Standardmodell der Teilchenphysik und die vier Grundkräfte

Alle Materie – Menschen, Tiere, Pflanzen und Planeten – bestehen aus Atomen. Im Kern der Atome befinden sich die positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen und in der Atomhülle die negativ geladenen Elektronen. Wir haben uns schon an anderer Stelle mit dem Bau der Atome und dem Periodensystem der Elemente befasst. Doch auch Atome sind aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt. Physiker haben ihre Kenntnisse über die kleinsten Teilchen im so genannten Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst. Im Wechselspiel zwischen vielen experimentellen Ergebnissen und verschiedenen theoretischen Modellen ist in mehreren Schritten zwischen 1961 und 1973 das "Standardmodell der Teilchenphysik" entstanden. Obwohl es diesen bescheidenen Namen behalten hat, gilt es heute, über 40 Jahre später, als die bisher tiefste Erkenntnis, die die Naturwissenschaft über Entstehung, Aufbau und Verhalten der Materie in unserem Universum hervorgebracht hat. Alle bisher beobachteten subatomaren Vorgänge entsprechen perfekt den Vorhersagen des Standardmodells.

In diesem Beitrag lernen wir also das Standardmodell der Teilchenphysik kennen.

Was ist das Standardmodell?

Als Elementarteilchen bezeichnet man alle Bestandteile des Universums, bei denen man davon ausgeht, dass sie nicht weiter teilbar sind. Dazu gehören die Materie- und Antimaterieteilchen sowie die Austauschteilchen. Elementarteilchen besitzen keine räumliche Ausdehnung – zumindest keine, die sich mit heutigen Messinstrumenten messen ließe. Alle Elementarteilchen derselben Sorte besitzen die gleiche Masse und gleiche Ladungen. Elementarteilchen folgen den Gesetzen der Quantenmechanik. So kann beispielsweise ihr Ort und Impuls nicht gleichzeitig exakt gemessen oder vorhergesagt werden, sondern nur in Form von Wahrscheinlichkeiten.

Elementarteilchen sind für unsere Sinne nicht wahrnehmbar, doch hinterlassen sie Spuren, die mit speziellen Messgeräten sichtbar gemacht werden können. Solche Spuren wurden zum ersten Mal Ende des 19. Jahrhunderts in Nebelkammern beobachtet. Darin ionisieren elektrisch geladene Teilchen die Moleküle, an denen sie vorbeifliegen; an den Ionen lagern sich Flüssigkeitströpfchen an, die als Nebelspuren sichtbar werden. Moderne Detektoren wie diejenigen am internationalen Forschungszentrum CERN in Genf basieren zum Teil auch auf Ionisation, machen sich aber auch andere Effekte zunutze.
Um massereiche, instabile Teilchen gezielt zu erzeugen und zu untersuchen, sind Teilchenbeschleuniger nötig. Bei Teilchenkollisionen wandelt sich ein Teil der

Bewegungsenergie der Teilchen in Masse um (gemäß der Masse-Energie-Äquivalenz $E = mc^2$). Die Technologie, um Teilchen auf immer höhere Energien zu beschleunigen, wurde seit den 1950er Jahren immer weiter entwickelt, was die Erzeugung von immer massereicheren Teilchen ermöglichte.

Das Standardmodell beschreibt alle uns bekannten Phänomene des Mikrokosmos und beinhaltet die folgenden Teilchenarten (Abb. 1): die Teilchen, aus denen Materie aufgebaut ist (Materieteilchen), und die Wechselwirkungen zwischen ihnen, die ebenfalls über kleine Teilchen ablaufen (Austauschteilchen). Ein weiterer Bestandteil des Standardmodells ist das Higgs-Teilchen, das weder Materie- noch Austauschteilchen ist.

