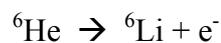


7. Neutrinos

7.1 Verletzung von Erhaltungssätzen oder ein neues unsichtbares Teilchen?

In der klassischen Physik hat das Konzept der Erhaltungssätze erfolgreich dazu beigetragen, bestimmte Probleme auf einfache und elegante Weise zu lösen. Dieses Konzept besagt, dass gewisse Größen, z.B. Energie, Impuls, elektrische Ladung usw. in einem abgeschlossenen System sich im Laufe der Zeit nicht ändern.

Wir wollen nun sehen, ob diese Erhaltungssätze auch im mikroskopischen Bereich erfüllt sind und betrachten dazu den Betazerfall: Ein Mutterkern zerfällt in einen Tochterkern und ein Elektron, wobei sich ein Neutron des Mutterkerns in ein Proton umwandelt, z.B.



Betrachten wir zunächst die Ladungen: Auf der linken Seite: $+2e$; auf der rechten Seite $+3e - 1e = +2e$. Die Ladung bleibt bei diesem Zerfall also erhalten, und das gilt allgemein.

Wie sieht es nun mit der Impulserhaltung aus?

Wenn der ${}^6\text{He}$ -Kern vor dem Zerfall in Ruhe ist, so folgt aus dem Impulserhaltungssatz, dass die Zerfallsprodukte in entgegengesetzte Richtungen auseinander fliegen und zwar mit Geschwindigkeiten, die zu ihrer Masse umgekehrt proportional sind: Große Masse – kleine Geschwindigkeit, kleine Masse – große Geschwindigkeit.

Versuch: Impulserhaltung beim Zweikörperzerfall

Zerplatzt ein ruhender Körper in zwei Bruchstücke, so fliegen diese in genau entgegengesetzten Richtungen auseinander. Dies fordert der Satz von der Erhaltung des Gesamtimpulses. Der Impuls eines Körpers ist eine Vektorgröße, deren Betrag gleich dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit und deren Richtung gleich der Richtung der Geschwindigkeit ist.

Da vor dem Zerplatzen der Impuls des (ruhenden) Körpers 0 ist, müssen die Impulse der beiden Bruchstücke sich vektoriell zu 0 addieren.

Ein solches System wurde durch eine gespannte Feder und zwei Kugeln simuliert (siehe Abb. 7.1). Die Kugeln liegen zunächst an der Feder, die dann ruckartig entspannt wird. Beim Wegfliegen der Kugeln sieht man folgendes:

1. Sie fliegen in entgegengesetzte Richtungen fort.
2. Je kleiner die Masse eines Bruchstücks, desto größer seine Geschwindigkeit.

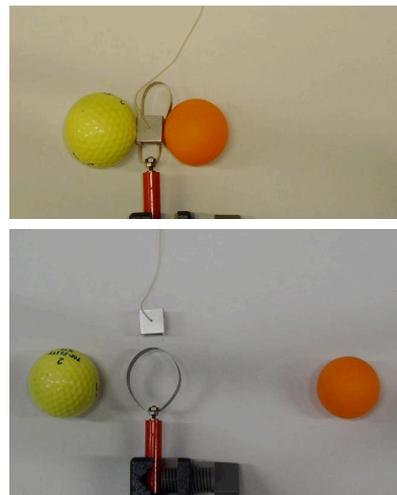
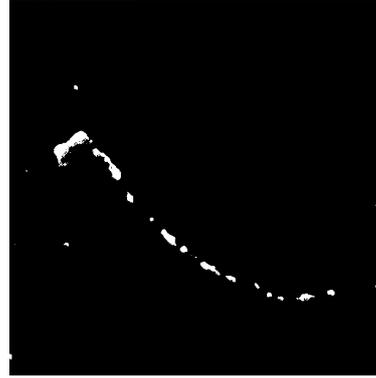


Abb. 7.1: Versuch zur Impulserhaltung beim Zweikörperzerfall

Abb. 7.2:
Nebelkammeraufnahme des β -Zerfalls eines ${}^6\text{He}$ -Kerns. Die Bahnen der Zerfallsprodukte, des Elektrons (lange gekrümmte Spur nach rechts unten) und des ${}^6\text{Li}$ -Kerns (kurze dicke Spur nach links unten) bilden einen Winkel, der kleiner als 180° ist.

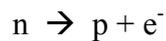


Beim Zerfall des ${}^6\text{He}$ sollte das Elektron mit großer Geschwindigkeit vom ${}^6\text{Li}$ -Kern, der sich nur langsam in die entgegengesetzte Richtung bewegt, fortfliegen. Doch wie sieht das experimentelle Ergebnis aus?

