

Neutrinooszillation

Neutrinos sind *elementare* Teilchen, d. h. sie sind nicht aus irgendwelchen Bestandteilen zusammengesetzt. Da sie weder elektromagnetische Ladung, noch Farbladung der Starken Kernkraft aufweisen, wechselwirken sie lediglich gravitativ und insbesondere im Rahmen der Schwachen Kernkraft, d. h. sie treten bei Zerfällen auf. Dabei unterscheidet man sog. neutrale Ströme (Reaktionen, bei denen Z^0 -Bosonen ausgetauscht werden) und sog. geladene Ströme (Reaktionen, bei denen W^\pm -Bosonen ausgetauscht werden).

Die Wechselwirkungsraten sind in beiden Fällen extrem gering, da sowohl Z^0 -, als auch W^\pm -Bosonen mit 92 GeV, bzw. 80 GeV, sehr schwer sind. Man kann Neutrinos deshalb getrost als die Ignoranten im Universum bezeichnen.

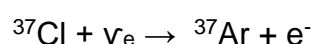
Technisch formuliert beträgt ihr typischer Wechselwirkungsquerschnitt für Reaktionen mit Atomkernen etwa 10^{-19} barn (10^{-47} m²). Praktisch bedeutet das, dass Neutrinos in Wasser mehrere Lichtjahren zurücklegen, bevor es dabei im Mittel zu einer Reaktion (mit einem Atomkern) kommt.

Warum stellen wir dann Wasserbehälter zum Nachweis von Neutrino auf? Pro Sekunde entstehen in der Sonne rund $1,8 \cdot 10^{38}$ Neutrinos, d. h. selbst in 150 Mio. km Abstand treffen davon etwa 65 Mrd. pro cm² auf – bzw. besser formuliert „durch alles was sich ihnen in den Weg stellt, inklusive uns und die Behälter, hindurch“.

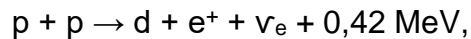
$$\frac{1,8 \cdot 10^{38} [\text{Neutrinos}]}{4 \pi (150 \cdot 10^6)^2 [\text{km}^2 \text{ s}]} = 65 \text{ Mrd} \frac{\text{Neutrinos}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$$

Somit sind durchaus in den riesigen Behältern der Neutrinodetektoren einige Ereignisse pro Tag zu erwarten. Um sich bestmöglich vor Störsignalen – insbesondere der kosmischen Strahlung – abzuschirmen, wurden die Detektoren tief unter der Erde, zumeist in ausgedienten Minen, aufgestellt.

Den Anfang machten die Amerikaner mit der Homestake-Mine in Nord-Dakota. Knapp 1,5 km unter der Erde legten sie sich mit 615 Tonnen Abflussreiniger auf die Lauer. In dem Bottich mit Tetrachlorethylen sollten sich Elektron-Neutrinos verraten gemäß der Reaktion



In regelmäßigen Abständen wurden die Argon-Atome im Behälter gezählt und tatsächlich konnte dadurch im Mittel alle zwei Tage ein Neutrino nachgewiesen werden. Dummerweise müssen jedoch Neutrinos über eine Mindestenergie (sog. Schwellenenergie) von 0,814 MeV verfügen um obige Reaktion auslösen zu können. Der weit überwiegende Anteil solarer Neutrinos entsteht jedoch bei der Fusion von zwei Protonen zu Deuterium gemäß



verfügt also bestenfalls über die Hälfte der notwendigen Energie. Lediglich bei späteren Zerfallsreaktionen entstehen vergleichsweise wenige Neutrinos mit Energien bis zu 18 MeV.

Die theoretisch zu erwartende Anzahl von niederenergetischen Neutrinos lässt sich aus der Leuchtkraft der Sonne berechnen, bzw. aus der Anzahl an (neutrinoproduzierenden) Fusionsreaktionen, die für eine gemessene Leuchtkraft von $3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$ notwendig sind. Die Anzahl der Fusionsreaktionen legt wiederum die Anzahl der nachfolgenden Zerfallsreaktionen fest und somit die Anzahl der hochenergetischen Neutrinos.

Auf der Suche nach einem Messverfahren für niederenergetische solare Neutrinos wurde man schließlich fündig bei der Umwandlung von Gallium zu Germanium gemäß:

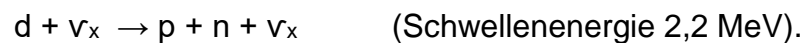
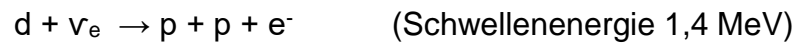


Entsprechende Experimente wurden in einem italienischen Labor, tief unter dem Bergmassiv Gran Sasso durchgeführt. Allen chemischen Reaktionen ist dabei ein Problem gemein: Die Neutrinos lassen sich lediglich zählen, ihre Richtung bleibt verborgen.

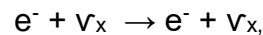
Die Richtung der scheuen Zeitgenossen ließ sich erst durch riesige Wassertanks ermitteln, in denen einfallende Neutrinos eine Reaktion auslösen, die einen charakteristischen Lichtkegel (sog. Cherenkov-Licht) an die Behälterwände werfen.

Der größte dieser unterirdischen Tanks befindet sich in einer ausgedienten japanischen Mine: Der Super-Kamiokande-Detektor mit 50.000 Tonnen hochreinem Wasser und 11.200 Photomultipliern an der zylindrischen Behälterwand. Leider liegt die Schwellenenergie über 5 MeV und für Tau-Neutrinos ist das Verfahren gänzlich blind.