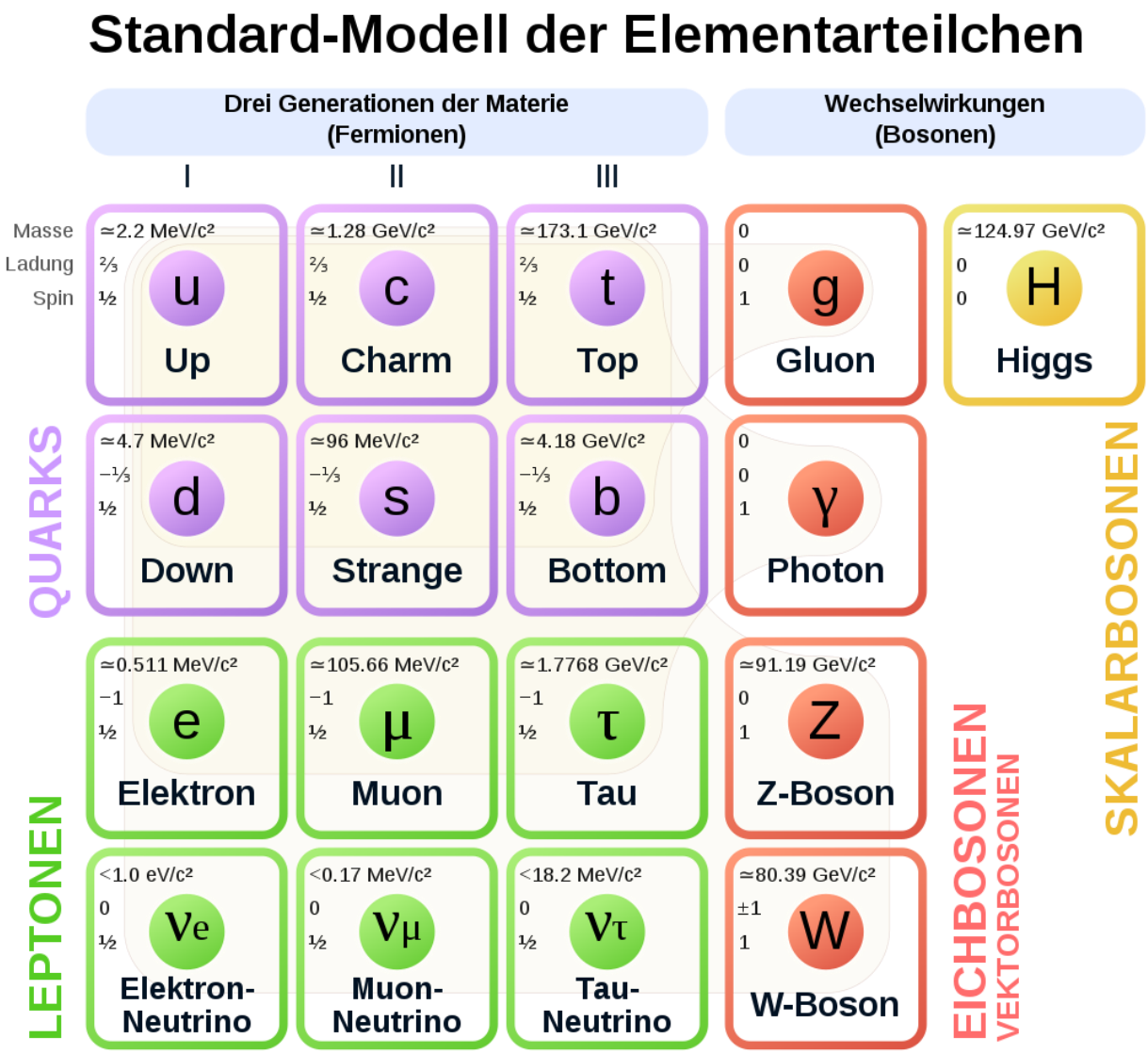


Abb. 1: Standardmodell der Teilchenphysik

Das Standardmodell beschreibt auch die wichtigen Wechselwirkungen zwischen ihnen: die starke Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Wechselwirkung. Nur die (vergleichsweise sehr schwache) Gravitation als vierte Grundkraft wird nicht berücksichtigt (Abb. 2).

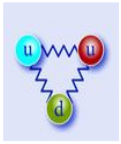
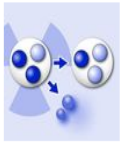
Wechselwirkung	 Starke Wechselwirkung	 Schwache Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Gravitation
Beispiele für Wirkung	Zusammenhalt des Protons	Betazerfall: Ein Proton wandelt sich in ein Neutron um (oder umgekehrt). Kernfusion: In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern.	Magnetismus, Licht, ...; Chemische Bindungen; Photoeffekt	Anziehung zwischen Massen: Schwerkraft, Umlauf der Planeten um die Sonne
Ladung	Starke Ladung ("Farbladung")	Schwache Ladung	Elektrische Ladung	
Botenteilchen	Gluonen	W^+, W^-, Z	Photon	
Reichweite	$2 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{m}$ (Protonendurchmesser)	$2 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{m}$ ($\frac{1}{1000}$ Protonendurchmesser)	unbegrenzt	unbegrenzt
Kopplungsparameter	$\alpha_S \approx \frac{1}{2}, ., \frac{1}{10}$	$\alpha_W \approx \frac{1}{30}$	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$	$\alpha_{grav} \approx \frac{1}{10^{45}}, ., \frac{1}{10^{38}}$

