

Die Masse der Neutrinos – ein physikalisches Rätsel wird gelöst

Rainer Müller

*Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften – Technische Universität Braunschweig
Pockelsstr. 11 – 38106 Braunschweig*

Zusammenfassung: In den letzten Jahren hat sich unser Wissen über die Neutrinos beträchtlich vermehrt. Neue Experimente haben Neutrinooszillationen nachgewiesen und damit gezeigt, dass Neutrinos eine Masse besitzen. In diesem Artikel werden diese Experimente und die physikalischen Hintergründe beschrieben, die zu ihrem Verständnis nötig sind.

1. Ray Davis und das „Rätsel der Sonnenneutrinos“

Als die schwedische Akademie der Wissenschaften im Oktober 2002 die Nobelpreisträger für Physik bekannt gab, wurde mit Ray Davis eine derjenigen Persönlichkeiten geehrt, die im Alleingang ein ganzes Forschungsgebiet begründet und über Jahrzehnte vorangetrieben haben. Davis' wissenschaftliche Leidenschaft galt der Untersuchung der von der Sonne erzeugten Neutrinos. Bei den Kernreaktionen im Innern der Sonne, die der Sonne ihre Energie geben, entstehen Neutrinos in riesiger Anzahl. Auf der Erde treffen etwa 60 Milliarden pro Sekunde auf jedem Quadratzentimeter ein. Da sie nur schwach mit jeglicher Materie wechselwirken, durchqueren die allermeisten die Erde völlig ungehindert (man kann abschätzen, dass von allen Neutrinos, die den Körper eines Menschen im Verlauf eines 80jährigen Lebens durchqueren, nur etwa 40 eine Wechselwirkungsreaktion auslösen).

Als Davis in den sechziger Jahren Sonnenneutrinos quantitativ nachweisen wollte, war die Skepsis sehr groß. Nur wenige Ereignisse pro Monat waren in seinem Detektor zu erwarten, und diese sollten vollständig erfasst und nachgewiesen werden. Die Unterdrückung von Hintergrundereignissen war unerlässlich, und so baute Davis sein Experiment weit unter der Erde in der Homestake-Goldmine in Dakota. Als Nachweismedium dienten 600 Tonnen Tetrachlorethylen, eine Chemikalie, die auch als Lösungsmittel in chemischen Reinigungen benutzt wird. Einige der einfallenden Neutrinos führten zu einer Kernreaktion, bei der ein Chlor- in ein Argonatom umgewandelt wurde. Diese wenigen Argon-Atome in seinem großen Chemikalien-Tank wies Davis durch chemische Extraktion und anschließenden radioaktiven Zerfall quantitativ nach. Um auf eine ausreichende Nachweisstatistik zu kommen, lief das Experiment fast 30 Jahre, von 1968 bis 1995.

Davis' unermüdliche Fleißarbeit wurde aber auch wissenschaftlich belohnt. Trotz Ausschaltung aller denkbaren Fehlerquellen fand er nämlich nur ein Drittel der vorhergesagten Neutrinos. Sein Ergebnis wurde später von anderen Experimenten bestätigt, und das „Rätsel der fehlenden Sonnenneutrinos“ galt über Jahre als eines der größten ungelösten Probleme der Teilchenphysik.

Als aussichtsreichster Lösungsvorschlag galt die Vermutung, dass sich die in der Sonne produzierten Elektron-Neutrinos auf ihrem Weg zur Erde in andere Neutrinoarten umwandeln. Das kann nur geschehen, wenn die Neutrinos Masse besitzen, eine bis dahin ebenfalls noch unentschiedene Frage. Große experimentelle Anstrengungen wurden unternommen, um die Vermutung zu bestätigen oder zu widerlegen. In den Jahren 1998-2002 wurden die Neutrinooszillationen schließlich überzeugend nachgewiesen. Im Folgenden sollen die theoretischen Hintergründe und die Experimente, die zur Entdeckung der Neutrinooszillationen geführt haben, etwas ausführlicher dargestellt werden.

