

Das Standardmodell der Elektroschwachen und Starken Wechselwirkungen	76
Quantenchromodynamik (QCD)	77
Quantenflavordynamik (QFD)	80
Drei Familien und die Verletzung von CP	81
Laufende Kopplungen	87
Ausblicke	95
Supersymmetrie, GUT und die Stabilität des Protons	96
Künftige Beschleuniger und Experimente	100

VERTIEFUNGEN

Beschleuniger und das Higgs-Teilchen	102
Lepton-Hadron-Streuprozesse	104
Neutrinooszillationen	110
Vakuumfluktuationen und Teilchenerzeugung	114
Symmetrien und Erhaltungssätze	116
Lokale Eichsymmetrien	119
Planckskala	122

ANHANG

Glossar	123
Literaturhinweise	128

DIE ENTWICKLUNG DER ELEMENTARTEILCHENPHYSIK

Die den Sinnen zugängliche Welt kann auf eine ihnen verschlossene elementarere zurückgeführt werden – diese Grundidee der Elementarteilchenphysik ist nahezu 2500 Jahre alt. Sie tritt bei den Philosophen vor Sokrates (um 470 – 399 v. Chr.) in zwei Formen auf. Aus den Elementen Feuer, Wasser, Luft und Erde sollten, so zusammenfassend der bis zur Wissenschaftlichen Revolution des 16. und 17. Jahrhunderts ungemein einflussreiche altgriechische Philosoph Aristoteles (384–322 v.Chr.), die Gegenstände direkter Beobachtung aufgebaut sein. Hinzu sollte ein fünftes Element namens Äther kommen, in das die Bewegungen der Himmelskörper eingebettet seien. Diese Theorie des Aristoteles ist in heutiger Terminologie eine Feldtheorie: Den Raum kontinuierlich ausfüllende Substanzen sollten in verschiedenen Durchmischungen allgegenwärtig sein und alles überhaupt Existierende ausmachen. Leeren Raum, reinen Zwischenraum, sollte es nicht geben. Dieser Lehre stand die der Atomisten Leukipp und Demokrit (beide um 400 v.Chr.) gegenüber, die sich alles Existierende aus unteilbaren, endlich ausgedehnten »diskreten« Einheiten – den Atomen – und leerem Raum zwischen ihnen aufgebaut dachten. Die Atome, so dachten sie, können sich sowohl ungeordnet durch den Raum bewegen, als auch Aggregate bilden: »Es gibt nichts als die Atome und den leeren Raum zwischen ihnen.«

Teilchen und Felder

Diese Grundideen sind bis heute erhalten geblieben. Die mittlerweile traditionelle Physik der »Felder und Teilchen« stellt kontinuierliche

Felder an den Anfang – ein Beispiel bilden die elektromagnetischen Wellen des Lichtes – und leitet von ihnen durch einen Prozeß namens Quantisierung die diskreten Teilchen – in unserem Beispiel die Photonen – ab. Hierauf beruht, dass die Elementarteilchen in Klassen eingeteilt werden können, deren Mitglieder immer und überall dieselben Eigenschaften wie Masse, Spin und Ladungen besitzen: Sie sind alle Abkömmlinge desselben Feldes. Verschieden können Eigenschaften wie Orte und Geschwindigkeiten sein, die vom Standpunkt des Beobachters abhängen. Teilchen sind hiernach Bündel von Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladungen und anderen Eigenschaften des Feldes, von dem sie abstammen.

Damit das Universum uns bei heute erreichbaren Energien so erscheint, als besitze es drei räumliche und eine zeitliche Dimension, müssen alle anderen Dimensionen, wenn es sie denn gibt, gekrümmt sein, und zwar – nach Auskunft der Stringtheorien – so, dass sie erst bei geringeren Abständen als 10^{-35} Meter nachweisbar werden. Zu einer so feinen Auflösung sind Energien erforderlich, welche die in absehbarer Zeit an Beschleunigern erreichbaren, die heute bis zu der Auflösung von 10^{-20} Meter reichen, um den Faktor 10^{15} übersteigen.