Abb. 2: Die vier Grundkräfte der Physik

Antimaterie

Zu jedem Elementarteilchen gibt es ein so genanntes Antiteilchen (Abb. 3). Es hat genau die gleichen Eigenschaften wie das entsprechende Elementarteilchen, beispielsweise exakt dieselbe Masse. Seine Ladungen sind allerdings entgegengesetzt. So ist das Antiteilchen des negativ geladenen Elektrons das positiv geladene Positron. Wenn Teilchen und Antiteilchen aufeinandertreffen, vernichten sie sich gegenseitig.

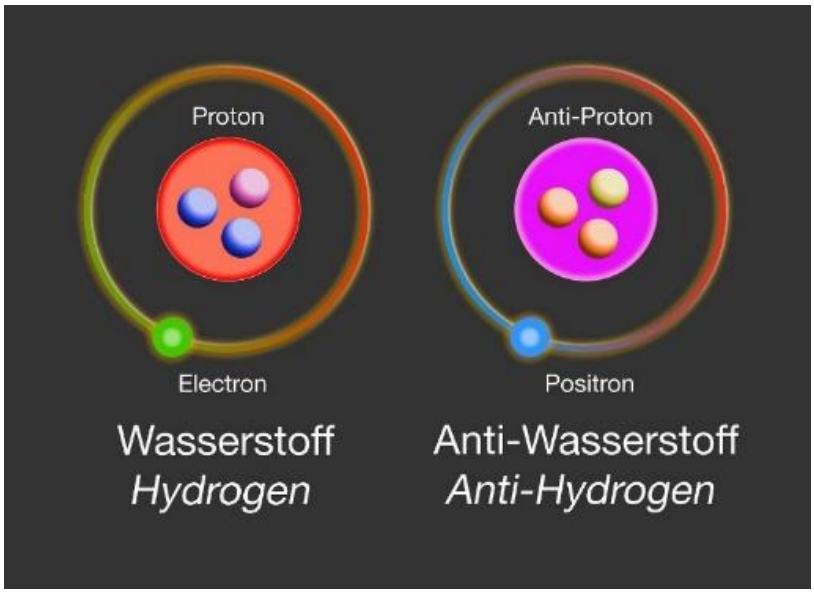


Abb. 3: Materie und Antimaterie

In der frühen Entstehungsphase unseres Universums standen die Erzeugung und die Vernichtung von Teilchen in einem Gleichgewicht. Nach wenigen Sekunden war das Universum aber soweit abgekühlt, dass sich nur noch Teilchen-Antiteilchen-Paare vernichteten, aber keine neuen mehr entstanden. Spuren dieses Vernichtungsprozesses sehen wir heute noch: die Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Gemäß dieser Vorstellung müsste sich allerdings alle entstandene Materie und Antimaterie vernichtet haben. Nun bestehen aber die Sonne, die Planeten und alles andere im Universum aus Materie. Man vermutet daher, dass es in der Frühphase des Universums Zerfälle von Teilchen gab, die etwas mehr Materie als Antimaterie erzeugt haben. Der nach der Vernichtung übrig gebliebene winzige Überschuss bildet heute die gesamte sichtbare Materie unseres Universums.

Was sind Materieteilchen?

Materie besteht aus Materieteilchen (auch Fermionen genannt). Insgesamt gibt es zwölf Materieteilchen, die in sechs Quarks und sechs Leptonen unterteilt werden. Beide Gruppen bestehen aus Teilchen dreier Generationen (Abb. 1).

