

# 13 Teilchen und Beschleuniger

Wir verlassen nun die aus vielen Teilchen zusammengesetzten Systeme und wenden uns deren Bausteinen zu. Dafür entfernen wir uns noch weiter von unserem gewohnten Alltag und tauchen in die Welt der Elementarteilchen ein. *Elementar* bedeutet hier in erster Linie, dass sie nicht weiter zusammengesetzt sind. Das heißt, wir sind nun bei den echten Bausteinen unserer Materie angekommen. Sie sind punktförmig und besitzen keine innere Struktur oder etwas vorsichtiger ausgedrückt, mit unseren heutigen Mitteln können wir keine feststellen.

Einige Vertreter dieser Welt wie das Proton, das Neutron, das Elektron und das Neutrino haben wir schon kennengelernt, aber nicht alle davon sind auch elementar. Tatsächlich sind Proton und Neutron zusammengesetzte Teilchen. Dies bedeutet aber noch lange nicht, dass wir ihre Komponenten auch direkt als freie Teilchen untersuchen können. Wie dies zu verstehen ist, klärt sich im Laufe dieses Kapitels. Wir schauen uns an, aus was Proton und Neutron bestehen, wie sie zerfallen und welche Kräfte dies bewirken.

Doch bevor wir damit anfangen, möchte ich Ihnen die Untersuchungsmethoden dieses grundlegenden Physikkzweigs etwas näherbringen. Viele von Ihnen haben bestimmt schon von Teilchenbeschleunigern, dem CERN oder vom LHC und seinen Großexperimenten gehört. Aber was verbirgt sich dahinter und warum muss man solch riesige, komplizierte und damit auch teure Anlagen bauen? Wie werden sie betrieben und was wird bei den Experimenten gemessen? Und warum beschleunigt man überhaupt Teilchen?

Zur Untersuchung kleiner Strukturen benötigt man generell hohe Energien. Dies sieht man schon bei einem Mikroskop, wo die Wellenlänge des verwendeten Lichts die Auflösung begrenzt. Man kann nichts erkennen, was kleiner als die Wellenlänge ist. Will man ein noch kleineres Objekt untersuchen, muss man die Wellenlänge verkleinern oder gleichbedeutend die Energie des Lichts vergrößern.

Genauso verhält es sich bei Elementarteilchen. Auch hier muss man die Energie erhöhen, wenn man zu kleineren Strukturen vordringen möchte. Dabei verwendet man allerdings kein Licht, sondern beleuchtet die Materie direkt mit schnellen Teilchen. Je nachdem, wie diese Teilchen abgelenkt werden, kann man auf den Aufbau der untersuchten Materie schließen. Zu wirklich hohen Energien und damit einer Auflösung, die die Bestandteile eines Protons sichtbar machen, kann man am besten vordringen, wenn man *zwei* schnelle Teilchen frontal aufeinander krachen lässt.

Dabei wird ein Großteil der Bewegungsenergie gemäß  $E = m \cdot c^2$  direkt in Masse umgewandelt. Und zwar in die Masse von neuen, meist kurzlebigen, das heißt schnell wieder zerfallenden Teilchen. Aber bevor wir uns ansehen, wie man diese Reaktionen oder Ereignisse untersucht, müssen wir klären, wie man sie herbeiführt. Um dies zu erreichen, müssen wir also zwei Teilchen, etwa ein Elektron und ein Proton fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen und dann auch noch dafür sorgen, dass sie sich treffen.

Es kommt aber noch ein generelles Problem hinzu. Alle Kräfte und Naturgesetze, mit denen wir es hier zu tun haben, fallen in den Bereich der Quantentheorie. Demnach unterliegen alle Ergebnisse, die wir erhalten, gewissen Zufälligkeiten, die durch Wahrscheinlichkeiten gesteuert werden. Ein einzelnes Ereignis hat daher fast keine Aussagekraft. Wir benötigen stattdessen Tausende oder besser noch Millionen von Ereignissen, um aus ihnen die Wahrscheinlichkeiten und deren Abhängigkeiten von der Energie, dem Ablenkungswinkel und anderen Größen zu rekonstruieren. Wir brauchen also eine Maschinerie, die effektiv Teilchen auf eine hohe Energie beschleunigt, sie danach aufeinander schießt und auch feststellt, was dabei passiert. Und das Ganze noch millionenfach in einer vertretbaren Zeit.

