

## ■ „Livestream“ aus dem Sonneninneren

Das Borexino-Experiment hat die niederenergetischen Neutrinos, die bei der Proton-Proton-Fusion in der Sonne entstehen, in Echtzeit detektiert.

Zur Energieerzeugung in der Sonne trägt zum überwiegenden Teil die Fusion von Wasserstoff zu Helium im sog. pp-Zyklus bei. Pro Reaktionskette, die sich als  $4\text{H} + 2\text{e}^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2\nu_e$  zusammenfassen lässt, wird dabei eine Energie von 26,7 MeV frei. Einen kleinen Beitrag liefert auch der sog. CNO-Zyklus, den Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker vor 75 Jahren mit ihren grundlegenden Arbeiten zur Energieerzeugung in Sternen als erste untersuchten. Aufbauend auf diesen Pionierarbeiten entwickelten John Bahcall (Princeton) und andere in den letzten Jahrzehnten ein detailliertes Modell dieser vielstufigen Fusionsprozesse, das sog. Standard-Sonnenmodell (SSM). Von besonderem Interesse sind dabei Neutrinos sehr geringer Energie ( $E_\nu < 0,42\text{ MeV}$ ), die am Anfang der pp-Fusionskette bei der Verschmelzung von zwei Protonen ( $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{d} + \text{e}^+ + \nu_e$ ) erzeugt werden. Das SSM sagt einen Fluss von  $6 \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$  dieser Neutrinos auf der Erde voraus, das entspricht 90 Prozent des Neutrinoflusses aller Fusionsreaktionen. Damit einher geht, dass rund 99 Prozent der Sonnenenergie aus dem pp-Zyklus stammen und nur der kleine Rest aus dem CNO-Zyklus. Diese theoretischen Vorhersagen konnte das Borexino-Experiment im italienischen Gran-Sasso-Untergrundlabor (Abb. 1) durch die erstmalige direkte Messung der niederenergetischen pp-Sonnenneutrinos in Echtzeit bestätigen [1]. Die dafür entwickelten Techniken zur Unterdrückung von störenden Untergrund-Ereignissen sind ein Triumph der Experimentierkunst.

In den letzten vier Jahrzehnten hat eine Vielzahl von Experimenten auf radiochemischer Basis (Homestake, GALLEX/GNO, SAGE) bzw. mit Echtzeitinformation (Super-Kamiokande, SNO) eine solide Datenbasis über Sonnenneutrinos geschaffen [2, 3]. Über drei Dekaden ergab sich dabei ein signifikantes

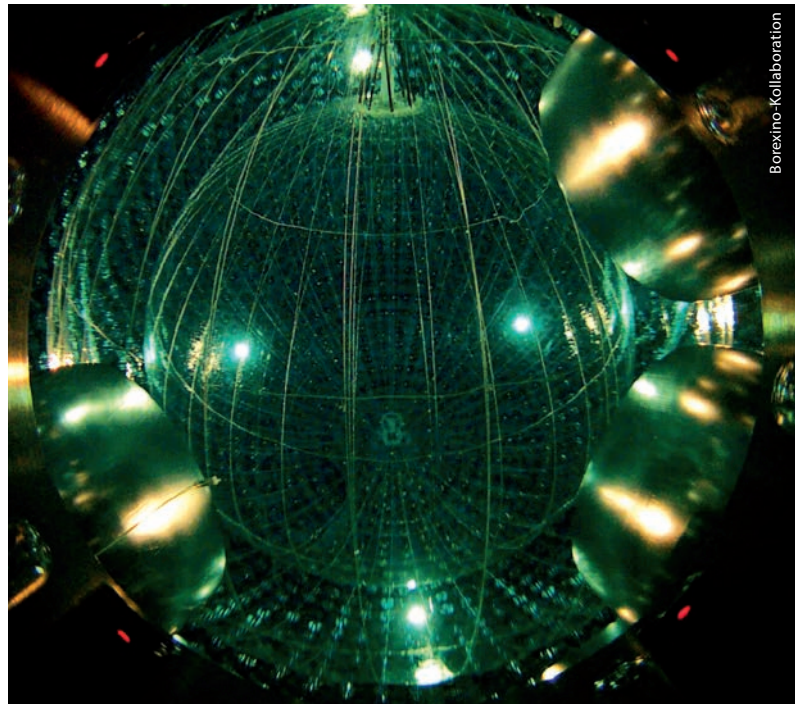


Abb. 1 Im Inneren des Borexino-Detektors sind 2212 Photomultiplier auf das mit 278 Tonnen Flüssigszintillator gefüllte transparente Nylon-Gefäß gerichtet. Sie detektieren das durch Neutrino-Wechselwirkungen erzeugte Szintillati-

onsicht. Zur Abschirmung ist das aktive Volumen von ca. 1000 Tonnen inaktiver Flüssigkeit umgeben; nach außen schließt sich als Myonen-Veto ein Wasser-Tscherenkow-Detektor an (nicht im Bild gezeigt).