Damit wären wir bei den drei Neutrinosorten angelangt. Gemäß Standardmodell der Teilchenphysik gibt es Elektron-, Myon- und Tauneutrinos. Wie aber sollen wir sie im Detektor unterscheiden? Hierfür wurde in Sudbury (Kanada) – Sie werden es erraten: in einer ausgedienten Mine – ein Behälter mit sog. Schwerem Wasser aufgestellt. Darin kommt es zu unterschiedlichen Reaktionen



Zusätzlich ist auch eine Streuung an Elektronen möglich, gemäß



an der fast nur Elektroneneutrinos teilnehmen.

Die Mächtigkeit dieses Experiments zeigt sich darin, dass man sowohl eine Aussage darüber erhält, wie viele beliebige Neutrinos ν_x gemessen wurden, als auch darüber, wie viele Elektroneneutrinos ν_e eine Reaktion ausgelöst haben.

Die Messungen aller Detektoren bei unterschiedlichen Energieschwellen ergeben nun folgendes Bild:

- 1.) Wir messen nur etwa 1/3 der theoretisch berechneten solaren Elektroneneutrinos
- 2.) Wir messen zusätzlich solare Myon- und Tauneutrinos, die theoretisch in der Sonne nicht entstehen sollten.
- 3.) Wir messen deutlich mehr Myonneutrinos (sie entstehen durch Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit unserer Atmosphäre) von „oben“ als von „unten“ – oder mit anderen Worten: beim Durchqueren unseres Planeten gehen Myon-Neutrinos verloren.

Daraus leiten wir ab, dass sich Neutrinos der verschiedenen Sorten ineinander umwandeln können – sogenannte Neutrinooszillation.

Warum ist das nun so wichtig? Lange Zeit galten Neutrinos als masselos. Die theoretische Übergangswahrscheinlichkeit für eine Neutrinooszillation beträgt jedoch

$$P(\nu_x \rightarrow \nu_y) = \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 c^4 L}{4 E \hbar c} \right) \sin^2(2 \theta).$$

Sieht schlimmer aus als es ist, entscheidend ist der Term Δm^2 , der für die Differenz der Massenquadrate der Neutrinosorten steht. Vereinfacht man auf nur zwei Neutrinosorten, erhält man $\Delta m^2 = m_x^2 - m_y^2$. Für identische Neutrinomassen ($m_x = m_y$) wäre dieser Ausdruck null und somit die Wahrscheinlichkeit der Neutrinooszillation insgesamt null. Beobachten wir jedoch Neutrinooszillationen, so muss $\Delta m^2 \neq 0$ gelten, d. h. die Neutrinomassen der einzelnen Sorten müssen sich unterscheiden und können somit nicht allesamt gleich null sein.

Bezieht man drei Neutrinosorten mit ein, erhält man $\Delta m^2 = m_z^2 - \frac{m_y^2 + m_x^2}{2}$. Auch hier dürfen die Neutrinomassen nicht identisch sein, wenn der Gesamtausdruck zur Übergangswahrscheinlichkeit ungleich null sein soll.

Die Gleichungen gelten in dieser vereinfachten Form nur im Vakuum – durch Wechselwirkungen (Streuung) in Materie gibt es resonante Verstärkungen, den sog. MSW-Effekt (Michejew-Smirnow-Wolfenstein).

Für eine gute Statistik sind die Ereignisse solarer Neutrinos zu selten:

Homestake: 0,5 / Tag

Sudbury: 3 / Tag

Superkamiokande: 15 / Tag

Deshalb erzeugen wir Neutrinos lieber selber mit einer möglichst hohen, bekannten Energie. Beispielsweise werden im KEK-Beschleuniger (Japan) Protonen mit 12 GeV auf eine Aluminiumplatte geschossen. Dabei entstehen Pionen, die wiederum in Myonen und Myonneutrinos zerfallen. Die Myonneutrinos verfügen über sehr hohe Energie (GeV-Bereich), das erhöht ihre Wechselwirkungsrate dramatisch. Die Elektronneutrinos werden unmittelbar nach ihrer Entstehung gemessen, anschließend

legen sie rund 250 km Strecke zurück bis zum Superkamiokande-Detektor, um dort eine zweite Messung vorzunehmen. Statistisch konnten auf diese Weise von 151 ± 11 erwarteten Ereignissen 108 gemessen werden. Das stimmt nicht nur sehr gut mit den Prognosen der unterstellten Neutrinooszillationen überein, sondern darüber hinaus weisen die Neutrinos auch eine Verschiebung im Energiespektrum auf, die für derartige Oszillationen charakteristisch ist.

Welche obere Grenzen für die Neutrinomassen haben wir bislang ermittelt?

Masse (Elektronneutrino) $< 2,2 \text{ eV}$

Masse (Myonneutrino) $< 0,17 \text{ MeV}$

Masse (Tauneutrino) $< 15,5 \text{ MeV}$

Wie geht's jetzt weiter?

Auf Super-Kamiokande soll bis 2025 Hyper-Kamiokande folgen mit 20-facher Wassermenge in zwei zylindrischen Tanks mit insgesamt 99.000 Photomultipliern, die zusätzlich durch verbesserte Bauweise um 50 Prozent sensibler nach dem Cherenkovlicht fahnden sollen.

Der Reiz dieser Unternehmungen liegt stets darin, dass es sich sowohl um ein Meßgerät für die Welt des Allerkleinsten handelt, als auch um ein Objektiv für die Weiten des Alls.

1987 war beispielsweise in der Großen Magellanschen Wolke ein blauer Überriese mit 17 Sonnenmassen im Alter von gerade mal 20 Mio. Jahren als Supernova explodiert. Etwa 30 Neutrinos aus diesem spektakulären Stermentod konnten wir in unseren irdischen Detektoren nachweisen, elf davon allein in Kamiokande.

Es bleibt spannend – Fortsetzung folgt...