

BG/BRG Amstetten

Spezialgebiet

---

# Elementarteilchen

---

*Autor:*

Matthias Leonhartsberger

*Betreuer:*

Dr. Josef Lechner

13. Mai 2014



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Standardmodell</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Quarks (Mesonen und Baryonen)</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Leptonen</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Fermionen und Bosonen</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Grundkräfte und Elementarteilchen</b>	<b>16</b>

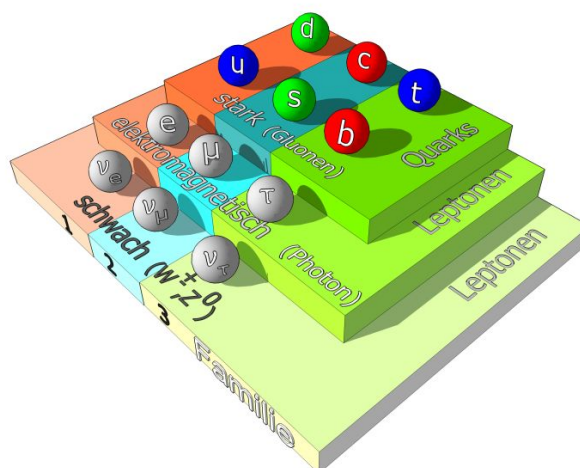


# 1 Standardmodell

Seit 1978 gibt es das Standardmodell der Teilchenphysik. Es kommt mit nur 25 Elementarteilchen aus, kann aber alle beobachteten Teilchen und drei der vier bekannten Kräfte erklären. Das Standardmodell beschreibt mit Leptonen und Quarks alle Teilchen, aus denen die Materie im Universum besteht und mit den Austauschteilchen drei der vier beobachtbaren Wechselwirkungen.

Alles, was wir sehen sehen - Menschen, Tiere, Pflanzen, Erde und Planeten - besteht aus Materieteilchen. Insgesamt gibt es zwölf Materieteilchen, die in sechs Quarks und sechs Leptonen unterteilt werden. Beide Gruppen bestehen aus Teilchen dreier Familien.

Quarks	Leptonen
u (up)	$e^-$ (Elektron)
d (down)	$\nu_e$ (Elektron-Neutrino)
s (strange)	$\mu^-$ (Myon)
c (charm)	$\nu_\mu$ (Myon-Neutrino)
t (top)	$\tau^-$ (Tauon)
b (bottom)	$\nu_\tau$ (Tauon-Neutrino)



Alle Leptonen und Quarks sind Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, also Fermionen, und unterliegen daher dem Pauli-Verbot („In einem System dürfen zwei Teilchen mit halbzahligem Spin niemals im gleichen Zustand sein. Sie müssen sich zumindest durch ein Merkmal unterscheiden.“). Gäbe es das Pauli-Verbot nicht, so würden sich alle Elektronen immer auf der untersten Schale befinden und daher ihre typischen chemischen Eigenschaften verlieren. Die Feldquanten sind Teilchen mit ganzzahligem Spin, also Bosonen, und unterliegen nicht dem Pauli-Verbot.

Alle Wechselwirkungen in der Natur lassen sich auf vier fundamentale Wechselwirkungen



zurückführen. Die starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkungen werden durch das Standardmodell beschrieben. Ein Teilchen nimmt an einer dieser fundamentalen Wechselwirkungen teil, wenn es die dazugehörige „Ladung“ trägt, wobei der Begriff Ladung hier in einer sehr verallgemeinerten Bedeutung verwendet wird. Die Ladung der elektromagnetischen Wechselwirkung ist die gewöhnliche elektrische Ladung. Leptonen und Quarks tragen die schwache Ladung, die auch Flavour-Ladung genannt wird. Die Ladung der starken Wechselwirkung ist die Farbladung. Sie wird von den Quarks und den Gluonen, nicht aber von den Leptonen getragen. Photonen tragen als Vermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung selbst keine elektrische Ladung, genauso wie die  $W^\pm$  und  $Z$ -Teilchen, die die schwache Wechselwirkung vermitteln, keine Flavour-Ladung tragen. Die Gluonen jedoch, die die starke Kraft zwischen Farbladungen vermitteln, tragen selbst eine Farbe (Quark-Confinement hängt damit zusammen).