All dies leisten die *Teilchenbeschleuniger*, von denen die größten alle ringförmig gebaut sind. Schauen wir uns an, wie hier beispielsweise ein hochenergetischer Strahl aus Elektronen erzeugt wird. Solch ein Strahl lässt sich im Prinzip mit jeder Wendel einer Glühbirne erzeugen, denn hier treten ständig Elektronen aus dem heißen Metalldraht aus. Die nun freien Elektronen beschleunigt man mit einer elektrischen Spannung und bündelt sie mit elektrischen und magnetischen Feldern zu einem Strahl. Genau nach diesem Prinzip zeichnen die mittlerweile veralteten Röhrenfernseher ihr Bild mit einem schnell bewegten Elektronenstrahl auf einen Leuchtschirm. Doch während in einem Fernseher Beschleunigungsspannungen von Tausenden von Volt ausreichend sind, benötigt man für einen Elektronenbeschleuniger Milliarden von Volt. Wie man leicht einsieht, kann diese Beschleunigung kaum in einem Rutsch gelingen, sondern benötigt viele einzelne Beschleunigungsschritte.

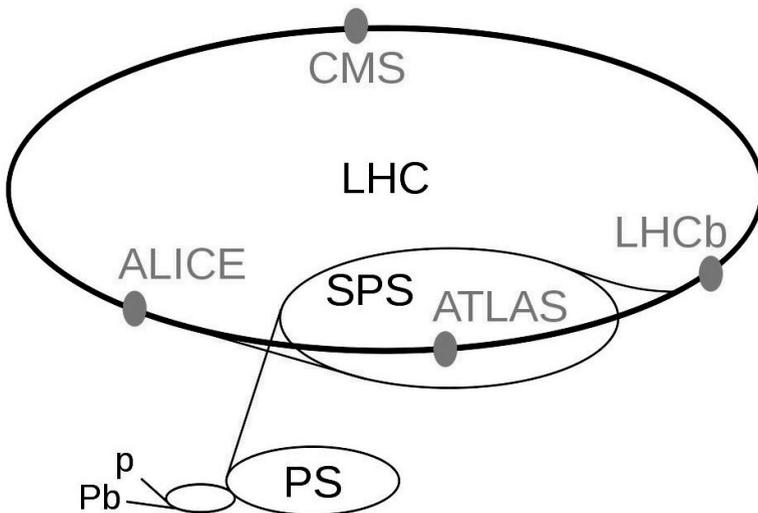
Und nun kommt die Ringform ins Spiel, die einen tragfähigen Kompromiss darstellt. In Kapitel 5 haben wir auf Abbildung 7 (Seite 39) gesehen, wie man ein elektrisch geladenes Teilchen mit Magnetfeldern auf einer Kreisbahn halten kann. Nach diesem Prinzip werden auch die Teilchen in einem ringförmigen Beschleuniger auf eine geschlossene Bahn geleitet. Dazu werden sie in Paketen gesammelt, damit sie effektiv beschleunigt werden können. Diese Pakete durchfliegen pro Umlauf viele einzelne Magnete, und zwar innerhalb eines Metallrohres. Hier herrscht ein Ultrahochvakuum, damit die Teilchen nicht augenblicklich von den Gasmolekülen der Luft abgelenkt werden. Bei jedem Umlauf werden die Pakete von elektrischen Feldern wie ein Surfer auf einer Welle weiterbeschleunigt und damit ihre Masse

erhöht. Daher müssen auch die Magnetfelder ständig an die schwerer werdenden Teilchen angepasst werden, denn sonst würden diese nicht auf ihrer geschlossenen Kreisbahn bleiben, sondern gegen die Wand des Metallrohres fliegen.

Aber auch ein einziger Ringbeschleuniger ist für heutige Zwecke nicht mehr ausreichend. So wie ein Auto beim Beschleunigen in einem einzelnen Gang an seine Grenzen kommt, so ist es auch bei einem Teilchenbeschleuniger. Bedingt durch seinen Umfang und die Stärke seiner Magnete, kann er Teilchen nur in einem bestimmten Energiebereich effektiv beschleunigen und in der Bahn halten. Will man darüber hinaus gehen, so benötigt man einen weiteren Beschleuniger.

