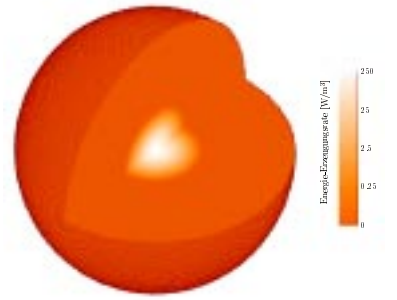
Neutrinos aus der Sonne

Das solare Neutrinoproblem

Was sind Neutrinos ?

Zu Beginn dieses Jahrhunderts stellte man fest, dass bei gewissen Kernreaktionen Energie zu verschwinden schien. Pauli postulierte daher Ende der 20er Jahre, dass es ein bis dahin unentdecktes Teilchen geben müsse, das in diesen Reaktionen entstehe und die fehlende Energie trage. Die Wechselwirkung dieses Teilchens mit anderen sei nur sehr gering und daher durchdringe es nahezu ungehindert jede Materie. Tatsächlich gelang es erst Mitte der 50er Jahre die Existenz dieses Teilchens, des „Neutrinos“, experimentell nachweisen. Gemäß dem heutigen Standardmodell der Teilchenphysik sind Neutrinos Elementarteilchen, die weder eine Ladung noch eine Masse besitzen. Gerade diese Eigenschaften sind es, die es so schwer machen Neutrinos experimentell zu messen und aufzuspüren. Während es als ziemlich gesichert gilt, dass Neutrinos ladungsneutral sind, ist ihre Masselosigkeit noch umstritten. Experimentell konnte bisher gezeigt werden, dass sie mindestens 100.000mal leichter sind als die Elektronen.

Energieproduktion in der Sonne



Figur 1 Die Sonne erzeugt ihre Energie durch Kernfusionen im Zentrum, bei denen auch die solaren Neutrinos entstehen. Der Durchmesser der Sonne beträgt etwa 1,4 Millionen Kilometer, die gesamte Leistung beträgt etwa ca. 400 Billiarden Gigawatt[1], wobei davon etwa 97,5% in Photonen (Licht) und 2,5% in Neutrinos abgestrahlt werden. Damit verliert sie pro Sekunde etwas über 4 Millionen Tonnen ihrer Masse ($E = mc^2$).

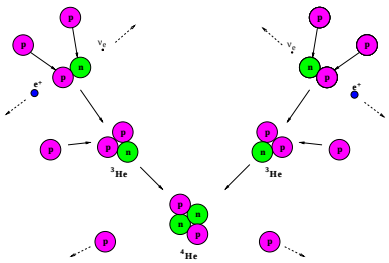
[1] Zum Vergleich: die Leistung des Kernkraftwerks Ohu beträgt 1,455 Gigawatt.

Wo entstehen Neutrinos in der Sonne ?

Die Sonne gewinnt die Energie in ihrem Innern durch das Verschmelzen insgesamt vierer Wasserstoffkerne, den Protonen, zu einem Heliumkern. Dabei müssen zwei der vier Protonen in Neutronen umgewandelt werden. Bei diesem Umwandlungs–Prozess entstehen unter anderem auch zwei Neutrinos (Figur 2). Nun findet die Erzeugung eines Heliumkerns aus vier Protonen nicht in einem einzelnen sondern in vielen Schritten und auf verschiedenen Wegen statt. Dabei entsteht ein Spektrum von Neutrinos mit verschiedenen Energien, welche die Sonne wegen ihrer geringen Wechselwirkung fast ungehindert verlassen (Figur 3). Da es sehr von den in der Sonne herrschenden Temperaturen abhängt, welche Wege zur Fusion von Helium bevorzugt werden, könnte man durch eine genaue Messung der Neutrino–Energieverteilung Aufschluss über die Bedingungen im Sonneninnern bekommen.