Bosonen, die die fundamentalen Wechselwirkungen vermitteln				
Wechselwirkung	Boson	Spin, $\hbar$	Masse	Elektrische Ladung
Starke	Gluon	1	0	0
Schwache	$W^\pm$	1	$80,22 \text{ GeV}/c^2$	$\pm 1e$
	$Z^0$	1	$91,19 \text{ GeV}/c^2$	0
Elektromagnetische	$\gamma$ (Photon)	1	0	0
Gravitation	Graviton*	2	0	0
*Noch nicht beobachtet.				

Während Leptonen stets isolierte Teilchen sind und man keine aus Leptonen zusammengesetzten Teilchen kennt, in denen Leptonen durch schwache Kraft aneinandergebunden sind, bestehen Hadronen (Baryonen und Mesonen) aus Quarks, die durch die Farbkraft zusammengehalten werden. Ein Ergebnis der Quantenchromodynamik ist, dass nur farbneutrale Quark-Kombinationen erlaubt sind. Drei Quarks unterschiedlicher Farbe, also



ein rotes, ein grünes und ein blaues, können sich zu einem „weißen“ Baryon zusammenschließen. Ein Meson besteht aus einem Quark einer bestimmten Farbe und einem Antiquark, das die entsprechende Antifarbe trägt, sodass das Meson ebenfalls farbneutral ist. Alle Baryonen zerfallen letztlich in das leichteste Baryon, das Proton. Dass das Proton nicht zerfällt folgt aus der Energie- und Baryonenzahlerhaltung.

Die uns aus dem Alltag bekannte Materie setzt sich aus wenigen elementaren Bausteinen, drei an der Zahl, zusammen:

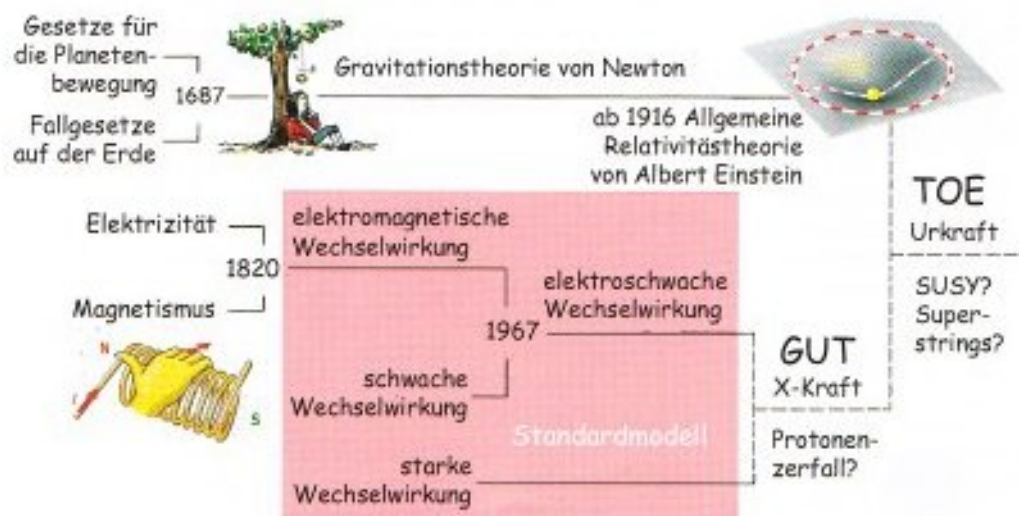
- Elektron
- Up-Quark
- Down-Quark

Jedes Teilchen besitzt ein Antiteilchen mit gleicher Masse und gleichem Spin, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung. Für Leptonen gilt, dass die Leptonenzahlen  $L_e, L_\mu$  und  $L_\tau$  für Teilchen und Antiteilchen jeweils entgegengesetztes Vorzeichen haben. Bei Hadronen ergeben sich Baryonenzahl, Seltsamkeit, Charm, Bottomness und Topness jeweils als Summe der entsprechenden Quantenzahlen der Quarks, aus denen die Hadronen aufgebaut sind. Die Quantenzahlen für Teilchen und Antiteilchen tragen dabei jeweils entgegengesetzte Vorzeichen.

Das Higgs-Teilchen gehört zum Higgs-Mechanismus, einer schon in den 1960er-Jahren vorgeschlagenen Theorie, nach der alle fundamentalen Elementarteilchen (beispielsweise das Elektron) ihre Masse erst durch die Wechselwirkung mit dem allgegenwärtigen Higgs-Feld erhalten.

Die uns bekannteste Wechselwirkung, die Gravitation, die wir zwangsläufig Tag für Tag erfahren, ist nicht im Standardmodell vertreten. Das hypothetische Wechselwirkungsteilchen der Gravitation, das Graviton, konnte experimentell noch nicht bestätigt werden.