Beim derzeit größten Beschleuniger, dem LHC (Large Hadron Collider, dt.: großer Hadronen-Speicherring) am CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, dt.: Europäische Organisation für Kernforschung), sind es immerhin vier Ringbeschleuniger, die wie die Gänge eines Getriebes hintereinander geschaltet sind. Jedes Mal wenn die maximale Energie eines Ringes erreicht ist, wird sozusagen hochgeschaltet und der Strahl aus dem Ring heraus- und in den nächst größeren hineingeschossen. Dabei dauert die Beschleunigung im letzten Ring mit seinem etwa 1600 Hauptmagneten allein 20 Minuten. Würde man diesen Beschleuniger also geradeaus bauen, würde er weit über die Bahn des Planeten Mars hinausragen.

Ist die Beschleunigung insgesamt abgeschlossen, so werden die elektrischen Felder so weit heruntergefahren, dass sie nur noch den Energieverlust ausgleichen, den die Teilchen durch Strahlung aufgrund der Richtungsänderung in den Kurven



- 22 Der LHC am CERN mit seinen vier Beschleunigerringen und den Experimenten (graue Kreise), der Durchmesser des größten Rings beträgt 8,5 km. Zwei der Vorbeschleuniger heißen SPS und PS.

erfahren. In diesem Zustand kann der Strahl stunden- bis tagelang in einem Ring gespeichert werden und nahezu verlustfrei zirkulieren. Man nennt einen solchen Ring daher auch *Speicherring*. In ihm kreist aber meist nicht nur ein Strahl, sondern zwei Strahlen in entgegengesetzter Richtung. Beim LHC sind dies zwei Strahlen aus Protonen, die nun 7500-mal schwerer sind als in Ruhe. So groß ist hier die relativistische Massenzunahme, bei der sich die Bewegungsenergie in Masse und nicht in zusätzliche Geschwindigkeit verwandelt.

Aber genau hier liegt auch einer der Nachteile der ringförmigen Bauweise. Der LHC benötigt wegen der Schwere der Teilchen ausgesprochene Hochleistungsmagnete. Und das quasi im Dauerbetrieb, denn ein Speicherring läuft über Monate fast ohne Pause 24 Stunden am Tag. Ein weiteres Problem stellen die großen Strahlungsverluste durch die Bahnablenkungen dar. Sie spielen sich hier im Röntgen- und Gammabereich ab, sodass der Ring während des Betriebs in eine tödliche Strahlung gehüllt ist. Aus diesem Grund befindet sich die gesamte Anlage gut abgeschirmt teilweise 100 m tief unter der Erde in einem Tunnel zwischen der Stadt Genf und den Bergen des französischen Jura. Dieser Tunnel hat die Ausmaße einer U-Bahn-Strecke mit 4 m Durchmesser und einem Umfang von fast 27 km. Keines der Experimente kann wegen der Strahlung im laufenden Betrieb betreten werden, weshalb alle Teile möglichst ausfallsicher und fernsteuerbar gebaut sind. Zusammengekommen hat dies alles hohe Bau- und Betriebskosten zur Folge.

Dementsprechend lange und intensiv werden diese Anlagen dann auch genutzt. Während meiner Diplomarbeit habe ich zusammen mit meinen Kollegen während der Inbetriebnahme des bislang größten Elektron-Proton-Beschleunigers ein Zusatzexperiment installiert und durchgeführt. Der Beschleuniger HERA (*Hadron-*



23. Blick in den Tunnel des LHC mit den Beschleunigermagneten und den darin befindlichen Strahlrohren  
© 2011, Dr. Andreas Mücklich, Nachdruck nicht gestattet

Elektron-Ring-Anlage) am DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) befand sich zwar nur 20 m tief unter Hamburg, hatte aber immerhin 6 km Umfang, weshalb die Techniker gerne Fahrräder zur Fortbewegung im Tunnel benutzen. Die Hauptexperimente, die die Struktur des Protons sehr präzise vermessen haben und von denen eines passenderweise ZEUS hieß, haben anschließend über 15 Jahre hinweg Daten gesammelt.

Beschleuniger können nur mit elektrisch geladenen Teilchen betrieben werden, denn neutrale Teilchen sind gegen die Beschleunigungsfelder immun. Wegen der langen Beschleunigungs- und Speicherzeiten kommen auch nur stabile Teilchen wie Protonen und Elektronen infrage. Aber auch deren *Antiteilchen* sind begehrte Strahlteilchen, wobei sie allerdings nicht immer einfach in ausreichender Menge herzustellen sind. Antiteilchen und die damit verbundene Antimaterie sind daher keine Erfindung der Science-Fiction-Literatur, sondern pure Realität.