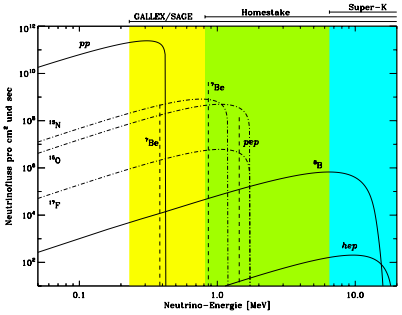
Die Sonnenneutrino–Experimente

Bisher gibt es vier verschiedene Experimente zur Messung der Sonnenneutrinos, deren Ziel es ist, verschiedene Energiebereiche des solaren Neutrinospektrums zu messen: GALLEX in Italien, SAGE in Russland, Homestake in den USA und (Super–)Kamiokande in Japan. Da GALLEX und SAGE praktisch dasselbe Nachweisverfahren verwenden, unterscheidet man im Grunde nur drei Experimente. Leider ist es mit den meisten Experimenten nicht möglich die Energie eines ankommenden Neutrinos zu messen, und daher kann nur der Gesamtfluss oberhalb detektorspezifischer Schwellenergien bestimmt werden (siehe Figur 3). Nur das Super–Kamiokande–Experiment besitzt eine gewisse Energieauflösung, so dass von diesem Detektor genauere Informationen erhältlich sind. Allerdings kann dieser Detektor im Gegensatz zu Homestake und GALLEX/SAGE nur die energiereichsten Neutrinos von der Sonne messen. Wegen der sehr niedrigen Wechselwirkung der Neutrinos mit Materie werden große Detektoren mit sehr langen Laufzeiten benötigt. Die Super–Kamiokande–Anlage enthält zum Beispiel 50.000 t reinsten Wassers, das sich am längsten in Betrieb befindliche Sonnenneutrino–Experiment, der Homestake–Detektor, läuft bereits seit mehr als 30 Jahren!



Figur 2 Die in der Sonne dominierende Fusionkette zur Erzeugung von Helium (^{4}He) aus 4 Protonen (p). Bei der Umwandlung eines Protons in ein Neutron (n) entstehen ein Positron (e^+, das Antiteilchen des Elektrons) und eine Elektron-Neutrino (ν_e). Die im Zwischenschritt benötigten zwei zusätzlichen Protonen werden am Ende wieder frei.

Das Neutrino-Spektrum der Sonne



Figur 3 Anzahl der auf der Erde pro cm² und Sekunde ankommenden Neutrinos, dabei entspricht z.B. 10^{12} einer Eins mit 12 Nullen, also einer Billion. Zur Unterscheidung der Neutrinos aus den verschiedenen Reaktionen werden sie entsprechend gekennzeichnet. *pp*-Neutrinos stammen z.B. aus der Reaktion in Figur 2. Die Balken oberhalb der farbigen Flächen markieren die Energie–Bereiche, in denen die einzelnen Detektoren messen.

Das solare Neutrinoproblem

Vergleicht man die aus den Sonnenmodellen vorhergesagten Neutrinozählraten mit den tatsächlich gemessenen Werten in den drei Detektoren, so zeigt sich, dass alle Experimente weniger messen als erwartet. Bereits in den ersten Ergebnissen des Homestake–Experiments ist diese Diskrepanz aufgetreten, und wurde von da an als „solares Neutrinoproblem“ bezeichnet. Man sollte dabei aber nicht vergessen, dass der bloße Nachweis von Neutrinos aus der Sonne bereits ein Beweis für die Vorhersage der Sternentwicklungstheorie ist, dass Sterne ähnlich der Sonne ihre Energie durch die Fusion von Wasserstoff gewinnen!

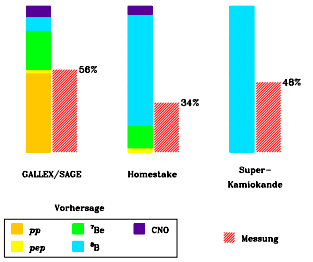
Während man früher, als nur die Homestake–Messungen zur Verfügung standen, das solare Neutrinoproblem mit ungenauer Physik in den Sonnenmodellen zu erklären versuchte, kann diese Lösung heutzutage aufgrund der Ergebnisse von GALLEX, SAGE und Super–Kamiokande schon nahezu ausgeschlossen werden. Gegen eine Erklärung des solaren Neutrinoproblems durch Manipulationen der Sonnenmodelle sprechen außerdem die Ergebnisse eines neueren Wissenschaftsgebietes, der „Helioseismologie“, die die Richtigkeit der Sonnenmodelle unterstützen.

Was ist Helioseismologie ?