Nach dem Erfolg der Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung wurden Versuche unternommen, diese in sogenannten **Großen Vereinheitlichten Theorien** (Grand Unified Theories, kurz **GUT**) auch noch mit der starken Wechselwirkung zu vereinigen.

Obwohl die GUT noch lange nicht fertig ist, arbeiten Physiker schon am nächsten Schritt der Vereinigung, dabei soll auch die Gravitation eingebunden werden. Man spricht von der **Theorie of Everything** (TOE), der **Theorie von Allem**.



## 2 Quarks (Mesonen und Baryonen)

Teilchen, die stark wechselwirken, heißen **Hadronen**. Es gibt zwei Arten von Hadronen: Die **Baryonen** mit halbzahligem Spin( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ , usw.) und die **Mesonen** mit ganzzahligem Spin(0, 1, 2, usw.). Die Baryonen, zu denen auch die Nukleonen (Proton, Neutron) gehören, sind die schwersten Elementarteilchen. Die Mesonen sind mittelschwer, ihre Massen liegen typischerweise zwischen der Masse des Elektrons und der Masse des Protons. Teilchen, die über die starke Wechselwirkung zerfallen, haben eine sehr kurze Lebensdauer in der Größenordnung von  $10^{-23}s$ . Teilchen, die über die schwache Wechselwirkung zerfallen, haben dagegen viel längere Lebensdauern in der Größenordnung von  $10^{-10}s$ . Hadronen sind komplexe, ausgedehnte und strukturierte Gebilde, und sie zerfallen in andere Hadronen. Wenn wir also unter *Elementarteilchen* nur solche Teilchen verstehen, die keine innere Struktur besitzen, also nicht aus anderen, elementareren Teilchen aufgebaut sind, dann zählen Hadronen nicht dazu. Man geht heute davon aus, dass alle Hadronen aus *Quarks* aufgebaut sind, die - nach heutigem Wissensstand - wirklich Elementarteilchen sind.

Der größte Fortschritt in unserem Verständnis der Elementarteilchen gelang mit der Entwicklung des Quark-Modells, das 1963 von MURRAY GELL-MAN und GEORGE ZWEIG vorgeschlagen wurde. Nach diesem Modell bestehen alle Hadronen aus Kombination von zwei oder drei wirklich elementaren Teilchen, den sogenannten **Quarks**<sup>1</sup>. Im ursprünglichen Modell gab es drei Sorten bzw. **Flavours** von Quarks: u, d und s (für **u**p, **d**own und **s**trange). Es wurden noch c, t und b (für **c**harm, **t**op und **b**ottom) hinzugefügt. Die Quarks gehören wie die Leptonen zu den Materiebausteinen. Eine ungewöhnliche Eigenschaft der Quarks ist ihre gebrochenzahlige Ladung: Die Ladung des u-,c-,t-Quarks beträgt  $\frac{2}{3}e$ , die des d-,s-,b-Quarks  $-\frac{1}{3}e$ . Weil nur ganz bestimmte Kombinationen möglich

---

<sup>1</sup>GELL-MAN bezieht sich dabei auf eine Zeile aus dem Roman „Finnegans Wake“ von James Joyce. Dort heißt es „Three quarks for Muster Mark“.



sind, ergeben sich in Summe trotzdem immer „ganze“ Ladungen. Die Seltsamkeit des u-, d-, c-, t- und b-Quarks ist 0, die des s-Quarks  $-1$ . Zu jedem Quark existiert ein Antiquark mit entgegengesetzter Ladung, Baryonenzahl, Seltsamkeit, usw.

Eigenschaften von Quarks und Antiquarks							
Flavour	Spin, $\hbar$	Ladung, $e$	Baryonenzahl	Seltsamkeit	Charm	Topness	Bottomness
<b>Quarks</b>							
u(up)	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	0	0
d(down)	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	0	0
s(strange)	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$-1$	0	0	0
c(charm)	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0	$+1$	0	0
t(top)	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	$+1$	0
b(bottom)	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$	0	0	0	$+1$
<b>Antiquarks</b>							
$\bar{u}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
$\bar{d}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
$\bar{s}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+1$	0	0	0
$\bar{c}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$-1$	0	0
$\bar{t}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	$-1$	0
$\bar{b}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	$-1$

Baryonen bestehen aus drei Quarks (bzw. drei Antiquarks im Falle der Antiteilchen), Mesonen dagegen aus einem Quark und einem Antiquark, ihre Baryonenzahl ist damit wie gefordert 0. Am häufigsten sind u- und d-Quarks. Aus diesen sind zum Beispiel Proton (uud) und Neutron (udd) aufgebaut. Die große Stärke des Quark-Modells besteht darin, dass alle erlaubten Kombinationen von drei Quarks und alle möglichen Quark-Antiquark-Paare in bekannten Hadronen resultieren.