In den 1930er Jahren wurde das erste Antiteilchen in der kosmischen Strahlung entdeckt. Es hatte genau dieselben Eigenschaften wie ein Elektron, aber eine positive Ladung, weshalb man es Positron taufte. Und kurze Zeit später war klar, dass es für fast jedes Teilchen ein quasi entgegengesetztes Teilchen gibt. Bei diesen gleich schweren Antiteilchen wechselt aber nicht nur die elektrische Ladung ihr Vorzeichen, sondern auch andere abstrakte Quantenzahlen. Eines der wenigen Teilchen, die kein Antiteilchen besitzen, ist übrigens das Photon. Man kann auch sagen, dass es sein eigenes Antiteilchen ist und sich somit nicht von ihm unterscheidet.

Tatsächlich besitzen bei den *elementaren* Teilchen alle Materieteilchen (halbzahliger Spin, Fermionen) jeweils ein Antiteilchen. Die meisten Austauscheteilchen (ganzzahliger Spin, Bosonen) hingegen haben kein Antiteilchen.

Treffen ein Teilchen und sein Antiteilchen aufeinander, so zerstrahlen sie in reine Energie, die idealerweise als Photonen den Ort des Geschehens verlässt. Aber wie oft in der Physik geht es auch umgekehrt. Ein Photon mit genügend hoher Energie kann sich auch in ein Teilchen-Antiteilchen-Paar aufspalten, zum Beispiel in ein Elektron und ein Positron oder ein Proton und ein Antiproton.

Verfolgen wir nun wieder die gespeicherten Protonenstrahlen im LHC. Damit wir auch etwas mit ihnen anfangen können, müssen wir sie zur Kollision bringen. Dies geschieht nach der Beschleunigung an mehreren vorher festgelegten Punkten im Ring, wobei die Strahlen bis auf einen Durchmesser von knapp 20 Mikrometer fokussiert werden. Dies erhöht noch einmal wesentlich die Reaktionsrate, denn die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Protonen an einem solchen Wechselwirkungspunkt auch wirklich treffen, ist außerordentlich klein. Immerhin durchdringen sich beide Strahlen mit insgesamt  $3 \times 10^{14}$  Protonen in 2800 Teilchenpaketen bei praktisch Lichtgeschwindigkeit mehr als 32 Millionen Mal pro Sekunde. Dies ergibt in jedem

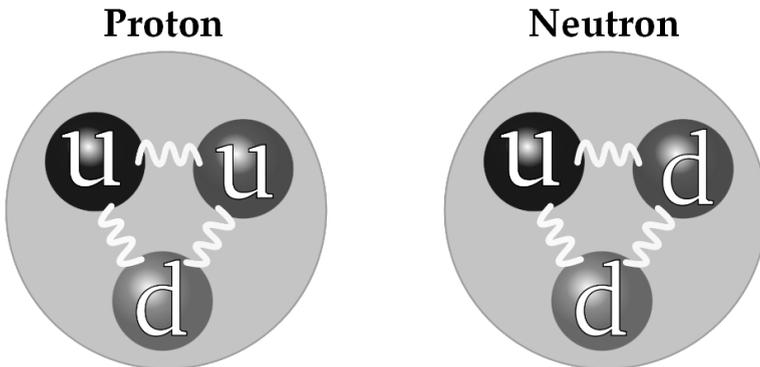
der 4 Wechselwirkungspunkte Millionen von Ereignissen pro Sekunde. Von diesen ist allerdings nur ein kleiner Bruchteil für die Physiker wirklich interessant. Es sind dies die Ereignisse, bei denen die Protonen so heftig aufeinanderprallen, dass sie dabei zerstört werden.

Nun lohnt es sich, einen *Detektor* zwiebelschalenartig um einen Wechselwirkungspunkt herum zu bauen. Sein Hauptziel ist es, möglichst viel von dem herauszufinden und aufzuzeichnen, was bei den Zusammenstößen in seinem Inneren passiert. Wegen der hohen Energie entstehen dabei oft Hunderte von neuen Teilchen, von denen einige noch innerhalb des Detektors wieder zerfallen. Ihre Flugbahn und ihre Energie werden möglichst genau vermessen, um die betreffende Teilchensorte zu identifizieren.

