

# 2

## Das Unsichtbare sichtbar machen

Im Jahr 1911 hatte der belgische Industrielle Ernest Solvay etwa 20 weltweit führende Physiker zu einer Konferenz nach Brüssel eingeladen. Diese Konferenz war die erste einer Reihe von Solvay-Konferenzen, die als Wegweiser für die Wissenschaft des 20. Jahrhunderts berühmt wurden. In den Jahren 1927 und 1930 ging es um die Quantenmechanik, die gerade ihren Durchbruch erlangt hatte. Endlich stellte sie die lange gesuchten Gleichungen bereit, mit denen sich das Verhalten von Elektronen in Atomen beschreiben lässt. Schwerpunkt der Konferenz 1933 sollte die Anwendung der Quantenmechanik auf die Chemie sein. Allerdings führte eine Flut überraschender Entdeckungen dazu, dass der Plan in letzter Minute geändert wurde. 1930 hatte Pauli das Neutrino eingeführt. 1932 wurden das Neutron und der erste Hinweis auf die Existenz von Antimaterie – das Positron, das positiv geladene Gegenstück des Elektrons – entdeckt. Experimente mit dem ersten „Teilchenzertrümmerer“ hatten verdeutlicht, dass der Atomkern eine reichhaltige und komplexe Struktur besitzt, die sich zudem durch Einwirkung des Menschen sowie durch spontane Radioaktivität ändern lässt. 1933 zeigten Irene Joliot-Curie, die Tochter von Marie Curie, und ihr Mann

Frédéric Joliot-Curie, dass sich in Betazerfällen der „künstlichen Radioaktivität“ positiv geladene Positronen genauso leicht wie negativ geladene Elektronen erzeugen lassen. Dies alles gipfelte darin, dass sich bei der Solvay-Konferenz vom 22. – 29. Oktober 1933 eine Reihe herausragender Physiker nicht der Quantenchemie, sondern einem ganz neuen Gebiet der Physik, der Kernphysik, zuwandten. Eingeladen waren – natürlich – Einstein, Rutherford, der Vater der Kernphysik, und die bereits schwer von der Strahlenkrankheit gezeichnete Marie Curie. Auch Pauli, Fermi und Bohr nahmen teil. Diskussionen unter den drei Letzteren führten dazu, dass das Neutrino, zunächst eine bloße Idee, wissenschaftlich exakt formuliert werden konnte. Vor allem war es Fermi, der ausgehend von den in dieser Woche gewonnenen Erkenntnissen schließlich den Nebel lüftete. Sein Ausgangspunkt war Frédéric Joliot-Curies Darstellung seiner Entdeckung, dass Betazerfälle auf zwei verschiedene Arten entstehen können. Bisher war gut bekannt und vielfach gezeigt worden, dass im Ergebnis von Betazerfällen negativ geladene Strahlen entstehen können, die Elektronen enthalten. Frédéric Joliot-Curie konnte aber Beispiele vorlegen, in denen die neu entdeckten Positronen aus ihnen hervorgingen. Abgesehen davon, dass ein positiv geladenes Positron an die Stelle des negativ geladenen Elektrons trat, boten beide Arten von Betazerfällen aber weitgehend dasselbe Erscheinungsbild.

Fermi war anerkannt für seine Vorstellungskraft. Angeregt durch Joliot-Curie malte er sich aus, wie aus Protonen und Neutronen bestehende Atomkerne aussehen könnten, die sich durch den Betazerfall ineinander umwandeln. So erkannte er, dass es dabei eine grundlegende Symmetrie

geben müsste. Wenn sich ein Neutron in ein Proton umwandelt, ist die Gesamtladung wegen der Emission des negativ geladenen Elektrons, des bekannten Betateilchens, im Gleichgewicht. Sollte es dann nicht auch möglich sein, dass ein Proton in einem Atomkern in ein Neutron umgewandelt wird? In diesem Fall könnte das Ladungsgleichgewicht durch die Emission eines positiv geladenen Betateilchens, des Positrons, sichergestellt werden. Die Hauptakteure in diesen Kernumwandlungsprozessen waren für Fermi also das Neutron, das Proton und das Betateilchen, wobei das Letztere ein Elektron, aber auch ein Positron sein konnte, es musste eben nur die passende elektrische Ladung tragen.