Energieskalen

S. 122

Welche Energien als hoch einzustufen sind, definiert die **Planckskala**. Gegenwärtige Theorien der Elementarteilchen sparen die Allgemeine Relativitätstheorie aus. Dies zu Recht, denn Energiekonzentrationen, bei denen die Schwerkraft einen merklichen Einfluss auf das Verhalten von Elementarteilchen ausüben könnte, verfehlen heutige Beschleuniger um den in absehbarer Zukunft unüberwindbaren Faktor 10^{15} . Wohl aber kann gefragt werden, ob Prinzipien wie Lokalität, Symmetrie und die konsistente Berechnungen erst ermöglichende Renormierbarkeit allgemeingültig sind.

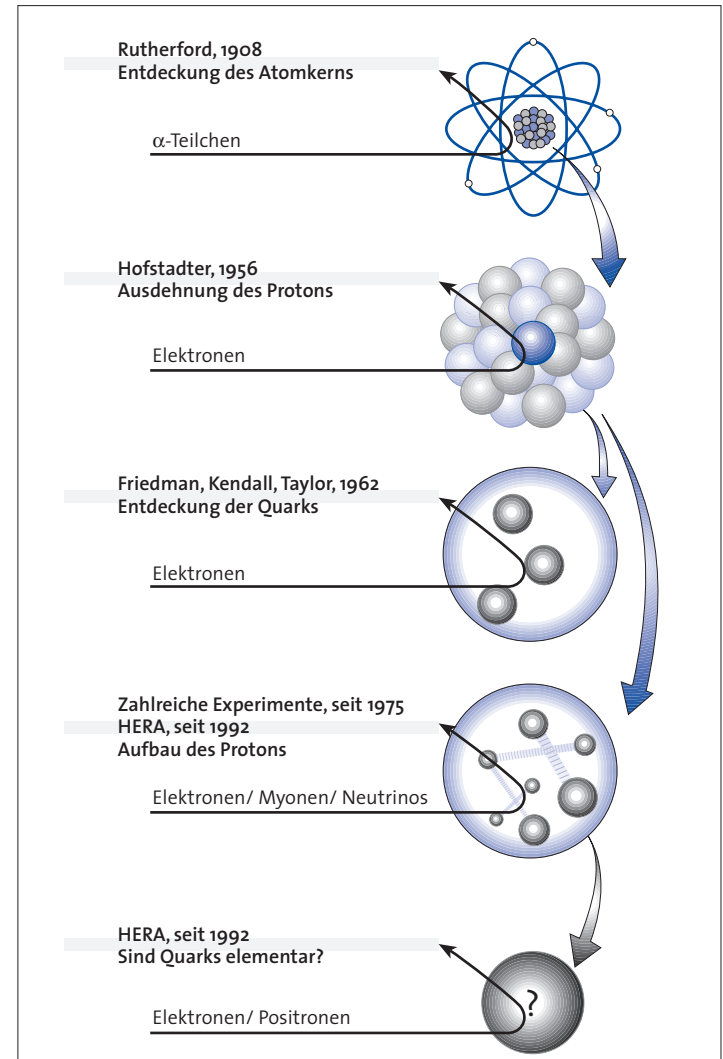


Abb. 1: Entscheidende Schritte auf dem Weg zu den Quarks – und darüber hinaus?




