

SEHR ELEMENTARE TEILCHEN-PHYSIK

von

Martinus J. G. Veltman

Emeritus MacArthur Professor of Physics
University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-1120.

(aus dem Englischen übertragen von Dr. Olivia Meyer)

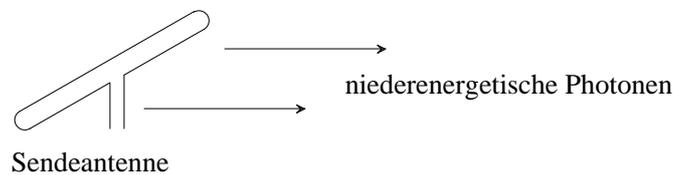
Einleitung

Wir sind heute davon überzeugt, dass alles - Materie, Strahlung, Schwerfelder und Ähnliches - aus Elementarteilchen aufgebaut ist. Die Eigenschaften dieser elementaren Teilchen zu untersuchen, ist das Thema der Teilchenphysik. Wüssten wir alles über diese Bausteine, dann würde das im Prinzip bedeuten, dass wir auch die makroskopische Welt verstehen. Doch davon sind wir natürlich noch weit entfernt; es ist nicht klar, wie vollständig unser Wissen ist; auch ist es sehr, sehr schwierig, aus den elementaren Teilchen das uns umgebende komplizierte Universum herzuleiten. Doch sollte man annehmen, wir könnten wenigstens dann alles erklären, sobald wir alle Eigenschaften der Elementarteilchen kennen. Natürlich können wir uns kaum vorstellen, so komplizierte Dinge wie die lebende Materie, ein Tier oder einen Menschen, vollkommen zu begreifen. Und natürlich mag es viele spezifische Eigenschaften der Elementarteilchen geben, die den feinsten Nachweisinstrumenten entgehen und doch entscheidend für so komplexe Systeme wie den Menschen sind.

Das Fachgebiet Elementarteilchenphysik kam in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts auf und machte von da an große Fortschritte. Seit 1948 wurden an 42 Teilchenphysiker 28 Nobelpreise vergeben. Daran kann man ermessen, wieviel Erfindungsgabe zu dieser Forschung gehört und wieviele Resultate erzielt wurden. Der allgemeinen Öffentlichkeit ist nur ziemlich wenig darüber bekannt. Diese kurze Zusammenfassung gibt eine sehr elementare Einführung in die Elementarteilchenphysik. Sie mag ein wenig dazu beitragen, die Lücke zwischen dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand und dem Allgemeinwissen über diese Dinge zu überbrücken.

PHOTONEN UND ELEKTRONEN

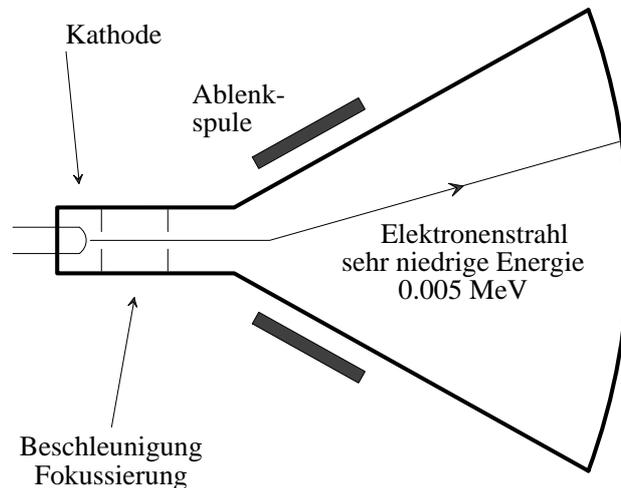
Photonen sind uns allen sehr vertraut: alle Formen von Strahlung bestehen aus diesen Lichtquanten. Dies schließt Radiowellen, sichtbares Licht (von Rot bis zu tiefem Blau), Röntgenstrahlen und Gammastrahlen ein. Der erste Nobelpreis für Physik wurde an Konrad Röntgen für den Nachweis der Röntgenstrahlen vergeben. Im Jahr 1921 erhielt Albert Einstein den Nobelpreis für Physik für seine Entdeckung, dass Licht aus Teilchen, den Lichtquanten, besteht. Einstein wurde zwar vor allem für die Formulierung der Relativitätstheorie berühmt, aber die Schwedische Akademie beruft sich auf seine Entdeckung der Photonen. In der Tat glauben viele, dies sei vielleicht seine kühnste und revolutionärste Idee gewesen. Die verschiedenen Typen von Photonen unterscheiden sich voneinander in ihrer Energie. Radiowellen-Photonen besitzen weniger Energie als Photonen des sichtbaren Lichtes (wobei Photonen des roten Lichtes weniger Energie haben als Photonen des blauen Lichtes), die Lichtquanten der Röntgenstrahlen sind noch energiereicher, und die in Gammastrahlen enthaltenen Photonen übertreffen diese noch weiter. In den Experimenten der Elementarteilchenphysik sind die Photonenenergien gewöhnlich sehr hoch, und man hat es dann meist mit einzelnen Photonen zu tun. Die Energie dieser Photonen beginnt bei dem 100.000.000.000 fachen der Energie von Photonen, die von Mobilfunk-Telephonen ausgesendet werden. Besonders bei niedrigen Energien ist die Zahl der beteiligten Photo-



nen überwältigend. Um eine Vorstellung davon zu geben: ein Handy mit einer Leistung von einem Watt strahlt beim Senden 10.000.000.000.000.000.000.000 Photonen in der Sekunde ab. Zusammen formen die Photonen das Muster von Radiowellen. Auch in sichtbarem Licht ist die Zahl der Photonen i.A. sehr groß. Interessanterweise gibt es Geräte, sogenannte Photomultiplier (Vervielfältiger), die so empfindlich sind, dass sie ein einzelnes Photon im sichtbaren Licht nachweisen können. Die Photonen des sichtbaren Lichtes sind eine Million mal so energiereich wie jene, die ein Handy aussendet, und obschon die Anzahl der abgestrahlten Photonen entsprechend kleiner ist, ist sie immer noch enorm hoch.

Auch Elektronen begegnen wir überall. Sie bewegen sich in den Stromleitungen in unseren Wohnungen, erzeugen Licht und arbeiten auch in Computern in komplizierter Weise. Sie rufen ebenso die Bilder an unseren Fernsehschirmen oder

Monitoren hervor. Hier werden sie in einer Bildröhre beschleunigt und abgelenkt, so dass sie den Schirm treffen, zum Leuchten anregen und auf diese Weise das Bild aufbauen. In der Röhre links im Bild wird ein Stück Metall, eine sogenannte

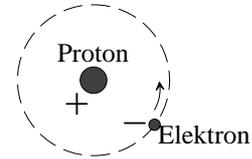


Kathode, erhitzt. Infolgedessen treten Elektronen aus dem Material. Ohne zusätzliche Maßnahmen würden sie wieder zurückfallen. Legt man an die Metallplatte jedoch eine negative elektrische Spannung von mehreren tausend Volt, dann werden sie abgestoßen und beschleunigt. Anschließend werden die Elektronen durch magnetische Felder, die gewöhnlich von stromdurchflossenen Spulen erzeugt werden, abgelenkt. Dadurch bewegt sich der Elektronenstrahl über den Bildschirm. Dort „malen“ die Elektronen das Bild, das man betrachten kann, falls man nichts Besseres zu tun hat.

