

Von Quarks und Higgs - Die Elementarteilchen des Standardmodells

Ein Themenheft für den Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe

Autor

Matthias Zimmermann

(Kontakt: matthias_zimmermann@hotmail.de)

Übersicht der Zehnerpotenzen, ihrer Symbole sowie der wichtigsten Konstanten:

Zehnerpotenz	Zahl	Symbol
10^{-15}	0,00 000 000 000 000 1	f femto
10^{-12}	0,00 000 000 000 1	p pico
10^{-9}	0,00 000 000 1	n nano
10^{-6}	0,00 000 1	μ mikro
10^{-3}	0,00 1	m milli
10^{-2}	0,01	c centi
10^{-1}	0,1	d dezi
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1 000	k kilo
10^6	1 000 000	M Mega
10^9	1 000 000 000	G Giga
10^{12}	1 000 000 000 000	T Tera
10^{15}	1 000 000 000 000 000	P Peta

Konstante	Bedeutung	Wert
e	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
c	Lichtgeschwindigkeit	299 792 458 m/s
h	Plancksches Wirkungsquantum	$4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
$\hbar = h/2\pi$	Reduziertes Plancksches W.	$6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$
1 eV	Elektronenvolt	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

INHALTSVERZEICHNIS

Einführende Worte	1
1 Grundkenntnisse zum Atom	2
2 Eigenschaften von Elementarteilchen	5
2.1 Masse	5
2.2 Ausdehnung und Form	6
2.3 Elektrische Ladung	6
2.4 Spin	6
3 Quarks	8
3.1 up und down	8
3.2 charm und strange	9
3.3 top und bottom	10
4 Antimaterie	12
5 Leptonen	14
5.1 Elektron	14
5.2 Myon	14
5.3 Tauon	15
5.4 Neutrinos	15
6 Wechselwirkungen und Bosonen	18
6.1 Virtuelle Teilchen	19
6.2 Elektromagnetische WW - Photon	20
6.3 Starke WW - Gluon	21
6.4 Schwache WW - W und Z Boson	23
6.5 Gravitation	24
7 Feynman-Diagramme	26
8 Moderne Nachweismethoden	28
8.1 Beschleuniger	28
8.2 Detektoren	31
9 Entdeckung des Higgs-Bosons	34
Abschließende Bemerkungen	35
Lösungen zu den Aufgaben	36

EINFÜHRENDE WORTE

Richard P. Feynman, Begründer der Quantenelektrodynamik, sagte einmal:

„Es gab eine Zeit, als Zeitungen sagten, nur zwölf Menschen verstünden die Relativitätstheorie. Ich glaube nicht, dass es jemals eine solche Zeit gab. Auf der anderen Seite denke ich, sicher sagen zu können, dass niemand die Quantenmechanik versteht.“

Diese Aussage soll dich natürlich nicht abschrecken. Vielmehr zeigt sie, dass die Kluft zwischen den Fortschritten der Wissenschaft und dem allgemeinen Verständnis immer größer wird. Dies soll durch dieses Themenheft ein wenig aufgefangen werden, indem es dir das sogenannte „Standardmodell der Elementarteilchen“ näher bringt, das alle heute bekannten Elementarteilchen samt ihren gegenseitigen Wechselwirkungen beschreibt. Es werden dabei keine quantenmechanischen Gleichungen oder komplizierten Theorien behandelt, sondern auf anschauliche Weise die wichtigsten Aspekte vermittelt.

Die Bedeutung dieses Themas für die Wissenschaft der heutigen Zeit zeigt sich auch an den verliehenen Physik-Nobelpreisen. Mehr als die Hälfte lassen sich der Quantenmechanik und der theoretischen Erforschung und Entdeckung der kleinsten Strukturen des Universums zuordnen. Von der Entdeckung der radioaktiven Strahlung über das Elektron bis zur Bestätigung der Theorie von Peter Higgs, der das Higgs-Teilchen vorhersagte und damit wichtige

Fortschritte zur Beantwortung der Frage lieferte, warum Teilchen unterschiedliche Massen haben.

Die angesprochene Anschaulichkeit, die dieses Themenheft für das Standardmodell der Elementarteilchen liefern möchte, hat aber auch ihre Grenzen. So werden hier (außer in Ausnahmefällen) keine Verbildlichungen von Teilchen in Form von Kügelchen oder ähnlichem vorgeführt. Bei einem Atom kann eine äußere Hülle noch über die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Elektronen definiert werden. Bei den elementaren Teilchen konnte man aber bislang noch keine Hülle oder Form finden, weshalb man sie als punktförmig annimmt. Damit würde jede visuelle Darstellung falsche Vorstellungen wecken.

Für eine problemlose Bearbeitung dieses Themenheftes solltest Du über einige Vorkenntnisse verfügen. Vorwiegend:

- Atom: Hülle und Kern
- Kern: Protonen und Neutronen
- Beschleunigung von Ladung in E-Feldern
- Ablenkung in magnetischen Feldern
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Um das Vorankommen in den vielen Aspekten des Standardmodells produktiv zu unterstützen, abstrakte Zusammenhänge zu veranschaulichen und den Lerneffekt zu verstärken sind regelmäßig Aufgaben gestellt. Für eine vollständige Bearbeitung solltest du also Papier, Stift und einen Taschenrechner zur Hand haben.

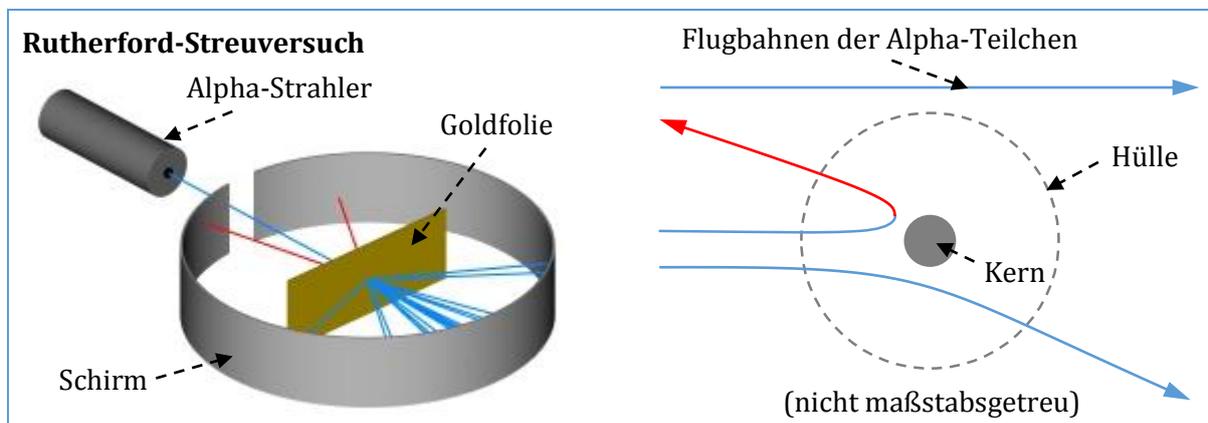
Über den Aufbau eines Atoms hast Du schon Vieles gelernt. Da diese Kenntnisse natürlich grundlegend für das Verständnis der Elementarteilchen sind, beginnen wir mit einer kurzen Wiederholung. Um das Wissen aufzufrischen werden wir auch die wichtigsten Experimente dazu nochmal aufgreifen.

Man ging lange davon aus, dass alle Materie aus Atomen besteht, die nicht weiter zerlegt werden können. Deshalb wurden sie nach dem griechischen Wort *átomos* für „das Unzerlegbare“ benannt. Wie du aber sicherlich weißt, ist ein Atom wiederum aus Elektronen in der Hülle und Protonen und Neutronen im Kern aufgebaut. Es kann demnach nicht als elementar gelten. Sind also Elektronen, Protonen und Neutronen die elementaren Teilchen? Wir schauen sie uns erstmal an und versuchen später noch kleinere Teilchen in ihnen zu finden.

Anhand der Elektronenhülle kann man die äußere Ausdehnung eines Atoms definieren. Sie hat einen Durchmesser von etwa 100 000 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$). Innerhalb dieser befinden sich die Elektronen (altgriechisch: *élektron* „Bernstein“), die übrigens auch heute noch als Elementarteilchen angesehen werden. Ihre Ladung von $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (per Definition allerdings negativ) ist die Elementarladung und damit die kleinste in der Natur vorkommende Ladung. Alle anderen Ladungen

sind ein Vielfaches davon. Sie konnte erstmals durch R. A. Millikan anhand von winzigen Öltröpfchen bestimmen werden. Die Masse von Elektronen konnte J.J. Thomson mittels der Ablenkung beschleunigter Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern bestimmen. Sie ist mit $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ fast 2000-mal kleiner ist als die Masse eines Wasserstoffatoms.

Wenn man aus einem Atom alle Elektronen herauslöst (es also ionisiert), bleibt natürlich nur der Atomkern übrig, der von E. Rutherford entdeckt wurde. Vielleicht kennst du den unten links abgebildeten Rutherford-Streuversuch, bei dem er Alpha-Strahlung auf eine Goldfolie schoss, um die Struktur der Atome darin zu untersuchen. Trifft die Alpha-Strahlung auf den äußeren Schirm aus Zink-Sulfid, so wird dort ein kleiner Lichtblitz hervorgerufen, der mit bloßem Auge sichtbar ist. Durch diesen Versuch kann gezeigt werden, dass die Strahlung nicht bloß gerade durch die Folie hindurch geht, sondern abgelenkt wird (unten rechts abgebildet). Als Rutherford bemerkte, dass sogar einige Lichtblitze auf der anderen Seite der Folie zu sehen sind (rote Linien, etwa jedes 8000ste Teilchen), kam er zu dem Schluss, dass ein massiver Kern im Atom mit einem Durchmesser von etwa 1 fm sein muss.



Da ein Atom elektrisch neutral ist und negativ geladene Elektronen enthält, muss der Kern positiv geladene Teilchen enthalten, die diese negative Ladung gerade kompensieren. Diese Kernteilchen werden Protonen genannt (altgriechisch: to prōton „das Erste“) und besitzen demnach eine Ladung von $+e$. Die Masse eines Protons lässt sich leicht anhand des Wasserstoff-Atoms herausfinden. Dieses besteht nur aus einem Elektron und einem Proton und folglich ergibt die Differenz der Masse des Atoms und des Elektrons die Masse des Protons mit $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Bei anderen Atomen stimmt diese Rechnung allerdings nicht, da ihre Kerne zusätzlich noch Neutronen (von „neutrale Protonen“) enthalten. Da jedes Atom in seinem Grundzustand genauso viele Protonen wie Elektronen enthält, besitzen Neutronen keine elektrische Ladung. Sie tragen also zunächst nur zur Masse bei. Das Proton und das Neutron werden als Nukleonen (lat.: nucleus „der Kern“) bezeichnet, also als Kernteilchen.

Zwischen dem Kern und der Hülle befinden sich also nur Elektronen und sonst nichts. Auf die Frage was sich zwischen Atomen befindet, antworten viele intuitiv „Luft“. Luft wird also häufig als Synonym für „Nichts“ verwendet, was aber natürlich falsch ist. Sie besteht aus verschiedenen Gasen und diese wiederum aus Atomen. Zwischen den Atomen dieser Gase kann demnach nicht wieder Luft sein. Aber auch „Nichts“ ist eine unzureichende Antwort, wie du im weiteren Verlauf noch erkennen wirst. Wir nennen es erstmal leeren Raum und kommen später darauf zurück.

Um immer eine schnelle Übersicht über die Teilchen zu haben, werden wir im Verlauf dieses Themenheftes eine Art „Periodensystem der Elementarteilchen“ erstellen. Darin sollen auch die wichtigsten Eigenschaften aufgeführt sein, wie die Masse und die elektrische Ladung. Zwar sind die Nukleonen keine Elementarteilchen, allerdings beginnen wir hier mit dem aktuellen Kenntnisstand und überarbeiten und erweitern sie im weiteren Verlauf.

Masse →	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	$1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Ladung →	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	0
Name →	Elektron	Proton	Neutron

Veranschaulichung der Größenverhältnisse von Hülle und -kern

Vielleicht hast du schon einmal Vergleiche gesehen, die die räumlichen Dimensionen in einem Atom veranschaulichen. Wir nutzen dazu einen Apfel:

Ein Apfel besitzt einen Durchmesser von etwa 10 cm. Wäre der Kern eines Atoms so groß wie ein Apfel, wie groß wäre dann seine Hülle?

Hierdurch wird deutlich, wie leer ein Atom ist. 99,9% der Masse befinden sich nämlich im Kern.

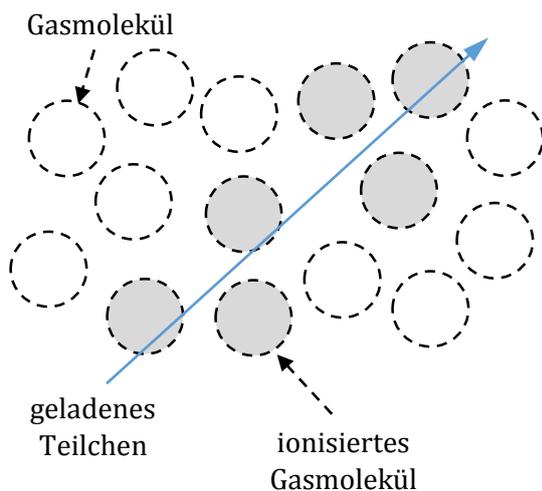
Die Masse eines Neutrons

Häufig können gewisse Eigenschaften von Teilchen nicht direkt gemessen, sondern nur aus zusammengesetzten Strukturen berechnet werden. Ein Beispiel:

Ein Helium-Atom besteht aus zwei Elektronen und vier Nukleonen. Es hat eine Masse von $m_{\text{Helium}} = 6,697 \cdot 10^{-27}$ kg. Bestätige anhand dieser Aussage die in der Tabelle eingetragene Masse eines Neutrons.

Gelegentlich werden in diesem Heft Aufnahmen aus Nebel- und Blasenkammern gezeigt. Da Du diese früheren Methoden zur Detektion von Elementarteilchen eventuell nicht kennst, folgt hier eine kurze Beschreibung bzw. Wiederholung.

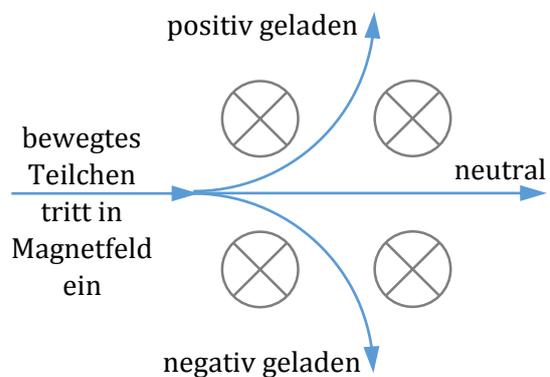
In einer Nebelkammer befindet sich ein Gas, das sehr schnell abgekühlt wird und dadurch absinkt. Beim Absinken entsteht dann eine etwa 1 cm dicke Zone, in der das Gas eigentlich schon so weit abgekühlt ist, dass es sich verflüssigen sollte. Es fehlen zum Bilden von Tröpfchen aber noch Kondensationskeime, an denen sich die Moleküle ansammeln können. Durchqueren nun geladene Teilchen (beispielsweise Elektronen oder alpha-Strahlung) das Gas, so ionisieren sie auf ihrem Weg einige Gasmoleküle, wie hier schematisch dargestellt ist.



Die Nebelspuren zeigen zwar nicht das Teilchen selbst, das die Ionisationen bewirkt hat, aber dessen Flugbahn. Aus der Länge und der Breite der Spur können Rückschlüsse auf das Teilchen gezogen werden. Beispielsweise macht ein Elektron dünne lange und ein Alpha-Teilchen wegen der größeren Masse kurze dicke Spuren.



