

# Elementarteilchenphysik

Rainer Hauser

Januar 2015

## 1 Einleitung

### 1.1 Elementarteilchen

Das Universum besteht aus Atomen, die sich zu Molekülen zusammenballen und so unsere materielle Welt bilden. Ein Atom besteht im Wesentlichen aus leerem Raum, in dessen Zentrum der Atomkern liegt, um den die Elektronen schwirren. Der Atomkern setzt sich aus einer Anzahl von Protonen und Neutronen zusammen, die zusammen als Nukleonen bezeichnet werden und je aus drei Quarks bestehen.

Neben diesen Elementarteilchen gibt es noch weitere wie beispielsweise Neutrinos, die praktisch ohne Wechselwirkung mit anderen Teilchen die Erde durchqueren können. Das heutige Standardmodell der Teilchenphysik teilt die Elementarteilchen in die *Fermionen* und die *Bosonen* als die beiden Hauptfamilien ein, wobei die Materie aus Fermionen besteht, während die Bosonen die Kräfte zwischen den Fermionen vermitteln. Daneben gibt es zu jedem dieser Teilchen ein *Antiteilchen* mit gleicher Masse und gleichem Spin, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung. Manchmal fallen Teilchen und Antiteilchen zusammen.

### 1.2 Fundamentale Kräfte

Die heutige Physik kennt vier fundamentale Kräfte oder Wechselwirkungen, mit denen sich physikalische Objekte gegenseitig beeinflussen. Die *Gravitation* ist zwar die schwächste dieser Kräfte und nimmt auch mit dem Abstand ab, wirkt aber unendlich weit, kommt nur als Anziehung vor und lässt sich nicht abschirmen. Die *elektromagnetische Wechselwirkung* wirkt ebenfalls unendlich weit und ist bedeutend stärker als die Gravitation, wirkt aber je nach dem Vorzeichen der beteiligten elektrischen Ladungen anziehend oder abstossend und lässt sich deshalb abschirmen. Die *schwache Kernkraft* hat nur eine sehr kurze Reichweite, ist für den Betazerfall verantwortlich, erlaubt die Umwandlung von Teilchen in andere und verletzt die Parität, funktioniert also nicht gleich, wenn man den Raum spiegelt, die Ladungen umkehrt und die Zeit rückwärts laufen lässt. Die *starke Kernkraft* mit ebenfalls sehr kurzer Reichweite bindet die Quarks aneinander und hindert so die Nukleonen am Zerfallen, hält aber auch die Atomkerne zusammen und wirkt damit der elektromagnetischen Kraft entgegen, durch die sich die positiv geladenen Protonen im Atomkern abstossen.

Weil sich die elektrischen Kräfte in den Grössenordnungen, in denen wir Menschen uns bewegen, im Wesentlichen gegenseitig aufheben, ist die elektromagnetische Kraft zwar für viele Phänomene in unserem Alltag wie beispielsweise das Licht, die Anziehung von positiv geladenen Protonen und negativ geladenen Elektronen im Atom sowie die chemischen Bindungen allgemein verantwortlich, spielt im Gegensatz zur Gravitation in astronomischen Grössenordnungen zwischen Galaxien, Sternen und Planeten jedoch keine Rolle, obwohl sie unendlich weit reicht und viel stärker als die Gravitation ist.

### 1.3 Physikalische Theorien

Weil durch Maxwell Elektrizität, Magnetismus und Optik zu einer Theorie vereinigt werden konnte, und weil der Mensch allgemein eine einheitliche Theorie für alle physikalischen Phänomene einer unübersichtlichen Vielzahl von verschiedenen Theorien vorzieht, hoffen die Physiker, diese Theorie eines

Tages zu finden. Die Realität sieht momentan aber ganz anders aus. Die Gravitation und damit das physikalische Verhalten in astronomischen Grössenordnungen wird durch die *allgemeine Relativitätstheorie* beschrieben, liess sich bisher aber nicht mit der *Quantenmechanik* vereinen, welche das physikalische Verhalten im atomaren und subatomaren Bereich beschreibt.

