

Sonnenneutrinos: zurück zur Astrophysik!

W. Hampel, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg

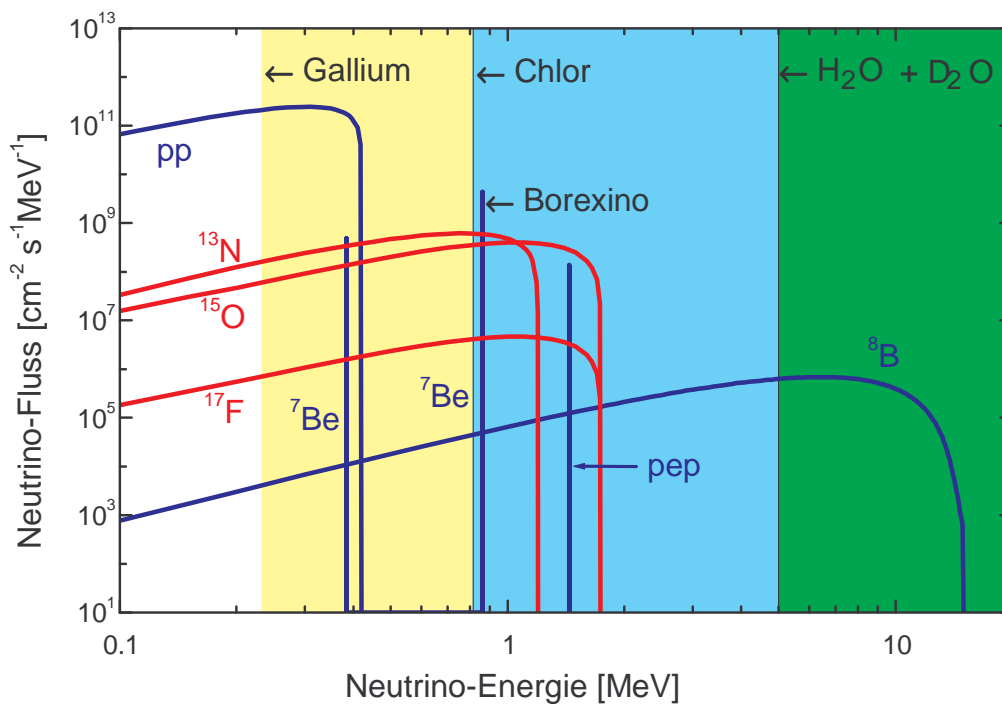
Nachdem der teilchenphysikalische Aspekt in den letzten Jahren dominierte, konzentriert sich die Sonnenneutrino-Forschung nun wieder auf ihren ursprünglichen Gegenstand, die Sonnenphysik. Eine Analyse aller Sonnenneutrino-Daten erlaubt den Schluss, dass der Anteil des CNO-Zyklus an der Energieerzeugung in der Sonne kleiner als 7,3% ist.

Im vergangenen Jahr wurden die beiden letzten noch fehlenden Mosaiksteine zur Lösung des sogenannten Sonnenneutrino-Problems gefunden. Im April erbrachte der SNO-Detektor im kanadischen Sudbury den Nachweis, dass die im Sonneninneren produzierten Elektron-Neutrinos (ν_e) am terrestrischen Detektor als eine Mischung aus Elektron-, Myon- und Tauon-Neutrinos (ν_e , ν_μ , ν_τ) ankommen [1]. Damit ist endgültig klar, dass die gemessenen Sonnenneutrino-Defizite aller sechs bisher durchgeführten Experimente durch Neutrino-Oszillationen verursacht werden und nicht etwa durch unser unzureichendes Verständnis der Neutrino-Produktion im Sonneninneren. Im Dezember schließlich zeigten die ersten Resultate des KamLAND-Detektors in der japanischen Kamioka-Mine, dass Anti-Neutrinos, die in japanischen und koreanischen Kernreaktoren einige hundert Kilometer vom Detektor entfernt produziert werden, ebenfalls oszillieren [2]. Dadurch wurden die zuvor noch möglichen Oszillations-Szenarien für Sonnenneutrinos auf einen kleinen Parameter-Bereich (die sogenannte Large-Mixing-Angle- oder LMA-Lösung) eingeschränkt [2].

