



ELEMENTARTEILCHEN-STECKBRIEFE

HINTERGRUNDINFORMATIONEN

In diesem Dokument finden Sie fachliche Informationen rund um Elementarteilchen und Wechselwirkungen. Die Fragen und Antworten wurden passend zu den Elementarteilchen-Steckbriefen zusammengestellt (s. Dateien [Teilchen_Steckbriefe_kurz] und [Teilchen_Steckbriefe_lang]). Anregungen zu deren Verwendung finden Sie im Dokument [Teilchen_Lehrerhinweise].

INHALT

1. Was sind Elementarteilchen ?	2
2. Was bedeutet die Angabe eV/c^2 ?	2
3. Wie erforscht man Elementarteilchen?	2
4. Was ist das Standardmodell der Teilchenphysik?	2
5. Was sind Quarks ?	2
6. Was sind Leptonen ?	2
7. Worin unterscheiden sich die drei Generationen der Materieteilchen?	3
8. Was ist Antimaterie ?	3
9. Was geschieht, wenn ein Teilchen zerfällt ?	3
10. Wie bestimmt man die Massen von Quarks?	3
11. Was versteht man unter der mittleren Lebensdauer eines Teilchens?	3
12. Was sind Austauschteilchen und Wechselwirkungen ?	4
13. Was bedeutet die Reichweite einer Wechselwirkung und wovon hängt sie ab?	4
14. Was sind Ladungen ?	5
15. Was ist eine starke Ladung (Farbladung) ?	5
16. Was ist eine schwache Ladung ?	6
17. Was ist das Higgs-Boson ?	6



HINTERGRUNDINFORMATIONEN

1. Was sind Elementarteilchen?

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 (s. Frage 12).

Elementarteilchen besitzen keine räumliche Ausdehnung – zumindest keine, die sich mit heutigen Messinstrumenten messen ließe. Alle Elementarteilchen derselben Sorte (z.B. alle Elektronen) besitzen die gleiche Masse und gleiche Ladungen (s. Fragen 14-16).

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.

2. Was bedeutet die Angabe eV/c²?

Das Elektronenvolt (eV) ist eine Einheit der Energie, die in der Teilchenphysik genutzt wird. Ein eV entspricht der Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es sich durch eine Spannung von einem Volt bewegt. 1 eV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Einsteins Formel $E = mc^2$ drückt aus, dass Masse eine Form von Energie ist; man spricht von der Masse-Energie-Äquivalenz.¹ Somit lässt sich die Masse in der Einheit eV/c² angeben.²

3. Wie erforscht man Elementarteilchen?

Elementarteilchen sind für unsere Sinne nicht wahrnehmbar, doch hinterlassen sie makroskopische Spuren, die mit speziellen Messgeräten sichtbar gemacht werden können. Solche Spuren wurden zum ersten Mal Ende des 19. Jahrhunderts in Nebelkammern beobachtet. Elektrisch geladene Teilchen ionisieren 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 massereichereren Teilchen ermöglichte.

4. Was ist das Standardmodell der Teilchenphysik?

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen (s. Frage 12). Es sind 12

Materieteilchen bekannt: 6 Quarks und 6 Leptonen, die jeweils in drei Generationen angeordnet sind. Alle bisher bekannte Materie besteht aus diesen Teilchen. Die Wechselwirkungen werden durch Austauschteilchen vermittelt (s. Frage 12).

Die allermeisten Voraussagen des Standardmodells wurden seit den 1970er Jahren experimentell bestätigt. Beispielsweise wurde damals die Existenz von massereichen Quarks vorhergesagt; später wurden diese mithilfe von Teilchenbeschleunigern erzeugt und nachgewiesen. Im Jahr 2012 wurde am CERN wahrscheinlich das letzte fehlende Elementarteilchen nachgewiesen – das Higgs-Boson (s. Frage 17).

Das Standardmodell liefert Erklärungen für viele Vorgänge in der Natur, jedoch gibt es noch viele offene Fragen, beispielsweise:

- Wie passt die Schwerkraft zum Standardmodell?
- Aus was besteht die Dunkle Materie, die einen Großteil der Masse des Universums ausmacht?
- Warum gibt es so viel mehr Materie als Antimaterie?