Aus der Elektrodynamik und der Quantentheorie ist die *Quantenelektrodynamik* entstanden, die als Quantenfeldtheorie elektromagnetische Phänomene beschreibt, und in der das *Photon* als Kraftteilchen wirkt. Die Quantenelektrodynamik und die schwache Wechselwirkung konnten zur *elektroschwachen Theorie* vereinigt werden, die nach ihren Entdeckern auch Glashow-Weinberg-Salam-Modell heisst. Dabei wird die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung zur so genannten elektroschwachen Wechselwirkung zusammengefasst, für die neben dem Photon auch *Z-* und *W-Bosonen* zuständig sind. Auch das *Higgs-Boson*, nach dem zur Zeit intensiv gesucht wird, spielt hier eine wichtige Rolle.

Die *Quantenchromodynamik* beschreibt die starke Wechselwirkung als Quantenfeldtheorie und hat das *Gluon* als Kraftteilchen. Sie ist neben der elektroschwachen Theorie ein wichtiger Bestandteil des so genannten *Standardmodells der Elementarteilchenphysik*, das die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung enthält und die Quantenmechanik wie auch die spezielle Relativitätstheorie erfüllt, nicht aber die Gravitation berücksichtigt. Nach dem Erfolg der elektroschwachen Theorie wurde versucht, die starke und die elektroschwache Wechselwirkung in die so genannte *grosse vereinheitlichte Theorie* zu vereinen. Eine Konsequenz davon wäre, dass das Photon kein stabiles Teilchen ist, sondern (wenn auch nur sehr selten) zerfallen kann. Deshalb versucht man, so einen Zerfall zu beobachten.

Zwar ist auch versucht worden, die Gravitation mit einem Kraftteilchen namens *Graviton* als Quantenfeldtheorie zu beschreiben, aber das ist bisher noch nicht befriedigend gelungen. Somit besteht die Physik heute aus der allgemeinen Relativitätstheorie für die Gravitation und damit für die Physik des Universums, der elektroschwachen Theorie und der Quantenchromodynamik, die sich bisher nicht zu einer einheitlichen Theorie haben vereinen lassen. Wo sich diese Teiltheorien überschneiden wie etwa bei den quantenmechanischen Eigenschaften schwarzer Löcher, wird es also schwierig.

## 2 Fermionen

### 2.1 Übersicht

*Fermionen* sind die Teilchen, aus denen Materie besteht. Sie haben einen halbzahligen Spin  $(m + \frac{1}{2})\hbar$ , genügen der Fermi-Dirac-Statistik und gehorchen somit dem Pauli'schen Ausschlussprinzip, das besagt, dass zwei Fermionen nicht gleichzeitig am gleichen Ort einen identischen Quantenzustand annehmen können, was sich als

$$\Psi(1, 2) = -\Psi(2, 1)$$

schreiben lässt.

Die Fermionen zerfallen in zwei Gruppen. Die *Leptonen* sind Fermionen, welche nicht der starken Wechselwirkung unterworfen sind, während die *Quarks* Fermionen sind, welche der starken Wechselwirkung unterworfen sind.

### 2.2 Leptonen

Zu den *Leptonen* gehören das Elektron  $e$ , das Myon  $\mu$  und das Tauon  $\tau$  sowie zu jedem davon je ein Neutrino, die Elektron-Neutrino  $\nu_e$ , Myon-Neutrino  $\nu_\mu$  und Tauon-Neutrino  $\nu_\tau$  heissen. Sie unterliegen nicht der starken Wechselwirkung, jedoch der schwachen Wechselwirkung und, falls sie elektrisch geladen sind, auch der elektromagnetischen Wechselwirkung. Elektron, Myon und Tauon sind negativ elektrisch geladen, während die Neutrinos elektrisch neutral sind. Zu jedem Lepton existiert zudem ein Antiteilchen.

Ursprünglich wurden die leichtgewichtigen Leptonen sprachlich von den mittelgewichtigen Mesonen und den schwergewichtigen Baryonen abgegrenzt, die im Gegensatz zu den Leptonen jedoch als aus Quarks zusammengesetzt gelten. Diese Namengebung macht seit der Entdeckung des Tauons nur noch wenig Sinn, denn das Tauon hat etwa die doppelte Masse eines Protons.

