

Spuren aus dem Sonneninneren

Das Borexino-Experiment konnte erstmals Neutrinos aus dem CNO-Zyklus in der Sonne nachweisen.

Georg Raffelt

Neutrinos sind nahezu masselose, elektrisch neutrale und extrem schwach wechselwirkende Elementarteilchen. Daher durchdringen sie Materie mühelos und erlauben es, einen Blick auf die Vorgänge im Inneren von Sternen zu werfen. Das gilt auch für die Sonne, die hellste Neutrinoquelle am Himmel. Mit dem Borexino-Experiment ist es nun erstmals gelungen, Neutrinos nachzuweisen, die aus den Kernreaktionen des CNO-Zyklus stammen [1].

Die Wasserstoff-Fusion in der Sonne und anderen Sternen läuft summarisch gemäß $4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e$ ab. Neutrinos tragen 2,3 Prozent der dabei freigesetzten Energie von 26,7 MeV. Die Fusion erfolgt anhand zweier Mechanismen, die in mehreren Schritten ablaufen: den drei pp-Ketten und dem CNO-Zyklus. Jede pp-Kette startet mit der Produktion von Deuterium: entweder mittels $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, wobei die Energie der Neutrinos unterhalb von 420 keV liegt, oder gemäß $p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$ (Abb. 1). Hinzu kommen Neutrinos aus dem Elektroneneinfang von ${}^7\text{Be}$ und dem Betazerfall von ${}^8\text{B}$. Mit den Daten, die der Szintillationsdetektor Borexino seit 2007 gesammelt hat,

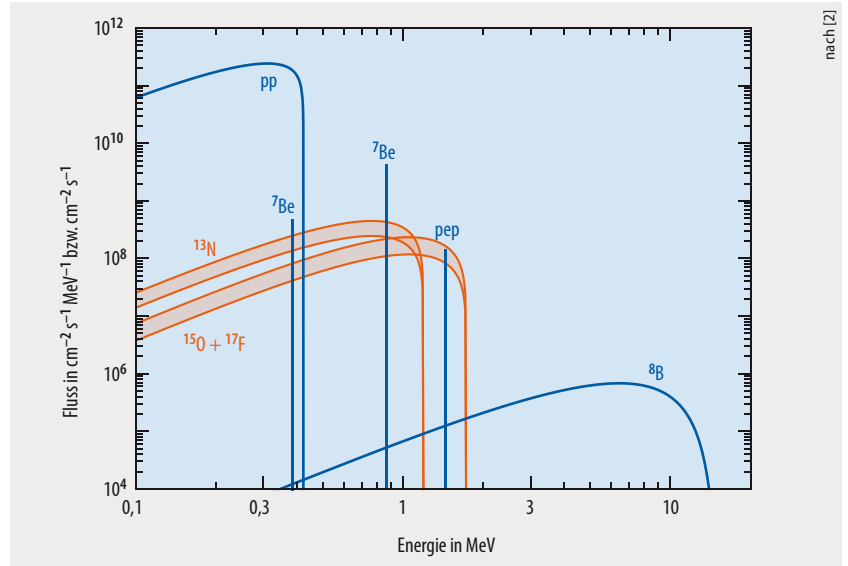


Abb. 1 Neutrinos aus der Sonne entstehen bei den Reaktionen der pp-Ketten (blau) und des CNO-Zyklus (orange). Die Häufigkeiten von Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff basieren auf zwei Sonnenmodellen, sodass sich für den Neutrinofluss aus den Reaktionen des CNO-Zyklus ein Bereich ergibt.

ließen sich alle diese Komponenten des Neutrinoflusses der Sonne spektroskopisch erfassen [3, 4]. Dagegen stand der direkte Nachweis von Neutrinos aus dem CNO-Zyklus noch aus. Beim CNO-Zyklus, auch Bethe-Weizsäcker-Zyklus genannt, fängt zunächst Kohlenstoff ein Proton ein: ${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$. Das Stickstoff-

Isotop ${}^{13}\text{N}$ ist instabil und zerfällt gemäß ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$. Durch zwei weitere Protoneneinfänge entsteht ${}^{15}\text{O}$ und nach dessen Betazerfall ${}^{15}\text{N}$. Ein weiterer Protoneneinfang schließt den Kreis: ${}^{15}\text{N} + p \rightarrow {}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$. Die CNO-Elemente wirken also nur katalytisch. Weil bei den Einfangreaktionen die Coulomb-Barriere zu überwinden ist, hängt der CNO-Zyklus stark von der Temperatur ab und trägt in leichten Sternen wie unserer Sonne nur ein Prozent zur Energieerzeugung bei. Entsprechend schwierig ist es, die zugehörigen CNO-Neutrinos nachzuweisen (Abb. 1).

