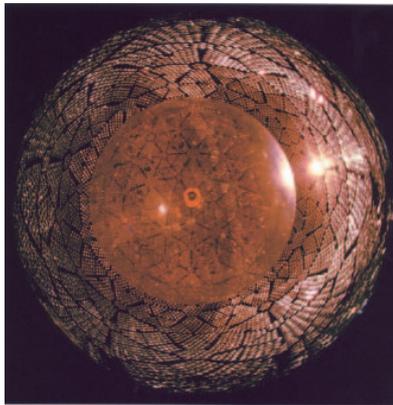


Rätsel der fehlenden Sonnenneutrinos gelöst

Die Kette der Erfolgsmeldungen aus der Neutrinophysik reißt nicht ab: Vor kurzem gelang dem *Sudbury Neutrino Observatory* (SNO) in Kanada der eindeutige Beweis, dass sich die im Sonneninnern erzeugten Elektron-Neutrinos ν_e auf ihrem Flugweg zur Erde in *andere* Neutrinoarten (Myon-Neutrinos ν_μ bzw. Tau-Neutrinos ν_τ) umwandeln [1]. Damit ist geklärt, dass das seit langem beobachtete Defizit an Sonnenneutrinos nicht auf einem fehlerhaften Sonnenmodell beruht, sondern

Im SNO-Detektor führen Reaktionen von Sonnenneutrinos in 1000 t Schwerwasser (D_2O) zur Emission von Cherenkov-Licht. Dieses wird von 9500 Photomultipliern nachgewiesen, die an einer geodätischen Stahlkugel befestigt sind (Foto: SNO)



seinen Ursprung in der von Null verschiedenen Ruhemasse der Neutrinos hat. Dieser experimentelle Durchbruch bildete auch das absolute *Highlight* der Ende Mai in München durchgeführten großen internationalen Neutrinokonferenz [2].

Seit den Pionier-Messungen von Ray Davis mit dem Homestake-Experiment Ende der 60er Jahre beschäftigt Astronomen und Teilchenphysiker das Problem der „fehlenden“ Sonnenneutrinos: Die gemessene Rate liegt um einen Faktor 2 bis 3 unter den Erwartungen des Standardsonnenmodells (SSM). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass radiochemische Detektoren (Galex/GNO, SAGE, Homestake) und Cherenkov-Detektoren (Super-Kamiokande) zum Nachweis von ν_e ausgelegt sind und damit „nur“ das Fehlen dieser Neutrinoart feststellen können. Bei den Fusionsreaktionen des Wasserstoff-Zyklus (pp-Zyklus) im Sonneninnern werden ausschließlich ν_e erzeugt: ein hoher Fluss niederenergetischer ν_e mit Energien bis 0,42 MeV (pp-Neutrinos), Neutrinos mit einer scharfen Energie von 0,86 MeV aus dem sog. ^7Be -Zweig, sowie ein geringer Fluss an Neutrinos mit hohen Energien

bis 14 MeV aus dem sog. ^8B -Zweig. Das Neutrinodefizit lässt sich erklären, wenn Neutrinos eine Masse haben. In diesem Falle können sich die ν_e auf ihrem Flugweg in andere Arten umwandeln („oszillieren“), sodass auf der Erde eine Mischung aus ν_e , ν_μ und ν_τ ankommen sollte. Ein Sonnenneutrino-Detektor, der für alle Neutrinoarten gleich sensitiv ist, kann daher feststellen, ob das gemessene Defizit auf diesen Umwandlungsprozessen beruht.

An diesem Punkt setzt das SNO-Experiment an, das nur auf die ^8B -Neutrinos reagiert. Mitte der 80er Jahre erkannte Herb Chen, der inzwischen leider verstorbene Gründer von SNO, dass das Deuteron (d) ein idealer Targetkern zur Messung des *Gesamtflusses* dieser hochenergetischen Sonnenneutrinos ist. Ermöglicht wird dies durch Reaktionen, bei denen das Deuteron durch die ν -Streuung aufgespalten wird: $\nu + d \rightarrow p + n + \nu'$ (sog. NC-Reaktion, *neutral current*). Entscheidend hierbei ist, dass dieser Prozess durch ν_e , ν_μ und ν_τ gleichermaßen induziert werden kann. Die entstehenden Neutronen werden am Deuteron eingefangen, wobei γ -Quanten mit 6,25 MeV entstehen, die zum Nachweis der NC-Reaktion dienen. Parallel dazu erlaubt die Reaktion $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ (sog. CC-Reaktion, *charged current*) die selektive Messung der ν_e -Komponente des ^8B -Flusses. Herb Chen schlug daher vor, einen großen, auf Schwerwasser (D_2O) basierenden Neutrinodetektor in der Creighton-Mine bei Sudbury in der kanadischen Provinz Ontario aufzubauen.