Dies war aber längst noch nicht alles. Erst mit dem Bekanntwerden weiterer experimenteller Ergebnisse nahm Fermis Theorie schließlich ihre endgültige Form an.

Pauli hatte erkannt, dass sich möglicherweise feststellen ließe, ob die Emission eines elektrisch geladenen Betateilchens tatsächlich von einem leichten Neutrino begleitet wäre. Eine sehr präzise Messung des Energiespektrums der Betastrahlung könnte zeigen, ob es ein Maximum der Energie gäbe oder ob die Kurve unendlich weit verlaufen würde. Bohr war nämlich der Auffassung, dass die Energieerhaltung nur im Mittel, für eine große Anzahl von Ereignissen, nicht aber für die einzelnen Ereignisse gültig wäre. Das Energiespektrum der Betateilchen müsste dann bis ins Unendliche reichen.<sup>1</sup> Würde das Energiespektrum dagegen an einem bestimmten Punkt abrupt enden, hätte Pauli recht.

---

<sup>1</sup> Pauli hatte erkannt, dass die Bohr'sche Hypothese eine sogenannte Poisson-Verteilung erfordern würde, die charakteristisch für statistische Effekte ist.

Paulis Vorschlag einer sorgfältigen Messung des Energiespektrums bei hohen Energien, um zu sehen, ob es sanft ausklingt oder abrupt endet, war aufgegriffen worden. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden auf der Konferenz bekannt gegeben und bewiesen deutlich, dass das Spektrum einen oberen Grenzwert besitzt.

Dies war Musik in Paulis Ohren und bestärkte ihn in seiner Vorstellung, dass am Betazerfall ein dritter, unsichtbarer Partner beteiligt sein musste. In der folgenden Diskussion ergriff er das Wort und stellte seine Idee des Neutrinos vor:

Ihre Masse kann nicht sehr viel höher als die Elektronenmasse sein. Um sie von den schweren Neutronen zu unterscheiden, hat Herr Fermi vorgeschlagen, sie „Neutrinos“ zu nennen. Es ist möglich, dass die wahre Masse der Neutrinos null ist ... Es scheint mir einleuchtend, dass Neutrinos einen Spin  $\frac{1}{2}$  haben. Über die Wechselwirkung der Neutrinos mit den anderen Materieteilchen oder mit Photonen wissen wir nichts.

Nun hatte Fermi alles zusammen, um seine Theorie des Betazerfalls zu formulieren, in der dem Neutrino eine zentrale Rolle zukam.

## Fermis Theorie des Betazerfalls

Sofort nach Abschluss der Solvay-Konferenz machte sich Fermi ans Werk. In seine Theorie fanden Paulis verschiedene Vorschläge ebenso wie das, was er auf dem Kongress gelernt hatte, Eingang: die Rollen des Neutrons und des

Protons, die Bestätigung, dass am Betazerfall tatsächlich ein Neutrino beteiligt ist, sowie erste Vorstellungen der späteren Quantenelektrodynamik. Zwei Grundpostulate besagen, dass Energie und Impuls beim Betazerfall erhalten sind, und ein drittes, dass dies auch auf den Drehimpuls – und zwar sowohl auf den räumlichen Drehimpuls als auch auf den Spin – zutrifft.

Der Spin ist ein innerer Drehimpuls von Teilchen. Die Quantentheorie zeigt, dass er nur bestimmte Werte annehmen kann, die entweder ungeradzahlige oder geradzahlige Vielfache einer gewissen Grundeinheit sind. Aus historischen Gründen ist diese Grundeinheit des Spins  $\frac{1}{2}$ . Ungeradzahlige Vielfache davon sind also halbzahlig, während geradzahlige Vielfache ganzzahlig sind. Teilchen, deren Spins halbzahlige Vielfache von  $\frac{1}{2}$  sind, heißen heute nach Enrico Fermi Fermionen. Teilchen, deren Spins ganzzahlige Vielfache sind, werden nach dem indischen theoretischen Physiker Satyendra Bose Bosonen genannt. Uns soll es hier vor allem um die Fermionen gehen.