5. Was sind Quarks?

Eine Klasse von Materieteilchen wird als Quarks bezeichnet. Man unterteilt sie in die up-artigen Quarks, die eine elektrische Ladung von $+2/3$ tragen, und die down-artigen Quarks mit $-1/3$. Quarks können drei verschiedene starke Ladungen annehmen (auch „Farbladungen“ genannt). Aus diesem Grund sind drei verschiedenfarbige Symbole auf den Kärtchen abgebildet. Man bezeichnet die starken Ladungen mit rot, blau und grün, und im Falle von Antimaterie mit antirot, antiblau und antigrün (s. Frage 15). Die „Antifarben“ sind auf den Kärtchen als cyan, gelb und magenta dargestellt.

Quarks werden durch die starke Wechselwirkung (s. Frage 12) zusammengehalten. Diese ist dafür verantwortlich, dass Quarks in der Natur nicht einzeln vorkommen können. Nur Zusammenschlüsse aus drei Quarks oder aus je einem Quark und Antiquark konnten bisher eindeutig nachgewiesen werden. Der Überbegriff für diese Teilchen lautet „Hadronen“ (altgr.: *αδρός* *hadrós* ‚dick‘, ‚stark‘). Die bekanntesten Hadronen sind Protonen und Neutronen (aus 3 Quarks) sowie Pionen (aus einem Quark und einem Antiquark). Alle Hadronen tragen insgesamt eine ganzzahlige elektrische Ladung.

6. Was sind Leptonen?

Eine Klasse von Elementarteilchen wird „Leptonen“ (gr.: *λεπτός* *leptós* ‚klein‘, ‚fein‘) genannt. Anders als Quarks besitzen Leptonen keine starke Ladung (s. Frage 15); sie kommen also in der Natur einzeln vor.

Es gibt elektrisch geladene Leptonen (Elektronen, Myonen und Tauonen) und elektrisch neutrale Leptonen (Neutrinos).

¹ In den vorliegenden Materialien steht der Begriff „Masse“ stets für die Ruhemasse eines Teilchens. Die einzige Ausnahme ist die Formel $E = mc^2$. Hier steht das Kürzel „m“ für die relativistische Masse.

² In der teilchenphysikalischen Literatur werden Massen und Impulse ebenso wie Energie in eV angegeben. Dafür wird der konstante Faktor c gleich 1 gesetzt.



HINTERGRUNDINFORMATIONEN



Neutrinos besitzen lediglich eine schwache Ladung (s. Frage 16). Da die schwache Wechselwirkung eine extrem kurze Reichweite hat, wechselwirken Neutrinos äußerst selten mit Materie. Das macht es schwierig, sie in Detektoren nachzuweisen. In den Detektoren am CERN beispielsweise werden Neutrinos nur indirekt nachgewiesen, indem man die Gesamtenergie vor und nach einer Teilchenkollision vergleicht; wenn danach Energie „fehlt“, lässt sich daraus auf die Entstehung von einem oder mehreren Neutrinos schließen.

7. Worin unterscheiden sich die drei Generationen der Materieteilchen?

Sämtliche Materie unserer Umgebung besteht aus Up- und Down-Quarks sowie Elektronen. Diese Teilchen und die Elektron-Neutrinos bilden die „erste Generation“ der Materieteilchen. Von jedem dieser Teilchen existieren zwei schwerere „Kopien“, welche sich nur durch ihre Masse voneinander unterscheiden. So ist beispielsweise das Myon rund 200-mal massereicher als das Elektron, und das Tauon sogar rund 4000-mal schwerer. Die Teilchen der zweiten und dritten Generation sind instabil, d.h. sie wandeln sich innerhalb von Sekundenbruchteilen in leichtere Teilchen um (s. Frage 9). Warum es genau drei Generationen gibt, oder ob es vielleicht eine vierte, sehr viel schwerere Generation von Teilchen gibt, wird derzeit noch erforscht.

8. Was ist Antimaterie?

Zu jedem Materieteilchen gibt es ein Antimaterieteilchen mit gleicher Masse, aber entgegengesetzten Ladungen (s. Fragen 14-16). Isolierte Antimaterieteilchen verhalten sich genauso wie Materie.