Um Diskrepanzen zwischen den experimentellen Daten für einige Zerfallsraten und den auf dem Quark-Modell beruhenden Rechnungen zu erklären, wurde im Jahre 1967 ein viertes Quark vorgeschlagen. Es trägt die Bezeichnung  $c$ , entsprechend einer neuen Quantenzahl, dem sogenannten Charm. 1975 wurde ein  $\psi$ -Meson entdeckt, das genau die Eigenschaft hatte, die man für eine  $c\bar{c}$ -Kombination erwartete. Zwei weitere Quarks,  $b$  und  $t$ , wurden 1974 vorgeschlagen. 1977 wurde ein neues, schweres Meson entdeckt, das als  $Y$ -Meson oder Bottonium bezeichnet wird und das man als Quark-Kombination  $b\bar{b}$  interpretiert. Das Top-Quark wurde 1995 entdeckt.

Es ergab sich aber ein Problem: Quarks sind Fermionen und daher gilt für sie das Pauli-Verbot. Bereits 1953 hatte man aber ein Teilchen entdeckt, dass man mit  $\Delta^{++}$  bezeichnet und das aus drei  $u$ -Quarks bestehen müsste. Zwei gleiche Quarks können sich durch ihren Spin unterscheiden. Für das dritte gibt es jedoch kein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Es dürfte also nicht drei  $u$ -Quarks auf einem Haufen geben und daher auch kein  $\Delta^{++}$ -Teilchen.

Man musste ein weiteres Unterscheidungsmerkmal einführen, das man in Anlehnung an die Farbmischung **Farbladung** oder kurz **Farbe** (engl. *Color*) nennt. Dadurch ist trotz des Pauli-Verbots das Quark-Modell gerettet. Alle Teilchen, die aus Quarks zusammengesetzt sind, sind nach außen hin farbneutral.

Quarks			Anti-Quarks		
					
rot	grün	blau	anti-rot	anti-grün	anti-blau

### Quark-Confinement:

Trotz erheblichen experimentellen Aufwand ist es bisher nicht gelungen, einzelne Quarks zu beobachten. Man geht heute davon aus, dass es grundsätzlich unmöglich ist, Quarks zu isolieren. Als Confinement bezeichnet man in der Teilchenphysik das Phänomen, dass Teilchen mit Farbladung nicht isoliert vorkommen. Quarks und Gluonen kommen nur in Bindungszuständen vor und können prinzipiell nicht als freie Teilchen gemessen werden.



Obwohl man die zwischen den Quarks wirkende Kraft nicht wirklich kennt, nimmt man an, dass die potenzielle Energie zwischen zwei Quarks mit wachsendem Abstand zunimmt, sodass ein unendlicher Energiebetrag nötig wäre, um Quarks endgültig zu trennen. Das wäre beispielsweise dann der Fall, wenn die Anziehungskraft zwischen zwei Quarks mit wachsendem Abstand konstant bleiben oder zunehmen würde statt abzunehmen, wie dies bei anderen fundamentalen Kräften, wie der elektromagnetischen Kraft zwischen zwei Ladungen oder der Gravitation zwischen zwei Massen der Fall ist.

Führt man einem aus Quarks bestehenden System, etwa einem Nukleon, einen großen Energiebetrag zu, so wird ein Quark-Antiquark-Paar erzeugt; die ursprünglichen Quarks bleiben dabei im Anfangssystem eingeschlossen (confinement). Da Quarks nicht voneinander getrennt werden können, sondern immer in einem Baryon oder einem Meson gebunden sind, lassen sich die Quark-Massen nicht exakt messen.