Borexino detektiert mit Hilfe von Photomultipliern Neutrinos durch sekundäres Licht. Die Neutrinos streuen an den Elektronen der organischen Flüssigkeit Pseudocumol und lösen Szintillationslicht aus. Die Zahl der registrierten Photonen N_{hit} ist ein Maß für die Rückstoßenergie. Allerdings entspricht das daraus gewonnene Elektronenspektrum nicht mehr dem ursprünglichen Neutrinospektrum (Abb. 2). Für Antineutri-

Kurzgefasst

Doppelt flüssig

Im Phasendiagramm von Wasser soll es zwei unterkühlte flüssige Phasen geben: eine mit hoher Dichte und eine mit niedriger. Nun ist es einem internationalen Team erstmals gelungen, den Übergang zwischen den beiden Flüssigkeiten zu beobachten. Mit einem IR-Femtosekundenlaser erhitzen die Forschenden hochdichtes amorphes Eis isochor auf 205 K. Bei der anschließenden Expansion wiesen sie mit einem Röntgenlaser in einem Pump-Probe-Experiment eine diskontinuierliche Strukturveränderung nach, die sie als Flüssig-Flüssig-Übergang interpretierten.

Kyung H. K. et al., Science 370, 978 (2020)

Rätsel um Protonenradius

Mit normalem und myonischem Wasserstoff ergeben sich bei verschiedenen atomaren Übergängen für den Protonenradius Werte, die signifikant voneinander abweichen. Münchner Physiker haben nun aus den Frequenzen des 1S-2S- und des 1S-3S-Übergangs einen Wert von 0,8482(38) fm extrahiert, der deutlich näher am Ergebnis für myonischen Wasserstoff liegt als am CODATA-Wert aus dem Jahr 2014 – ähnlich wie andere aktuelle Untersuchungen. Um den experimentellen Wert mit den Vorhersagen der QED zu vergleichen, gilt es nun, die Unsicherheit weiter zu reduzieren.

A. Grinin et al., Science 370, 1061 (2020)

nos, deren Nachweis mit der Reaktion $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ erfolgt, entfällt diese „Verschmierung“ [5].

Die zentrale Herausforderung bei der Detektion der CNO-Neutrinos bestand darin, den Untergrund zu minimieren. Dazu gilt es, selbst geringste radioaktive Verunreinigungen zu vermeiden. Beispielsweise reicht das Kalium in einem Fingerabdruck aus, damit die Elektronen aus der Reaktion $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + \bar{\nu}_e + e^-$ das gesuchte Signal überstrahlen. Beginnend mit dem Vorläuferexperiment Counting Test Facility hat die Borexino-Kollaboration eine bisher einmalige Reinheit des Szintillators erzielt. Der Standort im italienischen Gran Sasso-Untergrundlabor nordöstlich von Rom hilft, störende Signale aus der kosmischen Strahlung abzuschirmen.

Das strukturlose Elektronenspektrum der CNO-Neutrinos verbirgt sich als ein Beitrag im gesamten gemessenen Spektrum (Abb. 2). Am kritischsten erweist sich die Verunreinigung durch ^{210}Bi , das beim Zerfall von ^{210}Pb entsteht, das teilweise aus Oberflächenverunreinigungen im Detektor stammt. Damit ^{210}Pb nicht unkontrolliert in den Bereich des Detektors gelangt, der für die Messung berücksichtigt wird, unterdrückt eine thermische Stabilisierung konvektive Strömungen in der Szintillatorflüssigkeit.

Die Messkampagne Phase-III fand vom Juli 2016 bis Februar 2020 statt. Aus diesen Daten lässt sich das Signal der CNO-Neutrinos durch einen Maximum-Likelihood-Fit aller Beiträge extrahieren: Die Signale aus den pp-Ketten ergaben sich aus früheren Messungen; von allen anderen Beiträgen war die spektrale Form bekannt. Für das Best-fit-Signal ergeben sich mit einer Signifikanz von 5σ rund sieben Ereignisse pro Tag in 100 Tonnen Detektormaterial. Das entspricht einem Neutrinofluss aus dem CNO-Zyklus von $7,0^{+3,0}_{-2,0} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Der erwartete Wert hängt von der solaren CNO-Konzentration ab [6], die an der Oberfläche spektroskopisch zu bestimmen ist. Die Sonne enthält 1,5 bis 1,9 Prozent Elemente, die schwerer als Wasserstoff und Helium sind, vor allem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Diese „schweren“ Elemente beeinflussen