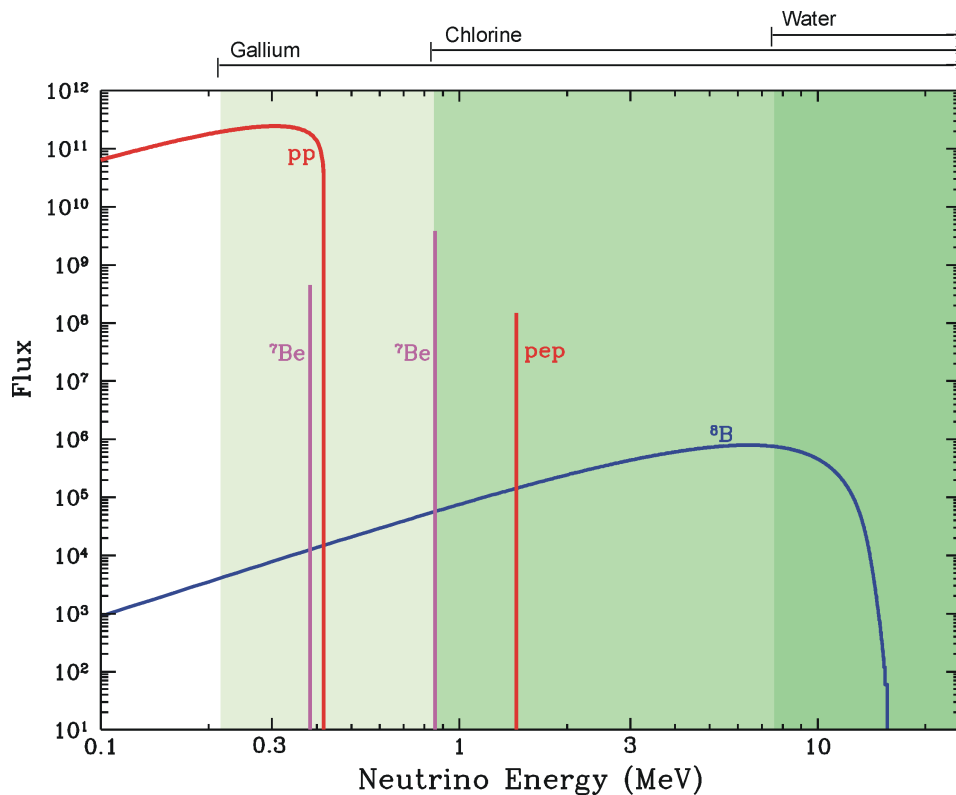
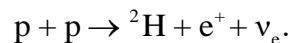


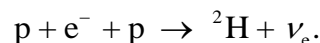
Abb. 1: Energiespektren der Sonneneutrinos aus den verschiedenen Erzeugungsprozessen und Energieschwellen der verschiedenen Nachweismethoden (aus [1]).

2. Neutrino-Produktion in der Sonne

Die Sonne bezieht ihre Energie aus der Fusion von Atomkernen. Als ein Nebenprodukt fallen dabei Neutrinos in großer Anzahl an, die das Sonneninnere verlassen und die man deshalb auf der Erde nachweisen kann. Die Hauptenergiequelle der Sonne ist der sogenannte pp-Zyklus, bei dem vier Protonen zu einem Heliumkern verschmelzen. Der pp-Zyklus beginnt mit der Kombination von zwei Protonen zu Deuterium:

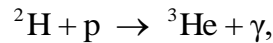


Die hierbei erzeugten Elektron-Neutrinos besitzen ein kontinuierliches Energiespektrum zwischen 0 und 0.4 MeV (vgl. das in Abb. 1 dargestellte Spektrum der Sonneneutrinos). Nach den Ausgangsprodukten bezeichnet man die Neutrinos, die bei dieser Reaktion entstehen als pp-Neutrinos. Da fast die gesamte Reaktionskette hier ihren Ausgangspunkt hat, sind die pp-Neutrinos ein sehr direktes Maß für den Gesamt-Energieumsatz in der Sonne. Nur etwa 0.2 % des Deuteriums entsteht in der Reaktion

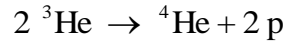


Die hierbei erzeugten Neutrinos werden pep-Neutrinos genannt und besitzen eine feste Energie von 1.4 MeV (im Energiespektrum in Abb. 1 als einzelne Linie dargestellt).

Beim nächsten Schritt, der Erzeugung von Helium-3, werden keine Neutrinos freigesetzt,

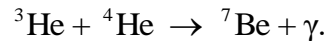


und in 85 % der Fälle ist mit der anschließenden Verschmelzung zu Helium-4,

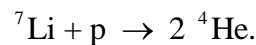
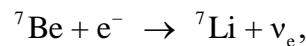


die Reaktionskette schon beendet. Hierbei sind keine weiteren Neutrinos entstanden, so dass die pp- (bzw. pep-) Neutrinos allein Aufschluss über diesen Hauptzweig der Kette geben können.

In 15% der Fälle allerdings verschmilzt das Helium-3 mit einem Helium-4-Kern zu Beryllium-7:

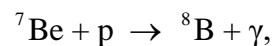


Für das Beryllium gibt es nun zwei Möglichkeiten zur weiteren Reaktion. In der ersten wird in zwei Schritten ${}^4\text{He}$ erzeugt:



Die dabei entstehenden Neutrinos heißen ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos und weisen zwei mögliche Energiewerte auf (0.86 MeV oder 0.38 MeV; s. Abb. 1).

Bei der zweiten Möglichkeit entsteht Beryllium-8 aus den Beryllium-7-Kernen, wobei das Zwischenprodukt Bor-8 anfällt:



Die hier erzeugten sogenannten ${}^8\text{B}$ -Neutrinos zeigen eine breite Energieverteilung, die bis zu der Energie von 14 MeV reicht (vgl. Abb. 1). Für den Nachweis der Neutrinos sind solch hohe Energien vorteilhaft; in den Experimenten machen sie den Hauptteil der nachgewiesenen Neutrinos aus. Von Nachteil ist, dass sie aus einer seltenen Nebenreaktion stammen, nur in einem von 5000 pp-Zyklen wird ein ${}^8\text{B}$ -Neutrino erzeugt.

Detaillierte theoretische Vorhersagen über die Raten, mit denen die einzelnen Reaktionen ablaufen werden von numerischen Sonnenmodellen gegeben. Diese sehr komplexen Simulationen beruhen auf astrophysikalischen, kernphysikalischen und hydrodynamischen Grundlagen. Sie geben Auskunft über die innere Zusammensetzung, Temperaturverteilung, Leuchtkraft, Schwingungsmoden und auch über die zu erwartenden Neutrinoflüsse. Die Neutrinos sind von besonderer Bedeutung, da sie im Inneren der Sonne erzeugt werden und ihre äußeren Schichten fast ungehindert passieren können. Im Gegensatz zu dem von der Sonnenoberfläche stammenden Licht oder den in der Helioseismologie vermessenen Eigenschwingungen geben die Neutrinos daher Aufschlüsse über die sonst unzugänglichen inneren Regionen der Sonne.

3. Neutrinooszillationen

Als die Experimente immer deutlicher zeigten, dass auf der Erde tatsächlich nur ein Drittel bis die Hälfte der von den Sonnenmodellen vorhergesagten Neutrinos eintreffen, lag es natürlich nahe, die Schuld zunächst bei den theoretischen Modellen zu suchen. Immerhin sind diese sehr komplex, und es gehen verschiedene, empirisch zu bestimmende Parameter als Eingangsdaten in

die Modelle ein, wie etwa die einzelnen nuklearen Streuquerschnitte. In der Literatur wurden immer wieder Vorschläge gemacht, wie das Sonnenmodell abzuändern sei, damit theoretische und experimentelle Neutrinoflüsse zur Deckung gebracht werden.