Die Teilchen verschiedener Generationen ähneln sich in ihren Eigenschaften, sie unterscheiden sich aber in ihrer Masse voneinander: Die Materieteilchen der zweiten und dritten Generation sind schwerer als die der ersten Familie. Zudem sind die Materieteilchen der zweiten und dritten Generation instabil, das heißt sie zerfallen in Teilchen der ersten Familie. Die Materieteilchen der zweiten und dritten Generation, die es in der Frühphase unseres Universums in großen Mengen gab, sind im Laufe der Ausdehnung des Universums in ihre leichteren Geschwister zerfallen. Heute

besteht die uns umgebende sichtbare Materie ausschließlich aus Teilchen der ersten Generation.

Zu den Quarks der ersten Generation zählen die Up-Quarks und Down-Quarks. Sie bilden die Neutronen und Protonen. Charm- und Strange-Quarks sind die Quarks der zweiten Generation, und schließlich bilden Top- und Beauty-Quarks (auch Bottom-Quarks genannt) die Mitglieder der dritten Generation.

Quarks haben einen halbzahligen Spin. Ein Spin beschreibt den Eigendrehimpuls eines Teilchens. Quarks haben eine elektrische Elementarladung. Diese beträgt bei den Up-, Charm und Top-Quarks +2/3 e und bei den Down-, Strange- und Bottom-Quarks – 1/3 e. Dabei hat jedes Quark einer höheren Generation eine größere Masse als das entsprechende Quark der Niedrigeren. Allerdings unterscheiden sich die Massen auch innerhalb der Generationen stark. Zudem trägt jedes Quark neben seiner elektrischen auch eine zweite Art Ladung, die Farbladung oder Farbe genannt wird. Quarks können die Farbladungen rot (r), blau (b) und grün (g) tragen.

Die zweite Gruppe der fermionischen Elementarteilchen, ebenfalls mit halbzahligem Spin, sind die Leptonen, von denen es auch sechs Stück gibt. Auch sie sind in drei Generationen eingeteilt. Pro Generation haben wir hier jeweils ein massives, geladenes Teilchen und sein zugehöriges Neutrino, das elektrisch neutral und im Verhältnis sehr leicht ist.

Leptonen der ersten Generation sind das Elektron und das Elektron-Neutrino. Die zweite Generation wird gebildet vom Muon und dem Muon-Neutrino, und die dritte Generation der Leptonen stellen das Tau und das Tau-Neutrino dar.

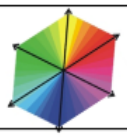
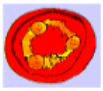
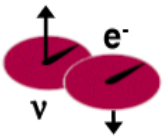
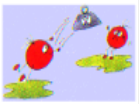
Teilchen der zweiten und dritten Generation können in Teilchenbeschleunigern wie dem LHC künstlich für sehr kurze Zeit erzeugt werden, bevor sie wieder in ihre leichteren Familienmitglieder zerfallen. Darüber hinaus entstehen sie häufig in der auf die Erde niedergehenden kosmischen Strahlung.

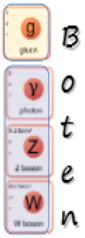
Austauschteilchen und Grundkräfte

Zwischen den Materieteilchen herrschen Wechselwirkungen oder Kräfte, die die Materie zusammenhalten (Abb. 2). Die Wechselwirkungen, die zwischen Materieteilchen herrschen, sind die **elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft**. Sie entstehen, weil die Materieteilchen winzige Austauschteilchen, so genannte Bosonen, austauschen. Die vierte bekannte Grundkraft, die **Gravitation**, spielt im Mikrokosmos keine Rolle. Deshalb haben Wissenschaftler zwar einige theoretische Vermutungen, aber bisher keinerlei experimentelle Hinweise, wie eine entsprechende Theorie der Gravitation mit Gravitonen als Austauschteilchen aussehen könnte.

Physiker haben festgestellt, dass alle Wechselwirkungen durch den Austausch von Austauschteilchen hervorgerufen werden. Sie haben sogar die Ursache für die Existenz der Wechselwirkungen gefunden: die Symmetrien (Abb. 4).

- Jede Wechselwirkung hat eigene Botenteilchen
- Botenteilchen koppeln nur an Teilchen mit entsprechender Ladung

	Ladung der Materieteilchen	Botenteilchen
Starke Wechsel-wirkung	Starke „Farb"-Ladung „Rot", „Blau", „Grün" 	Gluonen g 
Schwache Wechsel-wirkung	Schwache „Isospin"-Ladung $I_3^W = \begin{pmatrix} +1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$ 	„Weakonen" (W^+,W^-,Z) 
Elektro-magnetismus	Elektrische Ladung $Q = -1, +\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}, \ldots$	Photonen γ
Gravitation	über Supersymmetrie???	Gravitonen ?