Leptonen sind isolierte Teilchen. Man kennt keine aus Leptonen zusammengesetzte Teilchen, in denen die Leptonen durch die schwache Wechselwirkung aneinander gebunden sind. Während die drei Arten von Neutrinos kaum wechselwirken, sind die Elektronen wichtig in der Elektronenhülle des Atoms und für die chemischen Eigenschaften der Materie. In Metallen sind viele Elektronen frei und bilden das Elektronengas, das für die Leitfähigkeit der Metalle verantwortlich ist. Myon und Tauon haben ähnliche Eigenschaften wie das Elektron, sind aber sehr viel schwerer und zerfallen schnell.

## 2.3 Quarks

Die Quarks sind die Bausteine für zusammengesetzte Teilchen wie Protonen und Neutronen. Es gibt die sechs *Quarks* Up  $u$ , Down  $d$ , Charm  $c$ , Strange  $s$ , Top  $t$ , Bottom  $b$ . Die Quarks gehören zu den Fermionen, kommen aber allein nie vor. Sie können sich entweder als Kombination von drei Quarks zu Baryonen oder aber als Kombination eines Quarks und eines Antiquarks zu Mesonen zusammenfinden. Baryonen sind Fermionen, während Mesonen Bosonen sind. Diese beiden Gruppen fasst man als Hadronen zusammen.

Quarks tragen eine Ladung, die man Farbladung nennt und mit den Werten rot, grün und blau bezeichnet, die aber nichts mit den uns bekannten Farben zu tun haben. Drei Quarks mit je einer dieser Farben zusammen bilden ein farbloses Objekt. Zu jedem Quark gibt es ein Antiteilchen mit entgegengesetzter elektrischer Ladung, die Antiquarks heißen und die Farbladung antirot, antigrün und antiblau haben. Alle vier Grundkräfte der Physik wirken auf die Quarks.

## 3 Bosonen

### 3.1 Übersicht

*Bosonen* sind die Teilchen, die als Kräfte zwischen den Fermionen vermitteln. Sie haben einen ganzzahligen Spin  $m\hbar$  und genügen der Bose-Einstein-Statistik, womit sie

$$\Psi(1, 2) = \Psi(2, 1)$$

erfüllen, sodass alle Teilchen eines Ensembles den gleichen Zustand einnehmen können.

### 3.2 Eichbosonen

Das Photon  $\gamma$  für die elektromagnetische Wechselwirkung, das Gluon  $g$  für die starke Wechselwirkung und die Z- und W-Bosonen  $Z^0$  und  $W^\pm$  für die schwache Wechselwirkung nennt man *Eichbosonen* oder Austauscheteilchen, Botenteilchen, Trägerteilchen, Kraftteilchen oder Wechselwirkungsteilchen, weil sie die Kräfte zwischen den Fermionen vermitteln. Beim Übergang zu einer Quantenfeldtheorie entsprechen sie den Feldquanten des Eichfelds. Sie sind alle so genannte Vektorbosonen.

Elektromagnetische Strahlung, zu der das sichtbare Licht gehört, besteht quantenmechanisch aus Photonen, die auch Lichtquanten genannt werden. Die kleinst mögliche Menge elektromagnetischer Strahlung ist also ein Photon  $\gamma$ . Photonen haben eine unendlich lange Lebensdauer, werden aber bei vielen physikalischen Prozessen wie beispielsweise beim Sprung eines Elektrons in der Elektronenhülle eines Atoms von einem angeregten Zustand in einen anderen erzeugt oder vernichtet. Sie haben keine Masse und bewegen sich im leeren Raum mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$ .

Das Z-Boson  $Z^0$  ist elektrisch neutral und ist sein eigenes Antiteilchen. Das W-Boson, das elektrisch geladen als  $W^+$  und  $W^-$  vorkommt, die sich gegenseitig Antiteilchen sind, ist mit rund achtzigfacher Protonenmasse recht schwer, aber sehr kurzlebig.

Die acht verschiedenen Gluonen werden bei der starken Kernkraft zwischen den Quarks ausgetauscht, können aber auch mit anderen Gluonen wechselwirken, sodass es Teilchen gibt, die nur aus Gluonen bestehen. Gluonen sind elektrisch neutral, haben eine Farbladung, die sich immer aus Farbe und Antifarbe zusammensetzt, und werden als masselos angenommen, könnten aber auch eine kleine Masse haben. Die Anziehung zwischen den Quarks durch die Gluonen ist für die Stabilität der Atomkerne verantwortlich. Sie überwinden somit die elektromagnetische Abstossung der verschiedenen Protonen im Atomkern.