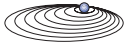
Gluonen	Photon	W- und Z-Boson	Graviton
Träger der:			
starken Kraft	elektro-magnetischen Kraft	schwachen Kraft	Gravitationskraft
Wirken auf:			
Quarks, Gluonen	Quarks, geladene Leptonen und W-Bosonen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen
Verantwortlich für:			
Zusammenhalt des Protons, des Neutrons und der Atomkerne	Chemie, Elektrizität und Magnetismus	Radioaktivität, Prozesse in der Sonne	Zusammenhalt der Erde, der Sonne, des Planetensystems
			

Abb. 2: Die vier Grundkräfte, ihre Austauschteilchen und ihre Reichweiten

Bereits diese Prinzipien können erklären, dass die Masse des Protons um den Faktor 10^{19} kleiner ist als die der Planckenergie entsprechende Planckmasse. Die Prinzipien implizieren nämlich, dass die Stärken der Wechselwirkungen von Elementarteilchen von der Energie abhängen. Insbesondere nimmt die Stärke der Wechselwirkung von Quarks und Gluonen, welche das Proton als gebundenen Zustand von drei Quarks ermöglicht, mit abnehmender Energie zu.

Quarks – das sind neben den Gluonen die elementaren Träger der Starken Wechselwirkung, welche die Atomkerne zusammenhält und zerfallen sowie fusionieren lässt. Unser gegenwärtiges Wissen von den Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen fasst das Standardmodell der Elementarteilchentheorie zusammen.













Leptonen		Quarks	
 Elektron Masse 0,0005 GeV	 Elektron-Neutrino Masse < 3 eV	 UP Masse ≈ 0,004 GeV	 Down Masse ≈ 0,007 GeV
 Myon Masse 0,1 GeV	 Myon-Neutrino Masse < 0,0002 GeV	 Charm Masse ≈ 1,3 GeV	 Strange Masse ≈ 0,15 GeV
 Tau Masse 1,8 GeV	 Tau-Neutrino Masse < 0,018 GeV	 Top Masse ≈ 174 GeV	 Bottom Masse ≈ 4,2 GeV

Abb. 3: Die Familien der Leptonen und Quarks

Die nach Auskunft des Modells elementarsten der elementaren Teilchen, aus denen alle überhaupt existenzfähigen aufgebaut sind und vermöge derer sie wechselwirken, fasst die Abb. 4 in drei Blöcken zusammen. Hinzu kommen die Antiteilchen der Teilchen, die es nach Auskunft der Theorie geben muss und gibt, sowie das einzige Teilchen des Standardmodells, das experimentell bisher nicht nachgewiesen werden konnte, das Higgs-Boson. Zur Einteilung: Die Quarks sind Teilchen mit, die Leptonen ohne Starke Wechselwirkung. Zusammen treten sie in den Familien 1, 2 und 3 auf. Hinzu kommen die Austauschteilchen der rechten Spalte. Von den vier grundlegenden Wechselwirkungen, auf die alle Erscheinungen laut heutiger Überzeugung zumindest im Prinzip sollen zurückgeführt werden können, stehen sie für drei: für die Schwache (Z und W), die Elektromagnetische (Photon γ) und die Starke Wechselwirkung (Gluon g); hinzu kommt die Schwerkraft mit ihrem Austauschteilchen, dem Graviton. Ohne die Austauschteilchen der Abbildung gäbe es keine Wechselwirkung irgendeines Quarks oder Leptons mit irgendeinem anderen – die Gravitation weiterhin ausgenommen.

Protonen und Neutronen unserer Alltagswelt sind aus jeweils drei Quarks der Typen u und d aufgebaut. Sie sind die Bausteine der Atomkerne; hinzu kommen in den Atomen und Molekülen die Elektronen. Sieht man von subtilen Effekten ab, braucht es für den Aufbau der uns umgebenden Welt keine weiteren Materieteilchen. Wohl aber für deren Verständnis! Ohne Antiteilchen ist keine Theorie der um uns herum auftretenden Materie, die auch uns ausmacht, konsistent. Erst seitdem die Physik der Elementarteilchen in ihrem Standardmodell bei den Teilchen der Abb. 4 und ihren Wechselwirkungen angekommen ist, kann sie sich rühmen, alle Reaktionen irdischer Elementarteilchen zumindest im Prinzip zu verstehen.