Die Detektoren des LHC sind die kompliziertesten Maschinen, die die Menschheit je gebaut hat. Der größte von ihnen ist 45 m lang, hat einen Durchmesser von 22 m, und wiegt in etwa so viel wie der Eiffelturm. Er wird von über 7000 Physikern aus mehr als 200 Forschungsinstituten betrieben. Allein bei der Datenverarbeitung rechnet man für alle Experimente zusammen mit mehr als einem Gigabyte an Rohdaten pro Sekunde. Aus diesen werden dann mit speziellen Computerprogrammen die Ereignisse rekonstruiert, die im Inneren der Detektoren stattgefunden haben. Obwohl jeder Detektor dabei seine besonderen Stärken hat, ist es sehr wichtig, dass beispielsweise die Entdeckung eines neuen Phänomens oder Teilchens immer von mehreren Experimenten vermeldet wird. Doch was man sich vom LHC erwartet, sehen wir uns erst im nächsten Kapitel an.

Wir kehren nun zur eigentlichen Teilchenphysik zurück, die man auch Hochenergiephysik nennt. Alles, was jetzt an Ergebnissen folgt, wurde an ähnlichen Beschleunigern und Experimenten in den letzten Jahrzehnten zusammengetragen. Seit den 1960er Jahren ist bekannt, dass sowohl das Proton als auch das Neutron aus jeweils drei Unterbausteinen bestehen. Nachdem zuvor mit jedem neuen Beschleuniger die Zahl der scheinbar elementaren Teilchen immer stärker angewachsen war, brachte dieses Konzept eine neue Ordnung in den damaligen Teilchenzoo. Fast alle der mehrere Dutzend bekannten Teilchen stellten sich als zusammengesetzt heraus. Sie bestehen aus lediglich sechs verschiedenen Teilchen und deren Antiteilchen, den *Quarks* und *Antiquarks*. Diese tragen die fast sinnfreien Namen *Up*, *Down*, *Charm*, *Strange*, *Top* und *Bottom*.

Unsere Kernbausteine, das Proton und das Neutron, beinhalten nur *Up*- und *Down*-Quarks. Alle anderen Quarks sind instabil und kommen nur in kurzlebigen Teilchen vor. Das Proton beispielsweise besteht aus zwei *Up*-Quarks und einem *Down*-Quark, während das Neutron aus nur einem *Up*-Quark und dafür zwei *Down*-Quarks aufgebaut ist. Unsere gesamte Materie kommt also nur mit zwei Quarksorten aus, denn Elektronen und Neutrinos haben keine Unterstruktur.



24 Proton und Neutron bestehen aus jeweils 3 Quarks, die durch Gluonen (Wellenlinien) aneinander gebunden sind.

Betrachten wir das Proton nun etwas genauer in diesem Quarkbild. Seine positive elektrische Ladung wird aus der Summe der Quarkladungen gebildet. Damit aber auch ein Neutron als ungeladenes Teilchen dabei herauskommen kann, muss die elektrische Ladung des Up-Quarks  $+\frac{2}{3}$  und die des Down-Quarks  $-\frac{1}{3}$  sein. Diese drittelzahligen Ladungen sind aber trotz vieler Anstrengungen bisher nie an einem freien Teilchen gemessen worden. Quarks treten in unserem Universum daher nicht als freie Teilchen auf, zumindest heutzutage nicht mehr.

Tatsächlich sind die Quarks im Proton so fest eingesperrt, dass sie es unter keinen Umständen verlassen können. So wie man ein Elektron mit genügend hoher Energie aus einem Atom herauslösen kann oder ein Proton oder Neutron aus einem Atomkern, so gelingt dies bei den Quarks eben nicht. Das liegt an der Unterschiedlichkeit der Kraft, die die Bindung zwischen den Quarks vermittelt, also an der Natur der starken Wechselwirkung. Doch bevor wir ihr genauer auf den Grund gehen können, müssen wir zuvor noch ein Konzept begreifen, das grundlegend für die gesamte Physik geworden ist.

Bisher haben wir die Wirkungen einer *Kraft* mit einem *Feld* beschrieben. Der Wert des Feldes an einem bestimmten Punkt zu einer gewissen Zeit gibt an, wie stark eine Kraft dort auf einen anderen Körper wirkt. In der Teilchenphysik gilt dies zwar immer noch, aber hier werden Kräfte auch mit den jeweiligen *Austauschteilchen* der Kraft in Verbindung gebracht. Jede Kraft, oder wie man auch sagt *Wechselwirkung*, besitzt mindestens ein Austauschteilchen, das für die Übertragung dieser Kraft verantwortlich ist.