Anfang der sechziger Jahre entdeckte man, dass die Oberfläche der Sonne mit einer Periode von etwa 5 min schwingt. Diese Eigenschwingungen der Sonne werden durch Schallwellen hervorgerufen, die durch die Sonne laufen, und sie dann zu globalen Schwingungen anregen. Wodurch diese Schallwellen ausgelöst werden, ist derzeit noch nicht ganz klar, was jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat, die Helioseismologen durch Messung dieser Schwingungen erzielen. Da die Frequenz dieser Eigenschwingungen von der inneren Struktur abhängt, erhält man durch Messung der Schwingungen der *Oberfläche* Informationen über das *Sonneninnere*. Dies ist vergleichbar mit der Geoseismologie, in der kleine Explosionen auf der Erde gezündet werden, um auf den inneren Aufbau der Erde zu schließen. Mittlerweile konnte man mit großer Genauigkeit eine Vielzahl von solaren Schwingungen verschiedenster Frequenzen identifizieren, wobei die stärksten eben eine Periode von 5 min besitzen. Vergleicht man die Ergebnisse der Helioseismologie mit Modellen der Sonne, welche unter anderem auch am Max–Planck–Institut für Astrophysik berechnet werden, so zeigt sich eine hervorragende Übereinstimmung. Sonnenmodelle sind damit eine der genausten Modelle, die es in der Astrophysik gibt.

Da es nur sehr geringe Unterschiede zwischen Modell und Messungen gibt, sind auch nur noch sehr beschränkt Manipulationen in der Physik möglich, die zu Berechnung der Modelle verwendet wird. Es ist somit sehr unwahrscheinlich, dass das solare Neutrinoproblem seinen Ursprung in zu wenig verstandenen physikalischen Vorgängen im Sonneninnern hat.

Die Ergebnisse der solaren Neutrinodetektoren



Figur 4 Vergleich der gemessenen Neutrinozählraten mit den aus den Sonnenmodellen vorhergesagten Werten. Durch die unterschiedlichen Schwellenergien in den einzelnen Detektoren können in jedem Experiment nicht Neutrinos aus allen Kernreaktionen gemessen werden. GALLEX und SAGE sind z.B. die einzigen Detektoren, die die *pp*-Neutrinos messen können. Letztere stammen aus der dominierenden Reaktion in der Sonne (Figur 2).

Die Lösung des solaren Neutrino–Problems ?

In den Kernfusionen im Zentrum der Sonne entstehen sogenannte „Elektron“–Neutrinos. Zusätzlich zu diesen Neutrinos gibt es allerdings noch zwei weitere Arten („Familien“), die μ– und τ–Neutrinos. Die derzeit bevorzugte Lösung des solaren Neutrinoproblems sind Neutrino–Oszillationen zwischen den Neutrino–Familien. Um diesen Effekt zu ermöglichen, muss man die Annahme des Standard–Teilchenmodells, dass Neutrinos masselos sind, fallen lassen und ein „Mischen“ zwischen den Neutrino–Familien erlauben. Dann kann sich ein Teil der im Sonneninnern entstandenen Elektron–Neutrinos auf dem Weg zur Erde in ein Neutrino der zweiten (μ–Neutrino) oder der dritten Familie (τ–Neutrino) umwandeln, welche in den Sonnenneutrino–Detektoren praktisch nicht gemessen werden können.

Die Ergebnisse von Homestake, GALLEX, SAGE und Super–Kamiokande erklärt man also damit, dass die Sonne soviele Elektron–Neutrinos erzeugt, wie in den Modellen vorhergesagt, allerdings nur ein Bruchteil davon auf der Erde als Elektron–Neutrino ankommt, und so ein geringerer Neutrinofluss der Sonne in den Experimenten vorgetäuscht wird. Die Anzahl der Elektron–Neutrinos, die sich auf dem Weg zur Erde in eine andere Neutrino–Familie umwandeln, hängt dabei von bisher unbekannten Eigenschaften der Neutrinos ab, wie etwa deren Masse. Passt man — wie dies auch am MPA durchgeführt wird — die vorhergesagten und gemessenen Neutrinoflüsse an, können diese Merkmale ermittelt werden. Man benutzt also die Sonne als ein Labor zur Bestimmung neuer Teilchen–Eigenschaften.

Aus den bisherigen Neutrino–Experimenten konnten noch nicht eindeutig die Eigenschaften der Neutrinos ermittelt werden. Mithilfe neuer Experimente wie SNO, das seit kurzem in Betrieb ist, oder Borexino soll es gelingen, das solare Neutrinorätsel endgültig zu lösen und damit auch die Merkmale der Neutrinos zu bestimmen.