Auch auf die Ladung der Teilchen kann geschlossen werden. Dafür legt man ein Magnetfeld durch die Kammer, das die elektrisch geladenen Teilchen auf Grund der Lorentzkraft ablenkt. Mittels der Richtung und Stärke der Ablenkung lässt sich dann die Ladung bestimmen. Wird ein Teilchen wiederum nicht abgelenkt, so muss es elektrisch neutral sein.



Bevor wir uns den Elementarteilchen widmen, sollten wir uns erst mit ihren speziellen Eigenschaften auseinandersetzen. Schließlich sind sie so klein, dass die Vorstellungskraft nicht mehr ausreicht um sie zu verbildlichen und sie weisen Eigenschaften auf, die eigentlich nur in mathematischer Form richtig nachvoll-

zogen werden können. Die Masse und die Ladung kennst du mittlerweile. Sie weisen aber noch weitere jeweils spezifische Eigenschaften auf und des Weiteren werden in der Teilchenphysik andere Einheiten verwendet. Dies soll hier also zunächst geklärt werden.

In unserer Umgebung macht es Sinn eine gemeinsame Einheit für Gewichts- bzw. Massenangaben zu haben. Die Einheit Kilogramm ist für die geringen Massen, die wir hier betrachten, allerdings wenig praktikabel. Zwar helfen die Zehnerpotenzen (z.B. statt Millionen dann 10^6) um die Angaben abzukürzen, in der Teilchenphysik hat sich aber eine handlichere Einheit für die Masse eingebürgert. Sie beruht auf der berühmten Formel von Einstein: $E = mc^2$. Hiermit kann die Masse in Energie umgerechnet werden, was bei den Elementarteilchen die sinnvollere Angabe ist. Besonders übersichtlich wird

dies noch in Verbindung mit den Symbolen (anstatt 10^6 dann M für Mega; am Anfang des Heftes sind die Symbole aufgelistet).

Die Einheit der Masse (bzw. Ruhemasse oder Ruheenergie) ist in der Teilchenphysik das Elektronenvolt (eV) und ihre Größe ist über die Energie definiert, die einem Elektron zwischen zwei Kondensatorplatten bei einer Spannung von einem Volt zugeführt wird. Wir betrachten einmal die Umrechnung von Kilogramm in Elektronenvolt und stellen dabei Einsteins Formel um:

Die Einheit der Masse: eV

$$E = -qU = eU = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$$

$$\text{Umrechnung eV} \leftrightarrow \text{kg: } E = mc^2 \Leftrightarrow m = \frac{E}{c^2}$$

$$1,783 \cdot 10^{-36} \text{ kg} = 1 \text{ eV} \Leftrightarrow 1 \text{ kg} = 0,561 \cdot 10^{36} \text{ eV}$$

Formel 1

Die Masse eines Elektrons in eV

Ab hier werden wir möglichst alle Masseangaben in Elektronenvolt machen. Also noch eine kurze Übung dazu:

Wie viel „wiegt“ ein Elektron in eV (Verwende ein Symbol, statt einer Zehnerpotenz)?

Warum kann man nicht von „Gewicht“ sprechen?

Aufgabe 3

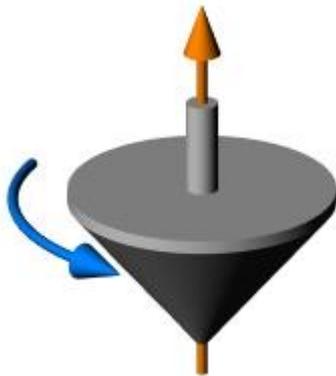
Ein Atom und sein Kern haben eine räumliche Ausdehnung die man beobachten bzw. messen kann. Bei den Elementarteilchen ist das anders. Bereits bei dem Elektron stieß man bislang bei immer genaueren Messungen auf keine Ausdehnung oder Struktur. Die experimentelle Minimalgröße ist mittlerweile bei 10^{-19} m

angelangt. Nehmen wir wieder den Apfel-Vergleich. Wäre ein Atomkern also 10 cm groß, so wären die Elementarteilchen bereits kleiner als 0,01 mm. Man geht daher zurzeit von punktförmigen Objekten aus, die keine räumliche Ausdehnung oder Form besitzen.

Wie auch alle Materie aus den Elementarteilchen aufgebaut ist, so ist auch jede in der Natur vorkommende Ladung ein Vielfaches der Elementarladung mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C. Aus diesem Grund bietet es sich an, hier einfach dieses Vielfache anzugeben, anstatt der Ladung in Coulomb.

Um es noch weiter abzukürzen, verzichtet man darauf, Angaben als $2 \cdot e$ zu schreiben. Wenn klar ist, dass von einer Ladung gesprochen wird, verwendet man einfach nur die Angabe 2, gibt also nur das Vielfache an. Ein Elektron hat also eine Ladung von -1.

Um sich den Spin eines Teilchens besser vorstellen zu können, beginnen wir im Makroskopischen. Stell dir einen Kreisel vor, der sich auf der Stelle dreht.



Der blaue Pfeil verdeutlicht die Drehung und der orangene Pfeil die Drehachse des Kreisels. Die „Stärke“ der Drehung ist abhängig von der Massenverteilung, dem Radius und der Drehgeschwindigkeit. Dieser sogenannte Drehimpuls ist eine Erhaltungsgröße, was bedeutet, dass z.B. aus einer Verkleinerung des Radius eine größere Geschwindigkeit resultiert, wohingegen der Drehimpuls erhalten bleibt. Dies

kannst du direkt bei Eiskunstläufern sehen, die sich durch Anziehen ihrer Arme schneller auf der Stelle drehen und sich beim Ausstrecken wieder verlangsamen.

Nun haben wir es bei den Elementarteilchen allerdings nicht mit Körpern im klassischen Sinn zu tun, die eine Ausdehnung besitzen, sondern punktförmig sind. Die Vorstellung des Drehimpulses funktioniert hier also nicht, da von einem Radius keine Rede sein kann. Er muss einfach als physikalische Eigenschaft akzeptiert werden, die nur quantenmechanisch verstanden werden kann, was hier den Rahmen sprengen würde. Da jedes Teilchen einen für sich eigenen Drehimpuls besitzt, spricht man vom Eigendrehimpuls, bzw. Spin (engl.: spin „Eigendrehimpuls, Drall“).

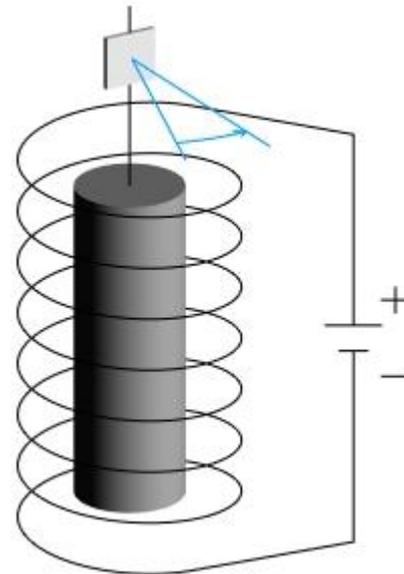
Der Spin kann dabei, ähnlich wie bei den Energieniveaus von Elektronen im Atommodell, nur spezifische Werte annehmen (man sagt, er ist quantisiert). Diese sind immer Vielfache des reduzierten

planckschen Wirkungsquantums $\hbar = h/2\pi = 6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}$. Auch hier lässt man der Einfachheit halber das \hbar weg und gibt nur das Vielfache an. Elektronen, Protonen und Neutronen haben den Spin $1/2$, was einem Eigendrehimpuls von $1/2 \cdot \hbar = 3,291 \text{ eV}\cdot\text{s}$ entspricht.

Neben seinem Wert besitzt der Spin natürlich noch eine Richtung. Hier gilt das gleiche wie bei stromdurchflossenen Leitungen, die Rechte-Faust-Regel bzw. Korkenzieherregel. Zeigt der Spin (bzw. seine Drehachse) nach oben, so dreht sich das Teilchen gegen den Uhrzeigersinn (wie beim Kreisbild zu sehen ist).

Aber gibt es diesen nicht-vorstellbaren Spin denn wirklich? Ein wichtiges Experiment zum Nachweis des Spins haben Albert Einstein und Wander J. de Haas 1915 entworfen, noch bevor der Spin im Jahr 1925 überhaupt eingeführt wurde. Dabei haben sie einen Eisenstab ins Zentrum einer Spule gehängt und den Stromkreis geschlossen. Um auch geringe Drehungen feststellen zu können, haben sie einen kleinen Spiegel an den Aufhängefaden des Stabs angebracht und einen Lichtstrahl darauf gerichtet. Sie konnten dadurch feststellen, dass sich der Stab leicht dreht (beachte die Verschiebung der blauen Linie am Spiegel im rechten Bild), was wegen der Symmetrie des Aufbaus nur an einer inneren Struktur liegen kann. Die Drehimpulse der Elektronen zeigten zuvor alle in unterschiedliche Richtungen. Nach dem

Einschalten der Spule haben sie sich nach dem Magnetfeld ausgerichtet und dabei einen Drehimpuls auf den Stab ausgeübt, der ihn zur Auslenkung gebracht hat.



Eine praktische Anwendung des Spins ist in der Medizin die Kernspintomographie. Dabei wird der Spin von Wasserstoffkernen genutzt, um dreidimensionale Bilder vom inneren Gewebe zu erstellen.

Übertragen wir diese ganzen neuen Kenntnisse auf die Tabelle der Elementarteilchen (Massen schon umgerechnet), so wird schnell deutlich, wie übersichtlich die Eigenschaften nun dargestellt werden. Da die Tabelle im weiteren Verlauf größer wird, stellen wir die Anfangsbuchstaben der Teilchen größer dar. So können sie schnell wiedergefunden werden.

Masse →	0,511 MeV	938,2 MeV	939,5 MeV
Ladung →	-1	1	0
Spin →	1/2	1/2	1/2
Name →	e Elektron	p Proton	n Neutron

Kommen wir nun wieder zu den Protonen und Neutronen. Es wurde schon angedeutet, dass sie keine Elementarteilchen sind. Aus was sind sie also wiederum zusammengesetzt? Du hast vielleicht schon von den sogenannten Quarks gehört (wird ausgesprochen wie „kworks“). Diese Elementarteilchen werden wir nun kennenlernen.

Die Quarks bilden eine ganze Gruppe an Elementarteilchen. Es gibt von ihnen sechs verschiedene, die in drei Generationen eingeteilt sind. Die zwei Quarks einer Generation haben jeweils unterschiedliche

Massen und Ladungen, wohingegen sich die Generationen nur in ihrer Masse unterscheiden. Der Spin ist wiederum bei jedem Quark $1/2 \hbar$.

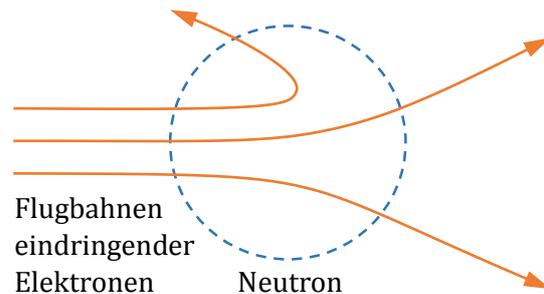
Ihren Namen haben sie ganz unwissenschaftlich von ihrem Entdecker Murray Gell-Mann (und George Zweig), dem der Klang eines Wortes aus dem Roman „Finnegans Wake“ von James Joyce gefiel:

„Three quarks for Muster Mark! ... Sure he hasn't got much of a bark ... And sure he has it's all beside the mark ...“

3.1

UP UND DOWN

Die erste Generation der Quarks (vorhergesagt 1964, bestätigt 1969) sind schon direkt die Bausteine der Nukleonen und nennen sich up-Quark und down-Quark. Das entscheidende Experiment war im Prinzip ganz ähnlich dem Rutherford-Streuversuch, den du bereits in der Wiederholung zum Atom kennengelernt hast (Seite 2). Anstatt der Alpha-Strahlung hat man Elektronen mit sehr hohen Geschwindigkeiten (nahe der Lichtgeschwindigkeit) auf Neutronen geschossen. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit konnten sie in die Neutronen eindringen. Es konnte festgestellt werden, dass sie durch elektrische Kräfte abgelenkt wurden, obwohl das Neutron nach außen elektrisch neutral ist. Demnach existieren im Innern kleinere, elektrisch geladene Teilchen.



Eine Ablenkung konnte auch beim Proton entdeckt werden, so dass man daraus schließlich zwei innere Teilchen mit unterschiedlichen Ladungen identifizieren konnte. Anhand dieser Ablenkung ist ein Proton aus zwei sogenannten up-Quarks (Ladung $2/3$) und einem down-Quark (Ladung $-1/3$) aufgebaut und ein Neutron aus zwei down-Quarks und einem up-Quark.

Aufgabe 4

Zusammengesetzte Ladung der Nukleonen

Ein Proton hat eine Ladung von 1 und ein Neutron ist elektrisch neutral. Beide bestehen aus einer unterschiedlichen Kombination von up- und down-Quarks.

Zeige, dass aus den Zusammensetzungen die jeweilige Ladung des Nukleons hervorgeht.

Schreibweise für zusammengesetzte Teilchen

Um auszudrücken aus welchen Quarks q ein zusammengesetztes Teilchen t besteht, schreibt man es als Gleichung mit den Quarks in Klammern:

$$t = (qqq)$$

Bei einem Proton p und einem Neutron n also: $p = (uud)$, $n = (ddu)$

Aber wieso können Quarks plötzlich mit $2/3$ und $-1/3$ doch Bruchstücke der elementaren Ladung e haben? Ganz einfach, sie kommen niemals einzeln vor sondern nur in Kombinationen, die einem ganzzahligen Vielfachen (auch Null, wie beim Neutron) entsprechen. Dies macht es allerdings schwer ihre einzelnen Massen zu bestimmen. Anhand der Massen verschie-

dener Kombinationen können sie aber berechnet werden, wenn man die Beiträge aus „Bindungsenergien“ abzieht. Zu den Bindungsenergien werden wir später bei den Wechselwirkungen unter den Elementarteilchen noch kommen und dann auch nochmal präzisieren, wieso Quarks nicht einzeln vorkommen können.

Masse der up- und down-Quarks

Abgesehen von den „Bindungsenergien“ haben die Quarks in einem Proton eine gesamte Masse von 9,6 MeV und in einem Neutron von 12,0 MeV.

Welche Massen haben die einzelnen Quarks?

Beim Spin verhält sich die Kombination ähnlich wie bei den Ladungen: Alle Quarks haben einen Spin von $1/2$. Die Richtung des Spins eines up-Quarks zeigt nach oben (daher auch der Name up) und entsprechend beim down-Quark nach unten. Da sich entgegengerichtete Spins aufheben und einen Beitrag zum gemeinsamen Drehimpuls von Null ergeben, hat das Proton (uud) einen Spin von $1/2$ nach oben und das Neutron (ddu) von $1/2$ nach unten.

$$\begin{array}{c} \uparrow + \uparrow + \downarrow = \uparrow + 0 = \uparrow \\ \downarrow + \downarrow + \uparrow = \downarrow + 0 = \downarrow \end{array}$$

Da wir nun die Nukleonen nicht mehr als Elementarteilchen betrachten können, aktualisieren wir unsere Tabelle und ersetzen sie durch ihre Bausteine, das up- und das down-Quark:

Masse →	0,511 MeV	2,4 MeV	4,8 MeV
Ladung →	-1	$2/3$	$-1/3$
Spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
Name →	Elektron	up	down
	e	u	d

Da wir mit dem up- und down-Quark bereits die Bausteine der Nukleonen und zusammen mit dem Elektron alle Bausteine für Atome haben, fragst du dich vielleicht, warum man noch mehr benötigt. Die Physiker haben leider auch keine Erklärung für die Existenz der weiteren Quarks. Sie treten aber bei Zerfällen und Fusionen von Atomen auf und sind damit für das heutige Universum ebenso entscheidend.