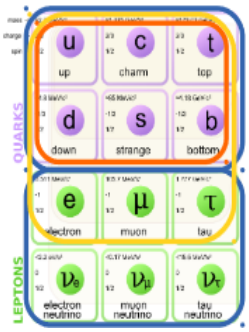


Abb. 4: Symmetrien

Symmetrie herrscht immer dort, wo man etwas ändert, aber trotzdem das Erscheinungsbild gleichbleibt. Das Standardmodell beruht auf drei Symmetrien, die aber nichts mit der räumlichen Form der Elementarteilchen, sondern vielmehr mit ihren Ladungseigenschaften zu tun haben. Zu jeder der drei Symmetrien gehört genau eine Ladungsart: Die uns vertraute elektrische Ladung, eine „starke Farbladung" der Quarks, und eine „schwache Ladung". Die Ladungs-Symmetrien kann man sich als Veränderung von Maßstäben vorstellen. Um zu erreichen, dass sich bei Veränderung der mit den Ladungen zusammenhängenden Maßstäbe nichts am Erscheinungsbild ändert, sind dauernde Anpassungen an die neuen Maßstäbe nötig. Diese Arbeit erledigen zu jeder Symmetrie gehörige Austauschteilchen, die zwischen den Materieteilchen hin- und hereilen und dadurch eine Wechselwirkung hervorrufen.

Die elektromagnetische Kraft entsteht durch den Austausch von Photonen, aus denen auch das Licht besteht. Ein elektrisch geladenes Elementarteilchen kann ein Photon erzeugen und vernichten. Interagiert es mit einem anderen elektrisch geladenen Elementarteilchen, so erzeugt es ein Photon, das mit dem anderen Elementarteilchen ausgetauscht und von diesem wieder vernichtet wird. Das Photon überträgt also die Wechselwirkung. Da das Photon masselos ist, wirkt die elektromagnetische Kraft über sehr große Reichweiten zwischen geladenen Teilchen.

Die starke Kraft hält die Quarks im Inneren von Protonen und Neutronen zusammen. Hier tauschen die Materieteilchen so genannte Gluonen aus, von denen es acht unterschiedliche gibt.

Die starke Ladung (oft auch Farbladung genannt) bestimmt, ob ein Teilchen der starken Wechselwirkung unterliegt. Quarks und Antiquarks tragen eine Farbladung, sowie auch die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, die Gluonen.

Während jede Teilchensorte nur eine bestimmte elektrische Ladung annehmen kann (im Falle von Elektronen: -1), gibt es Quarks mit drei verschiedenen Farbladungen. Man bezeichnet sie mit rot, blau und grün, und im Falle von Antimaterie mit antirot, antiblau und antigrün (Abb. 5).

Abb. 5: Quarks kommen nicht einzeln vor, sondern nur in farbneutralen oder „weißen“ Kombinationen. Entweder schließt sich ein Quark kurzzeitig mit einem Antiquark zusammen (links), oder es können sich drei Quarks oder drei Antiquarks zusammenschließen (rechts).

In der Natur kommen Quarks nicht einzeln vor, sondern nur in farbneutralen oder „weißen“ Kombinationen (Abb. 5). Das kann auf zwei Arten geschehen: Entweder schließen sich drei Quarks zusammen (rot + grün + blau = weiß) wie es zum Beispiel bei Protonen und Neutronen geschieht. Diese Teilchen werden unter dem Oberbegriff „Baryonen“ zusammengefasst. Die wichtigsten Baryonen sind wohl das Proton (uud) und das Neutron (udd), aus denen die Atomkerne gebildet werden und die dementsprechend auch Nukleonen heißen. Ein Proton besteht aus zwei up und einem Down-Quark, ein Neutron aus einem Up- und zwei Downquarks.

Alternativ kann sich ein Quark für kurze Zeit mit einem Antiquark zusammenschließen (Farbe + passende Antifarbe = weiß). Diese Paare nennt man „Mesonen“. Ein Beispiel dafür sind die Pionen, welche unter anderem entstehen, wenn kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft. Gluonen können acht Kombinationen aus Farbladungen tragen.