Auf der Nebelkammeraufnahme (Abb. 7.2) sieht man, dass der Winkel zwischen der ${}^6\text{Li}$ - und der Elektronenbahn deutlich von 180° verschieden ist. Das heißt, dass für diesen Prozess der Impulserhaltungssatz nicht erfüllt zu sein scheint. Auch das gilt allgemein für den β -Zerfall.

Kommen wir nun zum Energieerhaltungssatz:

Hierzu betrachten wir den Zerfall des freien Neutrons (Halbwertszeit ca. 10 min.)



Die erste Frage ist, warum ein freies Neutron zerfällt, ein freies Proton aber nicht.

Aus energetischen Gründen, weil nämlich die Masse des Neutrons größer als die Summe der Massen von Proton und Elektron sind. Massen und Ruheenergien sind nach Einstein verknüpft über die Beziehung $E = m \cdot c^2$, womit sich für die 3 betrachteten Teilchen folgende Ruheenergien ergeben:

$$E_n = 939,6 \text{ MeV} \quad E_p = 938,3 \text{ MeV} \quad E_e = 0,5 \text{ MeV}$$

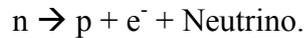
E_n ist also um 0,8 MeV größer als die Summe aus E_p und E_e , und diese 0,8 MeV stecken in der Bewegung von Proton und Elektron, wobei die Bewegungsenergie des Protons wegen der großen Masse sehr viel kleiner als die des Elektrons ist. Also müssten alle Elektronen, wenn die Energie erhalten bleibt, die gleiche Bewegungsenergie $E_m \approx 0,8 \text{ MeV}$ besitzen.

Doch was ergibt sich aus dem Experiment? Schon 1914 hatte Chadwick entdeckt, dass die bei einem β -Zerfall emittierten Elektronen nicht alle die gleiche Energie besitzen, sondern Energien haben, die zwischen 0 und der erwarteten Bewegungsenergie E_m liegen. Daraus sieht man, dass nur für sehr wenige Elektronen der Energiesatz erfüllt zu sein scheint, für die allermeisten jedoch nicht. Auch dies gilt wieder allgemein für den β -Zerfall: Der Energiesatz scheint verletzt zu sein.

Wie sollte man diese Ergebnisse verstehen?

Wir müssen uns in die Zeit zurückversetzen, in der die Quantentheorie langsam entdeckt wurde. In diesem Prozess mussten viele frühere Annahmen über Bord geworfen werden. Warum nicht auch gewisse Erhaltungssätze, insbesondere der "heilige" Energiesatz, den man mühsam im 19. Jahrhundert etabliert hatte. Bohr war mutig und bereit, den Energiesatz zu opfern. Einen anderen Weg schlug 1930 Wolfgang Pauli vor. Er betrachtete folgende Möglichkeit: Beim β -Zerfall trägt ein drit-

tes, nicht sichtbares Teilchen (ein "Geisterteilchen") die fehlende Energie und den fehlenden Impuls fort. Dieses hypothetische Teilchen wurde später von Fermi "Neutrino", kleines Neutron, genannt, weil es ja aus Gründen der Ladungserhaltung elektrisch neutral sein muss und außerdem keine Spuren hinterlässt. Mit dieser Annahme erhält der β -Zerfall des Neutron die Form:

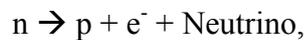


Der Energiesatz war gerettet, aber auf Kosten eines unsichtbaren Teilchens, von dem Pauli selbst später sagte: *"Ich habe etwas Schreckliches getan. Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann."*

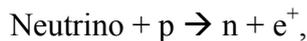
War nun der Teufel mit dem Belzebug ausgetrieben?

7.2 Das Unsichtbare "sichtbar" machen

Was heißt "unsichtbar" in diesem Zusammenhang? Wir hatten schon bei der Entdeckung des Atoms eine ähnliche Situation: Atome kann man nicht sehen, da sie kleiner sind als die Wellenlänge des Lichtes, für das unser Auge empfindlich ist. Erst als andere Wirkungen der Atome bekannt wurden, die man sehen konnte, wurde die Existenz von Atomen anerkannt. Ein anderes Beispiel: Positronen wurden durch die Spuren, die sie in einer Nebelkammer hinterließen, entdeckt. Wenn wir die Existenz von Neutrinos sicher stellen wollen, müssen wir eine Wirkung der Neutrinos finden, die wir in einem Detektor sichtbar machen können. Das hat noch bis 1956 gedauert, denn, das Neutrino hinterlässt nur ungern eine Wirkung. Allerdings sollte es, wenn das Neutrino beim Betazerfall auftritt,