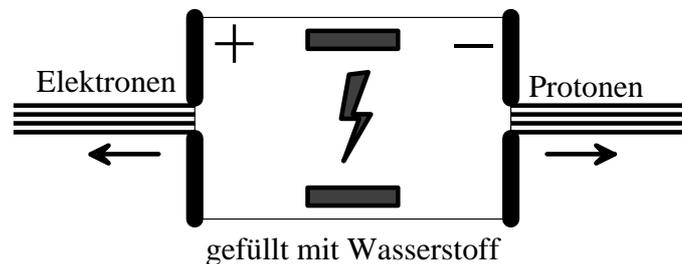
In der Fernschröhre befindet sich also ein Beschleuniger, allerdings mit ziemlich geringer Energie, vergleicht man ihn mit Teilchen-Beschleunigern. Die Energie von Elektronen wird in Elektronen-Volt ausgedrückt. Ein Elektron hat die Energie von einem Elektronen-Volt (abgekürzt eV), nachdem es in einem elektrischen Feld von einem Volt beschleunigt wurde. In einer Fernschröhre mag das elektrische Feld vielleicht rund 5000 Volt betragen, die Elektronen haben also, wenn sie auf den Bildschirm treffen, eine Energie von 5000 eV. In der Teilchenphysik werden viel höhere Energien erzielt, deshalb benutzt man hier die Einheit MeV (für eine Million Elektronen-Volt). Elektronen in einer Fernschröhre haben also eine Energie von 0,005 MeV. Versuchen Sie, diese Einheit im Kopf zu behalten, da sie überall in der Teilchenphysik verwendet wird. Verwandte, ebenfalls geläufige Einheiten sind GeV (1 Giga eV = 1000 MeV) und TeV (1 TeV = 1000 GeV).

DIE ERSCHAFFUNG NEUER TEILCHEN

Um Elementarteilchen zu erzeugen, muss man zunächst einen Strahl energiereicher Elektronen oder Protonen herstellen. Protonen sind zusammen mit Neutronen in Atomkernen enthalten. Wasserstoff hat den einfachsten Atomkern, er besteht aus nur einem Proton. Das Bild zeigt ein Wasserstoffatom - ein Proton, um das ein Elektron kreist. Das Elektron ist negativ geladen, das Proton trägt exakt dieselbe Ladung, mit entgegengesetztem Vorzeichen. Die Gesamtladung des Wasserstoffatoms ist die Summe beider Ladungen, also Null. Das Wasserstoffatom ist daher elektrisch neutral.



Der erste Schritt zur Herstellung eines Protonenstrahls besteht darin, einen Behälter mit Wasserstoff zu füllen. Anschließend wird darin ein starker Funken, eine elektrische Entladung, erzeugt. Dies führt zu einem Strahl von Elektronen, die sich durch den Wasserstoff bewegen. Dort, wo sie auf ein Wasserstoff-Atom treffen, entreißen sie ihm ein Elektron, so dass nun ein Elektron und ein Proton in dem Behälter „driften“. Dies Herausschlagen von Elektronen aus einem Atom nennt man auch Ionisation.



Im nächsten Schritt wird an den Behälter ein elektrisches Feld gelegt. Falls das Feld auf der linken Seite positiv ist, werden die Elektronen nach links gezogen, die Protonen, die entgegengesetzte Ladung haben, dagegen nach rechts. Durch ein kleines Fenster (aus irgendeinem dünnen Material) treten die Protonen auf der rechten Seite aus, und fertig ist der Protonenstrahl. Genauso erhalte man links einen Strahl aus Elektronen, doch ist diese Methode dafür ziemlich ineffektiv. Elektronenstrahlen kann man besser erzeugen, wie die Fernschröhre zeigt.

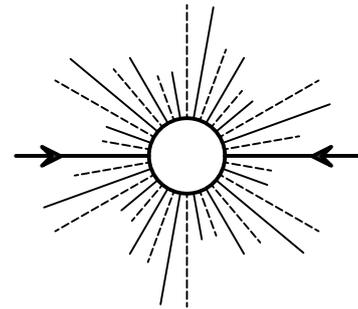
Um neue Teilchen zu produzieren muss man eine winzige Blase hochkonzentrierter Energie erzeugen. Aus der Einsteinschen Gleichung $E = mc^2$ wissen wir, dass Materie eine Form von Energie ist. Um Teilchen einer bestimmten Masse zu erzeugen, muss die Blase mindestens diese Energie besitzen.

Die Blase wird nun in alles mögliche zerfallen, manchmal in dies, manchmal in das. Aber immer ist die Energie, die der Gesamtmasse dieser Zerfallsproduk-

te entspricht, geringer als die ursprüngliche Energie der Blase. Deshalb wollen Teilchenphysiker immer größere Beschleuniger. Diese größeren Maschinen erzeugen immer energiereichere Blasen, und sehr schwere, noch unbekannte Teilchen könnten unter den Zerfallsprodukten der Blase auftauchen.

Um nun solch eine energiereiche Blase zu erschaffen, werden die Protonen, die aus der Ionisationskammer kommen, auf hohe Energien beschleunigt. Dann werden sie auf irgendwelche anderen Teilchen geschmettert, z.B. die Teilchen in einem Atomkern.

Dazu schießt man den Protonenstrahl einfach auf ein geeignetes Material, ein sogenanntes Target. Wann immer ein Teilchen aus dem Strahl mit einem Nukleon zusammenstößt, wird sich solch eine Blase bilden, die dann in alle Arten von Teilchen zerfällt. Diese Teilchen verkörpern selbst wieder kleine Energieblasen. Sie sind sehr instabil und zerfallen nach kurzer Zeit. Das ist der Grund dafür, dass wir sie in der Materie um uns herum nicht sehen. Es gibt nur wenige stabile Teilchen, hauptsächlich Photonen, Elektronen, Protonen und Neutrinos.



Die neu gefundenen Teilchen erhalten Namen und werden auf ihre Eigenschaften hin untersucht. In den Anfangszeiten wurden diese Teilchen Mesonen genannt. Man findet z. B. reichlich Pi-Mesonen, oder kurz Pionen, Teilchen mit einer 260 mal so großen Masse wie die des Elektrons. Diese Pionen zerfallen hauptsächlich in Myonen (Teilchen, deren Masse 200 mal so groß wie die Elektronenmasse ist) und ein Neutrino (ν , Masse 0). Das Myon, zwar relativ langlebig, zerfällt in ein Elektron, ein Neutrino und ein Anti-Neutrino. Anti-Teilchen haben fast dieselben Eigenschaften wie ihre Gegenstücke (sie haben dieselbe Masse, aber die entgegengesetzte Ladung), aber das werden wir später diskutieren. Oft werden sie gekennzeichnet, indem man über das Teilchensymbol einen Querstrich macht, z.B. $\bar{\nu}$ schreibt für das Anti-Neutrino.

Diese Prozesse kann man schon an Beschleunigern beobachten, die Strahlen mit relativ mäßiger Energie liefern. Um ein paar Zahlen zu nennen: Die Elektronenmasse entspricht einer Energie von 0,5 MeV, und ein Pion hat eine Masse von 135 MeV. Das Myon hat eine Masse von 105 MeV. Beschleuniger mit Protonenstrahlen von 1 GeV, also 1000 MeV, können diese Teilchen mühelos erzeugen. Sie sind oft elektrisch geladen, positiv oder negativ. Die Einheit der elektrischen Ladung ist normalerweise gleich dem negativen der Elektronenladung, daher hat das Elektron die Ladung minus 1. Das Pion z.B. tritt in drei Varianten auf, π^+ , π^- and π^0 , mit den Ladungen +1, -1, und 0. Das geladene Pion zerfällt in ein Myon und ein Neutrino: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ and $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$. Wie schon erwähnt, treten die Myonen in zwei Varianten auf, es gibt kein neutrales Myon. In jedem der bisher betrachteten Prozesse ist die Ladung immer strikt erhalten, also zerfällt ein negatives Pion in ein negatives Myon (und ein neutrales Neutrino), während

ein positives Pion immer in ein positives Myon zerfallen wird.