Sechs Gluonen haben jeweils zwei Farbladungen. Ein Quark kann seine Farbladung ändern, indem es ein entsprechendes Gluon aussendet. Weiterhin gibt es zwei Gluonen mit mehreren Farbladungen. Diese vermitteln Wechselwirkungen zwischen Quarks, bei denen sich deren Farbladung nicht ändert (Abb. 6).

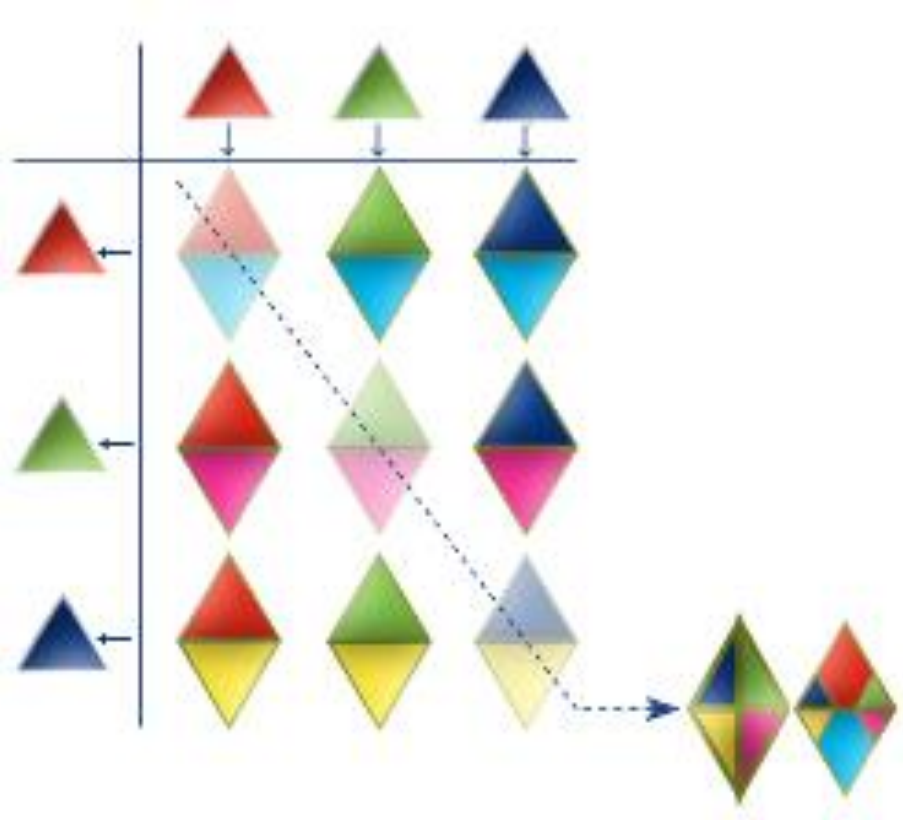


Abb. 6: Gluonen tragen Kombinationen von zwei oder mehr Farbladungen. Ein Quark mit einer Farbe der oberen Reihe kann sich in ein Quark der linken Spalte verwandeln, indem es das entsprechende zweifarbige Gluon aussendet. Es gibt nur acht Gluonen anstatt neun, denn Wechselwirkungen ohne Farbänderung werden durch zwei Gluonen vermittelt, die Kombinationen mehrerer Farbladungen tragen.

Die starke Wechselwirkung ist die "stärkste" unter den Wechselwirkungen, wie ihr Name schon sagt, ihre effektive Reichweite ist allerdings auf den Atomkern beschränkt.

Die schwache Kraft wirkt auf alle, auch auf elektrisch ungeladene Elementarteilchen. Sie ist beispielsweise für radioaktive Zerfälle verantwortlich. Sie erfolgt über den Austausch von so genannten Z-Bosonen und W-Bosonen. Die Reichweite der schwachen Kraft ist sehr klein, da die sie vermittelnden Austauschteilchen sehr große Masse haben. Die W- und Z-Bosonen wiegen fast 100-mal soviel wie ein Proton.

Die Materie- und die Austauschteilchen unterscheiden sich in einem wesentlichen Punkt voneinander: dem Spin oder Eigendrehimpuls. Materieteilchen wird ein halbzahliger Spin zugewiesen, also beispielsweise ½. Die Austauschteilchen haben einen ganzzahligen Spin, also beispielsweise 1.