auch die umgekehrte Reaktion geben, den sog. inversen Betazerfall:



d.h. es sollte ein Neutron und ein Positron entstehen, das sich recht leicht nachweisen lässt. Dieser inverse Betazerfall wurde an Chlor-Kernen durch Reines, Cowan und Mitarbeiter untersucht. Aber es wurde ein sehr mühseliges Experiment, denn man brauchte sehr sehr viele Neutrinos, damit überhaupt einmal ein Positron entsteht. Erst nach dem zweiten Weltkrieg, als man große Kernreaktoren hatte, die neben der Energie auch viele Neutrinos produzieren, konnte man die Neutrinos positiv durch die obige Reaktion nachweisen.

7.3 Eigenschaften, Antiteilchen, Familien

Da Neutrinos so schwer nachzuweisen sind, ist es sehr schwierig, ihre Eigenschaften zu bestimmen.

Nur bei der Ladung ist es leicht: Neutrinos haben keine Ladung. Schwieriger ist es bei der Masse: Das Neutrino, das beim Betazerfall auftritt hat eine kleine Masse, so klein dass man lange davon ausging, dass sie auch Null sein könnte. Inzwischen weiß auf Grund der sog. Neutrino-Oszillationen, dass sie definitiv nicht Null, aber sehr klein ist,

etwa zwischen einem Millionstel oder einem Zehnmillionstel der Masse eines Elektrons.

Wie wir schon gesehen haben, gehört zu jedem Teilchen auch ein Antiteilchen. Es gibt ein Neutrino und ein Antineutrino. Man muss also genau unterscheiden: Beim Betazerfall des Neutrons entsteht ein Antineutrino und auch beim inversen Betazerfall muss man das Proton mit Antineutrinos beschießen.

Und dann kommt wieder die mysteriöse Zahl Drei ins Spiel: Es gibt nämlich nicht nur ein Neutrino und sein Antiteilchen, sondern noch zwei andere Neutrinos mit ihren Antiteilchen. Das Neutrino, das beim Betazerfall zusammen mit einem Elektron auftritt, nennt man "Elektron-Neutrino", wenn statt des Elektrons beim Betazerfall ein Müon (etwa 100 mal schwerer als das Elektron) und ein Neutrino auftritt, spricht man vom Mü-Neutrino und mit einem Tauon (etwa 17 mal schwerer als das Müon) tritt das Tau-Neutrino auf. Allerdings treten Müon und Tauon nicht bei dem Zerfall von Atomkernen auf, da die Energiedifferenzen zu klein sind, aber bei Zerfällen von anderen Elementarteilchen. Alle diese anderen Neutrinos haben auch Massen, die etwa so klein sind wie die des Elektron-Neutrinos, aber wir wissen dass alle drei Neutrinos leicht verschiedene Massen haben.

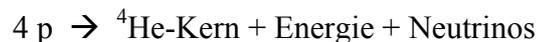
Und so sieht unsere Drei-Familien-Welt der Leptonen aus:

Elektron e^-	Müon μ^-	Tauon τ^-
Elektron-Neutrino ν_e	Mü-Neutrino ν_μ	Tau-Neutrino ν_τ

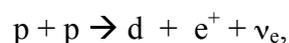
Gibt es noch weitere Familien? Höchstens, wenn die entsprechenden geladenen Leptonen eine Masse haben, die größer als ca. 50 mal der des Tauons ist.

7.4 Neutrinos von der Sonne

Die Sonne ist ein großer Ofen (siehe auch Kapitel 11). Allerdings verbrennt sie keine Kohle, sondern sie gewinnt ihre Energie aus Kernfusionsprozessen, bei denen hauptsächlich 4 Protonen zu einem ^4He -Kern verschmolzen werden:



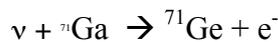
Ein entscheidender Prozess dabei ist der folgende Betazerfall:



d.h. zwei Protonen stoßen zusammen und bilden ein Deuteron (Kern des schweren Wasserstoffs), ein Positron und ein Elektron-Neutrino. Woher wissen wir das? Zunächst einmal kann man Kohle als Brennstoff ausschließen, da es auf der Sonne - zumindest auf ihrer Oberfläche - praktisch keine Kohle gibt, sondern hauptsächlich Wasserstoff, also Protonen. Außerdem würde der Heizwert der Kohle bei weitem nicht ausreichen, die Energieabstrahlung der Sonne über einen Zeitraum von Milliarden von Jahren zu decken. Andererseits können Rechnungen, die von dem obigen Prozess ausgehen, recht gut die Stärke der Sonnenstrahlung und andere Eigenschaften der Sonne wiedergeben. Aber dennoch möchte man gerne hierfür einen direkten Nachweis haben.