Nach Fertigstellung eines großen Messraumes in einem 2000 m tiefen Schacht der Mine wurde 1994 mit dem Bau des SNO-Detektors (s. Foto) begonnen. Das Nachweisvolumen für Sonnenneutrinos umfasst 1000 t reines Schwerwasser (D_2O). Extreme Anforderungen ergaben sich an den Gehalt an radioaktiven Isotopen $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ im D_2O , der unter 10^{-14} (d. h. $< 10 \mu\text{g}/1000 \text{ t}$) gehalten werden musste. Dies erforderte eine sorgfältige Materialselektion und die Entwicklung spezieller Reinigungssysteme.

In einer ersten Publikation [3] beschränkte sich SNO auf die Analyse der CC-Reaktion am Deuteron, mit der das seit langem beobachtete ν_e -Defizit aus dem ^8B -Zweig bestätigt wurde. Die nun veröffentlichten Resultate [1] zum gesamten Fluss an ^8B -Neutrinos sind das eigentliche

„Schlüsseergebnis“ von SNO.

Die von SNO beobachteten 580 NC-Ereignisse entsprechen einem Gesamtfluss von ^8B -Sonnenneutrinos von $5,09 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, der in sehr guter Übereinstimmung steht mit der Erwartung aus dem SSM von $5,05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (das Experiment hat einen statistischen und systematischen Fehler von je $\pm 9\%$, die SSM-Vorhersage eine Unsicherheit von $\pm 20\%$). Es gibt also keine „fehlenden“ Sonnenneutrinos: Uns erreicht der volle vom SSM vorhergesagte ^8B -Neutrinofluss, d. h. unsere Modelle vom Ablauf der Fusionsreaktionen im Sonneninnern sind korrekt.

Die NC-Reaktion erlaubt keine Aussage, welche Neutrinoarten (ν_e , ν_μ oder ν_τ) uns auf der Erde erreichen. Der Anteil an ν_e lässt sich jedoch aus der Analyse der CC-Reaktion am Deuteron bestimmen. Der mit SNO gemessene ν_e -Fluss ist um einen Faktor 3 kleiner als der Gesamtfluss, d. h. auf der Erde kommt eine Mischung aus ca. $1/3 \nu_e$ und ca. $2/3 \nu_\mu$ und ν_τ an. Da bei den Fusionsreaktionen in der Sonne *keine* ν_μ und ν_τ erzeugt werden, ist der von SNO bestimmte Fluss an ν_μ und ν_τ von $(3,41 \pm 0,65) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ein eindeutiges Signal (Signifikanz $5,3 \sigma$) für Neutrinoumwandlungsprozesse. Damit hat SNO das seit 30 Jahren bestehende Sonnenneutrinoproblem gelöst: Die „fehlenden“ ν_e haben sich in ν_μ und ν_τ umgewandelt.

Offen bleibt der genaue Mechanismus des Umwandlungsprozesses von Sonnenneutrinos. Weitere SNO-Resultate [1] in Verbindung mit bisherigen Sonnenneutrinoexperimenten deuten jedoch auf eine konsistente Lösung hin: Demnach oszillieren Neutrinos nicht erst auf dem langen Flugweg zur Erde, sondern bereits im Sonneninnern. Zusätzlich werden die Oszillationen noch durch die Wechselwirkung von Sonnenneutrinos mit den Elektronen der Sonnenmaterie beeinflusst (MSW-Effekt). Die Untersuchung dieses Effektes sowie die genaue Festlegung der Oszillationslänge und Oszillationsamplitude von Sonnenneutrinos erfordert zusätzliche experimentelle Anstrengungen. In weiteren Messungen von SNO sollen daher die bisherigen Resultate verfeinert werden. Einen entscheidenden Durchbruch erhofft man sich ferner vom bereits angehenden Reaktor-neutrinoexperiment Kamland in Japan sowie von

Dr. Guido Drexlin,
Inst. für Kernphysik,
Forschungszentrum
Karlsruhe, 76021
Karlsruhe

Borexino im italienischen Gran Sasso Labor, das ab 2003 erstmals selektiv die Neutrinos aus dem ${}^7\text{Be}$ -Zweig nachweisen kann.

Die experimentelle Neutrino-Physik befindet sich in einem „goldenen Zeitalter“: Nachdem 1998 die Oszillation von atmosphärischen Neutrinos $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ durch das japanisch-amerikanische Super-Kamiokande-Experiment beobachtet wurde, stehen wir dicht vor der Aufklärung der Oszillationseffekte bei den Neutrinos. Dass die Umwandlungen der solaren und atmosphärischen Neutrinos groß bzw. sogar maximal sind, ist eine der großen Überraschungen der bisherigen Experimente, die die Theorie herausfordern. Eine weitere Überraschung könnte die für die Theorie ebenso wichtige absolute Massenskala von Neutrinos liefern. Diese fundamentale Größe bleibt auch nach den SNO-Resultaten weiterhin unbekannt, da Oszillationsexperimente wie SNO nur Massendifferenzen messen können. Hier kommt zukünftigen Experimenten zum Doppelbetazerfall und Tritiumbetazerfall wie KATRIN eine Schlüsselrolle zu.