Schauen wir uns also die Verhältnisse am CERN an. 1959 wurde dort ein Beschleuniger mit $30 \text{ GeV} = 30\,000 \text{ MeV}$ eingeweiht. Siehe die Abbildungen weiter unten. Als erstes gibt es eine Ionisationskammer, die einen Protonenstrahl erzeugt. Mit vergleichsweise mäßigen elektrischen Feldern werden diese Protonen leicht beschleunigt und zu einem engen Strahl gebündelt. Dieser Strahl wird in ein Rohr gelenkt, das einen Ring mit 200 Meter Durchmesser bildet. Die rund um das Rohr installierten Magnete bewirken, daß der Teilchenstrahl gebogen wird und im Rohr verbleibt. An bestimmten Punkten entlang des Strahlrohrs befinden sich Segmente mit elektrischen Feldern. Wenn der Strahl solch ein Segment passiert, erhalten die Teilchen einen „Kick“ und ihre Energie wird größer. Der Strahl läuft viele Male im Rohr um, wobei die magnetischen Felder langsam anwachsen, um die immer energiereicheren Protonen im Strahlrohr zu halten. Irgendwann erreichen die magnetischen Felder ihre Grenze, so dass keine weitere Beschleunigung mehr möglich ist. Genau dann wird der Teilchenstrahl aus dem Rohr extrahiert und auf ein Target gelenkt. In den dadurch ausgelösten Teilchenkollisionen werden viele Teilchen erzeugt. Mit unterschiedlichen Methoden (magnetische Felder, Abschirmung mit gezielten Durchlassöffnungen) werden die Teilchen, die man genauer anschauen möchte, aussortiert, wiederum zu Strahlen gebündelt (man nennt diese auch sekundäre Strahlen), und für weitere Untersuchungen in große Detektoren gelenkt. Das kann natürlich nur mit Teilchen geschehen, die ausreichend lange „leben“ und nicht während des Vorgangs auf halbem Weg zerfallen. Es gibt verschiedene solcher Teilchensorten, darunter auch Pionen. Die sekundären Pionenstrahlen standen am CERN für Experimente zur Verfügung. Auf diese Weise wurden die Eigenschaften der Pionen mit hoher Genauigkeit ermittelt.

Zu dieser Zeit wurden als Detektoren vor allem Blasen- und Funkenkammern eingesetzt, jede mit ihren Vor- und Nachteilen. Sie werden im nächsten Kapitel beschrieben.

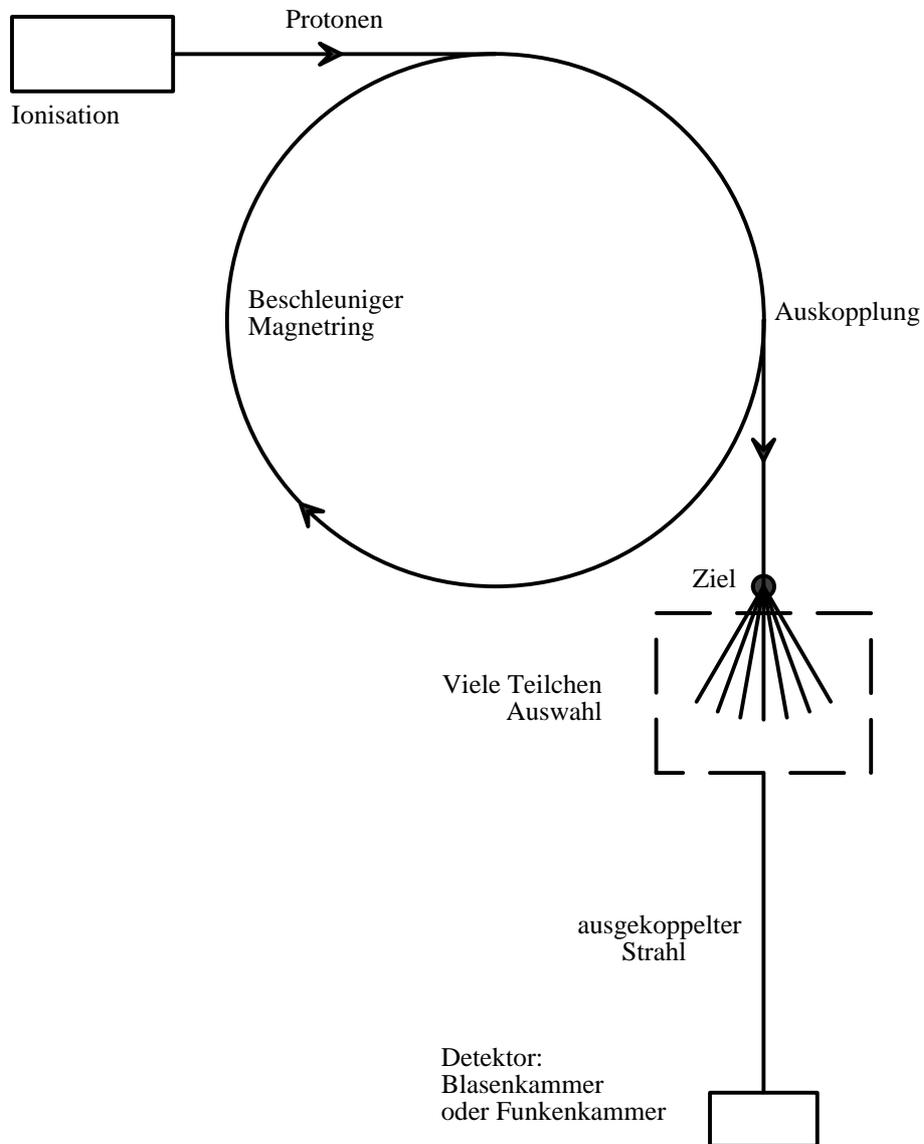
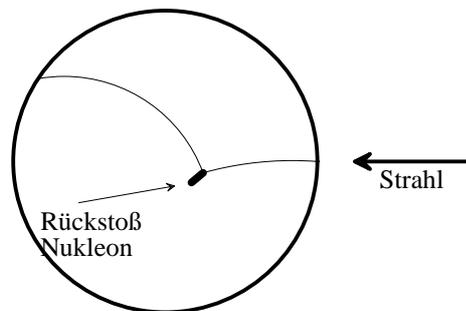


Abbildung 1: Teilchenbeschleuniger. Der Durchmesser, der am CERN im Jahr 1959 konstruierten Maschine (genannt PS), beträgt 200 m. Es wurde eine Energie von $30 \text{ GeV} = 30,000 \text{ MeV}$ erreicht. Am Fermilab nahe Chicago: Durchmesser 2 km, Energie $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$.