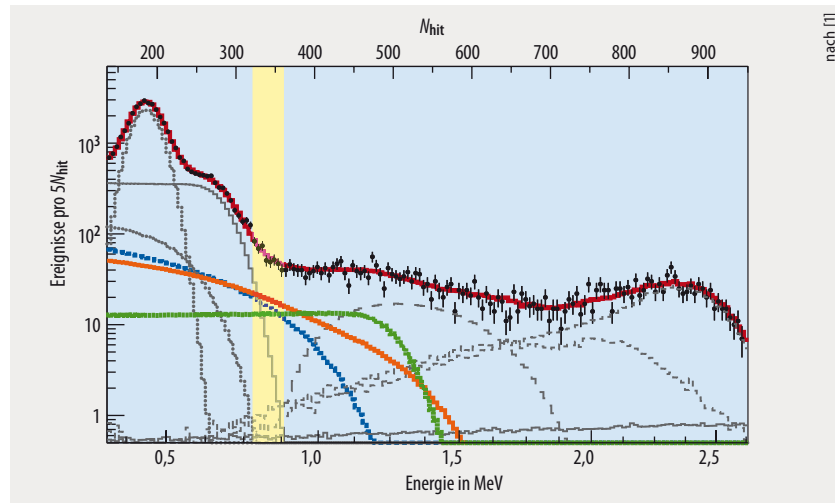


Abb. 2 Die Messpunkte (schwarz) und der Fit (rot) geben an, wie sich die Elektronenenergien verteilen, die sich aus der Anzahl nachgewiesener Szintillationsphotonen N_{hit} ergeben. Zwischen etwa 0,7 und 0,8 MeV (gelb) liefern die Elektronenrückstöße von CNO-Neutrinos (orange) den größten Beitrag. Dieser ist jedoch vergleichbar mit dem Störsignal aus dem Zerfall von ^{210}Bi (blau) und nur wenig größer als der Beitrag der pep-Neutrinos (grün). Zum gesamten Fit tragen weitere solare Neutrinos und Untergrund bei (grau). Borexino weist vor allem Elektronenneutrinos nach, die auf dem Weg aus der Sonne teilweise durch Flavourkonversion in Myon- und Tauneutrinos „verloren“ gehen; die Analyse berücksichtigt dies.

den Strahlungstransport und damit die detaillierte Struktur der Sonne. Helioseismologische Messungen liefern ein Schallgeschwindigkeitsprofil, das sich deutlich von demjenigen aus dem Standardmodell der Sonne unterscheidet. Ursache könnte eine CNO-Häufigkeit im Sonneninneren sein, die vom Wert an der Oberfläche abweicht. Daraus ergibt sich ein Neutrinofluss aus dem CNO-Zyklus von $3,0$ bzw. $5,6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Das Resultat der Borexino-Kollaboration bevorzugt den höheren Wert, der besser mit der Helioseismologie übereinstimmt, aber schlechter mit den spektroskopischen CNO-Häufigkeiten an der Oberfläche. Um diese Diskrepanz aufzuklären, wären genauere Messungen des Neutrinospektrums nötig.

Borexino hat mit der Bestimmung aller Neutrino Flüsse aus den pp-Ketten die selbstgesteckten Ziele erreicht; dieses neueste Ergebnis übertrifft sogar alle Erwartungen. Mit JUNO entsteht derzeit in China ein deutlich größerer Szintillationsdetektor mit 20 000 Tonnen Material. Er soll vornehmlich die Oszillationen von Antineutrinos aus einem Kernreaktor präzise messen. Dabei sind die Ansprüche an die Reinheit des Materials und an die Abschirmung in der Tiefe unter der Erde deutlich geringer

[7]. Daher scheinen die Chancen für einen erneuten Nachweis der CNO-Neutrinos im kanadischen SNOLAB besser zu stehen: Der Detektor SNO+, der derzeit in Betrieb geht, nutzt 780 Tonnen Szintillationsmaterial und liegt sehr tief unter der Erdoberfläche [8]. Daher bleibt zu hoffen, dass das spektakuläre Ergebnis von Borexino nur ein erster Schritt war, um Feinheiten des Sonneninneren und die fundamentalen Prozesse darin zu verstehen. Diese Erkenntnisse gilt es, auch auf andere Sterne zu übertragen.

[1] M. Agostini et al. (Borexino Coll.), *Nature* **587**, 577 (2020)
 [2] E. Vitagliano et al., *Rev. Mod. Phys.* **92**, 045006 (2020)
 [3] L. Oberauer, Das Neutrino bild der Sonne, *Physik Journal*, Februar 2020, S. 27
 [4] M. Agostini et al. (Borexino Coll.), *Nature* **562**, 505 (2018)
 [5] M. Agostini et al. (Borexino Coll.), *Phys. Rev. D* **101**, 012009 (2020)
 [6] N. Vinyoles et al., *ApJ* **835**, 202 (2017)
 [7] F. An et al. (JUNO Coll.), *J. Phys. G* **43**, 030401 (2016)
 [8] Näheres zu SNO+ unter bit.ly/2JvmeQ

Der Autor

Dr. Georg Raffelt, Max-Planck-Institut für Physik (Werner-Heisenberg-Institut), Föhringer Ring 6, 80805 München