Die Quarks der zweiten Generation waren daher schwerer ausfindig zu machen. Es sind nur kurzlebige Teilchen, die schnell wieder zerfallen. Im Jahr 1969 konnte das erste Teilchen aus dieser Generation aber in der kosmischen Strahlung entdeckt werden. Die Physiker fanden die ungewöhnlich hohen Messergebnisse der Zerfallszeiten so seltsam, dass sie das Teilchen auch gleich so nannten. Das strange-Quark (engl.: strange „seltsam“) hat eine Masse von $m_s = 104 \text{ MeV}$ und stimmt in den anderen Eigenschaften mit dem down-Quark überein.

Auch das andere Quark aus der zweiten Generation wurde wegen Zerfällen von Teilchen eingeführt. Hier waren es die theoretischen Physiker, die es zum Lösen von einigen Problemen in ihren Gleichungen eingeführt hatten. Es konnte 1974 tatsächlich nachgewiesen werden und erhielt den Namen charm-Quark (weil es die Theoretiker so reizvoll fanden, wie es ihre Probleme gelöst hatte. Engl.: charm „reizvoll, charmant“). Es stimmt mit den Eigenschaften des up-Quarks überein, hat allerdings mit $m_c = 1\,270 \text{ MeV}$ sogar eine größere Masse als ein ganzes Proton. Die mittlere Lebensdauer ist hier mit 10^{-12} s deutlich kürzer als beim strange-Quark.

Falls du dich fragst wie eigentlich Elementarteilchen nach ihrer Lebensdauer zerfallen können und in was (sie sind schließlich schon elementar), so musst du zur Antwort noch etwas warten. Es handelt sich nämlich um Umwandlungen in andere Teilchen und dafür müssen dir erst alle bekannt sein.

In der dritten Generation der Quarks wurden wahre Riesen entdeckt. Da sie nochmals massereicher sind, benötigte man sehr viel höhere Energien, um sie ausfindig zu machen. Dementsprechend mussten die Geräte dafür erst noch entwickelt werden.

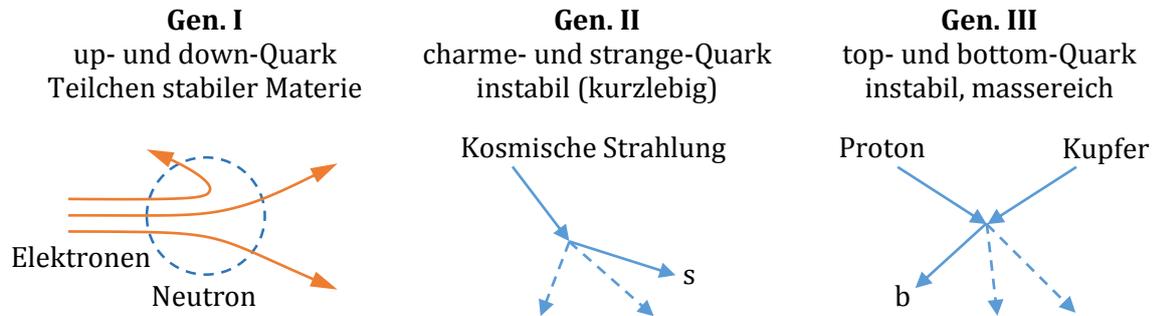
Das bottom-Quark wurde 1977 am Fermilab in Chicago entdeckt, als man Protonen auf die Atomkerne von Kupfer schoss und die Trümmer der Kollision untersuchte. Es hat eine Masse von $m_b = 4\,200 \text{ MeV}$ und stimmt wiederum in den anderen Eigenschaften mit dem down-Quark überein. Die Bezeichnung bottom erhielt es wie das down-Quark wegen dem

nach unten gerichteten Spin (engl.: bottom „unten“). Es hat eine mittlere Lebensdauer von $2 \cdot 10^{-12} \text{ s}$.

Für das top-Quark benötigte man nochmals mehr Energie, da es mit einer Masse von $m_t = 171\,200 \text{ MeV}$ fast so viel wiegt wie ein ganzes Goldatom. Erst 1995 war es möglich solche Energien in den Detektoren zu erzeugen und die Teilchen ausfindig zu machen. Hier wurde die Bezeichnung wie beim up-Quark wegen der Richtung des Spins nach oben gewählt (engl.: top „oben“). Es stimmt wiederum in den anderen Eigenschaften mit dem up-Quark überein, hat aber nur eine mittlere Lebensdauer von $6 \cdot 10^{-25} \text{ s}$.

Zusammenfassung: Quarks

- Quarks sind elementare Teilchen mit einem Spin von $1/2$.
- Sie haben eine gebrochene Elementarladung von $2/3$ bzw. $-1/3$ und treten stets in Kombinationen auf, die ganzzahlige Elementarladungen ergeben.
- Man kann sie in drei Generationen einteilen, die sich jeweils nur in ihren Massen unterscheiden. (Unter der Aufteilung der Generationen ist jeweils ein Beispiel gegeben, wo diese Teilchen zu finden sind.)



Wir erweitern unsere Tabelle der Elementarteilchen und trennen dabei deutlich die Quarks vom Elektron und noch kommenden Teilchen. Du kannst hier auch

nochmal gut erkennen, dass sich die Quarks von einer Generation zur anderen nur in ihren Massen (und ihren Lebensdauern) unterscheiden.

Gen. →	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
Spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
Name →	u up	c charm	t top
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d down	s strange	b bottom

Quarks

Quarks des Sigma-Baryons

Es gibt eine Vielzahl an Teilchen, die durch Kombinationen von Quarks möglich sind. Unter anderem das Σ^{*-} -Baryon. Es besteht wie das Proton und das Neutron aus drei Quarks, die zusammen eine Masse von 113,6 MeV haben und es hat eine Ladung von -1.

Aus welchen Quarks ist es zusammengesetzt und welchen Spin (mit Richtung) hat es?

Das es nur 6 Quarks gibt war nur die halbe Wahrheit. Eigentlich sind es nämlich 12. Und es gibt quasi 2 Elektronen, 2 Protonen und 2 Neutronen. Falls dich das jetzt verwirrt, ist es nicht schlimm. Wir kommen nämlich jetzt zur Antimaterie, bzw. zu den Anti-Teilchen.

Bereits 1898 wurde die Existenz von Antiatomen vermutet. Sie sollten in allen Eigenschaften das genaue Gegenstück darstellen und sich ebenfalls gegenseitig durch die Gravitation anziehen, allerdings von normalen Atomen abgestoßen werden. Dies stimmt aus heutiger Sicht so bekanntlich nicht. Jedoch wurde im Jahr 1928 das Anti-Elektron vorhergesagt, dass alle Eigenschaften mit dem Elektron teilt, aber eine entgegengesetzte Ladung von $+e$ anstatt $-e$ hat. Dieses „positive Elektron“ (heute Positron genannt) konnte 1932 schließlich tatsächlich in Nebelkammern

beobachtet werden. Die entgegengesetzte Ladung konnte man dabei anhand der umgekehrten Ablenkung in einem Magnetfeld erkennen. Man weiß heute auch, dass Beta-Strahlung aus Elektronen sowie Positronen bestehen kann und unterscheidet daher den Beta-Minus-Zerfall und den Beta-Plus-Zerfall.

Aber auch die anderen Teilchen haben ein Gegenstück, das ihnen in allen Eigenschaften gleicht, aber eine entgegengesetzte elektrische Ladung besitzt. So besteht ein Anti-Proton aus zwei Anti-Up-Quarks und einem Anti-Down-Quark.

1995 gelang es in Jülich unter sehr viel Energieaufwand sogar ein ganzes Anti-Atom künstlich herzustellen. Es besteht aus einem Anti-Proton im Kern und einem Positron in der Hülle und ist damit das genaue Gegenstück zum Wasserstoff.

Unterscheidung von Teilchen und Anti-Teilchen

Anti-Teilchen werden zur Unterscheidung mit einem Querstrich über ihrem Formelzeichen notiert. So schreibt man beispielsweise für das Antiproton \bar{p} .

Für die Zusammensetzung des Anti-Protons schreibt man entsprechend: $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

Bei einigen Teilchen notiert man allerdings ein $+$ oder $-$ hochgestellt an das Symbol, um die entgegengesetzte elektrische Ladung zu verdeutlichen. Dies ist u.a. beim Elektron der Fall. So wird das Elektron mit e^- notiert und das Positron mit e^+ .

Warum aber ist Antimaterie so selten und muss aufwändig erzeugt werden? Das liegt zum einen am Effekt der sogenannten Annihilation (lat. *annihilatio* „Zunichtemachen“): Trifft ein Teilchen auf sein Gegenstück, so vernichten sich beide gegenseitig und geben ihre Energie in Form von Gamma-Strahlung ab. Das Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie ist aber bislang noch nicht ganz verstanden, denn prinzipiell sollte es gleichviel von beidem geben. Momentan geht man zur Klärung dieser Frage bis zum Urknall

zurück und versucht es über eine kurze Verletzung der physikalischen Gesetze zu erklären. Demnach hat sich eine Sekunde nach dem Urknall alle Antimaterie an ihren Gegenstücken vernichtet und aus einem relativ winzigen Überschuss an Materie hat sich alles um uns herum gebildet - inklusive sämtlicher Sterne und Galaxien.

Aber Anti-Teilchen entstehen auch jederzeit aufs Neue, z. B. bei der Beta-Strahlung. Zudem gibt es noch den Effekt der Paarbildung, der umgekehrt wie die Annihilation verläuft. Trifft hochenergetische Strahlung (z.B. Gamma-Strahlung) auf ein Atom, so kann sie sich in der Hülle zu einem Elektron und einem Positron umwandeln. Die Energie der Strahlung muss dafür mindestens so groß sein wie die beiden Ruhemassen. In der rechten Blasen-kammeraufnahme kannst du verfolgen, wie ein von unten kommender (nicht sichtbarer) Gamma-Strahl auf ein Atom trifft

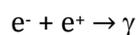
und damit die hier V-förmig weiterfliegenden Teilchen erzeugt.



Formel 4

Schreibweise für Reaktionen

Um zu verdeutlichen welche Teilchen vor und nach einer Reaktion vorliegen, schreibt man sie wie folgt am Beispiel der Annihilation von einem Elektron und einem Positron:



Dabei gilt der Energieerhaltungssatz. Die Gamma-Strahlung hat also so viel Energie wie das Elektron und das Positron zusammen.

Aufgabe 7

Energie der Gamma-Strahlung bei Annihilation

Zur Energie der Ruhemasse des Elektrons und des Positrons addiert sich noch die kinetische Energie ($E_{\text{kin}} = 1/2 \cdot mv^2$), die wegen der Energieerhaltung auch übertragen wird.

Welche Energie hat die Gamma-Strahlung, wenn beide Teilchen mit jeweils 30 000 km/s aufeinander zufliegen?

Übrigens: In der Science-Fiction wird Antimaterie oft als eine Art „Super-Treibstoff“ angesehen. Da aber der Wirkungsgrad bei der Produktion nur 0,000 000 01 % ist und selbst für die Speicherung enorme Energien benötigt werden, könnte man durch Umwandeln

sämtlicher fossiler Energievorkommen in Anti-Wasserstoff 10 Autos von Hamburg nach München und wieder zurück fahren lassen. Als Energieträger ist es also vollkommen unbrauchbar. Nach aktuellem Kenntnisstand wird man auch nirgends größere Mengen Antimaterie vorfinden.

Aufgabe 8

Warum gibt es so wenig Antimaterie?

Es befindet sich kaum Antimaterie in unserer Umgebung.

Warum ist das so?

Nachdem du nun die Elementarteilchen im Atomkern kennengelernt hast, widmen wir uns dem bislang alleinstehenden Elektron. Es ist das erste beobachtete Elementarteilchen der Gruppe der Leptonen. Als die Bezeichnung eingeführt wurde, ging man nur von sehr leichten Teilchen aus, wodurch sie ihren Namen erhielten

(griech.: leptós „dünn, fein“). Auch diese Gruppe ist in die 3 Generationen eingeteilt, wobei wiederum nur die erste Generation ein stabiles Teilchen in Atomen ist. Die Generationen unterscheiden sich auch hier nur durch ihre Massen und Lebensdauern. Alle Leptonen haben wie auch die Quarks einen Spin von $1/2$.

5.1

ELEKTRON

Zur ersten Generation gehört natürlich das Elektron, das dir schon bekannt ist. Es wurde bereits 1897 entdeckt und hat wesentliche Beiträge zum Verständnis des Aufbaus von Atomen geliefert sowie der Theorie der Elementarteilchen. Weiterhin werden anhand der Energie eines

Elektrons alle Massen von Elementarteilchen angegeben und durch seine negative Ladung wurde die Elementarladung entdeckt. Mit einer Masse von $m_e = 0,511 \text{ MeV}$ ist es verhältnismäßig leicht. Sein Anti-Teilchen wird nicht Anti-Elektron, sondern Positron (e^+) genannt.

5.2

MYON

Die Erde wird zu jeder Zeit aus allen Richtungen von einer Vielzahl kosmischer Teilchen aus dem All beschossen. Trifft diese kosmische Strahlung auf die Atome und Moleküle der Atmosphäre, so entstehen in den oberen Luftschichten in etwa 10 km Höhe die sogenannten Myonen (griechischer Buchstabe μ). In der zweiten Generation finden sich also wiederum Teilchen, die bei Zerfällen und Umwandlungen eine Rolle spielen. Die Myonen wurden bereits 1936 anhand von Spuren in Nebelkammern entdeckt (Bild unten). Zwar ähneln die Spuren denen von Elektronen, allerdings sind sie sehr viel länger (da Myonen die gleiche Ladung haben, sich aber viel schneller bewegen).



Dieser Umstand zeigt auf direkte Weise die Relativität der Zeit. Ein Myon hat nur eine kurze Lebensdauer von ca. $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, weshalb es im klassischen Sinne nur eine Strecke von 660 m zurücklegen kann und niemals in einer Nebelkammer am Boden ankommen würde. Da es aber mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in Richtung Erde fliegt, vergeht die Zeit (gemäß der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein) für solch ein Myon langsamer und es überbrückt diese Strecke dadurch trotzdem.

Die Masse des Myons ist mit $m_\mu = 105,7 \text{ MeV}$ vergleichsweise groß, was dem Namen dieser Gruppe eigentlich nicht gerecht wird. Es trägt ebenfalls die negative Elementarladung und den Spin $1/2$. Das Anti-Myon wird als μ^+ notiert.

Noch schwerer als das Myon ist das Tauon mit einer Masse von $m_\tau = 1\,777\text{ MeV}$, das erst 1975 bei einer Kollision eines Elektrons und eines Positrons nachgewiesen werden konnte. Weil es das dritte entdeckte Lepton ist, wurde es Tauon

genannt, nach dem Anfangsbuchstaben τ „Tau“ von griech.: τρίτον „drittes“. Seine Ladung und sein Spin sind ebenfalls identisch zum Elektron. Es zerfällt im Mittel bereits nach $2,9 \cdot 10^{-13}\text{ s}$.

Wie bei den Quarks besitzt auch bei den Leptonen jede der drei Generationen zwei Teilchen. Das jeweils zweite Teilchen ist hier ein entsprechendes Neutrino. Neutrinos waren für die Physiker ein riesiges Problem, später aber auch ein wahrer Segen. Die Geschichte ihrer Entdeckung ist ein gutes Beispiel für das Wechselspiel von theoretischen Überlegungen und experimentellen Belegen. Wir werden daher etwas detaillierter dieser spannenden Geschichte folgen.

Als zu Anfang des 20. Jahrhunderts der radioaktive Beta-Zerfall untersucht wurde, konnte niemand das kontinuierliche Energiespektrum der Strahlung nachvollziehen. Betrachtet man ein Atom vor und nach dem Zerfall, so sollte die Strahlung genau der Energiedifferenz entsprechen, was sie aber nicht tat. Es wurden immer beliebige kleinere Energien gemessen. Einige Physiker (u.a. Niels Bohr) zweifelten daher am wichtigen Energieerhaltungssatz, ohne den die restliche Physik für nahezu ungültig erklärt werden müsste.