Bildlich kann man sich dies folgendermaßen vorstellen: Zwischen zwei Teilchen, die eine Kraftwirkung aufeinander ausüben, werden im Rahmen der heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ständig Austauschteilchen ausgetauscht. Diese Austauschteilchen können aus dem Nichts entstehen, in dem sie sich die Energie für

ihre Masse aus dem umgebenden Vakuum borgen. Sie müssen diese Energie  $\Delta E$  gemäß der Formel  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  nur rechtzeitig an das Vakuum zurückzahlen. Sind sie also zwischen den beiden Teilchen eine Zeitspanne  $\Delta t$  unterwegs, die kürzer ist als  $\Delta E/\hbar$ , so sind sie in der Lage ihre Energieschuld fristgerecht zu begleichen. Wenn sie das innerhalb dieses Zeitrahmens schaffen, dann toleriert die Natur quasi kurzzeitig die fehlerhafte Energiebilanz und die Kraftwirkung kann durch das Austauschteilchen übertragen werden.

Während dieses Austauschprozesses scheinen die Teilchen nicht wirklich zu existieren, weshalb man sie auch als *virtuelle Teilchen* bezeichnet. Das heißt aber noch lange nicht, dass sie keine Auswirkungen haben. Denn werden sie auf ihrem Weg von einem Teilchen zum anderen von einer großen Energieportion getroffen, so kann ein Teil dieser Energie dazu verwendet werden, ihre negative Bilanz vorzeitig auszugleichen. Und schon ist aus dem virtuellen Teilchen ein echtes geworden. Das klingt zwar schon wieder nach Science-Fiction, aber eine bessere und gleichermaßen anschauliche Erklärung kann ich Ihnen für diese tatsächlich messbaren Phänomene nicht anbieten.

Jede Kraft besitzt also ihr Austauschteilchen. Für die elektromagnetische Kraft ist dies das Photon. Da es eine Ruhemasse von null besitzt, darf die Energie, die es sich ausborgen muss, beliebig klein sein. Deshalb kann es als virtuelles Teilchen unendlich weit unterwegs sein, weshalb die elektromagnetische Kraft eine unendliche Reichweite besitzt. Dasselbe gilt für das noch nicht nachgewiesene Austauschteilchen der Gravitation, das Graviton. Da auch die Gravitation eine unendliche Reichweite besitzt, ordnet man dem Graviton ebenso eine Ruhemasse von null zu. Etwas komplizierter jedoch sieht es bei der starken und schwachen Wechselwirkung aus.

Obwohl die Austauschteilchen der *starken Wechselwirkung*, die *Gluonen*, keine Ruhemasse besitzen, hat diese Kraft eine effektive Reichweite. Dies liegt an der besonderen Art der Ladungen dieser Kraft. Wie wir gesehen haben, sind in einem Proton oder Neutron stets drei Quarks vorhanden. Mit zwei verschiedenen Ladungen wie bei den elektrischen Ladungen kann so ein Gebilde aber nicht stabil sein. Vielmehr müssen es hier *drei* verschiedene Ladungen sein, die man nach folgender Analogie Farbladungen genannt hat. Bei einem Fernsehbild entsteht die neutrale Farbe weiß durch die Mischung der drei Grundfarben blau, rot und grün. Diese Farben hat man als Bezeichnungen für die Farbladungen der Quarks übernommen. In diesem Bild entsteht nun beispielsweise ein weißes, also farbneutrales Proton dadurch, dass sich in seinem Inneren drei Quarks mit den Farbladungen blau, rot und grün befinden. Nach außen hin trägt ein Proton also gar keine Farbladung, da sich die drei Farbladungen der Quarks gegenseitig aufheben.

Es stellt sich nun heraus, dass für die Wechselwirkung zwischen *drei* verschiedenen Farbladungen auch die Gluonen gewisse Farbkombinationen tragen müssen.

Daher wechselwirken auch die farbigen Gluonen untereinander, was zu tief greifenden Konsequenzen führt. Die Gluonen knüpfen wegen ihrer eigenen Farbe, das Bindungsband zwischen den Quarks auf eine sehr ungewöhnliche Weise. Versucht man beispielsweise eines der Quarks eines Protons mit einer gewissen Menge an Energie aus dem Verband herauszulösen, so wird dieses Band nur noch fester. Die zusätzliche Energie löst nicht die Bindung des Quarks, sondern verstärkt sie noch.