Trifft ein Antiteilchen jedoch auf seinen Materiepartner, entstehen aus der vorhandenen Energie (Masse und Bewegungsenergie) ein oder mehrere Austauschteilchen. Diesen Prozess nennt man „Annihilation“ oder „Vernichtung“. Meist entsteht dabei elektromagnetische Strahlung in Form von zwei Photonen³.

Der umgekehrte Prozess heißt „Paarbildung“: Aus Energie in Form von Austauschteilchen entsteht ein Teilchen-Antiteilchen-Paar. Man geht davon aus, dass beim Urknall auf diese Weise Materie und Antimaterie in gleichen Mengen aus Energie entstanden sind. Warum nicht alle Materie wieder annihilirt wurde, so dass wir in einem Universum aus der übrig gebliebenen Materie existieren, ist eine ungelöste Frage aktueller Forschung.

9. Was geschieht, wenn ein Teilchen „zerfällt“?

Stabile Materie besteht nur aus Elementarteilchen der ersten Generation: Elektronen, Up- und Down-Quarks. Elementarteilchen der zweiten und dritten Generation wandeln sich nach kurzer Zeit in leichtere Teilchen um; man sagt, sie „zerfallen“. Die Zerfallsprodukte sind allerdings keine Bruchstücke des ursprünglichen Teilchens, sondern völlig neue Teilchen. Bei Zerfällen gelten Impuls- und Energieerhaltung sowie weitere Erhaltungssätze. Insbesondere muss die Summe aller Ladungen vor und nach dem Zerfall gleich sein (Ladungserhaltung).

10. Wie bestimmt man die Massen von Quarks?

Da Quarks in der Natur nicht einzeln vorkommen, kann man ihre Masse nicht direkt messen. Stattdessen bestimmen Forscher die Masse von Hadronen – das sind Teilchen, die aus Quarks bestehen, wie beispielsweise Protonen – und schließen daraus auf die Masse der einzelnen Quarks. Die Masse der schwereren Quarks kann genauer bestimmt werden als die der leichteren.⁴

11. Was versteht man unter der mittleren Lebensdauer eines Teilchens?

Nicht alle Elementarteilchen sind stabil. Up-Quarks und Elektronen und ihre Antiteilchen haben eine prinzipiell unbegrenzte Lebensdauer; auch Photonen und Gluonen könnten unbegrenzt lange existieren, wenn sie niemals mit anderen Teilchen wechselwirken würden. Die (Anti-)Materieteilchen der zweiten und dritten Generation sowie W- und Z-Bosonen zerfallen dagegen schnell in leichtere Teilchen (s. Frage 9).

Man kann die Lebensdauer eines individuellen Teilchens jedoch nicht exakt vorhersagen, sondern lediglich die Wahrscheinlichkeit angeben, dass es innerhalb eines Zeitintervalls zerfallen wird. Die mittlere Lebensdauer einer Teilchensorte (z.B. Myonen) entspricht der Zeit, nach der die Anzahl dieser Teilchen nur noch den Bruchteil $1/e$ (etwa 36,8 Prozent) von der ursprünglichen Anzahl beträgt. Das entspricht also nicht der Halbwertszeit, die bei Kernzerfällen verwendet wird.

Die Lebensdauer eines Teilchens hängt unter anderem von seiner Masse und der Anzahl der Zerfallsmöglichkeiten ab. Je massereicher ein Teilchen ist und je mehr Zerfallsmöglichkeiten es gibt, desto kürzer ist im Allgemeinen seine Lebensdauer.

Die Lebensdauer von **Quarks** lässt sich nicht direkt messen, da sie nicht einzeln vorkommen. Bei den auf den Steckbriefen angegebenen Lebensdauern handelt es sich um Schätzungen,

³ Je nachdem, welche Teilchen zusammenstoßen, können auch mehrere Gluonen oder ein Z-Boson entstehen. Wenn ein Quark auf ein Antiquark der gleichen Generation und der gleichen schwachen Ladung trifft oder ein Lepton auf ein passendes Antilepton (z.B. ein Elektron auf ein Elektron-Antineutrino oder ein Up-Quark auf ein Down-Antiquark), vernichten sich diese in ein W^- - bzw. W^+ -Boson.