Da bei jeder Kernfusion der obigen Art 2 Neutrinos freigesetzt werden und Neutrinos alle Materie nahezu unverändert durchdringen, müssten die in der Sonne produzierten Neutrinos auch bei uns ankommen. Eine einfache Abschätzung ergibt, dass nach dem obigen Modell pro Sekunde etwa 10 Milliarden Neutrinos durch eine Fläche von der Größe eines Daumennagels hindurchfliegen. Aber keine Angst, die Neutrinos machen uns nichts, weil sie so ungern auf etwas wirken (das ist unser Glück).

Wenn man andererseits die Sonnenneutrinos nachweisen möchte, muss man entsprechend aufwendige Experimente durchführen. Physiker des Heidelberger MPI für Kernphysik begannen etwa 1986, eine Apparatur zum Nachweis von Sonnenneutrinos zu bauen. Ein großer Tank wurde mit 100 Tonnen Galliumchlorid-Lösung gefüllt; daher erhielt das Experiment den Namen GALLEX. In den 100 Tonnen Flüssigkeit sind ca. 30 Tonnen des sehr teuren Elements Gallium, was einem Viertel des damals auf dem Weltmarkt verfügbaren Galliums entsprach. Um das Experiment gegen alle unerwünschten Strahlungen abzusichern, wurde es in eine Halle des Autobahn-Tunnels unter dem Gran Sasso, einem hohen Berg in den Abruzzen (östlich von Rom), gestellt. Die Neutrinos von der Sonne wandeln nun in einem inversen Beta-Zerfall Gallium Atome in dem Tank in Germanium Atome um.



Obwohl so viele Neutrinos von der Sonne durch den Tank fliegen und obwohl der Tank 30 Tonnen Gallium (ca. 10^{29} Ga-Atome) enthält, sollten sich pro Tag nur etwa ein bis zwei Gallium Atome in Germanium Atome umwandeln, vorausgesetzt die Berechnungen für die Vorgänge in der Sonne sind richtig. Nachdem man die wenigen Ge-Atome aus den 30 Tonnen Gallium chemisch extrahiert und die einzelnen ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome durch Messung ihres radioaktiven Zerfalls nachgewiesen hatte, stellte man fest, dass nur etwa die Hälfte der erwarteten Umwandlungen von Gallium in Germanium eingetreten waren. Was war die Ursache hierfür?

Arbeitete der Detektor nicht zuverlässig? War das Modell von der Sonne falsch? Oder stimmte etwas mit den Neutrinos nicht?

Die Kontroverse dauerte eine ganze Zeit, bis man herausfand, dass die Diskrepanz in unseren Vorstellungen von den Neutrinos zu suchen ist: Das Elektron-Neutrino, das bei dem Prozess in der Sonne entsteht, wandelt sich für eine gewisse Zeit in ein anderes