Allerdings war das Vertrauen in die Sonnenmodelle groß, denn sie wurden über viele Jahre entwickelt, erweitert und getestet und haben sich dabei als sehr robust und zuverlässig erwiesen. In der Helioseismologie sagten die Modelle mit großem Erfolg Tausende von Eigenschwingungen der Sonne mit hoher Präzision vorher.

Die neuesten (weiter unten beschriebenen) experimentellen Ergebnisse aus den Jahren 2001 und 2002 zeigen, dass die Sonnenmodelle in der Tat korrekte Vorhersagen liefern. Die Lösung liegt im Bereich der Elementarteilchenphysik. Die in der Sonne erzeugten Elektron-Neutrinos wandeln sich auf dem Weg zwischen Sonne und Erde in eine andere Neutrino-Spezies (Myon-Neutrinos oder Tau-Neutrinos) um, die sich in den älteren Neutrinodektoren nicht nachweisen ließen. Diese Verwandlungen nennt man Neutrinooszillationen.

Der Mechanismus funktioniert nur, wenn die Neutrinos eine Masse besitzen. Er basiert auf der Voraussetzung, dass Myon-, Elektron- und Tau-Neutrino, die physikalisch durch ihr Verhalten bei Reaktionen der schwachen Wechselwirkung gekennzeichnet sind, keine definierte Masse besitzen, sondern aus Zuständen fester Masse quantenmechanisch überlagert sind.

So sind also Elektron- und Myon-Neutrino $|v_e\rangle$ und $|v_\mu\rangle$ von den Masse-Eigenzuständen verschieden, die wir als $|v_1\rangle$ und $|v_2\rangle$ bezeichnen wollen. Sie sind verknüpft durch

$$\begin{aligned} |v_e\rangle &= \cos\theta |v_1\rangle + \sin\theta |v_2\rangle, \\ |v_\mu\rangle &= -\sin\theta |v_1\rangle + \cos\theta |v_2\rangle. \end{aligned}$$

Der Winkel θ wird als Mischungswinkel bezeichnet. Dass es einen Unterschied zwischen Massen- und Wechselwirkungs-Eigenzuständen geben soll, mag sich auf den ersten Blick wenig glaubwürdig ausnehmen. Tatsache ist jedoch, dass im Standardmodell der Elementarteilchenphysik eine analoge Situation bereits bei den Flavor-Freiheitsgraden der Quarks realisiert ist. Der Mischungswinkel, der die Abweichung charakterisiert, wird dort Cabibbo-Winkel genannt.

In diesem Szenario an, ergeben sich Neutrino-Oszillationen zwangsläufig. In der Sonne werden Elektron-Neutrinos erzeugt. Der Anfangszustand ist also $|\psi(t=0)\rangle = |v_e\rangle$. Die Zeitentwicklung wird einfach durch die Schrödingergleichung für freie Teilchen beschrieben und lässt sich für die Masse-Eigenzustände sehr leicht angeben: $|v_i(t)\rangle = \exp(-iE_i t / \hbar) |v_i(0)\rangle$, wobei

$E_i = \sqrt{c^2 p^2 + m_i^2 c^4}$. Der Zustand eines ursprünglichen Elektron-Neutrinos nach der Zeit t ist also:

$$|\psi(t)\rangle = \cos\theta e^{-iE_1 t / \hbar} |v_1\rangle + \sin\theta e^{-iE_2 t / \hbar} |v_2\rangle.$$