DETEKTOREN

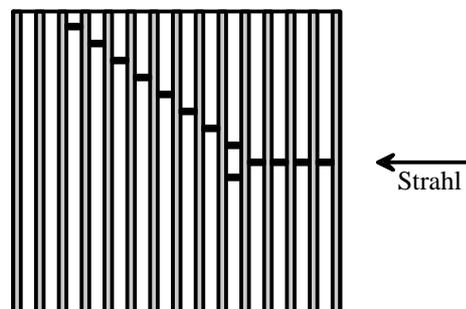
Die Erfindung der Blasenkammer durch Glaser (Nobelpreis 1960) markierte den Beginn der modernen experimentellen Teilchenphysik. In einer Blasenkammer wird etwas Flüssigkeit nahe am Siedepunkt gehalten. Wenn sich durch die Flüssigkeit geladene Teilchen bewegen, ionisieren sie auf ihrem Weg Atome oder Moleküle (d.h. entreißen ihnen Elektronen). Als Folge dieser Störungen bilden sich entlang der Teilchenspur kleine kochende Bläschen. Nun wird davon ein Photo gemacht und die Teilchenreaktionen können im Detail untersucht werden. Um das Ladungsvorzeichen der Teilchen zu bestimmen, die die Kammer durchfliegen, wird durch Magnetspulen in der Nähe der Kammer ein magnetisches Feld erzeugt. Dieses krümmt die Spuren, und zwar positiv geladene andersherum als negativ geladene. Man erhält außerdem aus der Stärke der Krümmung Information über die Geschwindigkeit der Teilchen. Wir sollten hervorheben, daß neutrale Teilchen keine Spuren hinterlassen, sondern nur indirekt beobachtet werden.

In einer Blasenkammer hat die Flüssigkeit selbst auch die Funktion des Targets. Ein Teilchenstrahl aus dem Beschleuniger wird in die Blasenkammer hinein geschickt, und die Teilchen im Strahl kollidieren gelegentlich mit den Atomen der Flüssigkeit. Normalerweise erfolgen die Stöße mit den Atomkernen. Die Abbildung zeigt ein Beispiel eines einfachen Blasenkammerbildes.



Blasenkammern haben aber einen großen Nachteil: sie sind langsam. Der Prozess, die Flüssigkeit zum Kochen zu bringen, das Foto zu schießen und dann die Flüssigkeit wieder vom Siedepunkt herunterzufahren, ist relativ langsam, d.h., er dauert einige Sekunden. Auf der anderen Seite enthalten die Bilder viele Details der Reaktion und erlauben daher eine sehr präzise Analyse.

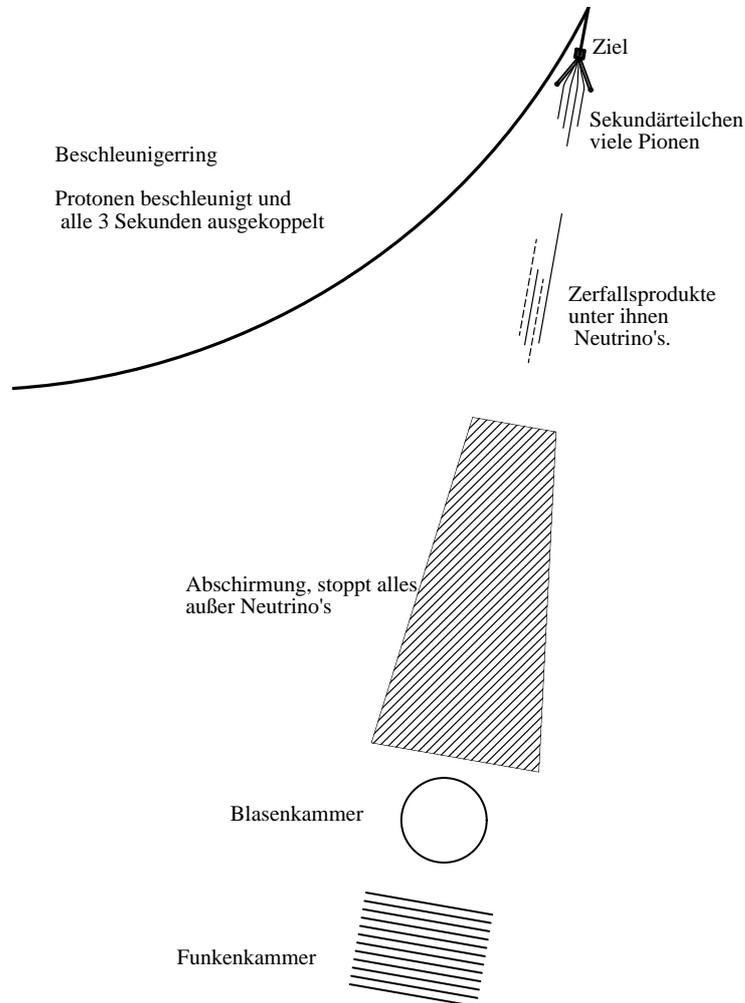
Funkenkammern bestehen aus einer Anzahl parallel zueinander montierter Metallplatten, zwischen denen ein gut ausgesuchtes Gas eingeschlossen ist. Durchfliegende Teilchen ionisieren Gasatome, und wenn man zwischen die Platten eine Hochspannung legt, dann entstehen genau dort Funken, wo das Teilchen durchgegangen ist. Gewöhnlich befindet sich die Kammer nicht in einem Magnetfeld, die Spuren sind daher nicht gekrümmt.



Die Lage der Spur ist auch weit weniger genau definiert. In der Abbildung ist ein Ereignis analog zu dem der Blaskammer oben zu sehen. In diesem Fall dient das Plattenmaterial als Target; es ist weniger wahrscheinlich, dass es zu Kollisionen mit Gasatomen kommt, da das Gas verglichen mit dem Metall eine geringe Dichte hat.

Die Funkenkammer hat gegenüber der Blaskammer zwei Vorteile. Zunächst einmal verfügt man, wenn man Platten aus Schwermetall verwendet (die als Target fungieren) über ein wirklich massives Target. Das ist ein Vorteil, wenn man Teilchen untersuchen möchte, die nur selten reagieren. Neutrinos sind solche Teilchen, sie treten so selten mit Materie in Wechselwirkung, dass z.B. Neutrinos von der Sonne die Erde normalerweise ohne Probleme ungestört durchqueren können. Der zweite Vorteil von Funkenkammern ist, dass sie „getriggert“ werden können. Mit unterschiedlichen Techniken, die andere als die hier erwähnten Nachweisgeräte erfordern, lässt sich zunächst feststellen, dass ein Ereignis von Interesse ist. Nur in diesem Fall wird eine Spannung an die Platten angelegt. Mit anderen Worten, man kann eine Auswahl unter den Ereignistypen treffen und sich auf die interessantesten konzentrieren.