### 3 Leptonen

Leptonen			
Name	Elektrische Ladung	Masse	Lebensdauer
$e^-$ (Elektron)	-1	$0,511 MeV/c^2$	stabil
$\nu_e$ (Elektron-Neutrino)	0	$< 2,2 eV/c^2$	stabil
$\mu^-$ (Myon)	-1	$105,659 MeV/c^2$	$2,197 \cdot 10^{-6}$
$\nu_\mu$ (Myon-Neutrino)	0	$< 0,17 MeV/c^2$	stabil
$\tau^-$ (Tauon)	-1	$1784 MeV/c^2$	$3,4 \cdot 10^{-13}$
$\nu_\tau$ (Tauon-Neutrino)	0	$< 28 MeV/c^2$	stabil

Leptonen sind Teilchen, die der schwachen, nicht aber der starken Wechselwirkung unterliegen. Alle Leptonen haben einen Spin von  $\frac{1}{2}$  und gehören somit zu den Fermionen. Zu den Leptonen gehören die Elektronen, die Myonen und die Neutrinos. Sie alle besitzen eine kleinere Masse als die Hadronen - daher auch die Bezeichnung Lepton („leichtes Teilchen“). Das als vorläufig letztes Lepton im Jahre 1975 entdeckte Tauon ist annähernd doppelt so schwer wie das Proton. Soweit man weiß, sind Leptonen strukturlose Punktteilchen und können als wirklich elementar aufgefasst werden, d.h. sie sind nicht aus anderen Teilchen zusammengesetzt. Die Leptonen gehören neben den Quarks zu den Materiebausteinen des Universums.

Es gibt sechs Leptonen: das Elektron und das Elektron-Neutrino, das Myon und das Myon-Neutrino und das Tauon und das Tauon-Neutrino. Zu jedem dieser Leptonen gibt es ein Antiteilchen:



Elektron	→ Positron
Elektron-Neutrino	→ Anti-Elektron-Neutrino
Myon	→ Anti-Myon
Myon-Neutrino	→ Anti-Myon-Neutrino
Tauon	→ Anti-Tauon
Tauon-Neutrino	→ Anti-Tauon-Neutrino

Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen. Mathematisch werden Teilchen und Anti-Teilchen durch einen Ausdruck beschrieben. Deshalb zählt man die Antiteilchen nicht extra. Antiteilchen entsprechen in allen Eigenschaften ihren Spiegelteilchen, haben aber, wenn sie geladen sind, eine gegengleiche Ladung. Bestünde das Universum aus Antimaterie würden wir das gar nicht merken, es wären einfach alle Ladungen vertauscht. Das einzige Anti-Teilchen mit einer Extrabezeichnung ist das Positron (Anti-Elektron), alle anderen haben einfach die Silbe „Anti“ vor ihrem Namen.

Die Massen der Leptonen sind recht unterschiedlich. Die Neutrinos wurden ursprünglich, wie vom Standardmodell vorhergesagt, als masselos angesehen. Inzwischen gibt es jedoch deutliche Hinweise darauf, dass die Masse der Neutrinos zwar sehr klein, aber von null verschieden ist.

Untersuchungen der von der Sonne ausgestrahlten Neutrinos mit dem Super-Kamiokande in Japan in den 1990er Jahren ergaben, dass auf der Erde viel weniger Neutrinos ankommen, als theoretisch aufgrund der in der Sonne stattfindenden Fusionsprozesse zu erwarten wäre. Dies ließe sich erklären, wenn die Masse der Neutrinos von 0 verschieden wäre. Man schätzt, dass auf der Erde etwa 70 Milliarden Neutrinos pro Sekunde durch jeden Quadratzentimeter fliegen. Neutrinos sind nicht geladen und treten unglaublich selten mit dem Rest der Materie in Wechselwirkung. Zum Beispiel die Neutrinos die bei der Fusion der Sonne entstehen: Selbst eine Bleiwand von einem Lichtjahr Dicke (etwa  $10^6 m$ ) würde



nur die Hälfte davon abschirmen.

Selbst eine noch so kleine Neutrinomasse von einigen wenigen  $eV/c^2$  wäre im Übrigen von kosmologischer Tragweite. Die Frage, ob das Universum für alle Zeiten expandiert oder eines Tages eine maximale Ausdehnung erreicht und dann wieder kontrahiert, hängt von der Gesamtmasse des Universums ab. Dabei könnte die Masse der Neutrinos eine entscheidende Rolle spielen, denn die kosmologische Dichte beträgt für jede Neutrinoart ungefähr  $100/cm^3$ . Die Beobachtung von Elektron-Neutrinos aus der Supernovaexplosion 1987A erlaubt eine Abschätzung für die Obergrenze der Masse dieser Teilchen. Da die Geschwindigkeit eines massebehafteten Teilchens von seiner Energie abhängt, würden Neutrinos aus einem Supernovaausbruch, wenn sie eine Masse haben, über eine gewisse Zeit verteilt auf der Erde ankommen. Aus der Tatsache, dass alle bei dem Supernovaereignis 1987A beobachteten Elektron-Neutrinos innerhalb von 13s auf der Erde eintrafen, erhält man als obere Schranke für ihre Masse den Wert  $16eV/c^2$ . Das bedeutet jedoch keineswegs, dass die Masse nicht doch null sein könnte.