und von der Energie abhängiges Defizit zwischen gemessenem und vorhergesagtem Neutrinofluss, das „Sonnenneutrino-Problem“. Im Jahr 2002 gelang es schließlich mit dem SNO-Experiment, dieses Rätsel zu lösen, und zwar durch den Nachweis von Neutrinos, die bei dem Beta-Zerfall von  ${}^8\text{B}$  zu  ${}^8\text{Be}$  entstehen (einer Teilreaktion des pp-Zyklus) [4]. Die Messungen, die ab einer Schwelle von 2,2 MeV und sowohl flavour-unabhängig als auch flavour-spezifisch durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich die im Sonneninneren erzeugten Elektroneneutrinos  $\nu_e$  auf ihrem Weg zur Erde teilweise in andere Flavour-Zustände ( $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) umwandeln können. Durch Einbeziehung unabhängiger Messungen des KamLAND-Experimentes ergibt sich ein Neutrinomischungsmodell, bei dem auch die Sonnenneutrinos stark mischen. Dabei verstärkt die Wechselwirkung mit Elektronen

im Sonneninnern durch den Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein-Effekt (MSW) die Umwandlung von höherenergetischen Elektroneneutrinos mit  $E_\nu > 2\text{ MeV}$  resonanzartig (Abb. 2). Da dies bei den niederenergetischen pp-Neutrinos nicht der Fall sein sollte, ist ihr direkter Nachweis auch für die Teilchenphysik besonders interessant.

Das Borexino-Experiment, zu dessen Aufbau und Messungen deutsche Gruppen in Hamburg, Heidelberg, Dresden, Mainz und München wesentlich beigetragen haben, hat seit 2007 wichtige neue Erkenntnisse zur Spektroskopie von Sonnenneutrinos bei  $E_\nu < 2\text{ MeV}$  geliefert. So gelang es mit Borexino erstmals, die monoenergetischen  ${}^7\text{Be}$ - und pep-Neutrinos ( $E_\nu = 0,86\text{ MeV}$  bzw.  $1,44\text{ MeV}$ ) direkt nachzuweisen. Ermöglicht wurden diese Messungen durch die extrem niedrige intrinsische Radioaktivität des 278 Tonnen um-

fassenden ultrareinen Flüssigszintillators (Abb. 1). Neutrinos erzeugen bei Wechselwirkungen mit Elektronen in diesem Volumen isotropes Szintillationslicht, dessen Intensität über 2212 Photomultiplier bestimmt wird. Für alle Detektorkomponenten sind die Anforderungen an die Reinheit extrem, da jedes radioaktive Nuklid im Szintillator oder den Strukturmaterialien zu störenden Untergrundreaktionen führen kann. Als Resultat jahrelanger Selektionsprozesse für besonders reine Materialien ist Borexino einer der untergrundärmsten Orte auf der Erde.

Nach der dreijährigen erfolgreichen ersten Messphase wurde Borexino 2010/2011 einer weiteren aufwändigen Reinigungskampagne unterzogen, um den Anteil störender Nuklide wie  $^{85}\text{Kr}$  und  $^{210}\text{Bi}$  auf ein Niveau zu reduzieren, welches eine gezielte Suche nach pp-Neutrinos erlaubt. Die Analyse der ersten neuen Messdaten von Januar 2012 bis Mai 2013 hat nun gezeigt, dass sich diese Anstrengungen gelohnt haben: Ein Multiparameter-Fit an das gemessene Energiespektrum von Ereignissen in einem inneren Volumen von  $86\text{ m}^3$  hat es ermöglicht, einen Beitrag von pp-Neutrinos

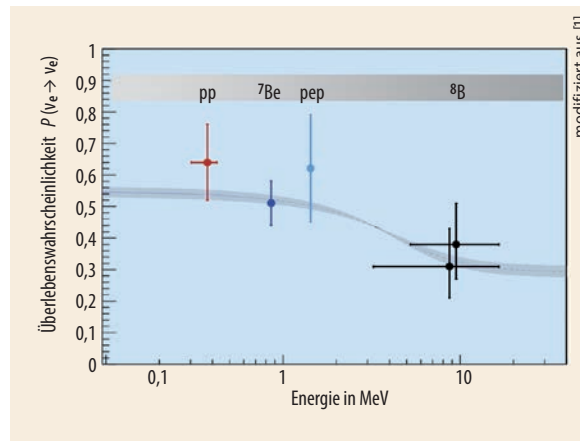


Abb. 2 Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein in der Sonne erzeugtes Elektroneneutrino  $\nu_e$  bis zum Nachweis auf der Erde „überlebt“, hängt von der Energie ab. Die Daten des Borexino-Experiments stimmen gut mit der Vorhersage des aktuellen Neutrino-Mischungsmodells überein (graue Kurve), bei dem oberhalb von 2 MeV ein Übergang zu materie-dominierter Mischung auftritt.

zweifelsfrei (Signifikanz:  $10\sigma$ ) nachzuweisen. Die gemessene Rate von  $144 \pm 13$  (stat.)  $\pm 10$  (syst.) pp-Neutrino-Ereignissen pro Tag (normiert auf eine Targetmasse von 100 t) entspricht einem Fluss von  $(6,6 \pm 0,7) \times 10^{10}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ , der sehr gut mit dem SSM-Wert übereinstimmt.