DAS 1963 CERN NEUTRINO EXPERIMENT



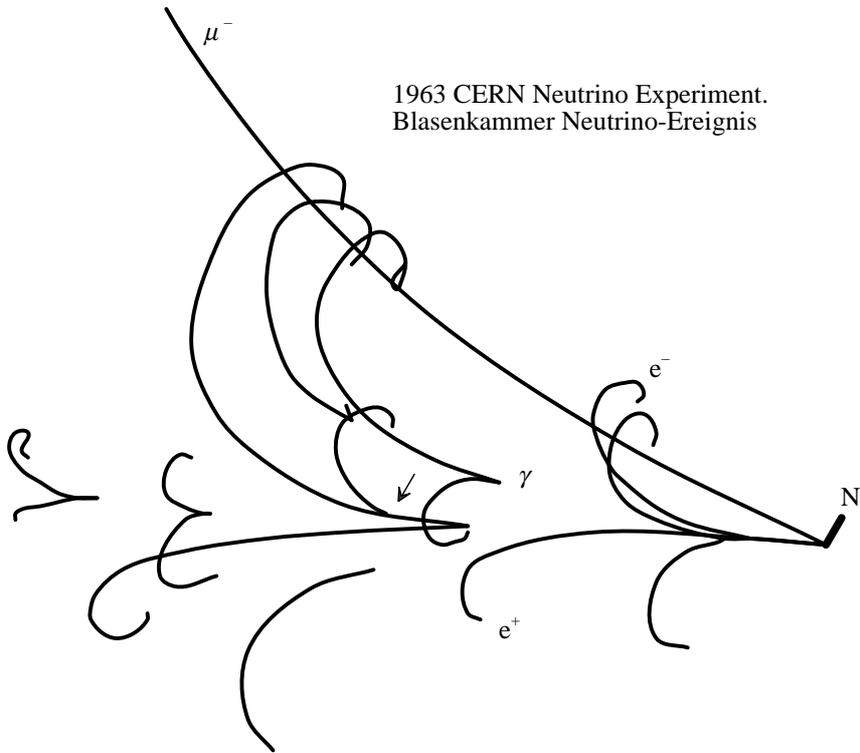
Erst die Einführung der Funkenkammer ermöglichte Neutrino-Physik. Jetzt verfügte man über soviel Targetmaterial, dass die Wahrscheinlichkeit einer Neutrino-reaktion groß genug war, um Experimente durchzuführen. Die Idee für ein derartiges Experiment ging auf Schwartz zurück, der damals am Brookhaven National Laboratory, Long Island, USA, zusammen mit Ledermann und Steinberger das allererste Experiment dieser Art machte (Nobelpreis 1988). 1963 wurde ein Neutrinoexperiment am CERN durchgeführt, sein Aufbau ist schematisch in der Abbildung zu sehen. Eine große Verbesserung zum Brookhaven-Experiment bestand in einem von van de Meer erfundenen Trichter (van de Meer erhielt den Nobelpreis 1984, aber nicht für diese Erfindung), der die vom Target kommenden Pionen zu einem Strahl mit viel höherer Intensität fokussierte. Pionen zerfal-

len prinzipiell in Myonen und Neutrinos, und läßt man sie eine gewisse Strecke zurücklegen, dann werden viele von ihnen zerfallen. Mit zunehmender Entfernung vom Target wandelt sich der Pionenstrahl allmählich in eine Mischung aus Myonen und Neutrinos um (plus irgendwelches andere Zeug vom Target). Eine anschließende massive Abschirmung (ungefähr 25 Meter Stahl) stoppte nun alle Teilchen außer den Neutrinos. Also durchliefen fast ausschließlich Neutrinos die Blaskammer und die Funkenkammer, die sich hinter der Abschirmung befanden. Gelegentlich würde eines von ihnen mit dem Material in entweder der Blaskammer oder der Funkenkammer in Wechselwirkung treten.

Die Blaskammer wurde installiert, obwohl die beteiligten Forscher nur wenig Hoffnung hatten, irgendein durch ein Neutrino hervorgerufenen Ereignis zu sehen. Im ersten sogenannten „RUN“ wurden 460 000 Bilder aufgenommen, unter denen sich glücklicherweise 240 Ereignisse fanden. Ohne den Trichter hätte man, wenn überhaupt, nur einige wenige beobachtet. Die Experimente mit Funkenkammern waren noch erfolgreicher, weil sie soviel Material enthielten. Außerdem musste man nicht so viele Bilder scannen, denn die Funkenkammer wurde nur getriggert, wenn andere Nachweisgeräte anzeigten, dass einige geladene Teilchen die Kammer verließen. Etwa 2000 Ereignisse wurden auf ebensovielen Bildern gesehen. Diese Zahlen beziehen sich nur auf den ersten Run des Experimentes, das noch viele weitere Jahre in Betrieb war.

Eines der Blaskammerbilder rief aus Gründen, die hier nicht erklärt werden können, besonders großes Interesse hervor. Die nächste Abbildung zeigt eine gewissenhafte Kopie des wirklichen Ereignisses. Der Neutrinostrahl trat von rechts ein. Bei der Kollision entstanden mehrere geladene Teilchen, dazu noch ein zurückprallender Atomkern (oder was auch immer nach dem Zusammenstoß übrigblieb). Eines der erzeugten Teilchen war ein negativ geladenes Myon; es kann daran erkannt werden, dass es ein geladenes Teilchen ist und, wie für Myonen zu erwarten, nur wenig reagiert. In diesem Bild verläßt das Myon die Kammer sogar ohne jegliche Wechselwirkung. Die übrigen Spuren stammen von Elektronen und Positronen. Ein Positron verhält sich genauso wie ein Elektron, trägt allerdings eine positive Ladung. Es ist das Antiteilchen des Elektrons, man könnte also auch von einem Anti-Elektron sprechen. Auf dem Blaskammerbild sind anscheinend ein einzelnes Positron (unten in der Mitte) und ein einzelnes Elektron (vielleicht eines, das aus einem Atom geschlagen wurde, siehe den Pfeil) zu sehen. Abgesehen von diesen beiden Einzelspuren erkennt man lediglich Paare, Elektron- Positron Paare. Solche Paare werden durch energiereiche Photonen erzeugt, wie wir im nächsten Kapitel diskutieren werden.

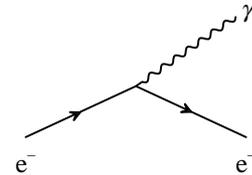
1963 CERN Neutrino Experiment.
Blasenkammer Neutrino-Ereignis



FEYNMAN REGELN

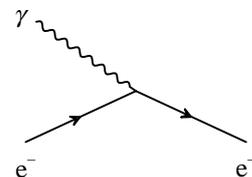
1948 wurden große Fortschritte in der theoretischen Beschreibung der Elementarteilchen erzielt. Feynman führte seine Technik der Diagramme ein, ohne die die Elementarteilchen-Theorie nicht ihren heutigen Stand erreicht hätte.

Hier ist die Idee. In der Antenne eines Radiosenders bewegen sich die Elektronen vor und zurück. Dabei senden sie Photonen aus, die Radiowellen entsprechen. Dieser Prozess ist in der Zeichnung durch einen sogenannten Vertex dargestellt. Ein Elektron kommt von links, sendet ein Photon aus, und läuft dann weiter.

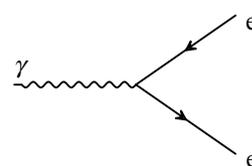


Nun sind die Details dieses Prozesses, wenn ein Elektron Radiowellen ausstrahlt, seit dem 19. Jahrhundert bekannt und können mit aller Genauigkeit berechnet werden. Also entspricht dieser Zeichnung ein genauer mathematischer Ausdruck, der den numerischen Wert dieses Prozesses angibt. Feynman machte daraus ein übersichtliches Formelpäckchen. Er gab ein einfaches Rezept an, nach dem sich bei vorgegebenem Diagramm der passende mathematische Ausdruck leicht niederschreiben lässt, der es erlaubt, die Menge der vom Elektron ausgesandten Strahlung zu berechnen. Der Pfeil in den Elektronen-Linien gibt die Richtung des Flusses negativer Ladung wieder. Das Schöne dabei ist, dass diese Diagramme sehr stark die Intuition ansprechen.

Hier ist die nächste Situation: Auf der Empfängerseite treten Photonen mit Elektronen in der Antenne in Wechselwirkung, sodass sich diese bewegen und Ströme erzeugen. Das wird in dem abgebildeten Diagramm dargestellt. Es ist dem vorherigen sehr ähnlich, außer dass das Photon nun einläuft statt herauskommt. Und wieder kann leicht eine mathematische Gleichung aufgeschrieben werden, welche die genaue Stärke des Prozesses angibt. Bei einem Blick auf das Diagramm stellt man fest, dass das zweite Diagramm aus dem ersten hervorgeht, indem das Photon von „heraus“ nach „herein“ verschoben wird. Diese Prozedur nennt man „überkreuzen“, eine typische Eigenschaft der Feynman-Diagramme. Ändert man eine auslaufende Linie in eine einlaufende um oder umgekehrt, dann erhält man einen Reaktionsprozess, der wirklich existiert. Dies hat bemerkenswerten Folgen.