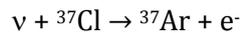
Wolfgang Pauli und Enrico Fermi hatten 1930 aber die Idee, dass neben der Beta-Strahlung auch andere Teilchen (die sie Neutrinos nannten, für die italienische Verniedlichungsform -ino eines Neutrons, also „Neutrönchen“) emittiert werden, die man einfach nicht messen kann. Diese „Geisterteilchen“ hätten die Spektren der Strahlung erklärt, von etwas unsichtbarem und unmessbarem auszugehen ist aber natürlich absolut unbefriedigend. Gerade weil diese theoretischen Teilchen aber die

Messergebnisse gut erklären würden, hat man jahrelang versucht sie auf irgendeine Art zu messen. Pauli und Fermi versuchten also zunächst die Eigenschaften herauszuarbeiten und präsentierten sie 1933. So sollte das Neutrino keine elektrische Ladung und eine Masse von weniger als 2,2 eV besitzen (Erinnerung: Das Elektron hat 0,511 MeV, also 511 000 eV).

Wie detektiert man also Teilchen, die so leicht sind und mit anderen elektrischen Ladungen nicht wechselwirken? Zunächst gar nicht. Da man aber weiß, wie man die Teilchen entstehen lassen kann, hat man erst daran weiter gearbeitet. Beim Poltergeist-Experiment hat man dazu einen Kernreaktor verwendet, durch den weitaus mehr Neutrinos entstehen sollten als es durch natürliche radioaktive Materialien möglich ist. Beim Homestake-Experiment hat man einen noch größeren „Reaktor“ für Atomzerfälle und -fusionen genutzt - die Sonne. Durch die Berechnung der Anzahl an Zerfällen schießen von der Sonne pro Sekunde durch einen Quadratzentimeter 60 Milliarden Neutrinos (überlege einmal wie viele Neutrinos durch deinen Körper seit Anfang dieses Absatzes geflogen sind). Wegen der Nähe zum Kernreaktor sind es beim Poltergeist sogar 50 Billionen pro Sekunde und Quadratzentimeter.

Die theoretischen Physiker haben währenddessen mögliche Reaktionen ausgearbeitet, bei denen Neutrinos mitwirken.

Unter anderem diese Reaktion:



Dabei steht das ν (griechischer Buchstabe „Ny“, nicht verwechseln mit v) für ein Neutrino, dass mit angeregtem Chlor ${}^{37}\text{Cl}$ wechselwirkt und dabei eine Umwandlung in angeregtes Argon ${}^{37}\text{Ar}$ und ein Elektron stattfindet.

Diese Reaktion wurde dann beim Homestake-Experiment mit den Neutrinos der Sonne untersucht. Um äußere Einflüsse auf die Messungen zu verringern, hat man 1 478 m unter der Erde in einer alten Goldmine ein Becken mit Wasser geflutet, in dem sich ein 615 t großer Tank gefüllt mit einem Chlorkohlenwasserstoff befand.

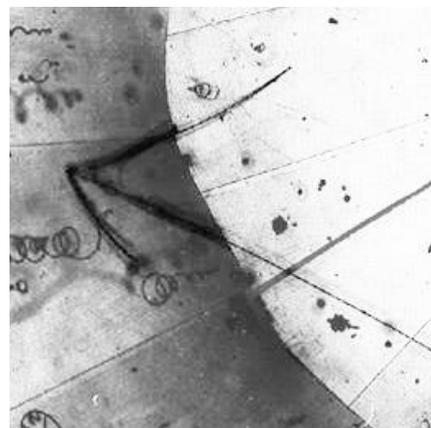


So sollten andere Teilchen der kosmischen Strahlung abgeschirmt werden, wohingegen die Neutrinos ohnehin durch die Erde hindurchfliegen können. Nachdem auch sämtliche Einflüsse der Umgebungstrahlung beseitigt oder zumindest herausgerechnet werden konnten, wurde durch Detektieren der Argon-Atome und der Elektronen die Anzahl der Neutrinos gemessen, die diese Reaktion erst ermöglichen. Die theoretischen Erwartungen für die Anzahl detektierter

Neutrinos anhand dieser Reaktion war etwa 1,5 pro Tag. Gemessen wurden aber nur 0,5 Neutrinos pro Tag und die Physiker standen wieder vor einem Rätsel, das als „solares Neutrino Problem“ in die Geschichte der Physik einging.

Erst als die drei Generationen der Leptonen bekannt waren (also Elektron, Myon und Tauon) fand man eine Antwort. Demnach sollte jedem Lepton ein Neutrino zugeordnet werden. Man fand später tatsächlich heraus, dass bei der beobachteten Reaktion ein Elektron-Neutrino ν_e mit einer Masse von 2,2 eV wirkt, in der Sonnenstrahlung aber auch Myon-Neutrinos ν_μ (Masse kleiner als 0,17 MeV) und Tauon-Neutrinos ν_τ (Masse kleiner als 15,5 MeV) enthalten sind. Dadurch ergab sich die geringere Anzahl detektierter Neutrinos im Experiment und das Rätsel um die Neutrinos war gelöst.

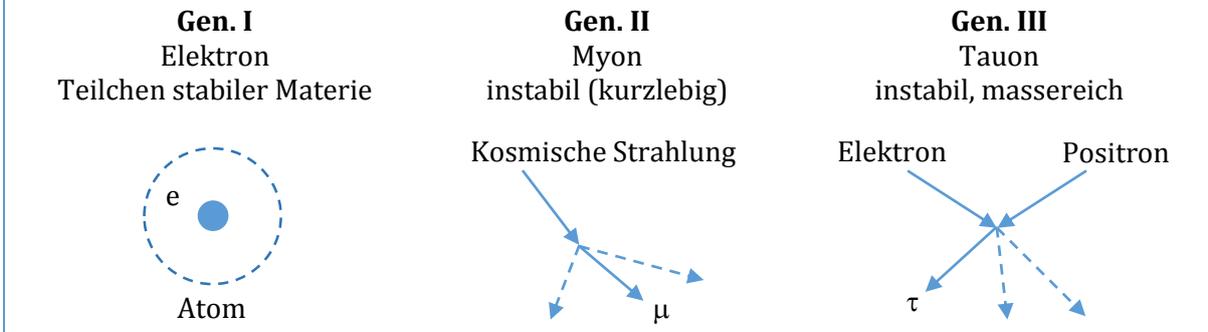
In der folgenden Aufnahme einer Blasenkammer von 1970 kannst du eine weitere Reaktion sehen.



Dabei zerfällt urplötzlich ein Proton in andere Teilchen, was über ein Neutrino erklärt wird, dass rechts in den Bildausschnitt unsichtbar eintritt und die Reaktion auslöst.

Zusammenfassung: Leptonen

- Leptonen sind elementare Teilchen mit einem Spin von $1/2$.
- Bis auf die elektrisch neutralen Neutrinos besitzen sie eine negative Elementarladung.
- Auch die Leptonen kann man in drei Generationen einteilen, die sich jeweils nur in ihren Massen unterscheiden. Zu jedem Teilchen einer Generation gehört noch ein entsprechendes Neutrino, das kaum mit seiner Umgebung wechselwirkt.



Aufgabe 9

Entdeckung der Quarks und Leptonen

Vergleiche die Zusammenfassungen der Quarks und der Leptonen miteinander.

Was fällt bei den Generationen besonders auf und wie könnte es erklärt werden?

Wir erweitern in unserer Tabelle das Elektron zur Gruppe der Leptonen und fassen auch ihre Eigenschaften darin

zusammen. Die exakten Massen der Neutrinos konnten bislang noch nicht genau bestimmt werden.

Gen. →	I	II	III
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
Spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
Name →	up	charm	top
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	down	strange	bottom
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	Elektron	Myon	Tauon
	< 2,2 eV	< 0,17 MeV	< 15,5 MeV
0	0	0	
$1/2$	$1/2$	$1/2$	
e-Neutrino	μ -Neutrino	τ -Neutrino	

Eine letzte Gruppe an Elementarteilchen fehlt uns nun noch vom Standardmodell. Die sogenannten Bosonen. Sie unterscheiden sich deutlich von den Quarks und Leptonen, denn sie gehören nicht zu den Materie-Teilchen. Bosonen repräsentieren die wirkenden Kräfte zwischen den Elementarteilchen. Der Begriff „wirkende Kraft“ ist hier allerdings nicht sehr angebracht. Bei den Kräften unter Elementarteilchen handelt es sich mehr um gegenseitige Beeinflussungen, weshalb man den Begriff Wechselwirkung (kurz WW) benutzt.

Aber wie kann man sich vorstellen, dass Wechselwirkungen immer durch Teilchen stattfinden? Stell dir zwei Elektronen vor, die nahe beieinander sind. Im klassischen Sinn sagt man, dass sie sich aufgrund ihrer gleichen Ladung abstoßen, also eine Kraft aufeinander ausüben. In der Teilchenphysik sagt man, sie tauschen Bosonen aus, die diese Wechselwirkung repräsentieren.



Es handelt sich quasi um Pakete, die übertragen werden und eine Änderung hervorrufen. Daher werden sie oft auch als Austauschteilchen bezeichnet.

Bosonen unterscheiden sich in ihren Eigenschaften von den Materie-Teilchen teilweise sehr. So haben einige keine Masse (bzw. Ruheenergie), keine elektrische Ladung und alle haben einen Spin von $1 \cdot \hbar$ statt $1/2 \cdot \hbar$.

Wir haben die Bosonen in der bisherigen Bearbeitung dieses Themenheftes sogar schon mehrfach indirekt betrachtet. Bei sämtlichen angesprochenen Reaktionen zwischen Teilchen haben sie mitgewirkt und bei der Berechnung der Masse der Quarks wurden die „Bindungsenergien“ in einem Proton bereits abgezogen, die durch Bosonen entstehen.

Energie im Wasserstoffatom

Aufgabe 10

Wir betrachten nochmal das Proton und seine Quarks am Beispiel des Wasserstoffatoms:

Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron. Demnach hat es eine Masse von $m_{\text{H-Atom}} = 938,7 \text{ MeV}$. Das Proton ist wiederum aus Quarks zusammengesetzt.

Welche Masse ergibt sich aus den Quarks und dem Elektron? Welchem Anteil in % entspricht das?

An der Aufgabe wird deutlich, welche entscheidende Rolle die Bosonen unter den Elementarteilchen spielen. Sie sind zuständig für das Zusammenhalten von Teilchen, für den Zerfall und jeglichen anderen Austausch. Man konnte die Arten an verschiedenen Wechselwirkungen bereits auf vier reduzieren, mit denen man im Standardmodell jeglichen Austausch

zwischen Teilchen beschreiben kann. Diese vier werden wir hier nun im Detail behandeln und damit auch eine Erklärung für den Unterschied der Massen vom Proton und seinen Quarks erfahren. Bevor wir sie angehen können, müssen wir aber erst einen kuriosen Umstand bei den Elementarteilchen klären: Die virtuellen Teilchen.

Bei den Elementarteilchen gibt es einige Dinge, die sich der Vorstellungskraft vollständig entziehen. Darunter auch die Kuriosität der virtuellen Teilchen. Eigentlich sind sie gar nicht da, sie mischen aber im realen Geschehen mit. Dies macht sich besonders bei den Bosonen bemerkbar. Prinzipiell kann aber jedes Teilchen auch virtuell vorliegen.

Wir hatten zu Beginn die Frage, was sich denn eigentlich zwischen Atomen befindet.

Typische Antworten darauf sind „Luft“ und „Nichts“. Das die Antwort „Luft“ nicht stimmen kann hatten wir bereits erörtert und anstatt „Nichts“ hatten wir „leeren Raum“ gesagt. Das „Nichts“ ist für einen Physiker nämlich praktisch nicht möglich, es befinden sich immer etliche Felder und Potentiale im Raum. Hier kommt die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation (oft auch Unschärferelation genannt) ins Spiel, die den Begriff „Nichts“ endgültig widerlegt.

Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Für ein Teilchen kann nicht gleichzeitig sein Aufenthaltsort x und sein Impuls $p = m \cdot v$ gemessen werden. Zwischen beiden Werten besteht folgende Relation:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

Diese Formel lässt sich auch nach der Energie E und der Zeit t umformen. Dabei wird verwendet, dass eine Kraft F Impuls pro Zeit ist und eine Energie Kraft mal Weg.

$$\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot \Delta t = \Delta x \cdot F \cdot \Delta t = \Delta E \cdot \Delta t$$

$$\text{also: } \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Nehmen wir einmal an, dass die Relation im makroskopischen Auswirkungen hat und betrachten ein Beispiel: Ein Radfahrer fährt mit $v = 20 \text{ km/h}$ und einer gesamten Masse von $m = 75 \text{ kg}$. Wir stellen um und setzen ein:

$$\begin{aligned} \Delta x \cdot \Delta p &\geq \hbar/2 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta x \geq \hbar/(2 \cdot \Delta p) \\ \Delta x &\geq 1,055 \text{ J} \cdot \text{s} / (2 \cdot 75 \text{ kg} \cdot 20 \text{ km/h}) \\ &= 1,265 \cdot 10^{-37} \text{ m} \end{aligned}$$

Der Ort des Radfahrers ist also bis auf $1,265 \cdot 10^{-37} \text{ m}$ unbestimmt. Er kann somit

recht genau sagen wo er ist, obwohl er seine Geschwindigkeit kennt.

Betrachten wir nun die für uns interessanteren Größenordnungen der Elementarteilchen und nehmen ein Elektron, das sich mit einer Geschwindigkeit von 10.000 m/s bewegt. Hier hat die Ortsunschärfe mit $\Delta x = 5,789 \text{ nm}$ nun doch eine große Auswirkung. Der Aufenthaltsort lässt sich über mehrere Atomlängen nicht exakt bestimmen.

Zeit-Unbestimmtheit beim Elektron

Vielleicht fragst du dich, was das mit Teilchen und dem leeren Raum zu tun hat. Betrachten wir die Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation und setzen die Energie eines Elektrons ein:

Berechne die Unbestimmtheit der Zeit für ein ruhendes Elektron ($E_{\text{ruhe}} = 0,511 \text{ MeV}$), also die minimale Zeit, die noch Auswirkungen haben kann.

Dies ist zwar eine sehr kurze Zeitspanne, da aber dieses Elektron währenddessen gar nicht messbar ist und somit nicht den Energieerhaltungssatz verletzt, kann es immer und überall auftauchen. Man nennt

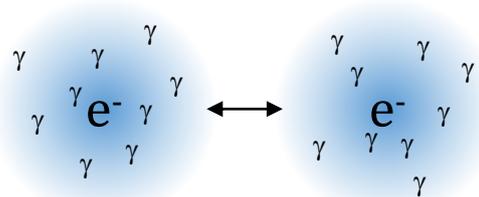
das Elektron dann virtuell, weil es physisch nicht existiert. Bosonen können während ihrer kurzen Lebensdauer als virtuelle Teilchen ihr Umfeld dennoch stark beeinflussen.

6.2

ELEKTROMAGNETISCHE WW - PHOTON

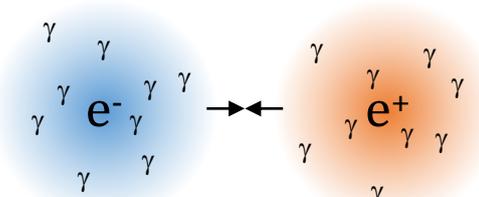
Wir beginnen mit einer Wechselwirkung, die dir bestens bekannt ist. Dir ist sicher schon die elektromagnetische Induktion geläufig, bei der ein elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt und umgekehrt ein Magnetfeld einen elektrischen Strom. Durch diesen Zusammenhang spricht man von der elektromagnetischen WW, die beides zugleich erklärt. Dadurch konnte die Anzahl der Wechselwirkungen von fünf auf vier reduziert werden. Ihre theoretische Grundlage wird Quantenelektrodynamik (kurz QED) genannt.

und wieder verschwinden. Du kannst es dir nun so vorstellen, dass sich nahe Elektronen gegenseitig durch den Austausch einiger Photonen wegstoßen, also einen Impuls übertragen.