⁴ Die Masse eines Hadrons ist nicht einfach die Summe der Quarkmassen, sondern auch deren Bindungsenergie trägt einen großen Teil zur Masse bei. Bei aus Up- und Down-Quarks gebildeten Hadronen überwiegt der Anteil der Bindungsenergie, so dass die Massen der einzelnen Quarks nur annäherungsweise mithilfe theoretischer Modelle berechnet werden können. Bei Hadronen, die aus schwereren Quarks bestehen, macht deren Masse einen großen Anteil der Gesamtmasse des Hadrons aus. Dadurch lassen sich die einzelnen Quarkmassen genauer bestimmen. Ein Sonderfall ist das Top-Quark: Es zerfällt so schnell, dass es keine Hadronen bilden kann. In diesem Fall rekonstruiert man die Masse des zerfallenen Top-Quarks aus den Energien seiner Zerfallsprodukte.



HINTERGRUNDINFORMATIONEN



die aus Zerfällen verschiedener Hadronen berechnet wurden. Down-Quarks sind nur dann stabil, wenn sie sich mit zwei Up-Quarks zu einem **Proton** zusammenschließen. Protonen sind stabil, da es kein leichteres Hadron mit dem gleichen Spin ($\frac{1}{2}$) gibt, in das sie zerfallen könnten.

Bei **Neutrinos** kann man nicht von einer Lebensdauer sprechen. Experimente zeigen, dass sie offenbar nicht wie andere Teilchen zerfallen. Mit der Ausbreitung eines Neutrinos ändert sich vielmehr ständig die Wahrscheinlichkeit, es in einem bestimmten „Flavour“ vorzufinden (Elektron-Neutrino ν_e , Myon-Neutrino ν_μ oder Tau-Neutrino ν_τ). Diese Besonderheit wird „Oszillation“ genannt.

12. Was sind Austauschteilchen und Wechselwirkungen?

Die Wechselwirkungen sorgen dafür, dass sich Elementarteilchen anziehen, abstoßen oder auf andere Weise aufeinander einwirken: Teilchen können entstehen (z.B. bei der Paarbildung), sich gegenseitig vernichten (wenn ein Materie- und ein Antimaterieteilchen zusammentreffen) oder sich ineinander umwandeln (z.B. die Umwandlung eines Down-Quarks in ein Up-Quark beim Betazerfall).

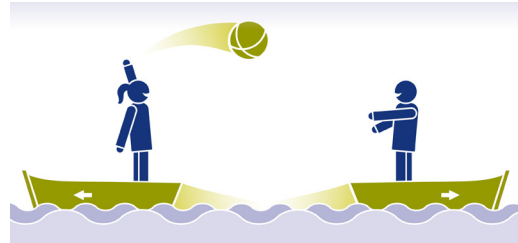
Alle Vorgänge in der Natur lassen sich mithilfe von vier Wechselwirkungen (oft auch einfach „Kräfte“ genannt) beschreiben:

- die elektromagnetische Wechselwirkung,
- die starke Wechselwirkung, die für den Zusammenhalt der Atomkerne und die Anziehung der Quarks untereinander sorgt,
- die schwache Wechselwirkung, die radioaktive Zerfallsprozesse (Betazerfall) und die Kernfusion ermöglicht,
- die Gravitation, die eine gegenseitige Anziehung aller massebehafteten Teilchen bewirkt.

Nur die ersten drei Wechselwirkungen spielen in der Teilchenphysik eine Rolle. Die Gravitation wird dagegen am besten von der Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieben. Es ist noch nicht gelungen, sie in den Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik zu integrieren.

Die Wechselwirkungen werden mithilfe von Austauschteilchen vermittelt. Je nach Zusammenhang werden diese manchmal auch als Kraftteilchen, Botenteilchen o.ä. bezeichnet.

Alle Austauschteilchen gehören zu den Bosonen (Teilchen mit ganzzahligem Spin). Im Falle einer abstoßenden Kraft kann man sich die Wirkung von Austauschteilchen so wie in Abb. 1 vorstellen.



► Abb. 1: Die Figuren im Boot entsprechen Elementarteilchen, der Ball einem Austauschteilchen.

Das bekannteste Austauschteilchen ist das **Photon**, welches die **elektromagnetische Wechselwirkung** vermittelt.

Die **Gluonen** (engl. to glue = kleben) vermitteln die **starke Wechselwirkung** (s. Frage 15).