Als jedoch Raymond Davis Jr. vor über vierzig Jahren seine Pionierarbeiten zum Nachweis von Sonnenneutrinos mit Hilfe eines radiochemischen Chlor-Detektors begann, für die er im letzten Jahr mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurde [3], war seine Motivation ausschließlich astrophysikalischer Natur. Davis wollte die Theorie der Energieerzeugung in der Sonne experimentell überprüfen, die Hans Bethe schon 1939 in seiner grundlegenden Arbeit zur Wasserstoff-Fusion in der Sonne aufgestellt hatte. Danach sind im Prinzip zwei verschiedene Reaktionszyklen möglich.

Der Proton-Proton-Zyklus (pp-Zyklus) beginnt mit der Verschmelzung von zwei Protonen zu einem Deuterium-Kern, während der Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus (CNO-Zyklus) durch die Anlagerung eines Protons an einen schon in der Sonnenmaterie vorhandenen ^{12}C -Kern ausgelöst wird. Einige der Reaktionen in den beiden Zyklen sind β -Zerfälle, die dabei erzeugten Elektron-Neutrinos (ν_e) machen den solaren Neutrino-Fluss aus. In der Summe ist das Ergebnis in beiden Reaktions-Zyklen das gleiche: Vier Protonen werden in ein α -Teilchen, zwei Positronen und zwei Elektron-Neutrinos umgewandelt.

In seiner Original-Arbeit kam Bethe noch zu dem Schluss, dass der CNO-Zyklus die Energieerzeugung in der Sonne dominiert. Heute geht man jedoch davon aus, dass dies nur bei Hauptreihensternen der Fall ist, die wesentlich massereicher als die Sonne sind. Der Grund hierfür liegt in der höheren Coulomb-Barriere für die Reaktionen des CNO-Zyklus; diese benötigen deshalb



Energiespektrum der Sonnenneutrinos aus dem pp-Zyklus (blau) bzw. dem CNO-Zyklus (rot) auf der Erde nach dem Standard-Sonnen-Modell [4]. Die verschiedenen Detektoren (Ga, Cl, H₂O, D₂O und Borexino) detektieren Sonnenneutrinos ab der jeweils eingezeichneten Energie-Schwelle (siehe Text).

höhere Temperaturen im Sternzentrum. In der Sonne sollte dagegen nach dem Standard-Sonnen-Modell (SSM) nur etwa 1,5% der Leuchtkraft durch den CNO-Zyklus erzeugt werden [4]. Die Abbildung zeigt das Energiespektrum der Sonnenneutrinos, wie es sich aus dem SSM ergibt. Die pp-, pep-, ⁷Be- und ⁸B-Neutrinos werden im pp-Zyklus erzeugt, während die Neutrinos des CNO-Zyklus aus den β⁺-Zerfällen von ¹³N, ¹⁵O und ¹⁷F stammen. Die bisher durchgeführten Sonnenneutrino-Experimente gliedern sich in zwei Typen. Das Chlorexperiment und die beiden Gallium-Experimente (GALLEX/GNO und SAGE) basieren auf dem radiochemischen Prinzip, bei dem nicht die eigentliche Neutrino-Reaktion beobachtet wird, sondern später die dabei produzierten Atomkerne aus dem Detektor extrahiert und nachgewiesen werden. Diese Detektoren können daher nur den integralen Neutrinofluss von ihrer jeweiligen Energieschwelle an (gewichtet mit dem Wirkungsquerschnitt als Funktion der Energie) messen (Abb.). Die übrigen drei Detektoren registrieren das Cherenkov-Licht, das durch Neutrinoreaktionen mit Elektronen oder Deuteriumkernen in großen Wasser- (Kamiokande und Super-Kamiokande) oder Schwerwasser-Tanks (SNO) erzeugt wird. Die Cherenkov-Detektoren können wegen des Untergrundes nur ab einer Neutrinoenergie von ca. 5 MeV messen, sie erfassen daher nur den hochenergetischen Anteil der ⁸B-Neutrinos aus dem pp-Zyklus (Abb.). Nur drei der sechs Experimente sind derzeit noch in Betrieb (GNO, SAGE und SNO).