Nun zu den Austauschteilchen der Abbildung: Ohne sie würden die Materieteilchen von u und d über e und ν_e bis zu τ miteinander nur durch die bei gegenwärtigen Energien vernachlässigbar kleinen Einflüsse der Schwerkraft wechselwirken. Als erstes Beispiel für von Austauschteilchen vermittelte Wechselwirkungen soll uns die Wechselwirkung eines negativ geladenen Elektrons e^- mit einem positiv oder negativ geladenen Teilchen T^\pm , z.B. einem positiv geladenen Myon μ^+ , dienen (Abb.5). Sie wechselwirken nach dem Vorbild der Vertices 1 und 4 der Abb. 39 (hintere Umschlagseite) durch den Austausch von Photonen γ und Z-Teilchen miteinander, wobei die Einflüsse der stets möglichen Iterationen umso kleiner sind, je häufiger sie auftreten. Durch die hochgestellten Symbole $+$, 0 und $-$ bezeichnen wir die elektrischen Ladungen $1, 0$ und -1 von Elementarteilchen.

Weil die Planckskala die Skala der Schwerkraft ist, kann der Traum der Physik von einer die vier bei niedrigen Energien verschiedenen starken Kräfte vereinigenden Theorie nur Wirklichkeit werden, wenn die drei zwischen den Elementarteilchen wirkenden Kräfte – die Schwache, die Elektromagnetische und die Starke Kraft – bei der Energie, welche der Planckmasse entspricht, so stark – besser: so schwach – sind, wie es die Schwerkraft tatsächlich ist. Mangels Masse der Quarks kann die Schwerkraft diese sicher nicht in einem Verbund

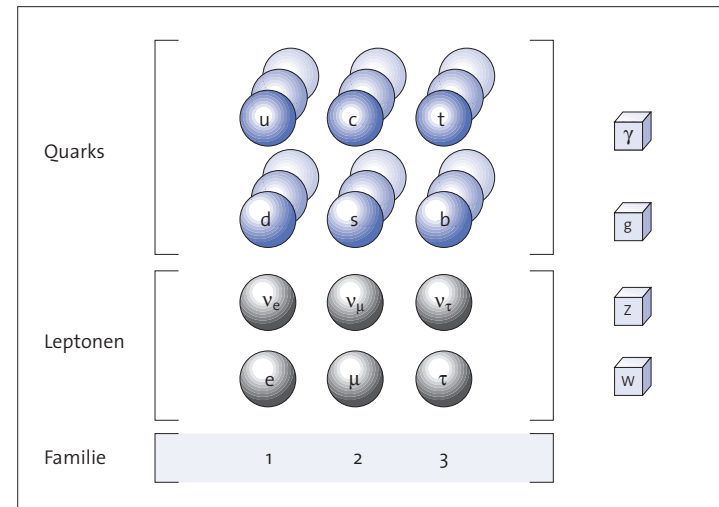


Abb. 4: Die Elementarteilchen des Standardmodells und die ihnen zugeordneten Austauschteilchen. Hinzukommt das Higgs-Boson, das als Einziges bisher (Frühjahr 2003) nicht experimentell nachgewiesen werden konnte.

wie dem Proton dauerhaft vereinigen. Aber die anderen Kräfte können das bei der Planckenergie infolge ihrer dortigen Schwäche auch nicht. Erst bei einer Energie, die um den bereits genannten Faktor 10^{19} geringer ist als die Planckenergie, wird die Kraft zwischen Quarks und Gluonen so stark, dass sie gebundene Zustände von Quarks, Antiquarks und Gluonen ermöglicht. Das Proton ist einer davon, das Neutron ein anderer. Insgesamt kennt die Tabelle der Elementarteilchen mehrere hundert von ihnen mit Massen, die von $0,14$ (das neutrale π -Meson) bis zu 12 Protonenmassen (das $\Upsilon(11020)$) reichen. Wenn gebundene Zustände existenzfähig sind, die das 1995 entdeckte top-Quark t mit der Masse von 186 Protonenmassen enthalten, erstrecken sich die Massen der aus Quarks und Antiquarks aufgebauten Teilchen deutlich über diesen Wert hinaus. Die Massen der

Austauschteilchen reichen von Null für γ (Photon) und g (Gluon) bis zu 86 und 97 Protonenmassen für W und Z .