Messungen der relativen Zahl von Myon-Neutrinos und Elektron-Neutrinos in dem großen, unterirdischen Super-K-Detektor lassen darauf schließen, dass mindestens eine Neutrinosorte zwischen zwei Neutrinoarten hin und her oszilliert. Ferner weisen Untersuchungen der Antineutrinos aus Kernreaktoren stark darauf hin, dass alle drei Neutrinosorten zwischen verschiedenen Neutrinotypen hin und her oszillieren und somit eine Masse haben und sich nicht mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, denn für Teilchen, die sich mit  $c$  bewegen, steht von uns aus gesehen die Zeit still. Wenn es nicht altert, kann es sich auch nicht umwandeln. Weiters ist auch klar, dass Neutrinos, wie alle unterlichtschnellen Teilchen, eine Ruhemasse besitzen müssen.

Messungen mit dem KamLAND zeigen, dass die Oszillation von einer Neutrinosorte zur anderen auf Distanzen von nur 180km Länge beobachtet werden können.



## 4 Fermionen und Bosonen

Man kann alle Teilchen dieses Universums anhand ihres Spins in zwei Gruppen einteilen: solche mit halbzahligem Spin ( $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ , usw.), die **Fermionen**, und solche mit ganzzahligem Spin (0, 1, 2, usw.), die **Bosonen**. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Fermionen und Bosonen sind entscheidend für den Aufbau des Universums.

### Spin:

Der Spin ist eine grundlegende Eigenschaft eines jeden Teilchens, ähnlich wie seine Masse oder seine Ladung. Der Spin eines Quants wird in  $\hbar$  angegeben. (z.B. Spin eines Elektrons:  $\frac{1}{2}\hbar$ ).  $h$  ist das Planck'sche Wirkungsquantum und  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ . Meist wird der Spin damit erklärt, dass das Quant um seine eigene Achse rotiert.

### Fermionen:

Fermionen, aus denen alle Atome unseres Universums aufgebaut sind, unterliegen dem Pauli-Prinzip. Es wurde 1925 von Wolfgang Pauli formuliert und in seiner allgemeinen Form besagt es, dass in einem System niemals zwei Teilchen mit halbzahligem Spin im gleichen Zustand sein dürfen. Sie müssen sich durch mindestens ein Merkmal unterscheiden. In seiner speziellen und zuerst beobachteten Form besagt das Pauli-Prinzip, dass in einem Atom keine zwei Elektronen in allen vier Quantenzahlen, die zu seiner Zustandsbeschreibung im Orbitalmodell notwendig sind, übereinstimmen. Wenn zwei Elektronen beispielsweise gleiche Haupt-, Neben- und magnetische Quantenzahlen haben, müssen sie sich also in der vierten Quantenzahl, der Spin-Quantenzahl, unterscheiden. Da diese nur die Werte  $-\frac{1}{2}$  und  $+\frac{1}{2}$  annehmen kann, können sich in einem einzigen Atomorbital maximal zwei Elektronen aufhalten. Diese Tatsache bestimmt maßgeblich den Aufbau des Periodensystems.

Ohne Pauli-Verbot würden die Elemente mit zunehmender Ordnungszahl kleiner werden, weil die Elektronen durch die Erhöhung der Protonenzahl näher an den Kern herangezogen werden. Das Pauli-Verbot verleiht also gemeinsam mit der Unschärferelation der Materie ihr Volumen.



Zu den Fermionen gehören:

- unter den Elementarteilchen: die Leptonen (z. B. das Elektron und das Neutrino) und die Quarks.
- unter den zusammengesetzten Teilchen: unter anderem alle, die aus einer ungeraden Anzahl von Quarks aufgebaut sind, wie beispielsweise alle Baryonen, zu denen auch das Proton und das Neutron zählen.

Im Standardmodell der Teilchenphysik gibt es keine elementaren Fermionen mit einem Spin größer als  $1/2$ .

Fermionen kommen in drei Gruppen vor, von denen die höheren Gruppen immer schwerer werden, sonst aber die fast dieselben Eigenschaften haben. Warum es genau drei Gruppen gibt weiß man nicht. Es ist außerdem so, dass „normale“ Materie nur aus Teilchen der ersten Gruppe bestehen. Die Teilchen der höheren Gruppen sind nicht stabil. Sie können erzeugt werden, zerfallen dann aber wieder in Teilchen der ersten Gruppe.