Aber natürlich gibt es für diesen Prozess auch eine Grenze. Wenn beispielsweise im LHC zwei Protonen sehr heftig aufeinanderprallen, so stoßen in Wirklichkeit zwei Quarks miteinander zusammen. Beim LHC ist aber die Energiemenge so groß, dass das Bindungsband der Quarks in beiden Protonen extrem stark belastet wird. Ein Teil der Stoßenergie wird dabei in Bindungsenergie umgewandelt und das Bindungsband zwischen den Quarks regelrecht mit Energie aufgeladen. Ist dort aber genügend Energie vorhanden, so können sich spontan neue Paare aus jeweils einem Teilchen und seinem Antiteilchen bilden.

Diese Paare entstehen aus dem Nichts und wandeln die Energie des Bindungsbands wiederum gemäß  $E = m \cdot c^2$  in die Masse des Teilchenpaars um. Dadurch zerreißt aber letztendlich das Bindungsband in den Protonen. Die Protonen werden durch den Zusammenstoß zerstört und alle Quarks und Antiquarks, die dabei entstehen, werden wiederum in Teilchen eingeschlossen. Alle Reaktionsprodukte des Zusammenpralls fliegen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit durch einen der Detektoren des LHC und werden dort möglichst allesamt nachgewiesen. So können wir im Nachhinein rekonstruieren, was sich an den Wechselwirkungspunkten des Beschleunigers ereignet hat. Ganz wichtig ist jedoch, dass sich unmittelbar nach der Kollision alle Quarks und alle Antiquarks wieder zu Teilchen verbinden. Sie tun dies, weil schon kurz nach dem Stoß die Bindungskräfte zwischen den Quarks wieder die Oberhand gewinnen. Dies führt dazu, dass Quarks niemals als freie Teilchen in Erscheinung treten.

Alle Teilchen, die in der Natur vorkommen, sind daher farbneutrale Teilchen, bei denen sich die Farbladungen nach außen hin immer aufheben. Nur in unmittelbarer Nähe dieser Teilchen ist es für andere Teilchen möglich, die Farbladungen in deren Innerem zu spüren. Kommen sich also beispielsweise zwei Protonen sehr nahe, so sie ziehen sich auch die Farbladungen *zwischen* den beiden Protonen an, wenn auch lange nicht so stark wie *innerhalb* der Protonen.

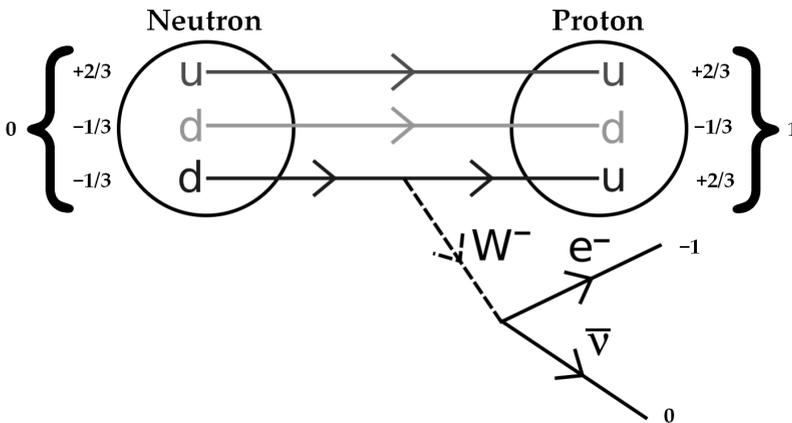
Auf diese Weise bekommt die starke Wechselwirkung ihre effektive Reichweite, die nur wenig größer ist als der Durchmesser eines Protons. Innerhalb dieser Reichweite sind noch Reste der inneren Farbladungen bemerkbar, während außerhalb davon alle Teilchen komplett farbneutral erscheinen. Diese sogenannte Restwechselwirkung ist aber ausreichend, dass sich benachbarte Protonen und Neutronen in einem Atomkern immer noch anziehen. Die starke Kernkraft, die einen Atomkern

zusammenhält, ist sozusagen das Überbleibsel der starken Wechselwirkung zwischen den Farbladungen der Quarks und Gluonen.

