Relativitätstheorie sagen die Existenz von S. voraus. Lange Zeit hielt man S. für unmöglich, so dass bei Annäherung an eine S. eine Art "Rückprall" erfolgen sollte oder ein Stillstand eintritt. Andernfalls versagte Einsteins Theorie bei sehr hohen Dichten.

Hawking und Penrose bewiesen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie ohne Berücksichtigung von Quanteneffekten eine Singularität bei der Entstehung des Universums unbedingt fordert, also einen Punkt, an dem die Zeit begann. Wenn in der Natur keine S. vorkommen, kann man die Allgemeine Relativitätstheorie nur durch Einbeziehung einer Quantentheorie der Gravitation verbessern.

Später sagte Hawking, dass Schwarze Löcher bei Betrachtung der Quanteneffekte verdampfen oder explodieren müssten.

Hawkings Universum

Die Allgemeine Relativitätstheorie fordert im Augenblick der Schöpfung eine Singularität, doch wie alle anderen Theorien sagt sie nichts über den eigentlichen Schöpfungsmoment. Hawking entwickelte in Ansätzen eine Verbindung von Allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Doch wie kann die Kopenhagener Deutung auf das ganze Universum angewandt werden? Man kann sich das Universum als quantenmechanische Wellenfunktion vorstellen (?), doch wer sollte die Wellenfunktion durch Beobachtung kollabieren lassen? Laut Hawking kann man nur über die "Viele-Welten-Interpretation" zu eine Quantenbeschreibung des Universums kommen.

Er wählte eine Reihe von Anfangsbedingungen und berechnete eine einfache Version dieses "Mini-Superraums", das nur ein Felderpaar für Gravitation und Materie enthält. Die Unschärferelation führt dazu, dass der Ursprung der Zeit über die Planckzeit "verschmiert" ist; es gibt also keinen genauen Schöpfungsmoment. Hawking kam zu einer Anzahl möglicher Versionen ("Summe der Geschichten", wobei die meisten möglichen Geschichten nicht stattfinden können), die alle gemeinsam haben: Jede dehnt sich bis zu einer bestimmten Größe aus, zieht sich dann wieder bis zu einem Zustand des Universums zur Planckzeit zusammen, um danach wieder zu expandieren, und zwar immer gleich! Nebenan im Superraum gibt es ähnliche Universen, die wir nie erkennen können.

Es gibt keine Singularitäten mehr und auch keinen Schöpfungsmoment. In der Kontraktionsphase verringert sich die Entropie. Wenn das Universum klein ist, muss die Ordnung groß sein. In der Planckzeit ist kein Platz für Unordnung.

Letzte Neuigkeiten

Neues von der Inflation

1992 lieferte der Satellit COBE Beweise für minimale Schwankungen der Hintergrundstrahlung, sogenannte Ripples, die sich exakt mit der Theorie von Urknall und Inflation decken. Die Schwankungen entsprechen Dichteschwankungen aus der Zeit, als Materie und Strahlung sich trennten, und sind genauso stark, dass sich daraus die heutigen Strukturen entwickeln konnten.

Was war vor der Singularität?

Das Universum hat sich nach Lindes "chaotischer Inflation" aus einer Quantenschwankung in irgendeinem schon bestehenden Raumzeitbereich entwickelt. Das würde bedeuten, dass aus unserem Universum weitere Universen entsprossen könnten!

Ω

Neueste Messungen ergaben für Ω niedrigere Werte (nur 20% – 30%) als von der Inflationstheorie angenommen. Man behilft sich mit der Vorstellung einer zweimaligen Inflation.