Higgs-Boson

Woher aber die Elementarteilchen ihre Masse erhalten, ließ sich im Rahmen dieses Modells lange Zeit nicht beantworten.

1964 erschienen in der Fachzeitschrift „Physical Review Letters“ drei unabhängige Veröffentlichungen zu einem Mechanismus, der die Masse von Elementarteilchen erklären kann. Alle drei Aufsätze nahmen verschiedene Perspektiven ein und lieferten jeder einen Beitrag zur Gesamtidee. Die Autoren waren François Englert und Robert Brout, Peter Higgs sowie Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble.

Einer von ihnen, der britische Physiker Peter Higgs, entwickelte einen formalen Mechanismus, durch den zunächst masselose Teilchen durch Wechselwirkung mit einem Hintergrundfeld (dem Higgs-Feld) massiv werden. Ursprünglich im Rahmen der Festkörperphysik entwickelt, wurde das gleiche Prinzip auf die Elementarteilchenphysik übertragen. Interessant dabei ist, dass eine ursprünglich als fundamental angesehene Eigenschaft (eben die Masse) der Teilchen sich nunmehr als „Nebeneffekt“ einer Wechselwirkung darstellt.

Durch den Higgs-Mechanismus wird beschrieben, wie die grundlegende Eigenschaft „Masse“ auf der Ebene der Elementarteilchen zustande kommt. Als zentraler Bestandteil des Standardmodells der Elementarteilchenphysik erklärt der Mechanismus, warum bestimmte Austauschteilchen (die „Eichbosonen“ der schwachen Wechselwirkung) nicht die Masse Null besitzen. Demnach gewinnen sie ihre Masse durch Wechselwirkung mit dem sogenannten Higgs-Feld, welches im ganzen Universum allgegenwärtig ist. Auch die Massen aller anderen (massebehafteten) Elementarteilchen wie Elektronen und Quarks werden hierbei als Folge der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld erklärt. Mit diesem Ansatz wurde es möglich, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung als zwei verschieden starke Aspekte einer einzigen grundlegenden elektroschwachen Wechselwirkung zu deuten, was einen der wichtigsten Schritte zur Aufstellung des Standardmodells darstellt (Abb. 7).