Kann man nun Quarks und Gluonen nach diesen Bemerkungen noch mit gutem Gewissen als Teilchen bezeichnen? Wie kann ich mir den Teil eines Protons vorstellen, wenn dieser Teil nicht separat in der Natur vorkommt? Nun, ich gebe zu, auch ich habe damit gelinde gesagt ein paar Schwierigkeiten. Aber ganz so hoffnungslos ist es nicht, denn Quarks und Gluonen haben wie alle Teilchen sehr systematische Eigenschaften, die sie auszeichnen. Zum Beispiel können sie nicht in beliebigen Kombinationen auftreten, sondern nur als zwei Sorten von Paketen mit festgelegtem Inhalt.

Die eine Sorte besteht aus jeweils drei Quarks und heißt Baryonen. Zu ihr gehören unter anderem das Proton und das Neutron. Die andere Sorte enthält dagegen nur ein Quark und ein Antiquark. Alle diese Teilchen, die man als Mesonen bezeichnet, sind allerdings instabil. Aber auch bei den Teilchen, die aus drei Quarks bestehen, ist nur das leichteste, das Proton, stabil. Zusammengenommen nennt man alle aus Quarks aufgebauten Teilchen Hadronen. Dies bedeutet so viel wie ›dicht‹ und kommt als H in der Abkürzung des LHC vor.

Quarks und Gluonen können ebenfalls sehr gut, wenn auch nur indirekt, in den Teilchenreaktionen an Beschleunigern nachgewiesen werden. Sie sind also alles andere als Fantasiegebilde, nur frei herumfliegen können sie eben nicht. Dies sollte aber in der absoluten Frühzeit des Universums anders gewesen sein. In der allerersten Sekunde unserer Welt war die gesamte Materie so energiereich, dass sich alle Quarks und Gluonen wie in einem heißen Gas frei bewegen konnten. Heute hin-



25 Betazerfall im Quarkbild: Durch die Abstrahlung eines  $W^-$ -Teilchen wird ein Up-Quark (u) in ein Down-Quark (d) umgewandelt. Das  $W^-$  zerfällt kurz danach in ein Elektron ( $e^-$ ) und ein Antineutrino ( $\bar{\nu}$ ). Die Zahlen geben die elektrischen Ladungen der Teilchen an.

gegen ist die Umgebung dieser Teilchen so energiearm, dass sie alle in Hadronen gefangen sind.

Die *schwache Wechselwirkung* besitzt im Gegensatz zur starken zwei andere Besonderheiten. Sie beinhaltet insgesamt drei Austauschteilchen und alle drei besitzen eine sehr große Ruhemasse. Die elektrisch geladenen  $W^+$ - und  $W^-$ -Teilchen sind immerhin 85-mal so schwer wie ein Proton, und das neutrale  $Z^0$ -Teilchen (gesprochen: Z null) ist sogar 97-mal so schwer. Dementsprechend kurz ist die Reichweite dieser Kraft, denn die virtuellen Austauschteilchen können nur eine sehr kurze Strecke zurücklegen, ohne die Unbestimmtheitsrelation zu verletzen. Sie müssen sich vom Vakuum auf jeden Fall immer die Energie für ihre beträchtliche Ruhemasse ausleihen, und deshalb ist die Zeitdauer bis zur Fälligkeit dieser Energie entsprechend kurz.

Mit gerade einmal  $10^{-18}$  m ist Reichweite der schwachen Wechselwirkung noch einmal 1000-mal kürzer als die der starken Wechselwirkung. Auch ist sie um einen Faktor  $10^{13}$  schwächer als die starke Wechselwirkung, die wiederum 100-mal stärker ist als die elektromagnetische Wechselwirkung. Trotzdem ist die schwache Wechselwirkung außerordentlich wichtig für radioaktive Zerfälle und die Kernfusionsprozesse in der Sonne.

Mit diesem Wissen schauen wir uns jetzt noch einmal den Zerfall eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino an. Bisher haben wir dies in etwa so betrachtet, als ob sich ein Apfel plötzlich in eine Birne, eine Erbse und ein Staukorn verwandelt. Wenn wir uns aber den Quarkinhalt ansehen, muss sich bei diesem Prozess nur ein einziges Down-Quark in ein Up-Quark umwandeln. Dies geschieht mithilfe der schwachen Wechselwirkung und eines abgestrahlten  $W^-$ -Teilchens. Das  $W^-$ -Teilchen zerfällt dann kurze Zeit später in ein Elektron und ein Neutrino, genauer ein Antineutrino. Nur die schwache Wechselwirkung ermöglicht solch einen Übergang zwischen verschiedenen Quarksorten und damit den Neutronenzerfall.