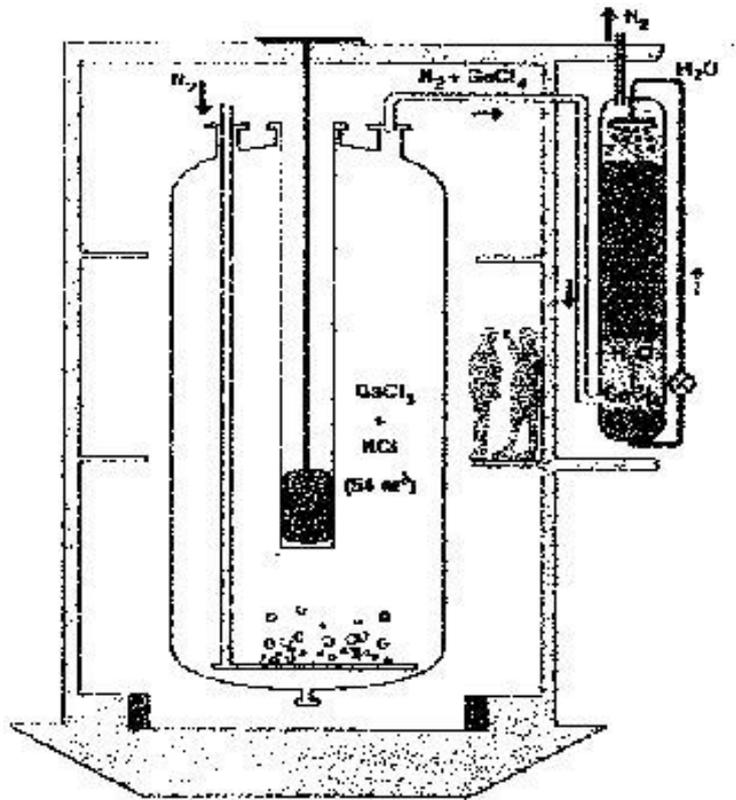


Abb. 7.3: Prinzipieller Aufbau des Gallex-Experiments

Mitglied der Neutrino-Familie um: in ein Tau- oder Mü-Neutrino. Der GALLEX Detektor aber arbeitet so, dass er ein "verkleidetes" Elektron-Neutrino nicht registriert und deshalb weniger Elektron-Neutrinos als erwartet anzeigt. Dieses Phänomen der sog. Neutrino-Oszillationen ist durch eine Reihe von verschiedenen Experimenten geklärt. Damit wurde natürlich auch unsere Vorstellung von der Sonne bestätigt.

7.5 Wolfgang Ernst Pauli (1900 – 1958)

Wolfgang Pauli wurde in Wien geboren, wo sein Vater, ein konvertierter Jude, zunächst als Arzt praktizierte und sich dann für Chemie und Physik interessierte und Professor an der dortigen Universität wurde. Da der Vater den Physiker und Wissenschaftsphilosophen Ernst Mach bewunderte, gab er seinem Sohn den zweiten Vornamen Ernst und bat auch Mach zum Paten für das Kind.

Wolfgang Pauli war ein brillanter Schüler, war aber durch den Unterricht so gelangweilt, dass er unter der Bank die Einsteinschen Veröffentlichungen zur Relativitätstheorie studierte.

Mit 18 Jahren immatrikulierte sich Pauli an der Universität in München, und schon zwei Monate nach Studienbeginn veröffentlichte er sein erstes Papier

über Relativitätstheorie. Sein Lehrer Sommerfeld wurde schnell auf diesen außergewöhnlichen Studenten aufmerksam und übertrug ihm die Aufgabe, einen Übersichtartikel über die Relativitätstheorie für die "Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften" zu verfassen. Als der 237 Seiten lange Aufsatz erschien, schrieb Einstein: "Wer immer dieses reife und großartig konzipierte Werk studiert, kann nicht glauben, dass sein Autor erst 21 Jahre alt ist. Man weiß gar nicht, was man mehr bewundern sollte, das psychologische Verständnis für die Entwicklung der Ideen, die Sicherheit der mathematischen Beweisführung, das tiefe physikalische Verständnis..."

Pauli schrieb seine Doktorarbeit über ein Thema der Quantentheorie und wurde mit 21 Jahren promoviert. Dann begann für ihn die damals typische Karriere eines jungen Physikers: Er wurde Assistent bei Born in Göttingen, wo er im Jahre 1922 Niels Bohr kennen lernte, der ihn nach Kopenhagen einlud. Von 1923 bis 1928 war er Privatdozent an der Universität Hamburg. Mit 25 Jahren formulierte er das später nach ihm genannte Ausschließungsprinzip, für das er auch den Nobelpreis für Physik des Jahres 1945 erhielt. Dieses besagt, dass jeder Quantenzustand eines Atoms von höchstens einem Elektron besetzt werden kann.

Im Jahre 1928 wurde er Professor an der ETH Zürich, und drei Jahre später postulierte er die Existenz des Neutrinos, um das es in unserer Vorlesung ging. Diese Entdeckung war so sensationell, dass sogar die New York Times darüber schrieb: "Ein neuer Bewohner in Herzen des Atoms wurde in die Welt der Physik heute eingeführt, als Dr. W. Pauli von der ETH Zürich, Schweiz, die Existenz eines Teilchens postulierte, das er "Neutron" nannte." (Später änderte man diesen Namen zu "Neutrino".) Während des zweiten Weltkrieges lehrte Pauli an verschiedenen Universitäten der USA.



In seinem privaten Leben war Pauli weniger erfolgreich. Seine erste Ehe ging früh in die Brüche, er begann zu trinken, suchte der Rat des Psychoanalytikers C.G. Jung und unterzog sich einer Analyse. In einer zweiten Ehe war er dann glücklicher. Neben seiner Physik hatte Pauli auch ein tiefes Interesse an philosophischen Problemen, die sich u.a. in seiner veröffentlichten Korrespondenz mit C.G. Jung offenbart.

Quellen:

1. <http://www.chemie.uni-bremen.de/stohrer/biograph/pauli.htm>
2. <http://nobelprize.org/physics/laureates/1945/pauli-bio.html>
3. <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Pauli.html>