Die **schwache Wechselwirkung** (s. Frage 16) wird durch die massereichen Austauschteilchen **W⁺, W⁻ und Z⁰** vermittelt, auch W- und Z-Bosonen genannt.

Die Existenz eines Austauschteilchens der Gravitation (das Graviton) wird zwar von verschiedenen Theorien vorhergesagt, jedoch wurde es noch nicht experimentell nachgewiesen. Die Gravitation ist rund 10^{40} -mal schwächer als die starke Wechselwirkung. Trotzdem hat sie für den menschlichen Alltag eine offensichtliche Bedeutung, da die Erde extrem groß ist und da sie stets eine anziehende Kraft bewirkt, die durch nichts abgeschirmt werden kann (es gibt keine negative Masse).

13. Was bedeutet die Reichweite einer Wechselwirkung und wovon hängt sie ab?

In der Langversion der Steckbriefe ist bei den Austauschteilchen die Reichweite der jeweiligen Wechselwirkung angegeben. Diese gibt an, bis zu welcher Entfernung Elementarteilchen wechselwirken können.

Die elektromagnetische Wechselwirkung hat eine prinzipiell unbegrenzte Reichweite, da ihre Austauschteilchen (Photonen) keine Ruhemasse besitzen und keine Ladungen tragen; sie wechselwirken also nicht miteinander. Gluonen sind zwar ebenfalls masselos und elektrisch neutral, jedoch tragen sie eine Kombination aus zwei oder mehr Farbladungen, so dass sie miteinander wechselwirken. Deswegen hat die starke Wechselwirkung nur eine Reichweite von rund 10^{-15} m, was etwa einem Protonendurchmesser entspricht.⁵

⁵ Die starke Wechselwirkung verhält sich prinzipiell anders als die elektromagnetische Wechselwirkung oder die Gravitation. Es ist mit einem endlichen Energieaufwand möglich, zwei elektrisch geladene Teilchen voneinander zu trennen oder eine Rakete aus dem Gravitationsfeld der Erde zu lösen. Wenn dagegen Quarks voneinander getrennt werden sollen, steigt die nötige Energie mit wachsendem Abstand bis ins Unendliche. Bei Abständen von etwa einem Femtometer (10^{-15} m) ist die nötige Energie so groß, dass sich daraus neue Quark-Antiquark-Paare bilden können. Diese bilden dann mit den Quarks, die man zu trennen versucht, neue Hadronen.

Quarks sind also gewissermaßen im Inneren von Hadronen gefangen; diese Eigenschaft nennt man „Confinement“. Die Reichweite der starken Wechselwirkung wird aus dem beschriebenen Grund üblicherweise mit 10^{-15} m angegeben.



HINTERGRUNDINFORMATIONEN

Die schwache Wechselwirkung wird von W- und Z-Bosonen vermittelt. Deren Masse ist um ein Vielfaches höher als die eines Protons; zu ihrer Erzeugung ist also viel Energie notwendig. An vielen Prozessen (z.B. Betazerfall, Kernfusion) sind W- und Z-Bosonen beteiligt, obwohl hierbei nicht genug Energie zur Verfügung steht, um sie mit ihrer tatsächlichen Masse zu erzeugen. Die Austauschteilchen können dann trotzdem als „virtuelle Teilchen“ entstehen – allerdings mit einer kleineren Masse, und nur für sehr kurze Zeit.⁶ Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung beträgt daher nur etwa 10^{-18} m.⁷