Für die Astrophysik bedeutet dieses Resultat einen grundlegenden Beitrag zum besseren Verständnis von Fusionsprozessen in sonnenähnlichen Sternen. Die gute Übereinstimmung der aus der pp-Rate (Neutrinos) und der Solar konstanten (Photonen) abgeleiteten Sonnenluminosität setzt darüber hinaus enge Grenzen für eine mögliche langfristige Variabilität der

Energieerzeugung in der Sonne. Dies ist möglich, da Photonen mehr als 100 000 Jahre für ihren Weg vom Sonneninnern zur Erde benötigen, während Neutrinos diese Strecke in acht Minuten zurücklegen.

Für die Teilchenphysik ist die aus dem Borexino-Resultat abgeleitete Überlebenswahrscheinlichkeit  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 0,64 \pm 0,12$  für pp-Neutrinos besonders relevant. Dieser Wert stimmt sehr gut mit der Erwartung aus bisherigen Neutrino-Oszillationsexperimenten und der Theorie des MSW-Effektes überein (Abb. 2).

Die Borexino-Ergebnisse verdeutlichen damit exemplarisch die Schlüsselrolle von Neutrinos an der Schnittstelle von Astrophysik und Teilchenphysik. Was bleibt zu tun? Borexino und andere Experimente werden zukünftig die Zusammensetzung des solaren Neutrino fluxes aus dem pp-Zyklus mit verbesserter Genauigkeit bestimmen. Besonders interessant wird die Jagd nach den bisher noch nicht beobachteten Neutrinos aus dem CNO-Zyklus, da ihr Nachweis den theoretischen Arbeiten von Bethe und Weizsäcker die letzte noch fehlende experimentelle Bestätigung geben würde.

Guido Drexlin und Kathrin Valerius

- [1] G. Bellini et al. (Borexino Collaboration), *Nature* **512**, 383 (2014)
- [2] L. Oberauer und M. Wurm, *Sterne und Weltraum*, Februar 2010, S. 30 und März 2010, S. 28
- [3] W. C. Haxton, R. G. H. Robertson und A. Serenelli, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51**, 21 (2013)
- [4] G. Drexlin, *Physik Journal*, Juli/August 2002, S. 20

Prof. Dr. Guido Drexlin und Dr. Kathrin Valerius, Karlsruhe Institut für Technologie, Institut für Kernphysik, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

## KURZGEFASST

### ■ Alles nur Staub?

Im März gaben Astronomen bekannt, sie hätten mithilfe des BICEP2-Teleskops am Südpol die sog. B-Mode der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung gemessen. Dies wäre der erste Hinweis auf Gravitationswellen aus der kosmischen Inflationsphase. Doch nun hat eine Analyse der Planck-Kollaboration gezeigt, dass auch Staub in unserer Galaxis das Signal verursachen könnte. Eine gemeinsame Analyse beider Kollaborationen soll in den nächsten Monaten Aufschluss darüber geben, ob Aufregung oder Ernüchterung angebracht ist.  
R. Adam et al. (*Planck Coll.*), arXiv 1409.5738, erscheint in *A&A*

### ■ Gedehnte Zeit

Bewegte Uhren gehen langsamer – diese zentrale Vorhersage der speziellen Relativitätstheorie wurde nun in einem Experiment an der GSI in Darmstadt erneut bestätigt. Die „Uhren“ wa-

ren dabei Lithium-Ionen, die sich mit 34 Prozent der Lichtgeschwindigkeit im Speicherring ESR bewegten. Die Experimentatoren aus u. a. Darmstadt, Garching und Mainz bestimmten mithilfe eines parallelen und eines antiparallelen Lasers die Doppler-Verschiebung der Frequenzen zweier Übergänge. Das Ergebnis bestätigt die Vorhersage mit einem Fehler von nur  $2 \cdot 10^{-9}$ , das ist viermal genauer als bisher.

B. Botermann et al., *Phys. Rev. Lett.* **113**, 120405 (2014)

### ■ Proton forever?

Supersymmetrische Theorien sagen voraus, dass Protonen äußerst selten in ein Kaon und ein Neutrino zerfallen können. Da der Neutrinodetektor Superkamiokande in 17 Jahren keinen solchen Zerfall beobachtet hat, muss die Halbwertszeit dafür größer als  $5,9 \cdot 10^{33}$  Jahre sein.

K. Abe et al. (*Superkamiokande Coll.*), *Phys. Rev. D* **90**, 072005 (2014)