Gruppe	Leptonen		Quarks	
Ladung:	-1	0	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
1.	Elektron	Elektron-Neutrino	u	d
2.	Myon	Myon-Neutrino	c	s
3.	Tauon	Tauon-Neutrino	t	b

### **Bosonen:**

Bosonen unterliegen dem Pauli-Prinzip nicht, sie dürfen also in beliebiger Anzahl dieselben Quantenzustände besetzen. Deshalb können sich zum Beispiel beliebig viele Photonen an einer Stelle befinden. Also kann eine Lichtquelle beliebig hell sein. Bosonen sind diejenigen Teilchen, welche die Kräfte zwischen den Fermionen, den Materieteilchen, vermitteln.

Zu den Bosonen gehören:



- unter den Elementarteilchen: die Eichbosonen als Vermittler der Grundkräfte
- unter den zusammengesetzten Teilchen: die aus jeweils einem Quark und einem Antiquark zusammengesetzten Mesonen, alle Atomkerne mit gerader Nukleonenzahl (z. B. der Kern des schweren Wasserstoffs Deuterium), sowie auch Quasiteilchen wie z. B. Phononen.

Bosonen unterscheiden sich von den Fermionen in der Symmetrie ihrer Wellenfunktionen. Ihre Wellenfunktion ist gegenüber Vertauschungen symmetrisch. Wenn man also von einer Ansammlung von vielen Bosonen zwei Teilchen gegeneinander austauscht, dann ändert das an der Wellenfunktion nichts. Bei Fermionen dagegen ändert die Vertauschung das Vorzeichen der Wellenfunktion.

Jede Kraft wird durch eine oder mehrere Arten von Bosonen übertragen. Überträger der elektromagnetischen Kräfte sind die Photonen, die Lichtteilchen. Die schwache Kernkraft wird durch W- und Z- Bosonen übertragen. Für die Schwerkraft oder Gravitation sind die hypothetischen Gravitonen verantwortlich. Die starke Kernkraft kann man mit dem Austausch von Gluonen erklären.

Eine besondere Art von Bosonen sind die Higgs-Bosonen. Sie übertragen keine Kräfte, sondern sind mit einem Feld verbunden, das den anderen Elementarteilchen Masse verleihen kann.

Nicht nur Elementarteilchen können sich wie Bosonen verhalten. Auch aus Fermionen zusammengesetzte Teilchen können sich wie Bosonen verhalten, wenn sie einen ganzzahligen Gesamtspin haben und die Bindungskräfte zwischen den Fermionen stärker sind als äußere Einwirkungen.

Das einfachste Beispiel für zusammengesetzte Bosonen sind die aus je zwei Quarks bestehenden Mesonen. Aber auch ganze Atome oder gar Moleküle deren Einzelspins sich zu einer ganzen Zahl addieren nennt man Bosonen. Solche Bosonen bilden bei tiefen Temperaturen ein Bose-Einstein-Kondensat.



## 5 Grundkräfte und Elementarteilchen

Neben den Leptonen und den Quarks gibt es eine weitere Elementarteilchengruppe: die **Feldquanten**, die mit den Kräften zusammenhängen, die ein Elementarteilchen auf ein anderes ausübt.

### Elektromagnetische Wechselwirkung:

In der **Quantenelektrodynamik** wird das elektrische Feld eines geladenen Teilchens durch **virtuelle Photonen** beschrieben, die ständig von diesem emittiert und wieder absorbiert werden. Führt man dem System Energie zu, indem man das geladene Teilchen beschleunigt, so werden einige der virtuellen Photonen abgeschüttelt und treten als reale, beobachtbare Photonen in Erscheinung. Man sagt, das Photon vermittele die elektromagnetische Wechselwirkung. Alle vier fundamentalen Grundkräfte lassen sich so verstehen, dass sie durch Feldquanten vermittelt werden.

### Starke Wechselwirkung:

Die Feldquanten, die die starke Wechselwirkung zwischen den Quarks vermitteln, nennt man **Gluonen** (vom engl. *glue* für „Leim“). Isolierte Gluonen wurden noch nie experimentell beobachtet. Die zur starken Wechselwirkung gehörende „Ladung“ kann drei Farben annehmen, die man als *rot*, *grün* und *blau* bezeichnet. Die Ladung der starken Wechselwirkung bezeichnet man als **Farbladung**. Die Feldtheorie der starken Wechselwirkung nennt man **Quantenchromodynamik (QCD)**.