Durch die unterschiedlichen Massen sind die Oszillationsfrequenzen verschieden, und das Verhältnis der Überlagerungskoeffizienten unterscheidet sich von seinem Ausgangswert. Mit anderen Worten: Der Zustand zu einer Zeit t stellt kein reines Elektron-Neutrino mehr dar. Die Wahrscheinlichkeit, zur Zeit t ein Myon-Neutrino zu finden ist

$$\left| \langle v_\mu | \psi(t) \rangle \right|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{1}{2} (E_1 - E_2) t / \hbar \right].$$

Aus einem ursprünglichen Elektron-Neutrino ist also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein Myon-Neutrino geworden.

In Materie werden diese „Vakuum-Neutrinooszillationen“ durch den sogenannten Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW)-Effekt verstärkt. Beim Durchgang durch Materie werden Elektron-Neutrinos mit einer gewissen, wenn auch geringen Wahrscheinlichkeit elastisch an Elektronen gestreut. Man kann dies durch eine effektive Masse beschreiben. Da Myonen in gewöhnlicher Materie nicht vorkommen, tritt der gleiche Effekt für Myon-Neutrinos nicht auf. Für gewisse Parameterwerte können materieinduzierte Neutrinooszillationen die Konversionseffizienz stark erhöhen. Die Neutrinoumwandlungen finden also bevorzugt schon innerhalb der Sonne statt, deren äußere Schichten die Neutrinos nach ihrer Erzeugung im Innern durchqueren müssen.

4. Die Experimente und ihre Ergebnisse

Über viele Jahre hinweg galten die „fehlenden Sonnenneutrinos“ als eines der großen Rätsel der Elementarteilchenphysik. Die in den letzten zehn Jahren durchgeführten Experimente haben uns die Gewissheit verschafft: Neutrinos besitzen Masse, Neutrinooszillationen finden in der Sonne statt. Noch sind nicht alle Details geklärt; die folgende Übersicht soll einen Überblick über die bisherigen Experimente und ihre Ergebnisse liefern (s. auch [2]):

a) *Experimente vor 1998*

Alle vor 1998 durchgeführten Experimente fanden nur zwischen 30% und 60% der erwarteten Sonnenneutrinos. Sie konnten aber keinen Hinweis auf die Lösung des Rätsels geben. Ray Davis' Homestake-Experiment gehört in diese Kategorie, ebenso wie das japanische Kamiokande-Experiment (Nobelpreis 2002 für Masatoshi Koshiba), die beide nur für hochenergetische Neutrinos empfindlich waren (Abb. 1). Auch die Experimente Gallex und Sage, die mit dem Detektormaterial Gallium erstmals pp-Neutrinos nachweisen konnten, fanden dieses Defizit.

b) *Super-Kamiokande*

Beim japanischen Super-Kamiokande-Experiment wurden Neutrinos durch Cerenkov-Strahlung in einem riesigen Tank ultrareinen Wassers nachgewiesen. In diesem Experiment wurden nicht Sonnenneutrinos beobachtet, sondern Myon- und Elektron-Neutrinos, die in der Atmosphäre durch kosmische Strahlung erzeugt werden. Super-Kamiokande fand 1998 ein Defizit an „von unten“ kommenden Myon-Neutrinos [3]. Da Neutrinos, die den Detektor von unten treffen, die Erde durchquert haben und daher mit größerer Wahrscheinlichkeit einer Neutrinooszillation zum Opfer gefallen sind, wurde dies als Beleg dafür angesehen, dass die sich fehlenden Myon-Neutrinos auf ihrem Weg in Tau-Neutrinos umgewandelt hatten. Im November 2001 wurde das Super-Kamiokande-Experiment unfreiwillig außer Betrieb gesetzt, als in einer Kettenreaktion 7000 von 11000 der zum Nachweis der Cerenkov-Strahlung benutzten Photomultiplier implodierten.