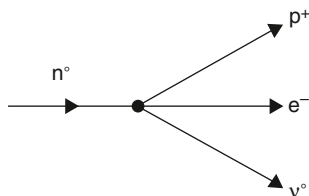
Das Proton ist ein Fermion mit dem Spin  $\frac{1}{2}$ . Die Anomalie beim Spin des Stickstoffkerns hatte Pauli veranlasst, das Neutron vorzuschlagen, das ebenfalls den Spin  $\frac{1}{2}$  hat. Auf diese Weise ergibt sich der richtige Spin für den Atomkern. Aus den Atomspektren und aus der Wechselwirkung von Elektronen mit Magnetfeldern lässt sich ableiten, dass Elektronen ebenfalls den Spin  $\frac{1}{2}$  besitzen.

Die Additionsregeln für den Spin in der Quantenmechanik sind etwas ungewöhnlich. Dass zwei Teilchen mit dem Spin  $\frac{1}{2}$  notwendig sind, um eines mit dem Spin 1 zu erzeugen, ist noch vorstellbar. Allerdings lässt sich ein Teilchen mit dem Spin  $\frac{1}{2}$  aus drei Teilchen mit dem Spin  $\frac{1}{2}$

erzeugen. Damit muss beim Betazerfall eines Neutrons in ein Proton und in ein Elektron etwas fehlen: Das anfangs vorhandene Neutron hat den Spin  $\frac{1}{2}$ , sodass beim Zerfall eine ungerade Anzahl von Teilchen mit dem Spin  $\frac{1}{2}$  entstehen müssen. Neben dem Proton und dem Elektron muss also noch ein drittes Teilchen erzeugt werden, das zwar den Spin  $\frac{1}{2}$ , aber keine elektrische Ladung trägt. Dies ist das Neutrino.

Nachdem Fermi die Akteure kannte, blieb noch deren Zusammenspiel zu beschreiben. Ausgehend davon, dass das Neutron einem Proton ähnelt, dem die elektrische Ladung genommen wurde, vermutete er, dass es sich mit Neutrino und Elektron ähnlich verhält. Diese Parallelen zwischen Elektron und Neutrino zum einen und zwischen Proton und Neutron zum anderen bildeten eine Säule seiner Theorie des Betazerfalls. Eine weitere war die neue Theorie zur Beschreibung elektrisch geladener Teilchen, die Quantenelektrodynamik, die sich bereits als sehr erfolgreich erwiesen hatte. Dabei nahm Fermi an, dass alle vier Teilchen für kurze Zeit an einem bestimmten Punkt im Raum und in der Zeit gleichzeitig sind. In diesem Bild könnte sich ein Neutron spontan in ein Proton verwandeln, wobei es ein Elektron (das Betateilchen) und ein Neutrino (das „Geisterteilchen“) emittiert.

Heute wissen wir, dass das nur die halbe Wahrheit ist. Der Punkt, an dem sich das Neutron in ein Proton umwandelt, ist nicht genau derselbe wie der, an dem die freigesetzte Energie und Ladung wieder in Form eines Elektrons und eines Neutrinos als Teilchen erscheint. Allerdings ist die Strecke zwischen beiden Punkten kürzer als der Durchmesser eines Neutrons. Zu Fermis Zeiten ließen sich sol-



**Abbildung 2 Fermis Modell für den Betazerfall.** In diesem Modell wandelt sich ein Neutron ( $n^{\circ}$ ) an einem Punkt des Raums spontan in ein Proton ( $p^{+}$ ), in ein Elektron ( $e^{-}$ ) und in ein Neutrino ( $\nu^{\circ}$ ) um. Die hochgestellten Zeichen geben die elektrische Ladung jedes Teilchens relativ zu der des Neutrons an.

che Abstände von der Größenordnung eines Atomkerns, geschweige denn eines einzelnen Neutrons oder Protons, noch nicht auflösen. Tatsächlich war das Fermi-Modell so gut, dass es bis heute im Rahmen des Grundstudiums der Physik als Standardeinführung in die Theorie der Betastrahlung dargestellt wird.