Die starke Wechselwirkung besteht aus zwei Teilen, der fundamentalen oder Farbwechselwirkung und der sogenannten *starken Restwechselwirkung*. Die Farbwechselwirkung ist verantwortlich für die Kraft, die zwischen Quarks wirkt, und wird durch Gluonen vermittelt, während die starke Restwechselwirkung für die Kraft zwischen farbneutralen Nukleonen, wie z.B. Neutronen und Protonen, verantwortlich ist. Diese Kraft rührt daher, dass die Kräfte zwischen den farbigen Quarks im Inneren der Nukleonen nicht vollständig



abgesättigt sind, sodass eine Restwechselwirkung nach außen reicht, die durch den Austausch von Mesonen vermittelt wird.

### **Schwache Wechselwirkung:**

Die schwache Wechselwirkung wird durch drei Feldquanten, die sogenannten **Vektorbosonen**, vermittelt. Es sind dies das  $W^+$ -, das  $W^-$ - und das  $Z^0$ -Boson. Diese Teilchen wurden von SHELDON GLASHOW, ABDUS SALAM und STEVEN WEINBERG in ihrer *Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung* vorhergesagt. Die W-Bosonen und das Z-Boson wurden erstmals im Jahre 1983 nachgewiesen. Die Massen der Bosonen, die in diesem Experiment bestimmt wurden, befinden sich in exzellenter Übereinstimmung mit den theoretisch vorhergesagten Werten.

### **Gravitation:**

Das Feldquant der Gravitation, das **Graviton**, wurde noch nicht gefunden. Die der elektrischen Ladung analoge „Gravitationsladung“ ist die Masse.

### **Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung:**

In dieser Theorie werden die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung als zwei Manifestationen einer fundamentaleren Wechselwirkung angesehen: der elektroschwachen Wechselwirkung. Bei sehr hohen Energien ( $\gg 100\text{GeV}$ ) soll diese durch vier Bosonen vermittelt werden. Aus Symmetriegründen müssen dies ein Triplet aus  $W^+$ ,  $W^-$  und  $W^0$ , alle mit gleicher Masse, und ein Singlett  $B^0$  mit einer bestimmten anderen Masse sein. Weder  $W^0$  noch  $B^0$  sind direkt beobachtbar, doch eine Linearkombination von ihnen:  $Z^0$  und Photon. Bei niedrigeren Energien existiert die Symmetrie nicht mehr und die elektroschwache Wechselwirkung zerfällt in die elektromagnetische und schwache.

Die Symmetriebrechung wird durch das sogenannte **Higgs-Feld** erzeugt, das zugehörige Teilchen ist das **Higgs-Boson**. Das Higgs-Boson hat nach den bisherigen Ergebnissen eine im Vergleich mit den meisten anderen Elementarteilchen sehr große Masse von etwa  $125\text{GeV}/c^2$ . Für den experimentellen Nachweis des Higgs-Bosons und die Bestimmung



seiner Masse sind Teilchenbeschleuniger ausreichender Energie und Luminosität nötig, weswegen der Nachweis über mehrere Jahrzehnte hinweg nicht gelang. Erst im Juli 2012 hat das Beschleunigerzentrum CERN den Nachweis eines Teilchens am Large Hadron Collider bekanntgegeben, bei dem es sich um das Higgs-Boson handeln könnte. Nachdem die Vermutung durch Analyse weiterer Daten bekräftigt werden konnte, gilt die experimentelle Bestätigung als so weit fortgeschritten, dass FRANÇOIS ENGLERT und PETER HIGGS für die theoretische Entwicklung des Higgs-Mechanismus der Nobelpreis für Physik 2013 zuerkannt wurde.

Eigenschaften der fundamentalen Wechselwirkungen					
	Gravitation	Schwache	Elektro- magnetische	Starke Fundamentale	Restliche
Wirkt auf	Masse	Flavour	Elektrische Ladung	Farbladung	
Teilnehmende Teilchen	Alle	Quarks, Leptonen	Elektrisch geladene Teilchen	Quarks, Gluonen	Hadronen
Vermittlerteilchen	Graviton	$W^\pm, Z$	$\gamma$	Gluonen	Mesonen
Kraft auf zwei Quarks im Abstand von $10^{-18}m^*$	$10^{-41}$	0.8	1	25	-
Kraft auf zwei Protonen im Kern*	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	-	20
*Stärke relativ zur elektromagnetischen Kraft					