Auch das Boson der elektromagnetischen WW ist dir schon bekannt. Es begegnet dir ständig und überall. Bei der Ausbreitung von Licht findet stets ein Wechselspiel zwischen elektrischen und magnetischen Feldern statt. Die Teilchen, die dies repräsentieren, sind die Photonen. Sie repräsentieren aber nicht nur „Licht-Teilchen“ (die einem kurzen Ausschnitt des gesamten Wellenlängen-Spektrums entsprechen), sondern unter anderem auch Gamma-Strahlung, Röntgenstrahlen und Radiowellen.

Bei entgegengesetzten Ladungen verhält es sich genau andersherum. Hier entspricht es der Vorstellung, dass z.B. ein Elektron und ein Positron jeweils Photonen aus den Seen absorbieren und sich somit immer weiter nähern (umgekehrter Impulsübertrag).



Da Photonen masselos sind, ist ihre Lebensdauer als virtuelle Teilchen unendlich und somit auch ihre Reichweite. Sie beeinflussen sich währenddessen nicht einmal gegenseitig, da sie auch ladungslos sind. Weshalb sich Ladungen abstoßen oder anziehen kann aber gut über die elektromagnetische WW beschrieben werden. So sind Elektronen und Positronen ständig von einem „See“ aus virtuellen Photonen umgeben, die ständig entstehen

Die Bosonen dürfen in unserer Tabelle natürlich nicht fehlen. Wir beginnen mit dem Photon:

Masse →	0	
Ladung →	0	
Spin →	1	
Name →	Photon (elektromagn.)	

Wir kommen nun zur starken Wechselwirkung, die unter anderem für den großen Unterschied zwischen der Protonenmasse und der Quarkmasse verantwortlich ist. Da die Protonen im Atomkern positiv geladen sind, müssten sie sich eigentlich gegenseitig abstoßen und der Kern auseinanderfallen. Dasselbe gilt für gleichgeladene Quarks. Hier kommt die starke WW zum Tragen, die dafür sorgt, dass sich Nukleonen bzw. Quarks gegenseitig anziehen. Sie ist einhundertmal stärker als die elektrische Abstoßung, hat mit 2,5 fm aber nur eine geringe Reichweite, weshalb wir sie in der Natur nicht direkt spüren.

Grundlage für die starke WW ist die Quantenchromodynamik (kurz QCD, griech. chromo „Farbe“). Sie beschreibt, wie die Quarks über den Austausch von Gluonen (Nachweis 1979 am DESY in Hamburg) zusammenhalten. Der Name dieser Bosonen kommt vom englischen „glue“ für kleben. Die Gluonen kleben die Quarks also zusammen. Sie sind masselos und besitzen keine elektrische Ladung, erhalten in der QCD aber wie auch die Quarks eine weitere Eigenschaft, die starke Ladung oder Farbladung genannt wird. Es handelt sich dabei um eine Ladung die drei unterschiedliche Werte aufweisen kann und in der Natur stets Null ergeben muss. Wir hatten so etwas Ähnliches schon bei der elektrischen Ladung der Quarks, die zusammen immer ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung sein muss, damit es die Quark-Kombination geben kann.

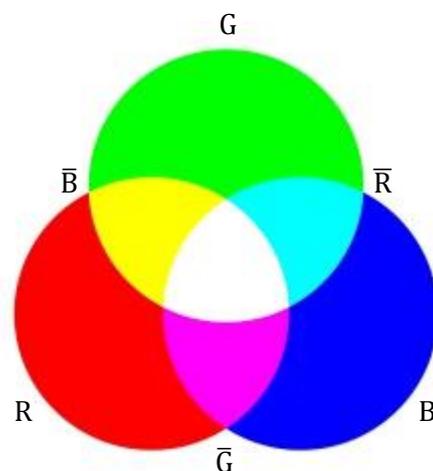
Da es sich um drei Werte handelt kam man auf eine elegante Lösung, die nicht zu wörtlich genommen werden sollte. Anstatt hier mit Zahlen zu jonglieren, ordnete man jedem Wert eine Farbe zu. Die Ladungen heißen somit Rot, Grün und Blau (RGB). Mittels der additiven Farbmischung ergeben nun stets alle drei Farben

zusammen Weiß (wie beispielsweise bei Fernsehern, Handy-Displays, etc.). Somit kann eine Kombination von Quarks nur existieren, wenn ihre Farbladungen Weiß ergeben. Möglich wäre z.B.:

$$p = (\mathbf{uud})$$

Ein Proton kann also aus einem Rot-geladenen up-Quark, einem Grün-geladenen up-Quark und einem Blau-geladenen down-Quark bestehen. Rot-Grün-Grün würde es hingegen nicht geben, da die Gesamtladung nicht Weiß wäre.

Hinzu kommt noch, dass es zu jeder Farbe eine Anti-Farbe gibt, wie auch jedes Teilchen ein Anti-Teilchen besitzt. Weiß ergibt sich also z.B. auch aus Rot und Anti-Rot. Dies ist wichtig für Teilchen wie die Pionen, die aus einem up-Quark und einem Anti-down-Quark zusammengesetzt sind und folglich nicht alle drei Farbladungen haben. Jedes Anti-Teilchen hat dabei immer eine Anti-Farbe. Gluonen als Austausch-Teilchen haben jeweils eine Farbe und eine Anti-Farbe (die nicht zusammengehören müssen). Die folgende Abbildung zur additiven Farbmischung hast du vielleicht schon einmal gesehen. Sie zeigt nochmal die möglichen Farb-Kombinationen zu Weiß.



Das waren jetzt vielleicht etwas viele Informationen auf einmal. Wir gehen deshalb an einem Beispiel durch, wie zwei Quarks

unter der starken WW wechselwirken indem sie ein Gluon austauschen.

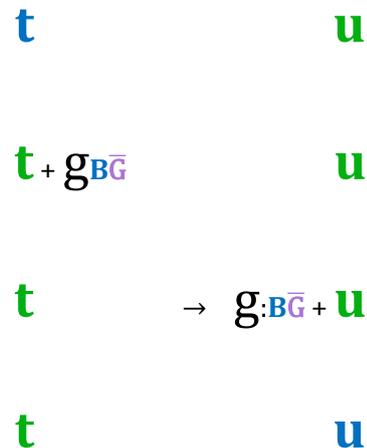
Austausch der Farbladung zweier Quarks

Wir nehmen als Beispiel ein blaues top-Quark und ein grünes up-Quark. Kommen sie sich nah genug, können sie stark wechselwirken.

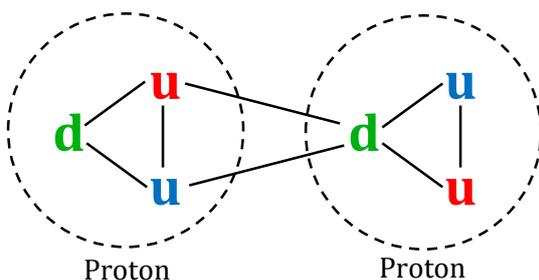
Das top-Quark sendet ein Gluon aus, das dessen Farbe wegträgt. Zurück bleibt die Farbladung, die mit der Anti-Farbe des Gluons weiß ergibt.

Das Gluon bringt seine Ladung dann zum grünen up-Quark. Da sich das Grün des Quarks und das Anti-Grün des Gluons aufheben, erscheint es nach außen blau.

Das up-Quark absorbiert das Gluon, womit nur noch die blaue Farbladung zurück bleibt. Somit haben die Quarks ihre Farbladung über das Gluon ausgetauscht.



Durch diese Wechselwirkungen, die ständig zwischen nahen Quarks stattfinden, verbinden sich schließlich auch die nahen Nukleonen. Die Quarks aus zwei Protonen, die nach Außen Weiß sind, gehen untereinander ständig neue Farbkombinationen ein, die sie durch die Gluonen austauschen. Das kannst du dir in etwa wie in der folgenden Abbildung vorstellen.



Bei der Anzahl der verschiedenen Gluonen würde man eigentlich 9 erwarten, die sich aus den unterschiedlichen Farbkombinationen ergeben. Quantenmechanisch ergeben sich aber nur 8. Eine Erklärung dazu würde aber den Rahmen sprengen.

Mit diesen Kenntnissen folgt nun endlich die Antwort zum Masseunterschied des Protons und seiner Quarks (uud). Der Großteil der Protonenmasse liegt nicht in der Masse der drei Quarks, sondern in den Bindungen durch Gluonen. Dabei ist nicht einfach jeweils ein Gluon zwischen zwei Quarks, sondern es wirken etliche Gluonen im Proton. Zwar sind die Gluonen selbst masselos, ihre Bewegungsenergien tragen aber wiederum über die Beziehung $E = mc^2$ zur gesamten Masse bei. Experimentell fand man heraus, dass je Quark circa 340 MeV durch Gluonen und ihre Wechselwirkungen hinzukommen.

Damit haben wir in der Gruppe der Bosonen bereits zwei Austauscheteilchen für die Wechselwirkungen:

Masse →	0	0
Ladung →	0	0
Spin →	1	1
Name →	Photon (elektromagn.)	Gluon (stark)

Kommen wir nun zum Unruhestifter in der Teilchenphysik. Bislang war noch alles schön geordnet: Bestimmte Quarks bilden Protonen, andere wiederum Neutronen; Elektronen sind Elektronen; Neutrinos kann man an ihrer Masse unterscheiden; zu jeder WW gehört ein Boson; usw. Die schwache WW wirft dies alles durcheinander. Sie kann Quarks in andere Quarks umwandeln, Elektronen zu Myonen machen, spontane Umwandlungen von Neutrinos hervorrufen und besitzt drei Bosonen. Sie ist also für Umwandlungen zuständig und wird theoretisch durch die Quantenflavourdynamik (QFD) beschrieben.

Ihr bekanntester Einfluss ist der Beta-Zerfall, den wir in diesem Heft schon mehrmals betrachtet haben. Dabei wird ein Neutron in ein Proton umgewandelt und sendet dabei ein Elektron und Anti-Elektron-Neutrino aus. Dies geschieht über die Umwandlung eines down-Quarks in ein up-Quark. Aus (ddu) wird also (uud). Da das down-Quark schwerer als das up-Quark ist, geht die Energiedifferenz in das Elektron, das Anti-Elektron-Neutrino und ihre kinetischen Energien über. Als Austauschteilchen (oder Zündung) dieser Wechselwirkung dient das W-Boson.

Wir führen zunächst die Eigenschaften dieser Bosonen auf und erweitern damit unsere Tabelle:

Masse →	0	0	91,2 GeV	80,4 GeV
Ladung →	0	0	0	1
Spin →	1	1	1	1
Name →	Photon (elektromagn.)	Gluon (stark)	Z-Boson (schwach)	W-Boson (schwach)

An den elektrischen Ladungen kannst du sehen, dass das Z-Boson elektrisch neutral ist, wohingegen das W-Boson eine Elementarladung besitzt. Man spricht bei den Wechselwirkungen, an denen diese Bosonen beteiligt sind, entsprechend von neutralen Strömen und geladenen Strömen. Beim Beta-Zerfall geschieht eine Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, was einer Ladungsänderung entspricht. Hier ist also ein W-Boson am Werk. Da es

sich um eine Ladungsänderung von +1 handelt (Neutron hat 0, Proton hat +1), wird dies über das Anti-W-Boson (Ladung -1; auch W-Boson genannt) realisiert, so dass die Gesamtladung erhalten bleibt.

Damit also jede Ladungsänderung kompensiert werden kann sind drei Bosonen nötig. $-1 \cdot e$ durch das W-Boson, $0 \cdot e$ durch das Z-Boson und $+1 \cdot e$ durch das W⁺-Boson.

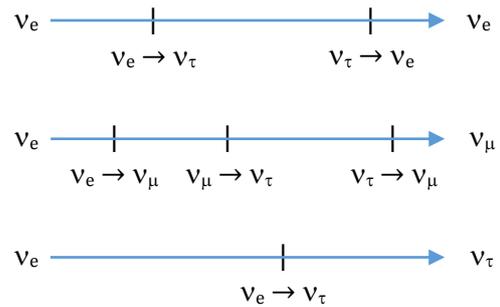
Bosonen der schwachen WW

Welches Boson der schwachen WW ist hier jeweils beteiligt?

a) $e^- + e^+ \rightarrow \tau + \bar{\tau}$

b) $e^+ \rightarrow \nu_e$

Im Aufgabenteil b) war die Umwandlung eines Positrons in ein Elektronen-Neutrino aufgeführt. Die überschüssige Energie (besonders der Massen) wird dabei als kinetische Energie auf das Neutrino übertragen. Neutrinos können sich aber auch untereinander ständig umwandeln. Da sie elektrisch neutral sind, geschieht dies durch ein Z-Boson. Wenn du dich an die Entdeckungsgeschichte der Neutrinos erinnerst, wurden auf der Erde nur ein Drittel der erwarteten Neutrinos der Sonne registriert. Dies lässt sich nun über die schwache WW endgültig erklären. Die Neutrinos haben sich auf ihrem Weg zur Erde mehrfach umgewandelt und der Detektor konnte nur Elektronen-Neutrinos einfangen.



Wenn du nochmal auf die Tabelle der Bosonen schaust, kannst du sehen, dass die Z- und W-Bosonen die einzigen mit Ruhemassen sind. Diese sind selbst im Vergleich zu allen anderen Elementarteilchen sehr groß. Nur das top-Quark besitzt eine noch größere Masse.

Aufgabe 13

Reichweite der schwachen WW

Unter anderem ergibt sich die Bezeichnung „schwache WW“ aus diesen relativ großen Massen, was an einer Aufgabe verdeutlicht werden soll:

Nehmen wir einmal an, die Bosonen könnten sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen (das können sie wegen ihrer Masse zwar nicht, aber damit betrachten wir den Grenzwert der Geschwindigkeit). Welchen Weg kann ein W-Boson im virtuellen Zustand zurücklegen? Zum Vergleich: Der Durchmesser eines Atomkerns beträgt ca. $1 \cdot 10^{-15}$ m.

Tipp: Energie-Zeit-Unschärfe. Der Weg ist das Produkt aus Geschwindigkeit und Zeit.

Die maximale Reichweite der schwachen WW entspricht also ungefähr dem Durchmesser eines Protons. Neben dieser kurzen

Reichweite ist sie aber auch etwa 100.000.000.000mal schwächer als die elektromagnetische Kraft.

6.5

GRAVITATION

Die Auswirkungen der vorigen drei Wechselwirkungen traten im bisherigen Verlauf schon mehrmals auf. Durch sie konnten viele Effekte endgültig beschrieben werden. Die Gravitation wurde bislang aber noch nicht thematisiert (sogar die Masse wurde nicht als Gewicht beschrieben).

In der Welt der Elementarteilchen ist sie um so viele Größenordnungen kleiner als die anderen Wechselwirkungen, dass man sie gar nicht beachtet. Betrachten wir als Beispiel zwei Elektronen im Abstand eines Atomdurchmessers. Die Stärke der elektromagnetischen WW zwischen ihnen kann über die Coulomb-Kraft berechnet werden und beträgt $F_C = 2,307 \cdot 10^{-8}$ N. Die Stärke der Gravitation lässt sich über das Newtonsche Gravitationsgesetz bestimmen und beträgt $F_G = 5,538 \cdot 10^{-51}$ N.

Eigentlich müsste die Gravitation analog zur starken und schwachen WW mit „unbedeutende WW“ bezeichnet werden.

Aber warum spüren wir die Gravitation jederzeit, obwohl ihre Stärke so gering ist? Das liegt daran, dass sie sich von allen uns umgebenden Teilchen aufsummiert und nicht abgeschirmt werden kann. Sogar die gesamte Materie des Universums (schließlich kreist die Erde um die Sonne und diese

wiederum um das Zentrum der Milchstraße) wirkt auf uns, da ihre Reichweite unendlich ist. Während wir beispielsweise die elektromagnetische WW der anderen Hälfte der Erde nicht mitbekommen, so tragen aber all ihre Teilchen zur Gravitation bei.