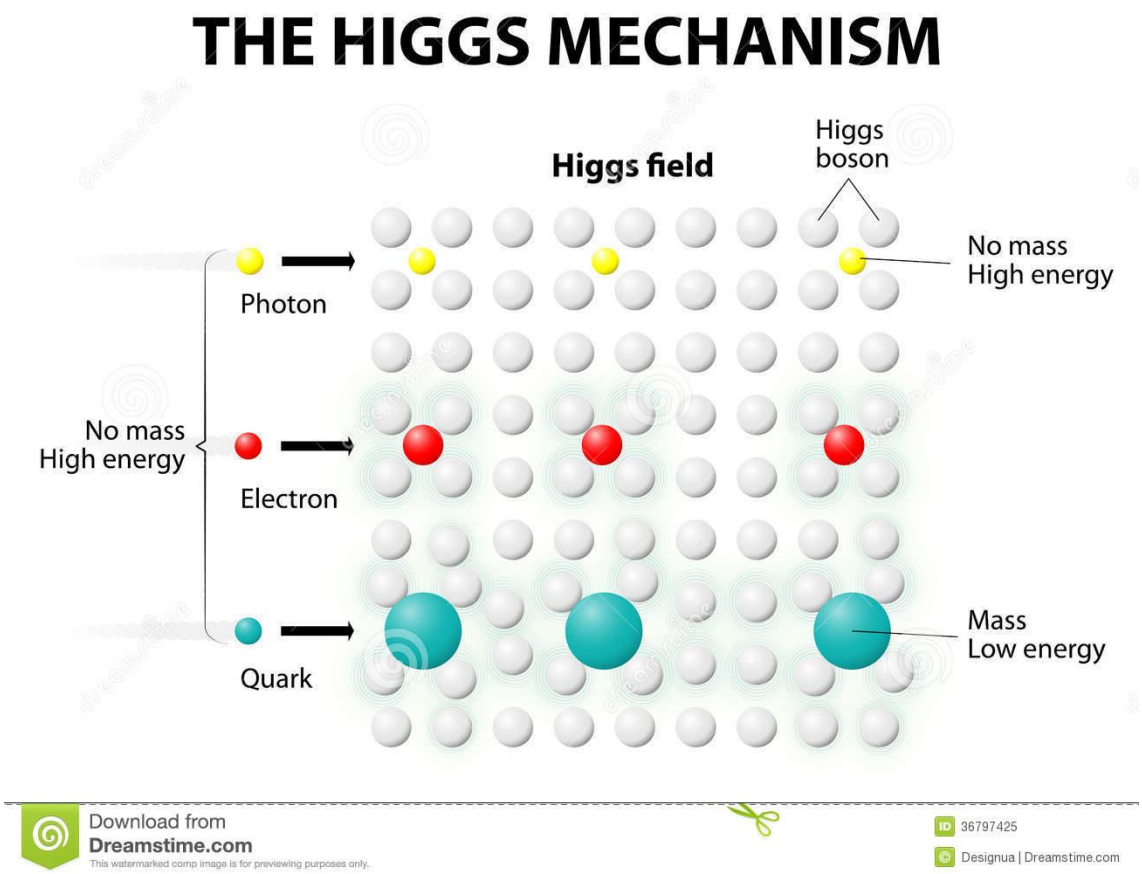


Abb. 7: Higgs-Mechanismus

Die Theorie sagte dabei die Existenz eines neuen Elementarteilchens voraus. Während das Higgs-Feld nicht direkt messbar ist, muss bei seiner Existenz ein weiteres Elementarteilchen auftreten, das „Higgs-Boson“.

Doch ob dieses hypothetische Teilchen tatsächlich existierte, war lange Zeit unklar. Im Juli 2012 gelang schließlich der Durchbruch: Mit dem Large Hadron Collider am Forschungszentrum CERN entdeckten Wissenschaftler ein Elementarteilchen, das viele Eigenschaften des postulierten Higgs-Bosons aufwies. Nach weiteren Analysen zeigte sich, dass es sich tatsächlich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen handelte.

Das Higgs-Teilchen hat keine elektrische Ladung und den Spin 0, ist somit ein Boson. Mit dem Fund des Higgs-Bosons zeigte sich, dass sich ihre rein theoretischen Überlegungen experimentell bestätigen lassen.

Das Standardmodell wurde im Wesentlichen in den Jahren 1961-1973 entwickelt. Es ist umfangreich getestet und erforscht worden und beschreibt hervorragend die Bausteine der Welt und ihre Wechselwirkungen. Allerdings gibt es auch eine Reihe offener Fragen, die es nicht beantworten kann.

So berücksichtigt es beispielsweise nicht die Gravitation. Diese spielt auf der Erde für uns Menschen eine große Rolle, ist aber in der Welt der kleinsten Teilchen so schwach, dass sie vernachlässigt werden kann. Bisher ist das Wechselwirkungsteilchen für die Gravitation noch nicht nachgewiesen worden.

Weiterhin besteht etwa ein Viertel des Universums aus Dunkler Materie. Diese Substanz lässt sich nicht mit den Teilchen des Standardmodells erklären. Geeignete Kandidaten für Teilchen, aus denen Dunkle Materie besteht, sind supersymmetrische Teilchen.

Physiker auf der ganzen Welt entwickeln das Standardmodell weiter und erweitern es um geeignete Ansätze, die etwa die Gravitation oder Supersymmetrie berücksichtigen, gleichzeitig das Standardmodell aber nicht grundsätzlich über den Haufen werfen.

Literatur

Bennett, J. Donhaue, M., Schneider, N., Voit, M. (2020): Astronomie die kosmische Perspektive. Pearson Verlag, 9. Auflage

Maran, S. M. (2008): Astronomie für Dummies. Wiley VCH Verlag, 3. Auflage

Pincock, S., Frary, M. (2009): Ursprung des Universums für Dummies. Wiley VCH Verlag, 1. Auflage

Lesch, H., Gaßner, J. M. (2020): Urknall, Weltall und das Leben. Verlag Komplett-Media, 4. Auflage

Netzwerk Teilchenwelt: Das Standardmodell der Teilchenphysik. Hintergrundinformationen https://www.teilchenwelt.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Netzwerk_Teilchenwelt/Material_Lehrkraefte/Standardmodell_Infos_01.pdf

Weltmaschine: Das Standardmodell der Teilchenphysik. https://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/