Wenn man das erste Diagramm nimmt und das einlaufende Elektron gegen ein auslaufendes tauscht, dann erhält man dieses Diagramm hier: ein einlaufendes Photon wird zu einem Paar aus einem Elektron und etwas, das einem Elektron sehr ähnlich sein muss, abgesehen davon, dass der Pfeil in die andere Richtung zeigt. Es gibt einen Fluss nach innen gerichteter negativer Ladung,

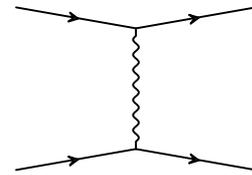


der interpretiert werden muss als ein Fluss nach außen gerichteter positiver Ladung. Die Ladung ist also der des Elektrons entgegengesetzt. Dieses Teilchen ist

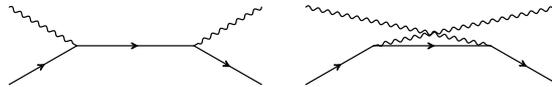
der interpretiert werden muss als ein Fluss nach außen gerichteter positiver Ladung. Die Ladung ist also der des Elektrons entgegengesetzt. Dieses Teilchen ist

ein Positron, das Anti-Teilchen des Elektrons. Diese Interpretation steht in Einklang mit einem anderen Fakt in der Natur: die elektrische Ladung bleibt immer erhalten. Wenn man mit Null (der Ladung des Photons) beginnt, muss man auch mit Null enden (die Summe der Ladungen von Elektron und Positron). In dem Blasenkammerbild aus dem vorigen Kapitel tauchen mehrere Photonen auf. Die Photonen als neutrale Teilchen sind unsichtbar, aber sie wandeln sich in Elektron-Positron-Paare um, die man sehen kann. Sie brauchen nicht symmetrisch zu sein, eines der Teilchen darf schneller als das andere sein. Das Blasenkammer-Bild wurde 1963 aufgenommen. Die Existenz des Positrons wurde 1930 von Anderson nachgewiesen, der damals am California Institute of Technology arbeitete (Nobelpreis 1936).

Die oben gezeigten Diagramme kann man als Elemente betrachten, aus denen kompliziertere Prozesse aufgebaut werden können, z.B., wenn ein Elektron ein Photon aussendet, das von einem anderen Elektron absorbiert wird. Auf diese Weise können Elektronen Photonen austauschen, wobei sie auseinanderweichen. Ein einfallreicher Mensch hat einmal das Beispiel von zwei Schlittschuh-Läufern geprägt, von denen der eine dem anderen einen Sandsack zuwirft. Sie können sich den Weg der Eisläufer vorstellen. Sie werden an dem Ort auseinanderweichen, an dem der Austausch stattfindet.



Dieser Prozess, der Austausch eines Photons, wird durch das abgebildete Diagramm wiedergegeben. Man spricht von Coulomb-Streuung. Hat man einmal das Diagramm, dann ist es, wie immer, ziemlich einfach, die entsprechende mathematische Gleichung niederzuschreiben, und es besteht überhaupt keine Schwierigkeit, alle Details zu berechnen. In unserer Analogie hängt alles von der Menge Sand in dem Sack ab; bei den Elektronen ändern sich die Eigenschaften des ausgetauschten Photons von Fall zu Fall in Übereinstimmung mit einem Wahrscheinlichkeitsmuster. Auch das kann man berechnen und daraus die relative Wahrscheinlichkeit dafür ableiten, dass dieses oder jenes Photon ausgetauscht wird.



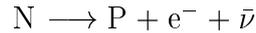
Ein weiterer beobachteter Prozess ist die Compton-Streuung (Nobelpreis 1927). Ein Photon trifft auf ein Elektron, und als Folge davon sendet das Elektron ein Photon aus. Das zweite Photon hat nicht notwendigerweise die gleiche Energie wie das einlaufende Photon. So könnte z.B. ein Photon des blauen Lichtes einlaufen, und das auslaufende Photon wäre ein rotes. Dafür gibt es sogar zwei Diagramme, da es auch möglich ist, dass das Elektron zuerst ein Photon emittiert und später das einlaufende absorbiert.

SCHWACHE WECHSELWIRKUNG

Im Jahr 1896 entdeckte Becquerel eine seltsame Strahlung, die man später auf den Zerfall des Neutrons zurückführte (Nobelpreis 1903):

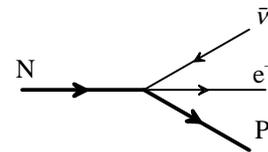


Heute nennt man das den Beta-Zerfall. Er läßt sich kürzer so schreiben:

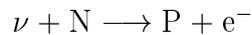
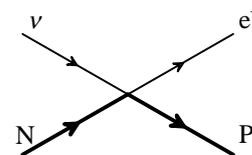


Der Querstrich über dem ν charakterisiert es als ein Anti- Teilchen. Es dauerte eine ganze Weile, bis etwa 1957, diesen Prozess im Detail zu verstehen. Heute können wir ein Diagramm zeichnen, das diesem Zerfallsprozess entspricht, und wir kennen auch die entsprechenden Gleichungen. Also können wir genau sagen, wie oft das Neutron zerfällt, wobei das Elektron in eine bestimmte Richtung zum Proton fliegt. Beginnen wir mit einem ruhenden Neutron, dann können wir die Wahrscheinlichkeit dafür angeben, dass sich das Elektron nach dem Zerfall entgegengesetzt zum Proton bewegt. Oder dass das Elektron unter rechtem Winkel herauskommt. Die Betrachtung eines einzigen Zerfalls lehrt uns gar nichts, aber wenn wir, sagen wir mal, 100 000 Zerfälle beobachten, können wir jene Fälle herausuchen, die die erforderliche Anordnung (z.B. Elektron und Proton entgegengesetzt) haben. Wenn die Wahrscheinlichkeit dafür 0,2 % beträgt, dann werden wir das in rund 200 Fällen beobachten. So funktioniert das mit den Feynman-Diagrammen, für den Beta- Zerfall können wir das alles berechnen.

So, hier ist das Diagramm. Darin gibt es nur ein neues Element: der Pfeil für das Neutrino weist nach innen, wie für ein Positron. Das Neutrino trägt keine elektrische Ladung, also gibt es auch keinen damit verbundenen Ladungsfluss. Hier wird der Pfeil effektiv dazu verwendet um anzuzeigen, dass wir es mit einem Anti-Teilchen zu tun haben.



Aus diesem Prozess kann man durch Überkreuzen einen anderen erhalten. Verschiebt man das Anti-Neutrino auf die einlaufende Seite, wobei es zu einem Neutrino wird, dann finden wir den Prozess:

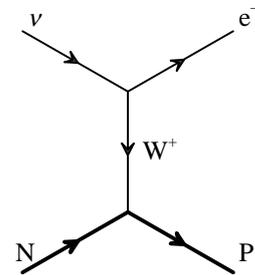


Solche Reaktionen lassen sich in einem Neutrino-Experiment beobachten, wie es 1963 am CERN durchgeführt wurde. Ein einlaufendes Neutrino trifft unter Umständen ein Neutron in irgendeinem Atomkern, und dann sollten ein Elektron und ein Proton auslaufen. Das Elektron ist leicht zu identifizieren, daher sollte diese Art von Ereignis ohne Schwierigkeiten zu erkennen sein. Darüber hinaus können wir, da wir den diesem Diagramm entsprechenden mathematischen Ausdruck genau kennen, sogar vorhersagen, wie oft das passieren sollte. In der Tat wurden Ereignisse dieser Art bei dem Neutrino-Experiment im vorhergesagten

Ausmaß beobachtet. So weit, so gut.