Ausgehend von dieser Theorie konnte Fermi berechnen, wie das Energiespektrum der im Betazerfall erzeugten Elektronen aussehen sollte. Das Ergebnis stimmte mit dem experimentell erhaltenen überein, und auch die Grenzenergie bei hohen Energien ergab sich richtig. Wenn man alle Ergebnisse im Zusammenhang betrachtete, konnte die Masse des Neutrinos höchstens ein kleiner Bruchteil der Elektronenmasse, möglicherweise aber auch null sein. Als die Ergebnisse genauerer Messungen mit Fermis Theorie des Betazerfalls verglichen wurden, zeigte sich, dass das Neutrino denselben Spin wie das Neutron, das Proton und das Elektron hat. Alle Annahmen von Fermi waren also richtig.

Trotzdem die Theorie so erfolgreich war, wollten viele Physiker nicht wahrhaben, dass das Neutrino ein reales Teilchen sein sollte. Überzeugen würde sie erst der Nachweis eines freien Neutrinos, das mit anderer Materie zusammenstößt, von ihr absorbiert wird und sie dadurch in irgendeiner Weise ändert. Als Fermi seine Ergebnisse 1934 veröffentlichte, traf der Artikel daher auf wenig Begeisterung.

Nachdem Fermi den Artikel mit dem Titel „Versuch einer Theorie der Betastrahlen“ fertiggestellt hatte, schickte er ihn an die führende englischsprachige Fachzeitschrift *Nature*. Dort wurde sie – eine der wichtigsten Arbeiten Fermis zur theoretischen Physik! – allerdings erst einmal vom Herausgeber abgelehnt. Als Begründung gab er an, dass ihm Hinweise zugegangen wären, dass das Manuskript „zu realitätsferne Spekulationen enthielt, um für den Leser von Interesse zu sein“. Würden die Gutachter heute noch leben, müssten sie wohl eingestehen, damit den größten Bock ihres Lebens geschossen zu haben. Schließlich erschien die Abhandlung auf Italienisch in der Zeitschrift *Nuovo Cimento* und bald darauf auf Deutsch in der *Zeitschrift für Physik*. Auf Englisch ist sie nie veröffentlicht worden.

Fermi hatte das Neutrino in seiner Theorie durchaus ernst genommen. Ausgehend von dem unlängst entdeckten Neutron und den Gesetzen der Quantenmechanik konnte er damit zeigen, dass sich ein Neutron in einem Atomkern spontan in ein Proton umwandelt, während ein Elektron (das Betateilchen) und ein Neutrino emittiert werden. Sicher war das zunächst spekulativ und ließ sich nicht unmittelbar nachprüfen. Zu „realitätsfern“ ... „um für den Leser von Interesse zu sein“ war es aber bestimmt nicht.



Fermi hatte sich an der Sache derart aufgegeben, dass er beschloss, erst einmal „für ein Weilchen“ von der theoretischen zur Experimentalphysik zu wechseln.<sup>2</sup> Bald schon sollten die Experimente allerdings Fermis Zeit voll in Anspruch nehmen, und dies auf Jahre hinaus. Sie waren die Voraussetzung dafür, dass die deutschen Wissenschaftler Otto Hahn und Fritz Strassmann und die gebürtige Österreicherin Lise Meitner später die Urankernspaltung mit all ihren Folgen entdeckten konnten. Dennoch war Fermis Theorie des Betazerfalls nicht in Vergessenheit geraten. Erst später zeigte sich, dass sie durchaus die Möglichkeit eröffnet, Paulis Neutrinohypothese wissenschaftlich zu überprüfen.