14. Was sind Ladungen?

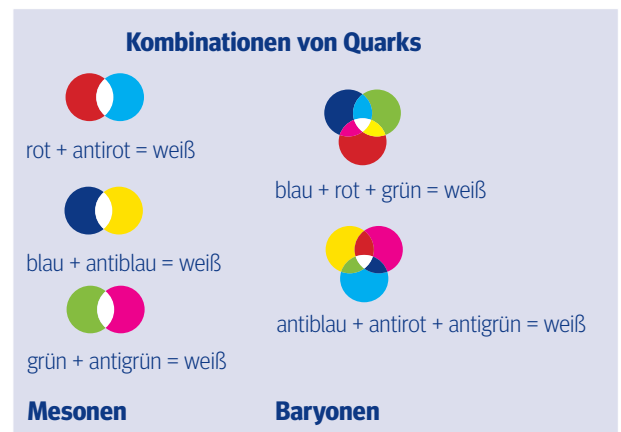
Eine Ladung ist eine Eigenschaft eines Teilchens, die bestimmt, ob und wie es von den vier Wechselwirkungen beeinflusst wird. Am bekanntesten ist die elektrische Ladung: Ist ein Teilchen positiv oder negativ elektrisch geladen, unterliegt es der elektromagnetischen Wechselwirkung, ansonsten nicht. Analog gibt es für die anderen Wechselwirkungen jeweils eine zugehörige Ladung. Zur schwachen Wechselwirkung gibt es die schwache Ladung, zur starken Wechselwirkung gehört die starke Ladung, auch „Farbladung“ genannt.

15. Was ist eine starke Ladung?

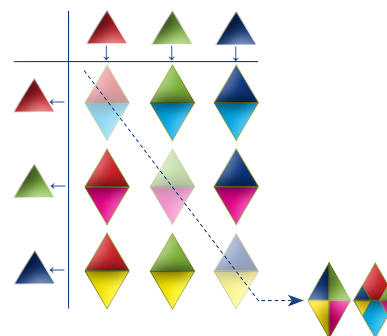
Die starke Ladung (oft auch Farbladung genannt) bestimmt, ob ein Teilchen der starken Wechselwirkung unterliegt. Quarks und Antiquarks tragen eine Farbladung, sowie auch die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, die Gluonen. Während jede Teilchensorte nur eine bestimmte elektrische Ladung annehmen 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 (Die Antifarben sind auf den Kärtchen als cyan, gelb und magenta dargestellt.).

In der Natur kommen Quarks nicht einzeln vor, sondern nur in farbneutralen oder „weißen“ Kombinationen (s. Abb. 2). 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. 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. Daher sind auf den Kärtchen acht Symbole abgebildet. 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 (s. Abb. 3).



► Abb. 2: 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).



► Abb. 3: Ein Quark mit einer Farbe der oberen Reihe kann sich in ein Quark der linken Spalte verwandeln, indem es das entsprechende Gluon aussendet. Wechselwirkungen ohne Farbänderung werden durch zwei Gluonen vermittelt, die Kombinationen der diagonalen Gluonen sind.

⁶ Das geschieht sehr selten, d.h. die Wahrscheinlichkeit für eine schwache Wechselwirkung ist sehr gering, wenn die Energien der beteiligten Teilchen niedrig sind. Dies ist so ähnlich, als ob man ein schwingungsfähiges System (z.B. eine Feder) fern von dessen Eigenfrequenz zum Schwingen anregt; dann wird das System nur mit einer kleinen Auslenkung (Amplitude) schwingen. Die Eigenfrequenz entspricht der tatsächlichen Masse des W-Bosons und die kleine Amplitude der Seltenheit der Wechselwirkung.

⁷ Die Reichweite der schwachen Wechselwirkung lässt sich folgendermaßen abschätzen: W- und Z-Bosonen können höchstens eine Zeitspanne Δt lang existieren. Diese ist durch die Energie-Zeit-Unschärferelation gegeben: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$. ΔE entspricht hier der Masse des W- oder Z-Bosons (80 bzw. 91 GeV). Die Entfernung, welche die Bosonen in der Zeit Δt zurücklegen können, ist etwa $R = c \cdot \Delta t$ (c = Lichtgeschwindigkeit). Wenn man die entsprechenden Werte einsetzt, erhält man eine Reichweite von etwa 10^{-18} m.



16. Was ist eine schwache Ladung?

Die schwache Ladung bestimmt, ob ein Teilchen der schwachen Wechselwirkung unterliegt. Alle Materie- und Antimaterieteilchen tragen eine halbzahlige schwache Ladung. Austauschteilchen tragen eine ganzzahlige schwache Ladung (W-Bosonen) oder keine (Photonen, Gluonen und Z-Bosonen).

Die schwache Wechselwirkung ermöglicht die Umwandlung von schweren Leptonen in leichtere Leptonen und von schweren Quarks in leichtere Quarks. Letzteres geschieht beispielsweise bei der Kernfusion in Sternen sowie beim Betazerfall.