Die 19 Größenordnungen von der Planckenergie herunter zu dem Energieäquivalent der Masse des Protons überbrückt die Theorie dadurch, dass ihr zufolge die Stärke der Kräfte nur sehr schwach – nur logarithmisch – von der Energie abhängt: Statt um den Faktor 10^9 nimmt die Stärke der Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen von der Planckskala bis zur Skala des Protons nur um einen Faktor wie 19 zu. Es ist die so erreichte Stärke, die zu Bildung und Erhalt gebundener Zustände von Quarks, Antiquarks und Gluonen ausreicht.

Masse und Ladung

Atome bestehen aus einem Kern und einer ihn umgebenden Hülle, deren Radius beim Wasserstoffatom um etwa den Faktor 10^5 größer ist als der des Kerns; beim Gold ist das Verhältnis etwa 10^3 . Verglichen mit dem des Kerns kann der Aufbau der Hülle leicht verstanden werden: Sie besteht aus Elektronen, die den Kern umfliegen; Einzelheiten regelt die Quantenmechanik. Mit Ausnahme des Kerns des Wasserstoffatoms, der aus einem einzigen Proton besteht, sind alle Atomkerne aus einfach elektrisch geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen aufgebaut. Dass die Protonen »einfach elektrisch geladen« sind, bedeutet, dass sie mit Ausnahme des Vorzeichens dieselbe elektrische Ladung wie die Elektronen tragen. Warum das so sei, ist ein unter dem Namen »Quantisierung der Ladung« bekanntes Problem der Elementarteilchenphysik, das heute so formuliert werden kann: Warum sind alle direkt beobachteten elektrischen Ladungen der Welt entweder Null oder ganzzahlige Vielfache des Dreifachen der drittelzahligen Ladungen der Quarks? Hier verbergen sich zwei allem Anschein nach ganz verschiedene und voneinander unabhängige Fragen: Erstens die nach der Quanti-

sierung der Ladungen der Quarks und Elektronen selbst – warum die Ladungen der Quarks dem Betrag nach exakt $1/3$ oder $2/3$ des Betrages der Ladung des Elektrons betragen –, und zweitens die Frage, warum die Quarks anders als in Verbänden mit ganzzahligen Ladungen weder angetroffen wurden, noch in Experimenten erzeugt werden konnten.

Die Atome und der leere Raum zwischen ihnen

Ironischerweise wurde die Idee der Atome erst ab 1896 durch den Nachweis ihrer Teilbarkeit allgemein akzeptiert. Vor allem zu nennen in diesem historischen Prozess sind zwei Entdeckungen: Erstens 1896 die der *natürlichen Radioaktivität* durch Antoine Henri Becquerel (1852 – 1908, Physiknobelpreis 1903), die schlussendlich nur durch Umwandlung von Atomkernen in andere verstanden werden konnte; zweitens die des Elektrons durch J. J. Thomson (1856–1940, Physiknobelpreis 1906) im Jahr 1897.

Im 20. Jahrhundert hat sich die Idee durchgesetzt, dass die Materie aus wenigen Typen von Elementarteilchen aufgebaut ist, die – wie es jeweils schien – nicht weiter geteilt werden können: aus Molekülen, Atomen, Elektronen, Atomkernen, Protonen und Neutronen und Quarks. Wieder und wieder hat sich die Liste der Elementarteilchen durch die Entdeckung geändert, dass bis dahin für unteilbar gehaltene Teilchen tatsächlich aus elementarerer Bausteinen aufgebaut sind. Auf dieser Liste steht nur das Elektron seit seiner Entdeckung bis heute.