## Das Neutrino wird langsam zur Realität

Fermis Hypothese, dass Proton, Neutron, Elektron und Neutrino an einem Punkt ineinander umgewandelt werden, geht tatsächlich über die Beschreibung allein des Betazerfalls hinaus. Aus der Theorie folgt, dass ebenso ein Neu-

---

<sup>2</sup> Nach Laura Fermi, *Mein Mann und das Atom*, Eugen Diederichs Verlag, München, 1956. Fermi war für experimentelle wie für theoretische Forschung in gleicher Weise begabt. Dies zeigt das Beispiel der ersten Atombombenexplosion in der Wüste von New Mexico. Fermi hielt sich zusammen mit einigen der berühmtesten damaligen Wissenschaftler geschützt in einem Bunker Kilometer von der Explosion entfernt auf. Während die anderen verblüfft von dem Geschehen waren, rezitierte Robert Oppenheimer seine berühmten Verse aus der hinduistischen Schrift Bhagavadgita: „Jetzt bin ich der Tod geworden, der Zerstörer der Welten.“ [Deutsch: *Bhagavadgita: Der Gesang Gottes*, Goldmann-Verlag, München, 2002; online unter <http://gita.de.ki/>; abgerufen am 3.10.2011]. Fermi dagegen warf einige Papierschnipsel in die Luft und berechnete aus der Strecke, die sie flogen, welche Kraft die Bombe gehabt haben muss. Sein Ergebnis stimmte größenordnungsmäßig mit späteren genauen Berechnungen überein.

trino auf ein Neutron stoßen und es dabei in ein Proton und in ein Elektron umwandeln könnte. Dies wäre also eine Art „inverser Betazerfall“. Seit Fermi seine Theorie des Betazerfalls entwickelt hatte, war das Neutrino kein Lückenbüßer mehr für den „Energieverlust“, worauf sich Paulis Idee bis dahin ja beschränkt hatte, sondern ein reales Teilchen geworden. Als solches konnte es die verloren gegangene Energie mit sich führen, bis es mit einem anderen Teilchen zusammenstößt. Damit eröffnete sich eine Möglichkeit, das Neutrino als Teilchen nachweisen zu können.

Fermis Theorie zufolge konnte das geisterhafte Neutrino also auf einen Atomkern stoßen, elektrische Ladung von ihm übernehmen und dabei zu einem Elektron werden, das leicht nachzuweisen ist. Würde man diesen Atomkern im Auge behalten, ohne von dem Neutrino zu wissen, müsste man seine plötzliche Bewegung beziehungsweise das Auftauchen eines schnellen Elektrons als spontane Entstehung von Energie deuten. Dies wäre genau das Gegenstück zu dem Energieverlust im Betazerfall. Wäre der scheinbare Energieverlust in der Energiebilanz des Betazerfalls genau gleich der Energie, die das atomare Target beim Stoß erhielte, wäre die natürliche Erklärung, dass Pauli und Fermi recht hätten: Etwas Unbemerkttes, das im Betazerfall erzeugt wird, würde Energie über eine bestimmte Strecke im Raum transportieren, bis es wieder zerstört würde und seine Energie dabei an das Target weiterreichen würde: eine Art subatomarer Staffellauf.

So weit, so gut, zum allgemeinen Bild. Leider steckt der Teufel bei vielen guten Ideen im Detail. Fermis Theorie beschränkte sich nicht auf die Aussage, dass ein Neutrino elektrische Ladung aufnehmen und sich durch den Zusam-

menstoß mit Materie zeigen könne. Sie machte auch konkrete Aussagen darüber, unter welchen Bedingungen dies geschieht und wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist. Hier begannen die Schwierigkeiten.

Bis 1934 lagen genügend Daten über Betazerfälle verschiedener Elemente vor, um mit Fermis Theorie die Gesamtwahrscheinlichkeit für die Umwandlung von Neutrino, Elektron, Neutron und Proton ineinander an einem Punkt zu berechnen. Es zeigte sich, dass sie winzig klein war.<sup>3</sup> Hans Bethe und Rudolf Peierls, zwei brillante junge theoretische Physiker, erkannten, dass sie anhand dieser Daten und Fermis Theorie die Wahrscheinlichkeit für Wechselwirkungen zwischen Neutrinos und Materie berechnen konnten, bei denen ein frei fliegendes Neutrino sichtbar wird.<sup>4</sup> Allerdings zerschlugen sich die Hoffnungen, dass nach Fermis Erkenntnissen mit einer baldigen Entdeckung des Neutrinos zu rechnen sei, schnell. Bethe und Peierls stellten fest, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich Neutrinos auf diese Weise zu erkennen geben würden, so klein war, dass ein im Betazerfall erzeugtes Neutrino „wie ein Geschoss eine Nebelbank“ ungestört die gesamte Erde durchqueren könnte.