Das Fernziel der experimentellen Sonnenneutrino-Forschung ist die direkte Messung der Neutrino-Intensität aller solaren Neutrinoquellen als Funktion der Neutrinoenergie. Damit könnten astrophysikalische Details des SSMs überprüft werden; so unter anderem auch die Frage, welchen Anteil der CNO-Zyklus an der Energieerzeugung in der Sonne hat. Zwar ist man von diesem Ziel noch weit entfernt und die direkte Messung der CNO-Neutrinos steht noch aus. Da jedoch die beiden radiochemischen Detektoren in ihrem Signal einen entsprechenden CNO-Anteil haben müssen (nach dem SSM beträgt dieser Anteil für beide Detektoren etwa 7% [4]), sind Aussagen über den CNO-Beitrag zur Sonnen-Leuchtkraft im Prinzip trotzdem möglich. In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit sind J. N. Bahcall und Mitarbeiter dieser Frage nachgegangen [5].

Dazu haben die Autoren eine globale Analyse aller Sonnenneutrino-Daten und des KamLAND-Ergebnisses unter Einschluss von Neutrino-Oszillationen durchgeführt, wobei der CNO-Anteil an der Gesamt-Leuchtkraft der Sonne willkürlich (abweichend vom SSM) variiert wurde. Die beste Verträglichkeit mit den Messdaten aller Experimente ergeben Sonnenmodelle mit einem geringen Anteil des CNO-Zyklus an der Leuchtkraft der Sonne. In der Tat liefert ein Sonnenmodell ganz ohne CNO-Beitrag den besten Fit an die Daten; es zeigt sich aber, dass der Fit nicht wesentlich schlechter wird, solange der CNO-Anteil kleiner als 5% bleibt. Aus den Untersuchungen lässt sich eine obere Grenze (3σ) für den CNO-Beitrag zur Leuchtkraft der Sonne von 7,3 % angeben.

Wie sind die Aussichten, diese experimentelle Obergrenze weiter zu verbessern oder gar einen Messwert zu erhalten? Die Gallium-Detektoren sind derzeit die einzigen Experimente, die die niederenergetischen Sonnenneutrinos (und damit auch die Neutrinos aus dem CNO-Zyklus) integral erfassen können. Das ist einer der Hauptgründe, die Messungen mit dem GNO-Detektor fortzusetzen. Die dadurch mögliche weitere Reduktion der statistischen und systematischen Fehler des GNO-Signals wird für zukünftige astrophysikalische Interpretationen der Sonnenneutrino-Daten dringend benötigt. Der kurz vor der Inbetriebnahme stehende Borexino-Detektor, dessen Hauptaufgabe die Messung der ^7Be -Neutrino-Linie (Abb.) ist [6], wird aller Voraussicht nach in der Lage sein, die CNO-Obergrenze auf etwa 5% zu reduzieren [5]. Langfristig schließlich ruht die Hoffnung auf der Entwicklung neuartiger Detektoren, die Sonnenneutrinos im MeV-Bereich und darunter in Echtzeit mit Energie-Information messen können [7].

- [1] *G. Drexlin*, Physik Journal, Juli/August 2002, S. 20.
- [2] *K. Eguchi* et al. (KamLAND Collaboration), Phys. Rev. Lett. **90**, 021802 (2003).
- [3] *T. Kirsten*, Physik Journal, Dezember 2002, S. 22.
- [4] *J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault* and *S. Basu*, ApJ **555**, 990 (2001).
- [5] *J. N. Bahcall, M. C. Gonzalez-Garcia* and *C. Pena-Garay*, Phys. Rev. Lett. **90**, 131301 (2003).
- [6] *G. Alimonti* et al. (Borexino Collaboration), Astropart. Phys. **16**, 205 (2002).
- [7] *S. Schönert*, NOON 2003, Kanazawa, Japan (www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/noon2003/).