Die Entdeckung des Elektrons

Es war nicht eine im Prinzip planbare Erforschung der Elektrizität, die zur Entdeckung des Elektrons führte, sondern die Verbesserung der Leistung von Luftpumpen. Letztlich war es die Kathodenstrahlröhre,

das Wirken von Kräften implizieren. Die QED bezieht diese ein und wird dadurch zu einer Theorie der Wechselwirkungen von elektrisch geladenen Teilchen durch Austausch von Photonen.

PLANCKSKALA

In den drei grundlegenden Theorien der Physik – Quantenmechanik, Spezielle sowie Allgemeine Relativitätstheorie – treten drei Konstanten auf: das Planck'sche Wirkungsquantum \hbar , die Lichtgeschwindigkeit c und die Gravitationskonstante G . Zusammen können sie in eine Länge, eine Masse und eine Zeit umgerechnet werden. Bei Verzicht auf Zahlenfaktoren wie 2 , π oder 10^{23} liefern sie die nach Max Planck benannten Einheiten für Länge, Zeit und Masse: 10^{-35} Meter, 10^{-43} Sekunden und 10^{-5} Gramm. Ausgedrückt in diesen Einheiten besitzen \hbar , c und G den Zahlenwert eins.

Willkürlich sind diese Einheiten nicht. Auch außerirdische Physiker würden wegen der Universalität der Naturgesetze auf sie kommen. Das beobachtbare Universum ist gegenwärtig 10^{60} Plancklängen groß und dieselbe Zahl von Planckzeiten alt. Bei Unterschreitung der Plancklänge und/oder der Planckzeit als (total utopische) Auflösungen von Detektoren würde sich herausstellen, dass Raum und Zeit selbst den quantenmechanischen Unsicherheiten unterliegen. So auch das ganze Universum bis zur Planckzeit. Während die Planckzeit und die Plancklänge der Alltagserfahrung entrückt sind, ist ihr die Planckmasse als Masse eines Staubkörnchens zugänglich. Doch sie ist zu interpretieren als Masse eines Elementarteilchens. Ihre gigantische Größe tritt hervor, wenn wir sie uns in einen Raumbereich mit Planck'schen Abmessungen eingeschlossen denken: Die Planckmasse einer Kugel mit der Plancklänge als Durchmesser besitzt die 10^{93} -fache Dichte von Wasser. Die TOE soll es ermöglichen, *alle* Naturkonstanten, z. B. den Radius des Wasserstoffatoms und die Masse des Elektrons, in den Planck'schen Größen als Einheiten zu berechnen.

GLOSSAR

Antiteilchen – Zu jedem Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit entgegengesetzten Inneren Quantenzahlen sowie demselben Spin und derselben Masse. Teilchen, deren Innere Quantenzahlen verschwinden, sind ihre eigenen Antiteilchen. *s. S. 16ff., 34ff., 110ff.*

Austauschteilchen – Sammelname für die Teilchen W , Z , Photon γ und Gluon g mit Spin 1 des Standardmodells, die an die \triangleright Materieteilchen Quarks und Leptonen der drei Familien der Abb. 4 mit Spin $1/2$ koppeln. Ihr Austausch ermöglicht direkte Reaktionen der Materieteilchen miteinander. In allgemeineren Diagrammen (Abb. 5d) treten auch Materieteilchen als Austauschteilchen auf. *s. S. 6ff., 22ff., 78ff.*

Baryonen – Teilchen mit starker Wechselwirkung und halbzahligem Spin. Die \triangleright Baryonenzahl von Protonen und Neutronen ist 1, die von Quarks $1/3$. *s. S. 28ff., 84, 97*

Bosonen – Teilchen, von denen beliebig viele denselben Zustand annehmen können – und das bevorzugt auch tun. Ihr Spin ist ganzzahlig. *s. S. 6, 18, 99*

CERN – Europäisches Zentrum für Teilchenphysik in Genf. *s. S. 65, 85, 109*

Collider – Beschleuniger, in denen Teilchenstrahlen gegeneinander geschossen werden. *s. S. 65, 86, 102f.*