---

<sup>3</sup> Dies wird üblicherweise unter der Bezeichnung „Fermi-Kopplungskonstante“ zusammengefasst. In Einheiten des Quadrats der Protonenmasse gemessen beträgt sie etwa ein tausendstel Prozent.

<sup>4</sup> H. Bethe und R. Peierls, *Nature*, 133 (1934) S. 532. Bethe und Fierz berechneten erstmals aus der Fermi-Theorie des Betazerfalls die Wahrscheinlichkeit und stellten fest, dass sie sehr klein ist. Bethe und Peierls ermittelten daraufhin ausgehend von allgemeinen Prinzipien das Verhältnis der Wahrscheinlichkeit eines Betazerfalls zur Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutrino mit Materie wechselwirkt. Ihrem Ergebnis zufolge hängt dieses Verhältnis von der Energie ab, ist bei allen für die damals interessierenden Prozesse relevanten Energien aber immer winzig klein.

Seit man weiß, dass die Wahrscheinlichkeit für die Wechselwirkung eines Neutrinos mit anderer Materie so gering ist, heißt die zugehörige Kraft „schwache Kraft“. Da das Neutrino neutral ist, bleibt es von den elektromagnetischen Kräften, die die Moleküle zusammenhalten, unberührt. Auch die starken Kräfte, die die Atomkerne zusammenhalten, wirken nicht auf Neutrinos. Das Neutrino „spürt“ nur die Schwerkraft und die schwache Kraft. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Neutrino durch den Zusammenstoß mit irgendeinem Material zu erkennen gibt, ist so gering, dass die Schlussfolgerung, die Bethe und Peierls damals zogen, bald Allgemeingut wurde: „Es ist praktisch unmöglich, das Neutrino zu beobachten“.

Hätte jemand anderes als Pauli ein Teilchen vorgeschlagen, das effektiv nicht nachzuweisen war und sich nur über die „scheinbare“ Verletzung des Energieerhaltungssatzes zu erkennen gab, wäre Pauli selbst sicher der Erste gewesen, der es mit seiner gefürchteten Kritik zurückgewiesen hätte. Vielleicht wollte er sich auch mit seiner Wette um eine Kiste Champagner, dass das Neutrino niemals nachgewiesen würde, selbstironisch aus der Schusslinie nehmen. Immer stärker sah es danach aus, dass Pauli ein Stück Nichts erfunden hatte, das spurlos verschwinden würde, ohne jemals erkannt worden zu sein. Selbst wenn man ein Neutrino in ein Verlies mit einem Lichtjahr dicken Bleimauern sperren würde, es hätte immer noch gute Aussichten zu entkommen. Mehr und mehr wurde das Neutrino zum Albtraum der theoretischen Physiker. Eine wundervolle Idee, die sich aber auf ewig dem experimentellen Nachweis entziehen würde. Da immer mehr Physiker in den Zweiten Weltkrieg verwickelt wurden, geriet die Frage, ob sich das Neutrino

vielleicht doch noch herauskitzeln und seine Realität beweisen lassen würde, ohnehin zunächst in Vergessenheit. Ins Zentrum der Forschung rückte dafür immer stärker die Kernspaltung – das Ergebnis einer Abfolge von Ereignissen, die mit Fermis Verzweiflung nach der abgelehnten *Nature*-Veröffentlichung ihren Anfang genommen hatten. So sollte Paulis Wette erst ein Vierteljahrhundert später wieder ins Blickfeld geraten.



<http://www.springer.com/978-3-8274-2940-7>

Neutrino

Close, F.

2012, XII, 233 S. 11 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-8274-2940-7