### 3.3 Graviton

Das hypothetische Graviton, das als Tensorboson für die Schwerkraft zuständig ist, konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Zudem ist es bisher nicht gelungen, die Gravitation als Quantenfeldtheorie zu begründen. Eines der Probleme ist, dass die Gravitation im Gegensatz zu allen anderen Strahlungen nicht abgeschirmt werden kann und auf sämtliche Massen im Universum wirkt. Bisher ist zudem keine kleinste Menge Gravitation nachgewiesen worden, wie das etwa für die elektromagnetische Kraft mit dem Photon möglich war. Aus diesen Gründen wird die Gravitation vom Standardmodell nicht abgedeckt.

### 3.4 Higgs-Boson

Das skalare Higgs-Boson ist elektrisch neutral und zerfällt nach sehr kurzer Zeit. Theoretisch müssten alle Eichbosonen masselos sein, was aber für die Z- und W-Bosonen nicht stimmt. Das ist eine Folge des Higgs-Mechanismus, der ein fester Bestandteil des Standardmodells ist. Aus diesem Grund wird nach wie vor intensiv versucht, das Higgs-Boson experimentell nachzuweisen.

## 4 Hadronen als zusammengesetzte Teilchen

### 4.1 Übersicht

Die sechs Quarks zusammen mit den Leptonen sowie die Eichbosonen zusammen mit dem Higgs-Boson bilden die Grundbausteine der Materie gemäss Standardmodell der Teilchenphysik. Daneben gibt es aber auch zusammengesetzte Elementarteilchen wie die Protonen und Neutronen, aus denen die Atomkerne bestehen. Sie werden als *Hadronen* bezeichnet und sind aus Quarks und Antiquarks zusammengesetzt, womit sie der starken Wechselwirkung unterworfen sind. Je nach Spin gehören sie zu den Fermionen und heissen Baryonen oder zu den Bosonen und heissen Mesonen. Alle Hadronen sind instabil ausser dem Proton und dem Antiproton, für die bisher keine Zerfälle nachgewiesen wurden.

### 4.2 Baryonen

Die *Baryonen*, zu denen die Nukleonen, also das Proton und das Neutron, gehören, bestehen aus drei Quarks und sind somit Fermionen. Die Antibaryonen bestehen entsprechend aus drei Antiquarks. Die Nukleonen sind Baryonen, die aus Up- und Down-Quarks zusammengesetzt sind. Das Proton beziehungsweise Antiproton ist das einzige Baryon, das als freies Teilchen stabil ist, denn das Neutron zerfällt, wenn es nicht im Atomkern mit anderen Protonen und Neutronen gebunden ist.

Zu den Baryonen gehören neben den Nukleonen auch schwerere Teilchen, die Hyperonen genannt werden und mindestens ein Strange-Quark enthalten. Zu ihnen gehören Teilchen mit dem Namen Lambda  $\Lambda$ , Sigma  $\Sigma$ , Xi  $\Xi$  und Omega  $\Omega$  je nach der Zahl s-Quarks und dem Isospin. Neben den Grundzuständen der Baryonen gibt es noch eine riesige Zahl von Anregungszuständen, die Barionenresonanzen heissen.

### 4.3 Mesonen

Die *Mesonen* wie das Pi-Meson  $\pi$ , das auch Pion genannt wird, und das neutral oder elektrisch geladen vorkommt, oder das K-Meson  $K$ , das auch Kaon genannt wird, und das ebenfalls neutral oder elektrisch geladen vorkommt, sind aus einem Quark und einem Antiquark zusammengesetzt und gehören somit zu den Bosonen. Weil es viele Kombinationsmöglichkeiten mit einem Quark und einem Antiquark gibt, sind auch viele Mesonen möglich. Über hundert Mesonen sind bekannt, und für nochmals halb so viele gibt es Hinweise, die ihre Existenz wahrscheinlich erscheinen lassen.

Mesonen entstehen durch Teilchenkollisionen mit hoher Energie, wie sie in Teilchenbeschleunigern oder in der kosmischen Strahlung passieren. Sie können innere Anregungszustände haben, sodass sie andere Eigenschaften als die Mesonen im Grundzustand besitzen. Sie sind instabil und zerfallen meist in andere Mesonen, Leptonen oder Photonen.