Zusammenfassung: Wechselwirkungen und Bosonen

- Unter den Elementarteilchen herrschen vier verschiedene Wechselwirkungen.
- Die Gravitation ist unter Elementarteilchen so schwach, dass man sie nicht beachtet.
- Der Austausch der Wechselwirkungen findet durch Bosonen statt.
- Bosonen haben sehr unterschiedliche Eigenschaften, aber alle haben einen Spin von 1.

elektromagnetische WW

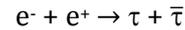
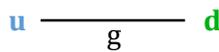
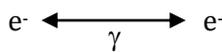
Photon
unendliche Reichweite
Interaktion von el. Ladung

starke WW

Gluon
stark, geringste Reichweite
drei Farbladungen
„klebt“ Teilchen zusammen

schwache WW

Z- und W-Boson
schwach, geringe Reichweite
Umwandlungen



Mit den Bosonen haben wir die Tabelle der Elementarteilchen des Standardmodells komplett:

Gen. →	I	II	III	
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
Ladung →	2/3	2/3	2/3	0
Spin →	1/2	1/2	1/2	1
Name →	u up	c charm	t top	γ Photon (elektromagn.)
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g Gluon (stark)
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	91,2 GeV
	-1	-1	-1	0
	1/2	1/2	1/2	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tauon	Z Z Boson (schwach)
Leptonen	< 2,2 eV	< 0,17 MeV	< 15,5 MeV	80,4 GeV
	0	0	0	1
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e e-Neutrino	ν_μ μ-Neutrino	ν_τ τ-Neutrino	W W Boson (schwach)
				Bosonen

Bisher haben wir Prozesse und Reaktionen immer mit Worten beschrieben oder durch Reaktionsgleichungen angegeben. Im Folgenden sehen wir, wie man diese noch darstellen kann und dabei auch alle beteiligten Prozesse während des Vorgangs mit einbezieht. Bei den Reaktionsgleichungen werden schließlich nur die Anfangs- und Endprodukte angegeben. Eine einfache und heute unentbehrliche Methode entwickelte Richard P. Feynman mit den nach

ihm benannten Feynman-Diagrammen. Sie sind schnell nachzuvollziehen, wenn man die Regeln zum Lesen und Deuten kennt.

Unten sind zwei Diagramme als Beispiele von Reaktionen, die wir bereits behandelt hatten. Als Lesehilfe sind im linken Diagramm noch die Zeit- und die Orts-Achse eingetragen. Mit den folgenden Regeln kannst du sie lesen und nachvollziehen.

Regeln bei Feynman-Diagrammen

Teilchen werden durch unterschiedliche Striche dargestellt:



Quarks und Leptonen



Anti-Quarks und Anti-Leptonen



Photonen, Z- und W-Bosonen



Gluonen

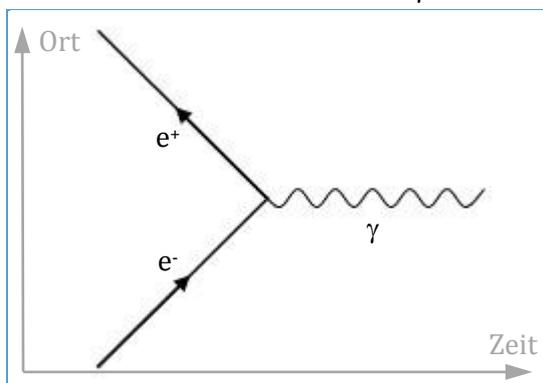
Ein Teilchen wandelt sich niemals von selbst um. Jede Reaktion kann immer nur zwischen mehreren Teilchen stattfinden. Hier gelten stets die Erhaltungssätze.

Die Leserichtung ist zumeist von links nach rechts (wie bei den folgenden Diagrammen), kann aber auch von unten nach oben sein. Dies wird jeweils anfangs erwähnt. Diese Richtung gibt an, wie sich das System in Verlauf der Zeit entwickelt.

Die zweite Dimension (oder Achse) der Diagramme entspricht dem Ort. Zwei sich treffende Linien bedeuten, dass sich die Teilchen am Schnittpunkt an demselben Ort befinden.

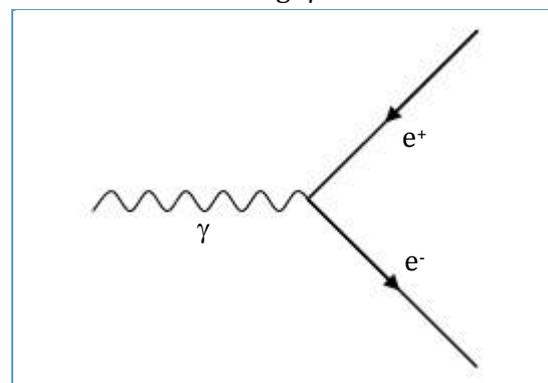
Formel 6

Annihilation: $e^- + e^+ \rightarrow \gamma$



Ein Elektron und ein Positron bewegen sich aufeinander zu und vernichten sich. Dabei geben sie ihre gemeinsame Energie in Form von Photonen ab.

Paarbildung: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$



Ein Photon trifft auf eine Atomhülle. Es wird dadurch in ein Elektron und ein Positron umgewandelt, die sich voneinander wegbewegen.

Der Nachteil der Reaktionsgleichungen ist, dass sie nur die Anfangs- und die Endprodukte angeben, aber nicht wie sie in der Zwischenzeit wechselwirken. Gegenüber

der Beschreibung mit Worten sind die Feynman-Diagramme wiederum schneller und einfacher nachzuvollziehen.

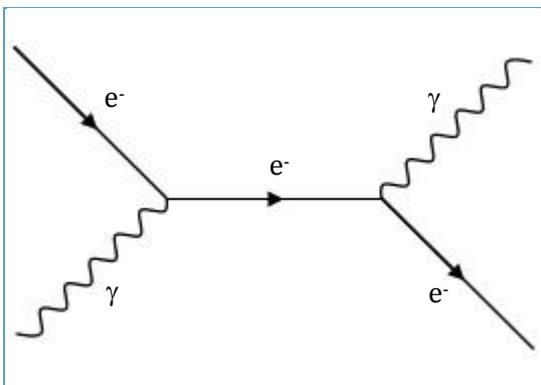
Aufgabe 14

Feynman-Diagramme deuten und selbst erstellen

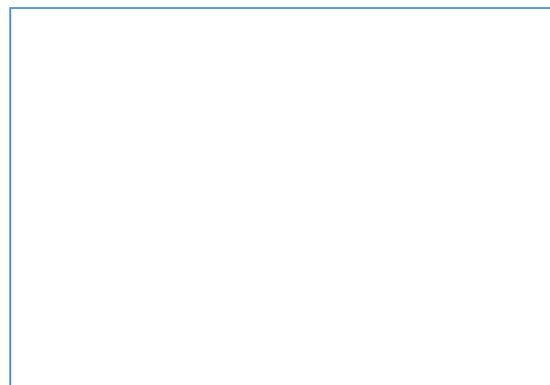
Im Folgenden sind vier weitere Feynman-Diagramme, Reaktionsgleichungen und/oder Beschreibungen von Prozessen aufgeführt.

Schreibe bzw. skizziere das jeweils Fehlende auf deinen Bearbeitungszettel.

Compton-Streuung: $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$

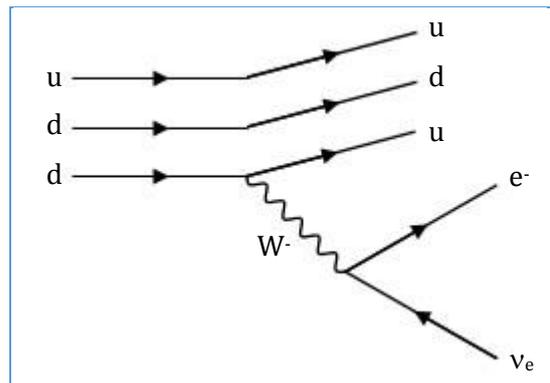
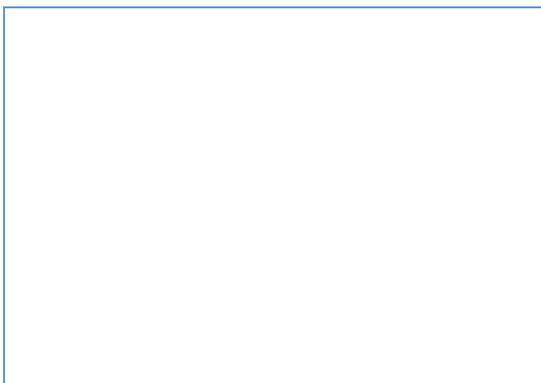


Änderung der Farbladung: $\bar{t} \rightarrow \bar{t}$



Die Farbladung eines Anti-top-Quarks wird durch die Absorption eines Gluons verändert, das im Vakuum entsteht.

ν_μ -e-Streuung: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$



Durch den Austausch eines Z-Bosons streuen ein Elektron und ein Myon-Neutrino aneinander.

Du hast jetzt sehr viele neue Teilchen und deren Eigenschaften und Wechselwirkungen kennengelernt. Die meisten von ihnen haben nur sehr kurze Lebensdauern. Wie untersucht man im Experiment Teilchen, die so schnell wieder zerfallen, dass sie nirgends zu finden sind? Die theoretischen Überlegungen reichen schließlich nicht aus, um die Natur zu verstehen, sie müssen auch real vorgefunden werden. Man muss diese Teilchen zur Beobachtung also direkt in der Untersuchungsanlage erzeugen.

Kommen wir nochmal auf die Formel $E = mc^2$ zurück. Wir haben mit ihr bislang Massen eine jeweilige Energie zugesprochen. Die Formel kann aber auch andersherum interpretiert werden. Man kann aus Energie also auch Masse erzeugen, sie muss nur groß genug sein. Wir hatten diesen Fall schon bei der

Paarbildung von Elektron und Positron durch die Energie eines Photons.

Die Energie eines Teilchens setzt sich bekanntlich aus der Ruheenergie (bzw. Masse) und der kinetischen Energie zusammen. Dies nutzt man aus, um aus einem Energieüberschuss neue Teilchen entstehen zu lassen. Es werden dabei zwei Teilchen sehr stark beschleunigt und aufeinander geschossen. Da sie schon elementar sind, zerbrechen sie nicht in Bruchstücke, sondern geben ihre kinetische Energie in Form neuer Elementarteilchen ab. Für die enormen Geschwindigkeiten werden leistungsstarke Beschleuniger benötigt und für die Untersuchungen modernste Detektoren, die blitzschnell Millionen von Vorgängen registrieren können. Die bekannteste und größte Forschungsstation hierfür ist das CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in der Schweiz.

Das Grundprinzip bei der Energiezufuhr ist die Beschleunigung von geladenen Teilchen in einem elektrischen Feld. Dazu werden die Teilchen zwischen zwei Kondensatorplatten gebracht, an denen

eine Spannung angelegt ist. Da die Spannung jedoch nicht beliebig erhöht werden kann, nutzt man zwei verschiedene Möglichkeiten die Energie zu maximieren.

Geschwindigkeit eines Protons

Bevor wir zu den beiden Möglichkeiten kommen betrachten wir aber zunächst ein Beispiel:

In der klassischen Mechanik errechnet sich die kinetische Energie bekanntlich mittels:

$$E_{\text{kin}} = 1/2 \cdot mv^2$$

Die kinetische Energie, die einem Proton in einem elektrischen Feld zugeführt wird, ergibt sich aus seiner Ladung e und der angelegten Spannung U :

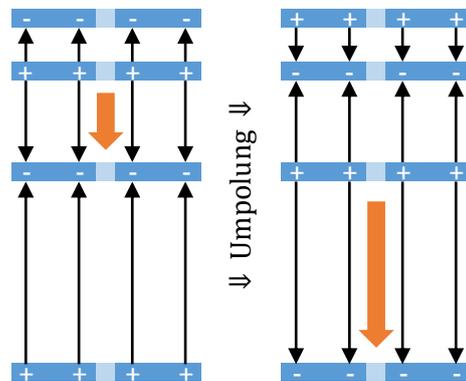
$$E_{\text{kin}} = eU$$

Wie schnell ist ein Proton ($m = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg), das mit einer Spannung von einem Megavolt beschleunigt wird und wie viel Prozent der Lichtgeschwindigkeit entspricht das?

Die erste Möglichkeit die Geschwindigkeit und damit die Energie der Teilchen zu erhöhen, ist bei den sogenannten Linearbeschleunigern realisiert. In ihnen durchlaufen die Teilchen nach und nach weitere elektrische Felder und werden dabei jedes Mal beschleunigt. Begrenzt werden die Energien dabei hauptsächlich durch die Länge des Beschleunigers. Der unten abgebildete LINAC des SLAC in Stanford, USA ist etwa 3 km lang. Zurzeit befindet sich ein zweimal 15 km langer Linearbeschleuniger in Planung.



Effizienter wurde dieser Aufbau durch das Nutzen einer Wechselspannung, die die Kondensatoren stets umpolt. Da die Teilchen beim Durchlaufen jedes weiteren Kondensators (die jeweils eine Öffnung in der Mitte haben) eine höhere Geschwindigkeit besitzen, müssen die Abstände entsprechend größer werden. Ansonsten würde es im nächsten abgebremst werden. Die folgende Abbildung zeigt eine Hintereinanderreihung von Kondensatoren, in denen ein Proton beschleunigt wird. Die Länge der Kondensatoren muss nun so abgestimmt sein, dass das Proton zeitgleich mit der Umpolung in das nächste elektrische Feld gelangt und weiter beschleunigt wird.



E_{kin} in der allgemeinen Relativitätstheorie

Bei hohen Geschwindigkeiten kann man nicht wie in der klassischen Mechanik rechnen, sondern muss die allgemeine Relativitätstheorie verwenden: Bei weiterer Beschleunigung eines Körpers, wird seine Masse stets größer. Die Gesamtenergie ist dann gegeben durch:

$$E_{\text{ges}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} mc^2$$

Diese ergibt sich bekanntlich aus der Summe der kinetischen Energie und der Ruheenergie (auch potentielle Energie genannt). Um die kinetische Energie zu erhalten, betrachtet man also die Differenz:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{ruhe}} \Leftrightarrow E_{\text{kin}} = E_{\text{ges}} - E_{\text{ruhe}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} mc^2 - mc^2$$

$$E_{\text{kin}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$$

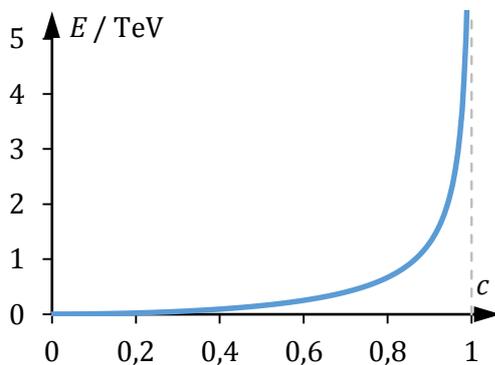
Formel 7

Energiezuwachs von 0,999·c zu 0,9999·c

Man würde zunächst vermuten, dass zwischen der 0,999-fachen Lichtgeschwindigkeit und der 0,9999-fachen kein großer Unterschied besteht. Schauen wir uns einmal die nötigen kinetischen Energien für diese Geschwindigkeiten an.

Ein Proton ($mc^2 = 938,2 \text{ MeV}$) wird auf die jeweilige Geschwindigkeit gebracht. Wie viel kinetische Energie musste dafür jeweils aufgebracht werden?

An dem Beispiel aus der Aufgabe sollte deutlich geworden sein, warum die Physiker die Energien der Teilchen angeben und nicht die erreichbaren Geschwindigkeiten. Bei der Suche nach Geldgebern für die Projekte mussten sie stets erklären, warum ein neuer Teilchenbeschleuniger ein großer Sprung gegenüber älteren ist, obwohl kaum höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Im Diagramm ist nochmal dargestellt, wie viel kinetische Energie ein Proton besitzt, wenn es sich der Lichtgeschwindigkeit weiter nähert.