c) *Das SNO-Experiment*

Auch das Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Kanada benutzt die bei der Streuung von Neutrinos emittierte Cerenkov-Strahlung zum Nachweis. Das Besondere an diesem Experiment ist, dass es mit schwerem Wasser (D_2O) betrieben wird. Auf diese Weise können auch Myon- und Tau-Neutrinos nachgewiesen werden. Im Gegensatz zu Super-Kamiokande weist SNO Sonnenneutrinos nach, und zwar ausschließlich hochenergetische 8B -Neutrinos. Diesem Experiment gelang 2001/02 erstmals, worauf die Physikergemeinde seit 30 Jahren gewartet hatte: Einen Neutrinofluss zu beobachten, der zu 100% mit den Sonnenmodellen überein-

stimmt. Nur 35% der auf der Erde ankommenden Sonnenneutrinos sind Elektron-Neutrinos, der Rest sind Myon- und/oder Tau-Neutrinos. Die in der Sonne erzeugten Elektron-Neutrinos wandeln sich also auf ihrem Weg zur Erde in die anderen Neutrinosorten um. Das Rätsel der Sonnenneutrinos dürfte damit als gelöst gelten. Aber obwohl die grundlegenden physikalischen Mechanismen geklärt waren, konnte man die Werte für Massendifferenzen und Mischungswinkel nicht genau angeben. Hier brachte im Dezember 2002 das japanische

d) *KamLAND-Experiment*

größere Klarheit [4]. Es wurden Oszillationen von Elektron-Neutrinos beobachtet, die allerdings nicht von der Sonne kamen, sondern von zahlreichen Kernreaktoren in Japan und Korea.

Nimmt man die Daten aller Experimente zusammen, ergibt sich das folgende Bild:

1. Elektron-Neutrinos wandeln sich in Myon- und/oder Tau-Neutrinos um. Der Mischungswinkel θ , der den Anteil der Massen-Eigenzustände am Elektron-Neutrino beschreibt, liegt bei dem unerwartet großen Wert von 45° . Das Elektron-Neutrino besitzt also auch nicht näherungsweise eine definierte Masse. Es ist eine fünfzigprozentige Mischung aus zwei Massen-Eigenzuständen, deren Massendifferenz zu $(\Delta m)^2 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ bestimmt wurde.
2. Myon-Neutrinos wandeln sich in Tau-Neutrinos um. Auch hier liegt der Mischungswinkel bei 45° . Die Massendifferenz ist hier allerdings wesentlich größer und liegt bei $(\Delta m)^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$. Aus diesem Grund erfolgen die Oszillationen auf wesentlich kürzeren Längskalalen.

Über die absoluten Massen der Neutrinos können die Experimente keine Aussagen machen. Hier ist man auf Laborexperimente angewiesen, die für das Elektron-Neutrino bisher eine Obergrenze von 2,2 eV finden. Auch andere Fragen, die die Teilchenphysiker interessieren sind noch offen, z. B. ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind oder nicht. Die Antwort würde die verschiedenen Szenarien jenseits des Standardmodells entscheidend beeinflussen. Und auch die Frage warum die Neutrinomassen so klein verglichen mit allen anderen Elementarteilchen-Massen sind, ist theoretisch bisher unverstanden. Zukünftige Experimente werden uns der endgültigen Lösung des „Neutrino-Rätsels“ hoffentlich näher bringen.

Literatur:

[1] J. N. Bahcall, *Solar Neutrinos: Where We Are, Where We Are Going*, *Astrophys.J.* **467**, 475 (1996); <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9512285>.

[2] M. C. Gonzalez-Garcia, *Theory of Neutrino Masses and Mixing*, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0210359> (2002).

[3] E. Kearns, T. Kajita, Y. Totsuka, *Der Neutrinomasse auf der Spur*, Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1999.

[4] S. M. Bilenky et al., *Absolute Values of Neutrino Masses: Status and Prospects*, <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0211462> (2002).