Neutrinos sind die einzigen Materieteilchen, die außer der schwachen Ladung keine weitere Ladung besitzen. Sie unterliegen also nur der schwachen Wechselwirkung, die eine sehr kurze Reichweite hat (s. Frage 13). Deswegen können sie sich weite Strecken durch Materie bewegen, ohne jemals mit einem anderen Teilchen zu wechselwirken. Daher sind sie in Detektoren sehr schwierig nachzuweisen.

17. Was ist das Higgs-Boson?

Schon seit über 40 Jahren suchen Forscher nach diesem Elementarteilchen – dem letzten fehlenden Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik. Im Juli 2012 wurde am CERN die Existenz eines bisher unbekanntes Elementarteilchens nachgewiesen, bei dem es sich wahrscheinlich um das Higgs-Boson handelt. Wenn seine Existenz nachgewiesen wird, ist das ein überzeugender Hinweis für die Richtigkeit des Standardmodells, und dessen Erklärung dafür, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten.

Das theoretische Gebäude des Standardmodells funktioniert nur dann, wenn Elementarteilchen keine Masse besitzen. Doch das stimmt offensichtlich nicht: Wenn das so wäre, könnten sich keine festen Strukturen bilden, weil masselose Teilchen stets mit Lichtgeschwindigkeit fliegen. Wie erhalten Teilchen also „nachträglich“ ihre Masse?

Eine mögliche Erklärung haben Peter Higgs und andere Physiker 1964 gegeben: Ihre Theorie besagt, dass das ganze Universum von dem sogenannten „Higgs-Feld“ erfüllt ist. Manche Teilchen, wie beispielsweise Photonen, fliegen ungehindert durch dieses Feld und bewegen sich daher mit Lichtgeschwindigkeit; anderen Teilchen setzt das Higgs-Feld Widerstand entgegen, als ob sie sich durch zähen Honig bewegen würden. Somit bewegen sich die Teilchen langsamer – sie verhalten sich, als hätten sie Masse.⁸

Warum verschiedene Teilchensorten allerdings jeweils eine bestimmte Masse tragen und nicht irgendeine andere, erklärt das Standardmodell nicht.⁹

Wir spüren das Higgs-Feld nicht, weil es strukturlos und homogen ist und überall im Universum existiert – so ähnlich, wie man Luft nicht bemerkt, wenn es windstill ist. Erst wenn man in der Luft Druckwellen erzeugt, spürt man diese als Geräusch oder Wind. Analog dazu sollte das Higgs-Feld „schwingen“, wenn energiereiche Teilchen hindurchfliegen. Diese Schwingungen heißen „Higgs-Bosonen“; sie sollten sich als neue Elementarteilchen nachweisen lassen. Der Teilchenbeschleuniger LHC wurde insbesondere zu diesem Zweck gebaut.

Das Teilchen, das 2012 am CERN entdeckt wurde, entspricht dem vom Standardmodell vorhergesagten „Steckbrief“ des Higgs-Bosons: Es ist massereich und elektrisch neutral, und die Messergebnisse sind mit einem Spin von 0 verträglich. Doch ist es wirklich das Higgs-Boson oder ein unerwarteter „Zwilling“? Und gibt es vielleicht nicht nur eine Art von Higgs-Boson, sondern gleich mehrere? Um solche Fragen zu klären, werden Forscher noch einige Jahre brauchen. Es bleibt also spannend!

⁸In der Tat waren Teilchen in der ersten Billionstelsekunde nach dem Urknall masselos. Erst dann war das Universum genügend abgekühlt, damit das Higgs-Feld kondensieren konnte.

⁹Das Higgs-Feld erklärt lediglich, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten, nicht dagegen größere Objekte. Beispielsweise stammt der größte Teil der Masse von Protonen und Neutronen von der Bindungsenergie zwischen den Quarks. Das Higgs-Feld liefert auch keine Erklärung dafür, wie die Gravitation funktioniert. Higgs-Bosonen können auch keine Kandidaten für die geheimnisvolle „Dunkle Materie“ sein, die wahrscheinlich einen Großteil des Universums ausfüllt – schließlich ist das Higgs-Boson nicht stabil, sondern wandelt sich nach seiner Erzeugung sehr schnell in andere Teilchen um.