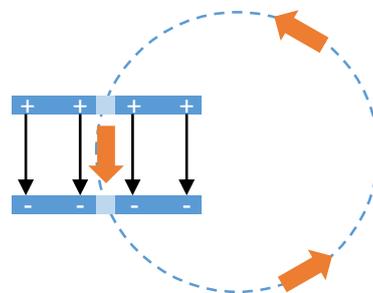


Stellen wir mal einen Bezug der Energie eines beschleunigten Protons zur bekannten Umwelt her. Der LHC am CERN kann 7 TeV aufbringen, was nach der Umrechnung aus 2.1 etwa 1,121 Mikrojoule entspricht. Nehmen wir als Vergleich eine Wasserflasche ($m = 1 \text{ kg}$), die aus einem Meter Höhe runterfällt. Beim Fall geht ihre Höhenenergie in kinetische Energie über. Beim Aufprall hat sie also:

$$E = mgh = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} = 9,81 \text{ J}$$

Dies ist schon eine millionenfach größere Energie. Im LHC werden allerdings immer Pakete mit etwa 110 Milliarden Protonen beschleunigt. Diese haben zusammen eine Energie, die 12 500 kg entspricht, die aus einem Meter herunterfallen.

Um solche Energien zu erreichen müsste ein Linearbeschleuniger übermäßig lang sein. Am LHC nutzt man daher eine andere Möglichkeit, um die kinetische Energie der Teilchen zu steigern. Sie werden dabei einfach immer wieder durch ein und dasselbe elektrische Feld geschickt. Um sie vom Ende des Feldes wieder zum Anfang zu bringen, werden sie durch Magnetfelder umgelenkt.



Durch die Magnetfelder erhalten sie zwar keine größere Geschwindigkeit sondern nur eine Richtungsänderung, können aber mehrmals durch das elektrische Feld geschickt werden. Begrenzt wird die Energie hier durch die Stärke des Magnetfeldes und die Größe des Ringes, in dem sie sich bewegen (der LHC ist 26 659 m lang). Ein solcher Beschleuniger wird Ring- oder Kreisbeschleuniger genannt.

Nachdem die Teilchen mittels eines Beschleunigers auf hohe Energien gebracht wurden sollen aus ihnen neue erzeugt und diese analysiert werden. Dies geschieht in hoch komplexen Detektoren, deren Grundprinzipien aber recht einfach nachvollzogen werden können. In Punkt 1 hatten wir die früheren Nachweismethoden mittels Nebel- und Blaskammern angesprochen. Mit ihnen ließen sich bereits die Spuren von Elementarteilchen nachverfolgen und einige Eigenschaften ermitteln. Sie sind aber für die enorme Anzahl an Vorgängen während der Teilchenkollisionen in den heutigen Aufbauten nutzlos. Es wurden daher elektronische Verfahren entwickelt, die direkt von Computern ausgelesen und gespeichert werden können. Sie funktionieren ähnlich wie das Geiger-Müller-Zählrohr oder eine Digitalkamera.

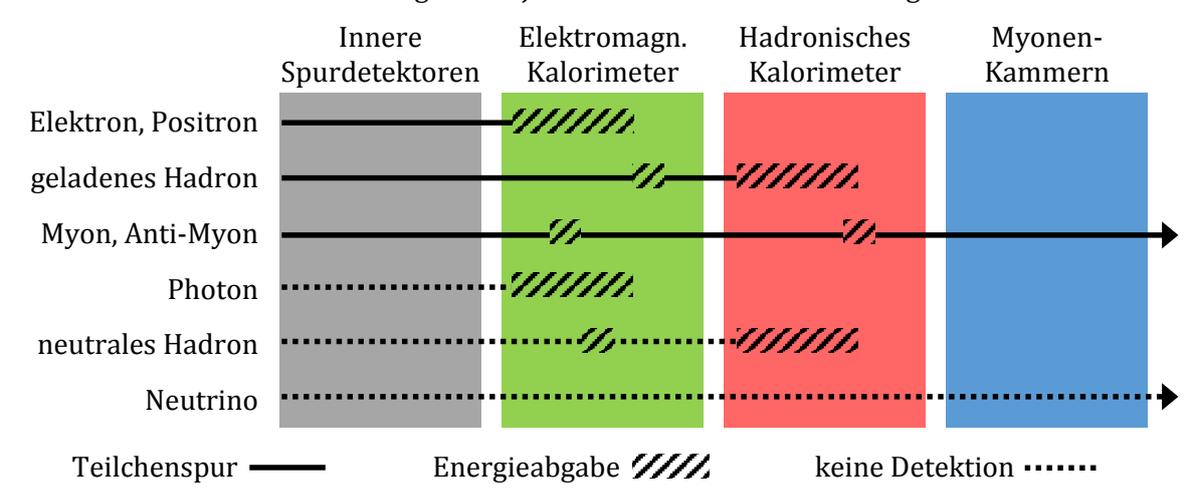
Die Funktionsweise werden wir exemplarisch am ATLAS-Detektor (A Toroidal LHC ApparatuS) kennenlernen. Er ist einer von vier Detektoren, die am LHC (Large Hadron Collider) angebracht sind. Das Foto zeigt ihn während des Aufbaus (Zur Einschätzung der Größe betrachte den Menschen unten im Bild).



LHC steht übrigens für „Large Hadron Collider“, hier werden also Hadronen zur Kollision gebracht. Das sind alle Teilchen, die der starken WW unterliegen, also aus Quarks und/oder Anti-Quarks zusammengesetzt sind. Dazu gehören die dir bekannten Protonen und Neutronen, aber auch z.B. das Pion $\pi^+ = (u\bar{d})$ oder das Sigma-Meson $\Sigma^0 = (uds)$. Es werden aber hauptsächlich Protonen (uud) verwendet. Sie werden beschleunigt und auf eine kinetische Energie von 7 TeV gebracht. Im ATLAS-Detektor treffen sie dann aufeinander, womit im Zentrum eine Energie von 14 TeV in die Erzeugung neuer Teilchen umgewandelt wird. Wie der Detektor diese Teilchen registriert, werden wir uns nun anschauen.

Schichten des ATLAS-Detektors

Der ATLAS-Detektor besteht aus vier unterschiedlichen Schichten, durch welche die neu entstandenen Teilchen durchfliegen und je nach Art unterschiedlich aufgenommen werden.



In den verschiedenen Schichten werden durch Ionisation von Gasmolekülen oder durch Halbleiter-Materialien elektrische Impulse geliefert, sobald ein Teilchen vorbeifliegt. Diese Impulse werden von Computern erfasst, die dann die Spuren der Teilchen rekonstruieren. Um dies im gesamten Raum um die Kollisionen herum zu erfassen, sind die Detektor-Schichten ringförmig um die Kollisionsstelle aufgebaut. Nach den inneren Spurdetektoren geben die Teilchen dann teilweise ihre gesamte Energie an die Schicht-Materialien ab, wodurch sie vollständig absorbiert werden. Auf die Teilchensorte kann mittels dieser Energien geschlossen werden.

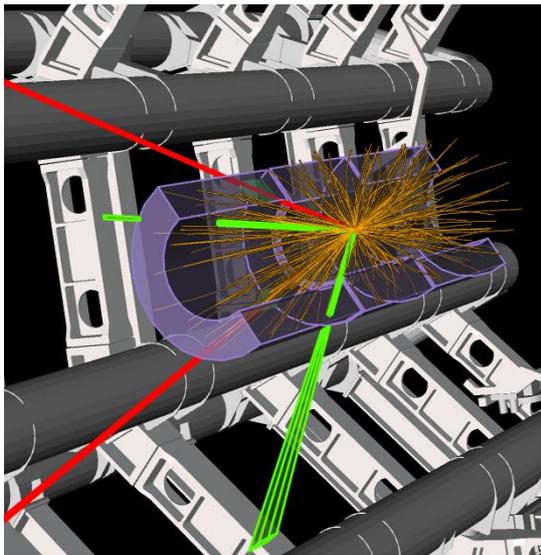
Betrachten wir mal ein paar dieser Detektionen: Wie in der vorigen Grafik zu sehen ist, gibt ein Elektron seine gesamte Energie in der zweiten Schicht (dem elektromagn. Kalorimeter = Energiemesser) an das Detektor-Material ab, wohingegen ein geladenes Hadron (also beispielsweise ein Proton) nur einen Teil abgibt und erst in der dritten Schicht vollständig absorbiert wird (daher der Name hadronisches Kalorimeter). Hierdurch können diese Teilchen bereits unterschieden werden. Anhand der Energien können sie dann nochmals exakt bestimmt werden. Ein Elektron und ein Photon geben hingegen in der gleichen Schicht eine ähnlich hohe Energie ab. Sie können aber dadurch unterschieden werden, dass das Photon in der ersten Schicht nicht wechselwirkt und somit keine Spur hinterlässt.

Somit können also schon einige Eigenschaften wie die Energie (Masse), die Geschwindigkeit (und damit die kinetische Energie) und die Flugrichtung ermittelt werden. Aber es können beispielsweise noch nicht die Elektronen von den Positronen unterschieden werden. Dafür wird aber ein magnetisches Feld im Detektor erzeugt, das verschiedene elektrische Ladungen unterschiedlich ablenkt. Anhand der Krümmung der rekonstruierten Spur kann dann die Ladung berechnet werden (wie schon bei den Nebel- und Blaskammern).

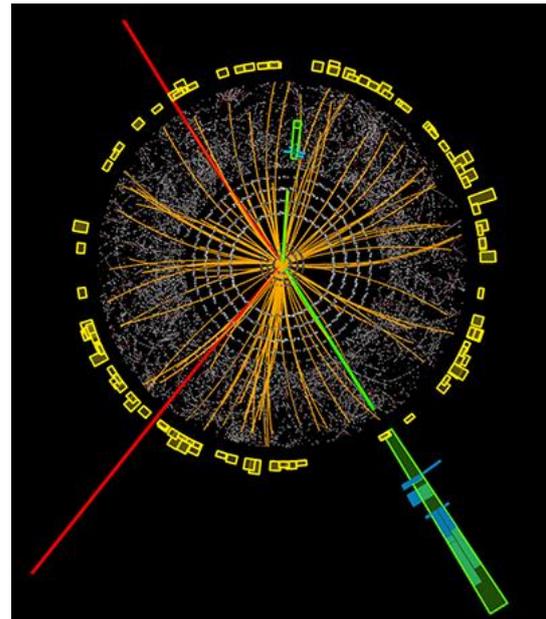
Auch mit diesen hochmodernen Detektoren sind Neutrinos kaum zu erfassen. Da sie mit den Schichten nicht wechselwirken, kann keine Spur rekonstruiert und auch keine Energie gemessen werden. Da man aber alle anderen Teilchen und deren Energien ermitteln kann, wird die fehlende Energie den Neutrinos zugeschrieben.

Bei den Kollisionen lässt sich übrigens vorher nicht voraussagen, welche Teilchen entstehen werden. Dies unterliegt allein dem Zufall. Lediglich die zur Verfügung stehende Energie kann durch die zugeführten Teilchen und deren Geschwindigkeit beeinflusst werden. Da aber pro Sekunde 600 Millionen Kollisionen passieren, kann jede mögliche Erzeugung gefunden werden. Dabei helfen wieder einmal die leistungsstarken Computer, die selbstständig voreingestellte Kollisionen herausfiltern.

Neben den jeweiligen Energiewerten in jedem Detektorpunkt können die Computer am ATLAS auch Darstellungen der Kollision ausgeben. Die folgenden Aufnahmen (ATLAS Experiment © 2013 CERN) stammen aus einer Kollision zweier Protonen, bei der vorrangig zwei Elektronen (grün) und zwei Myonen (rot) erschaffen wurden. Die anderen Teilchen (gelbe Spuren) sind „Trümmerreste“ die aus der übrigen Energie entstanden sind.



In einer zweidimensionalen Darstellung können auch die jeweiligen Energien in Form von Säulen ausgegeben werden. Hieran ist gut zu erkennen, dass die primär erzeugten Elektronen sehr viel höhere Energien haben als die anderen Teilchen, deren Energie sich um die Kollision herum verteilt.



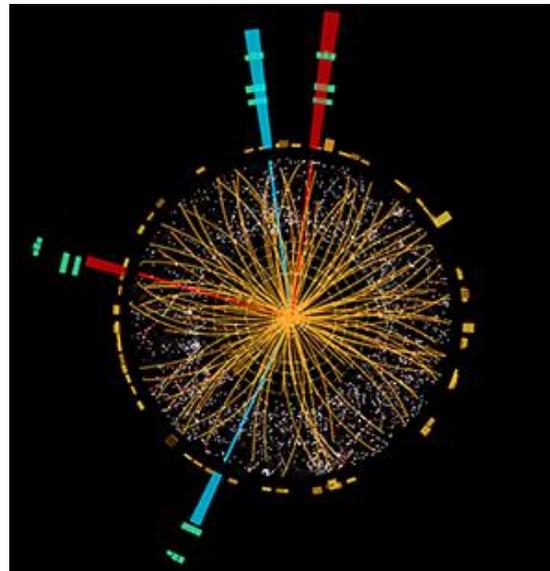
Du kannst daran auch gut die Schichten des Detektors erkennen. Die inneren Spurdetektoren verlaufen zunächst mit einer hohen Auflösung ringförmig um das Zentrum und danach etwas geringer aufgelöst gleichverteilt. Dadurch können die Spuren sehr genau rekonstruiert und an der Krümmung die Ladungen bestimmt werden. Unten rechts im Bild zeigt sich, wie das elektromagn. Kalorimeter (grüne Säulen) und die Myonen-Kammern (blaue Säulen) die Energie des Elektrons ausgeben. Es hatte sogar so viel kinetische Energie, dass es nicht vom elektromagn. Kalorimeter absorbiert wurde. Das hadronische Kalorimeter hat offensichtlich nichts gemessen, es waren also keine Protonen oder ähnliches bei der Kollision entstanden.

Seit Jahrzehnten hat eine entscheidende Frage die Teilchen-Physiker beschäftigt, auf die es nun erste Antworten gibt: Weshalb haben die Elementarteilchen so verschiedene Massen? Vielleicht ist dies eine Frage, die Du Dir gar nicht stellen würdest. Wenn Du aber auf die Tabelle der Elementarteilchen des Standardmodells schaut, wirken die Massen im Vergleich zu den anderen Eigenschaften schon seltsam. Man kann aus ihnen auch keine Elementarmasse oder dergleichen herleiten, so dass sie beliebig wirken. Zunächst eine schlechte Nachricht: Eine vollständige Antwort darauf haben die Forscher auch heute noch nicht gefunden. Aber: Sie sind ihr im Juli 2012 ein ganzes Stück näher gekommen und die Untersuchung geht vielversprechend weiter.

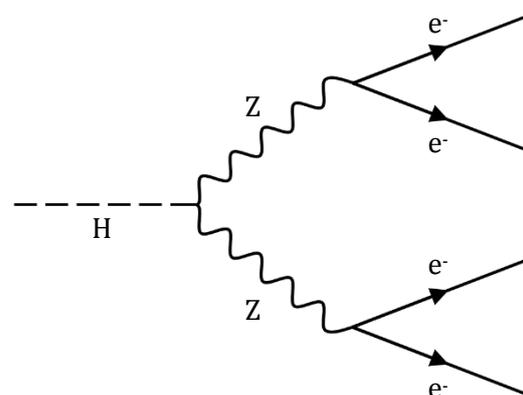
Nach einer Theorie von Peter Higgs und Francois Englert ist das gesamte Universum von einem sogenannten Higgs-Feld durchzogen. Dieses Feld ist zunächst nicht auszumachen, da es homogen (also überall gleich stark) ist. Erst wenn sich energie-reiche Teilchen darin bewegen, fängt es an zu schwingen, was durch Higgs-Bosonen repräsentiert wird. Sie zählen also auch zu den Austauschteilchen. Vorstellen kannst Du Dir den Vorgang wie eine Bewegung in Luft. Wenn es windstill ist und sich nichts bewegt, kannst Du auch die Luft nicht wahrnehmen. Erst wenn sich etwas bewegt und die Luft zum Schwingen anregt, kannst Du sie spüren. Die schwingenden Luftmoleküle können dann grob gesehen als Higgs-Bosonen interpretiert werden. Je stärker die Wechselwirkung des Elementarteilchens mit dem Higgs-Feld ist, desto mehr wird dieses darin gebremst und desto höher ist demnach seine Masse.