Bei dieser Neutrino-Wechselwirkung gibt es jedoch eine sehr ernste theoretische Schwierigkeit. In einem Neutrino-Experiment liegt die Energie des einlaufenden Neutrinos unterhalb von $10 \text{ GeV} = 10\,000 \text{ MeV}$. Das ist an sich eine ziemlich niedrige Energie. Aber theoretisch läßt sich dieser Prozess auch für immer höhere Energien berechnen, und dann geht es schief. Wenn die Neutrino-Energie größer wird, nimmt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich dieser Prozess ereignet, schnell zu (auf dem Papier), bis sie unmögliche Werte erreicht. Mit unmöglich meinen wir, dass ihr Wert eins übersteigt. Das würde bedeuten, idiotischer Weise, dass man mehr Ereignisse sehen würde, als der Strahl Neutrinos enthält. Man muss zwar zu sehr, sehr hohen Neutrino-Energien gehen, bevor das passiert, aber es passiert eben. Das ist das (theoretische) Problem.

Wir könnten den analogen Fall für Elektronen und Photonen betrachten. Das Diagramm für die Streuung eines Elektrons an einem Elektron kennen wir bereits, und dabei gibt es kein Problem. Versuchen wir also etwas Ähnliches. Wir erfinden ein neues (hypothetisches) Teilchen, um ein Diagramm zu zeichnen, das wie die Coulomb-Streuung aussieht. Dabei gibt es aber einen großen Unterschied: Weil die Ladung immer erhalten bleiben muss, muss das neue Teilchen, Vektorboson genannt und mit W gekennzeichnet, eine positive Ladung tragen.



Das kann man auf der Neutrino-Seite sehen: Das Neutrino wandelt sich in ein negativ geladenes Elektron und ein W-Boson um, daher muss die Ladung des W-Bosons der des Elektrons entgegengesetzt sein, d.h. positiv, wie die Ladung des Positrons. Dieses positive W-Boson und das neutrale Neutron (ohne Ladung) werden zu einem Proton (positive Ladung). In unserer Darstellung kennzeichnet der Pfeil bei dem W-Boson den Fluss der positiven Ladung.

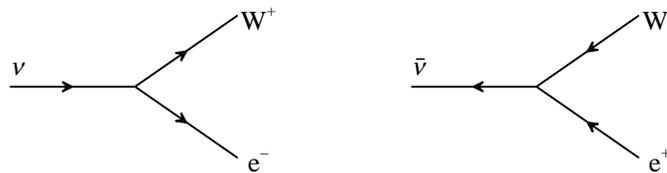
In der Tat gibt es, betrachtet man nun den mathematischen Ausdruck, der zu diesem Diagramm gehört, keine Schwierigkeiten mehr bei hohen Energien. Und für niedrige Energien liefert das Diagramm praktisch dasselbe Ergebnis wie das ursprüngliche Diagramm ohne das W-Boson, vorausgesetzt dieses ist schwer genug. Ein schweres W-Boson wird sich bei niedrigen Energien nicht stark bewegen. Effektiv wird sich der Prozess bei niedrigen Energien so abspielen, als sei die W-Linie zu einem Punkt zusammengezogen.

Nun, dieses W-Boson wurde 1983 experimentell am CERN gefunden (Nobelpreis für Rubbia und van de Meer 1984). Seine Masse ist beträchtlich: es ist 85 mal so schwer wie das Proton. Man braucht eine Menge Energie um solch ein Teilchen zu erzeugen. Seine Masse repräsentiert eine Energie, die $80 \text{ GeV} = 80\,000 \text{ MeV}$ äquivalent ist (vergleichen Sie die Elektron-Masse, $0,5 \text{ MeV}$!) Aber 1983 stand eine Maschine zur Verfügung, die Energie-Blasen von etwa 900 GeV produzierte, und das war genug. Das ist nicht sofort offensichtlich, denn die Energieblasen wurden in Proton-Proton-Stößen gebildet, und Protonen selbst neigen

dazu, etwas ausgedehnte Objekte zu sein. Die Energie war daher nicht all zu gut konzentriert. Wie auch immer, es funktionierte, und seither sind wir uns der Existenz des Vektor-Bosons sicher.

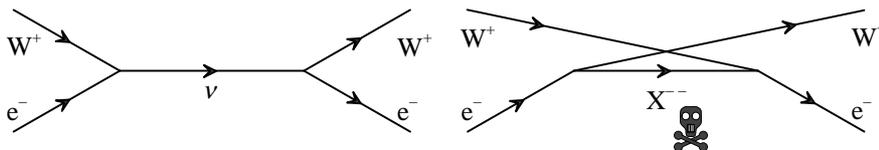
Theoretiker errieten also die Existenz des W-Bosons aufgrund des Hochenergieverhaltens von Feynman-Diagrammen. Auf diesen Überlegungen beruht auch die in den frühen siebziger Jahren entwickelte Theorie, für die 1979 der Nobelpreis vergeben wurde (Hoft und Veltman). Die Theorie geht noch viel weiter, sie erstreckt sich auch auf die Untersuchung hypothetischer Prozesse und deren Hochenergieverhalten. Auch wenn jene Reaktionen gar nicht im Labor reproduziert werden können, darf die Theorie niemals ein so idiotisches Verhalten ergeben wie oben diskutiert. Fahren wir also fort.

Hier müssen wir eine Verallgemeinerung der Anti-Teilchen- Idee einführen.



Die neue Regel lautet: Zu jedem existierenden Vertex muss es einen Vertex geben, bei dem alle Pfeile in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Also impliziert das linke Diagramm die Existenz des rechten.

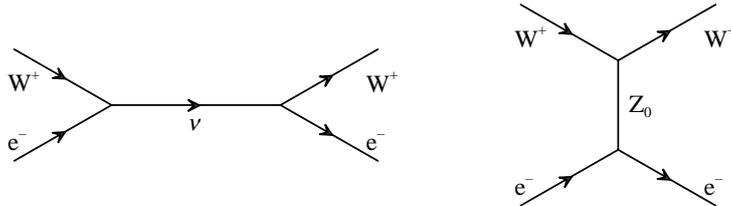
Der erste Prozess, den wir betrachten, ist die Streuung eines W-Bosons an einem Elektron. Es ist eine hypothetische Reaktion, da es keine Möglichkeit gibt, Strahlen von Vektor-Bosonen zu erzeugen. Sie sind in Wirklichkeit ziemlich instabil, einmal erzeugt, zerfallen sie geschwind in Teilchen mit kleinerer Masse.



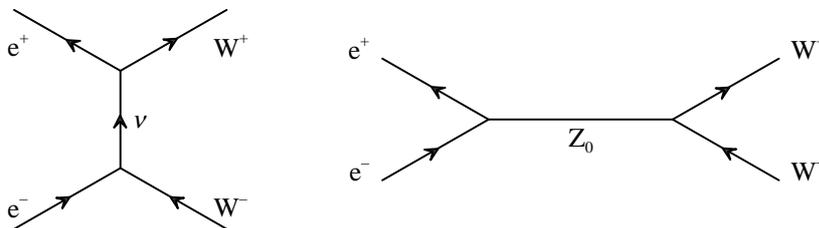
Hier sind zwei Diagramme für die Streuung von W-Bosonen an Elektronen. Wir benutzen für das linke Diagramm nur die ν -W-e-Kopplungen (eine davon vollständig gekreuzt), die in den oberen Abbildungen auftauchen. Daher sollte das linke Diagramm existieren. Aber sein Verhalten bei hohen Energien ist unvernünftig. Unter Rückgriff auf die entsprechenden Diagramme für Photonen und Elektronen, vor allem für die Compton-Streuung, erfanden wir ein anderes Diagramm, in dem ein W-Boson emittiert wird, bevor das einlaufende W-Boson absorbiert wird. Das würde die Dinge ins Lot bringen, aber unglücklicherweise würde das ein Teilchen X mit doppelt negativer Ladung erfordern. Die Natur nimmt es mit der Ladungserhaltung sehr genau. Wenn man daher mit einem Elektron beginnt, das ein positiv geladenes W-Boson abstrahlt, dann muss das

dritte Teilchen eine doppelt negative Ladung tragen. Und das ist schlecht, denn es gibt kein solches Teilchen.

Gibt es eine andere Lösung? Hier ist kreatives Denken gefordert, und die Abbildung zeigt die Lösung. Sie beinhaltet ein neues Teilchen, das elektrisch neutral sein muss. Es wird Z^0 (Z-Null) genannt, und wir müssen die Experimental-Physiker fragen, ob es existiert.



Auch das Z^0 wurde von Rubbia und van de Meer in dem oben erwähnten Experiment von 1983 entdeckt. Der schönste und sauberste Weg, solche Z-Bosonen zu produzieren, geht allerdings über eine andere Reaktion, die man aus der oberen durch Überkreuzen erhält.

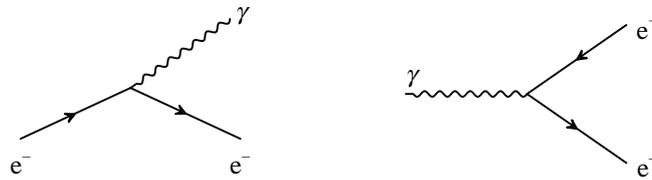


Die Reaktion, die diesem Diagramm entspricht,

$$e^- + e^+ \longrightarrow W^+ W^-$$

wurde an der größten verfügbaren Maschine am CERN (LEP genannt, für Large Electron Positron Collider) beobachtet. In LEP stoßen 100 GeV Elektronen auf 100 GeV Positronen. Wir haben viele derartige Ereignisse gesehen, und das Z_0 wurde mit großer Sorgfalt und großartiger Genauigkeit untersucht. Die Ergebnisse stimmen perfekt mit der Theorie überein.

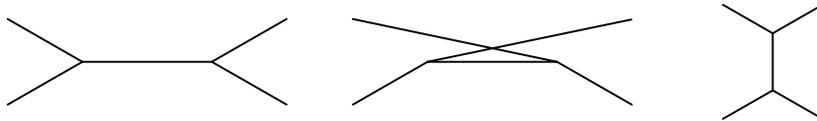
Fassen wir noch einmal die Regeln zusammen, die wir gelernt haben.



Überkreuzen: Die Vertauschung der einlaufenden Linien gegen die auslaufenden und umgekehrt in einem bekannten Prozess erzeugt neue Prozesse, die ebenfalls existieren müssen. Das impliziert die Existenz von Anti-Teilchen.

Wie erwähnt geht die Regel für Anti-Teilchen noch etwas weiter: wann immer es irgendeinen Vertex gibt, muss auch ein Vertex existieren, bei dem alle Pfeile in die entgegengesetzte Richtung zeigen.

Gutes Hochenergie-Verhalten: Dies erfordert es, dass ein beliebiger Streuprozess, der durch ein Diagramm der unten gezeigten Art dargestellt werden kann, mindestens auch durch eines der anderen beiden Diagramme beschrieben wird.

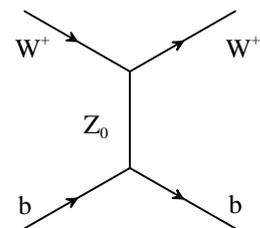
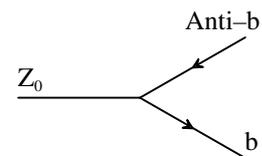


TOP-QUARK

Diskutieren wir schließlich noch, wie das Top-Quark in dieses Bild passt.

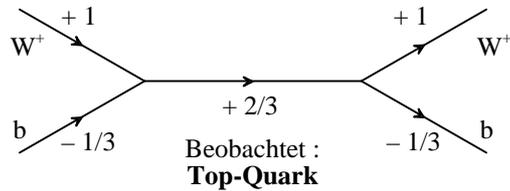
Als man am CERN die Z-Bosonen produzierte, beobachtete man viele unterschiedliche Zerfallsarten. Darunter war auch der Zerfall des Z-Boson in ein neues Teilchen, das Bottom-Quark. (Das Bottom-Quark wurde allerdings nicht so entdeckt, sondern vorher schon in einer anderen Teilchenreaktion.) Das Bottom-Quark hat eine Masse von 4,3 GeV und eine gebrochene

Ladung, nämlich $-1/3$. Den nun bekannten Regeln folgend betrachten wir nun W^+ -Bottom-Streuung. Das ist eine rein hypothetische Reaktion, da es experimentell unmöglich ist, einen Strahl von Vektor-Bosonen (W 's) zu produzieren. Tatsächlich sind Bottom-Quarks sogar in Protonen und Neutronen enthalten, also könnten wir als Target Protonen nehmen. Das wäre aber immer noch schwierig, denn das Vorkommen von Bottom-Quarks in Protonen ist sehr klein.



Das abgebildete Diagramm muss existieren. Allerdings führt das Diagramm für sich alleine zu einem unphysikalischen Verhalten bei hohen Energien, wie bereits diskutiert. Gemäß unseren Regeln muss es noch ein anderes Diagramm geben, und dafür gibt es zwei Möglichkeiten.

Die erste Möglichkeit ist in dieser Abbildung zu sehen. Sie beinhaltet ein neues Teilchen. Wir haben die elektrischen Ladungen eingetragen, und aus der Ladungserhaltung folgern wir, dass das neue Teilchen die Ladung $+ 2/3$ haben



muss. Tatsächlich wurde solch ein Teilchen am Fermilab bei Chicago nachgewiesen. Es wird Top-Quark genannt. Schon vor seiner Entdeckung waren, aufgrund hochpräziser LEP-Messungen, die theoretischen Kenntnisse über das Top-Quark so weitreichend, dass seine Masse ziemlich zutreffend vorhergesagt werden konnte. Dies erleichterte die experimentelle Suche nach diesem Teilchen natürlich beträchtlich. Um genau zu sein, die Vorhersage für die Masse des Top-Quark betrug 177 ± 7 GeV, der am Fermilab gefundene Wert 174 ± 5 GeV. Der Vollständigkeit halber muss ich erwähnen, dass es gewisse Unsicherheiten gibt, die mit einem anderen Teilchen, dem sogenannten Higgs-Boson, zusammenhängen, dessen Existenz aus der $W^+ W^-$ -Streuung abgeleitet werden kann. Aber das wollen wir hier nicht diskutieren.

Das dritte Diagramm würde ein Teilchen mit Ladung $-4/3$ beinhalten, und solch ein Partikel wurde noch nicht beobachtet.

ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN

Der Leser wird bemerken, dass dieser Text die betrachtete Materie nur oberflächlich streift. Es gibt viele Elementarteilchen, über die wir nicht gesprochen haben, und auch über die starken Kräfte, welche die Quarks in den Protonen und Neutronen zusammenhalten, haben wir nichts erzählt. Und so weiter. Aber mehr lässt sich mit einem so kurzen Beitrag nicht erreichen.