Im Juli 2012 haben die Forscher des CERN die Entdeckung des Higgs-Bosons bekannt gegeben. Nach langen Messreihen und vielen Versuchen an verschiedensten möglichen Reaktionen, an denen ein Higgs-

Boson beteiligt sein könnte, wurde die theoretische Vorhersage von P. Higgs und F. Englert bestätigt, die dafür beide mit dem Nobelpreis für Physik 2013 ausgezeichnet wurden. So hat das Teilchen eine Masse von ca. 126 GeV, ist elektrisch neutral und besitzt keinen Spin. Die folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse im ATLAS-Detektor bei einer Umwandlung eines Higgs-Bosons in vier Elektronen. Typischerweise werden dabei immer Paare erzeugt, was hier an den beiden rotgefärbten und blaugefärbten Säulen zu erkennen ist.



In Feynman-Diagrammen bekommt das Higgs-Boson eine eigene Darstellung mittels einer gestrichelten Linie. Die obige Reaktion, in der es zunächst in ein Z-Bosonen-Paar zerfällt, sieht darin wie folgt aus:



Mit dem Higgs-Boson ist unsere Tabelle der Elementarteilchen nun vollständig. Hierin kannst Du jederzeit die Gruppierungen und die wichtigsten Daten zu den Teilchen nachschlagen:

Gen. →	I	II	III		
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	ca. 126 GeV H Higgs
Ladung →	2/3	2/3	2/3	0	
Spin →	1/2	1/2	1/2	1	γ Photon (elektromagn.)
Name →	u up	c charm	t top		
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	g Gluon (stark)
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom		
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	91,2 GeV	Z Z Boson (schwach)
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e Elektron	μ Myon	τ Tauon		
	< 2,2 eV	< 0,17 MeV	< 15,5 MeV	80,4 GeV	W W Boson (schwach)
0	0	0	1		
1/2	1/2	1/2	1		
	ν_e e-Neutrino	ν_μ μ-Neutrino	ν_τ τ-Neutrino		Bosonen

ABSCHLIEßENDE BEMERKUNGEN

Mit diesem Themenheft hast Du hoffentlich eine Vorstellung davon bekommen, was Elementarteilchen eigentlich nun wirklich sind. Wie früher angenommen ist es nicht das Atom, aber ebenso nicht das Proton und Neutron. Sind nun die entdeckten Elementarteilchen des Standardmodells die endgültigen elementaren Teilchen, also die Bausteine aller Materie die nicht weiter zerlegt werden können? Dies ist bislang immer noch nicht geklärt. Es handelt sich eben weiterhin um ein Modell. Zwar hat es bislang in allen experimentellen Beobachtungen unfassbar exakt gestimmt, jedoch sind konkurrierende Modelle wie die String-Theorie oder das Quantenschleifen-Modell bereits in den Startlöchern, um es in Detailfragen herauszufordern.

Richard P. Feynman, einer der Mitbegründer des Standardmodells, sagte einmal: „Man kann niemals wissen ob man richtig liegt, man weiß nur wenn man falsch liegt.“

In Zukunft stehen zunächst weitere Untersuchungen zum Higgs-Boson an und es kann dabei auch noch nicht ausgeschlossen werden, dass es nicht noch weitere Higgs-Teilchen gibt. Ebenso wartet das vorhergesagte Graviton noch auf experimentelle Beweise seiner Existenz und damit der quantenmechanischen Beschreibung der Gravitation. Letztendlich sollen diese Ergebnisse dann zu einer „Theorie von Allem“ führen, einer Vereinigung aller Kräfte in einer einzigen, die alles erklärt.

Aufgabe 1

Veranschaulichung der Größenverhältnisse von Atomhülle und -kern

Atomhülle: 100 000 fm, Atomkern: ca. 1 fm

Die Hülle ist also etwa 100 000mal größer als der Kern.

Wäre der Durchmesser des Kerns 8 cm, so wäre die Hülle $8\text{cm} \cdot 100\,000 = \underline{8\text{ km groß}}$.

Aufgabe 2

Die Masse eines Neutrons

Da auch Helium elektrisch neutral ist, besitzt es wegen der zwei Elektronen auch zwei Protonen die deren Ladung kompensieren. Von den vier Nukleonen sind demnach zwei Neutronen. Also:

$$m_{\text{Helium}} = 2 \cdot m_e + 2 \cdot m_{\text{Proton}} + 2 \cdot m_{\text{Neutron}}$$

$$m_{\text{Neutron}} = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Helium}} - m_{\text{Proton}} - m_e$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 6,697 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 9,109 \cdot 10^{-31} = \underline{1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}$$

Aufgabe 3

Die Masse eines Elektrons in eV

Elektronenmasse in kg: $m_e = 9,110 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Umrechnung: $1 \text{ kg} = 0,561 \cdot 10^{36} \text{ eV}$

$$9,110 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 9,110 \cdot 10^{-31} \cdot 0,561 \cdot 10^{36} \text{ eV} = \underline{511 \text{ keV oder } 0,511 \text{ MeV}}$$

„Gewicht“ ist hier der falsche Begriff, da es sich um Energie handelt, $E = mc^2$.

Aufgabe 4

Zusammengesetzte Ladung der Nukleonen

Ein Proton besteht aus zwei up-Quarks (Ladung $2/3$) und einem down-Quark (Ladung $-1/3$), also: $(2/3) + (2/3) + (-1/3) = 3/3 = \underline{1}$

Ein Neutron besteht hingegen aus einem up-Quark und zwei down-Quarks, also: $(-1/3) + (-1/3) + (2/3) = 0/3 = \underline{0}$

Aufgabe 5

Masse der up- und down-Quarks

$p = (uud)$, also $2m_u + m_d = 9,6 \text{ MeV}$ (I)

$n = (ddu)$, also $2m_d + m_u = 12,0 \text{ MeV}$ (II)

(II) umstellen: $2m_d + m_u = 12,0 \text{ MeV} \Leftrightarrow m_u = 12,0 \text{ MeV} - 2m_d$

In (I) einsetzen: $2m_u + m_d = 9,6 \text{ MeV} \Leftrightarrow 2(12,0 \text{ MeV} - 2m_d) + m_d = 9,6 \text{ MeV}$

$\Leftrightarrow 24,0 \text{ MeV} - 3m_d = 9,6 \text{ MeV} \Leftrightarrow 3m_d = 14,4 \text{ MeV} \Leftrightarrow \underline{m_d = 4,8 \text{ MeV}}$

Wieder einsetzen: $2m_u + m_d = 9,6 \text{ MeV} \Leftrightarrow 2m_u + 4,8 \text{ MeV} = 9,6 \text{ MeV}$

$\Leftrightarrow \underline{m_u = 2,4 \text{ MeV}}$

Quarks des Sigma-Baryons

Eine Ladung von -1 wird nur durch Kombinationen von 3 Quarks mit der Ladung -1/3 erreicht. Es muss also aus down-, strange- oder bottom-Quarks bestehen. Daraus lässt sich schon schließen, dass es einen Spin von 3/2 nach unten hat.

Die Masse von 115,6 MeV kann man nur mit zwei down-Quarks und einem strange-Quark erreichen, also $\Sigma^{*-} = (dds)$.

Energie der Gamma-Strahlung bei Annihilation

$$E_{\text{kin}} = 1/2 \cdot mv^2 = 1/2 \cdot (9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (30\,000\,000 \text{ m/s})^2 = 4,099 \cdot 10^{-16} \text{ J}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{4,099 \cdot 10^{-16} \text{ J}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \text{ eV} = 2\,558,501 \text{ eV}$$

$$E = E_{\text{kin}} + E_{\text{Ruhe}} = 2\,558,501 \text{ eV} + 511 \text{ keV} = 513,56 \text{ keV}$$

Elektron und Positron haben also zusammen eine Energie von 1 027,12 keV, die in Gamma-Strahlung umgewandelt wird.

Warum gibt es so wenig Antimaterie?

Nach dem Urknall hat irgendetwas dafür gesorgt, dass es mehr Materie als Antimaterie gibt. Treffen nun Anti-Teilchen auf ihre Teilchen, so vernichten sie sich gegenseitig und es bleibt bloß ihre Energie zurück.

Entdeckung der Quarks und Leptonen

Die jeweils erste Generation der Quarks und der Leptonen wurde bei Untersuchungen von Atomen entdeckt, was daran liegen mag, dass diese einen Schritt zwischen beobachtbaren Objekten (Materie) und Strahlungsphänomen einnehmen.

Die zweiten Generationen wurden in der kosmischen Strahlung entdeckt, die durch die Entwicklung von Nebel- und Blasenkammern sichtbar gemacht werden konnte.

Die jeweils dritte Generation von Quarks und Leptonen spielen wiederum bei Zerfällen beziehungsweise Umwandlungen eine Rolle. Um diese überhaupt untersuchbar zu machen, mussten erst Kenntnisse über Atome und Strahlung gewonnen werden.

Energie im Wasserstoffatom

$$\begin{aligned} p &= (uud), \text{ also } m_{\text{Quarks+Elektron}} = m_u + m_u + m_d + m_e \\ &= 2,4 \text{ MeV} + 2,4 \text{ MeV} + 4,8 \text{ MeV} + 0,511 \text{ MeV} = \underline{10,111 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

Dies entspricht knapp 1,1 % von $m_{\text{H-Atom}} = 938,7 \text{ MeV}$

Zeit-Unbestimmtheit beim Elektron

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2 \Leftrightarrow \Delta t \geq \hbar/(2 \cdot \Delta E)$$

$$\Delta t \geq 6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s} / (2 \cdot 0,511 \text{ MeV})$$

$$\Delta t \geq \underline{6,440 \cdot 10^{-22} \text{ s}}$$

Bosonen der schwachen WW

Bei a) haben die beiden Teilchen vor und nach der Reaktion jeweils die gleiche Ladung (e^- und τ haben -1 , e^+ und $\bar{\tau}$ haben $+1$). Es handelt sich dabei um einen neutralen Strom, also ein Z-Boson.

Die Umwandlung in b) geht mit einer Ladungsänderung von $+1$ nach 0 einher. Damit die gesamte elektrische Ladung erhalten bleibt, ist hier ein W^{+} -Boson (Ladung $+1$) beteiligt.

Reichweite der schwachen WW

$$m_{W\text{-Boson}} = 80,4 \text{ GeV}, v = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

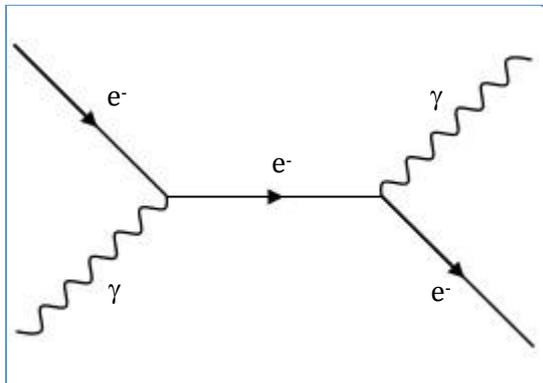
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2 \Rightarrow \Delta t \geq \hbar/(2 \cdot 80,4 \text{ GeV}) \Rightarrow \Delta t \geq 4,093 \cdot 10^{-27} \text{ s}$$

$$\Delta s = v \cdot \Delta t = 299\,792\,458 \text{ m/s} \cdot 4,093 \cdot 10^{-27} \text{ s} = \underline{1,227 \cdot 10^{-18} \text{ m}}$$

Die Reichweite ist also etwa ein Tausendstel des Durchmessers eines Atomkerns.

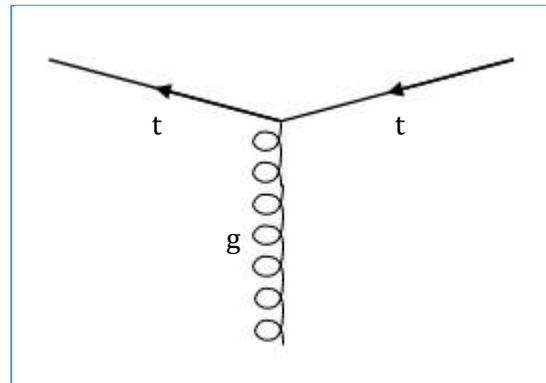
Feynman-Diagramme deuten und selbst erstellen

Compton-Streuung: $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$



Ein Elektron absorbiert ein Photon, womit es seinen Impuls ändert (hier geradeaus dargestellt). Das somit angeregte Elektron emittiert diese Energie später wieder als abgestrahltes Photon.

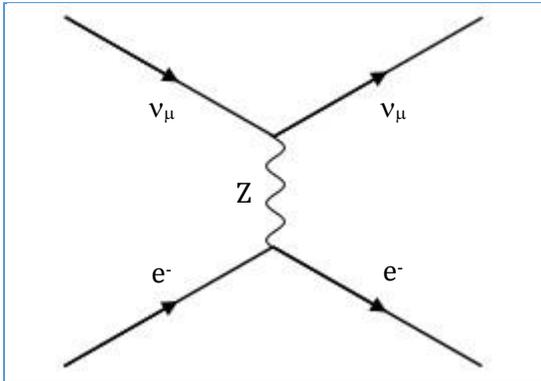
Änderung der Farbladung: $\bar{t} \rightarrow \bar{t}$



Die Farbladung eines Anti-top-Quarks wird durch die Absorption eines Gluons verändert, das im Vakuum entsteht.

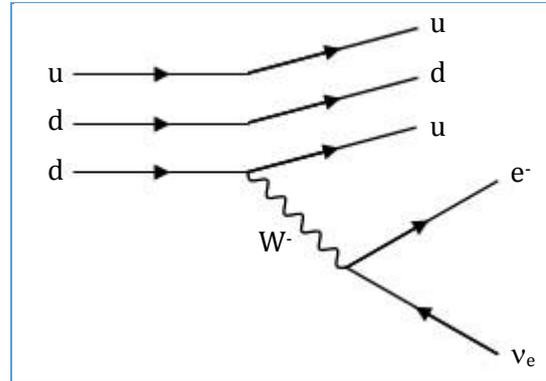
Feynman-Diagramme deuten und selbst erstellen

ν_{μ} -e-Streuung: $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$



Durch den Austausch eines Z-Bosons streuen ein Elektron und ein Myon-Neutrino aneinander. Sie stoßen sich folglich ab.

Beta-Zerfall: $(ddu) \rightarrow (uud) + e^{-} + \bar{\nu}_e$



Ein down-Quark wird durch die starke WW in ein up-Quark umgewandelt (und damit das Neutron in ein Proton). Das W-Boson, das dafür verantwortlich ist, zerstrahlt danach in ein Elektron und ein Anti-Elektron-Neutrino.

Geschwindigkeit eines Protons

Gleichsetzen der kinetischen Energien ergibt: $1/2 \cdot mv^2 = eU$

Umformen nach v : $v = \sqrt{2 \frac{eU}{m}}$

Werte einsetzen: $v = \sqrt{2 \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1\,000\,000 \text{ V}}{1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} = \underline{13\,838\,795,23 \text{ m/s}}$

Dies entspricht etwa 4,61 % der Lichtgeschwindigkeit.

Energiezuwachs von 0,99 999 99-c zu 0,99 999 999-c

Einsetzen in $E_{\text{kin}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$ ergibt für 0,999c eine Energie von 20,046 GeV und für 0,9999c bereits 65,404 GeV. Also wird bereits mehr als die dreifache Energie benötigt.