Rückblickend verdeutlicht die Historie der Sonnenneutrinos mit über drei Jahrzehnten großer experimenteller Anstrengungen und dem nun gelösten Rätsel der fehlenden Sonnenneutrinos einmal mehr, dass die Grundlagenforschung langfristig angelegt sein muss.

GUIDO DREXLIN

- [1] Q. R. Ahmad et al., nucl-ex/0204008 und nucl-ex/0204009
- [2] Vortragskopien der Konferenz unter <http://neutrino2002.ph.tum.de/>
- [3] Q. R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 071301

Spuren im Sand

Wer am Strand mit bloßen Füßen spaziert, wird rasch spüren, dass der Sandboden meist eine gerippte Oberfläche aufweist. Die mehrere Zentimeter großen streifenförmigen Rippeln entstehen durch das periodische Auf- und Abströmen der Brandungswelle. Ähnliche Naturphänomene kennt man – auf viel größerer Skala – von den riesigen Sandmeeren in den Wüsten der Erde. Bis heute ist nicht im Detail verstanden, wie sich die Sandmassen unter dem Einfluss von Wind- oder Wasserströmungen verformen

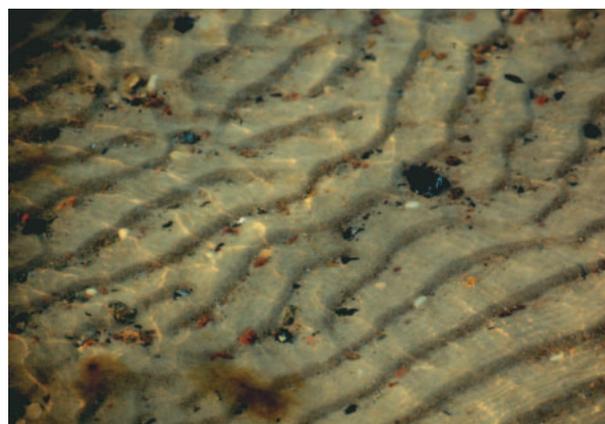
und bewegen, eine wichtige Thematik für die Wüstenländer oder für die küstennahe Schifffahrt. Gilt es doch, die „Versandung“ von Wasserstraßen (z. B. in der Scheldemündung) vorherzusagen und mit geeigneten Maßnahmen eventuell entschärfen zu können. So könnte der Stadt Antwerpen ein ähnliches Schicksal erspart bleiben wie Brügge, das durch die seit dem 14. Jahrhundert begonnene Versandung des Zwin seine Funktion als Seehafen verloren hat. Neben den Wasserbauingenieuren und den Geowissenschaftlern haben diese grundlegenden Phänomene der Dünenentstehung in den vergangenen Jahren starkes Interesse auch bei den Physikern geweckt. Sie bilden ein Kernproblem der neuen Disziplin „Physik der granularer Materie“.

Einer dänisch-deutschen Forschergruppe ist es kürzlich gelungen, einen wichtigen Beitrag zur bisher ungeklärten Frage „Wie entwickeln sich Sandrippeln, wenn sie einer oszillatorischen Wasserströmung ausgesetzt sind?“ zu leisten [1]. Andersen et al. gelang es mit Hilfe von modernen Datenanalysemethoden und unter Einbeziehung von experimentellen Resultaten, ein quantitativ und nicht nur qualitativ befriedigendes Modell für die zeitliche Evolution der Rippelmuster zu entwickeln. Das Modell [2] betrachtet den Massentransport (Austausch von Sandkörnern) zwischen benachbarten Rippeln, die durch turbulente Strömungswirbel zwischen den Rippelkämmen verursacht werden. Diese so genannten „Vortex-Rippeln“ wurden schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Ayrton und später intensiv von Bagnold in Laborexperimenten untersucht [3].

Im Kopenhagener Experiment wird das periodische Auf- und Abfließen einer Brandungsströmung in einem ringförmigen, mit Wasser gefüllten Kanal simuliert, dessen Boden mit einer Sandschicht bedeckt ist. Der Kanal ist auf eine bewegliche Scheibe montiert, die über eine Pleuelstange mit einem Motor verbunden ist, und kann somit um die Ringachse hin- und herbewegt werden. Rippeln entstehen, wenn der Kanal zu periodischen Drehschwingungen um die Ringachse angeregt wird. Ähnliche Schwingapparate existieren schon seit Ende der 1990er Jahre auch in Austin/Texas und Paris [4]. Zu Beginn des Experiments werden durch Oszillationen

mit kleiner Amplitude etwa 50 kleine Rippeln (mittlere Größe ca. 3 cm) auf der Sandoberfläche erzeugt. Anschließend wird die Schwingungsamplitude auf 6 cm erhöht. In den folgenden 20 Minuten lässt sich beobachten, wie die kleinen Rippeln wachsen, teilweise miteinander verschmelzen und sich schließlich ein stabiles gleichförmiges Muster aus ca. 20 größeren Rippeln bildet.

Um die Dynamik zu simulieren, betrachten die Autoren, welche Sandmenge ein Rippel während einer Schwingung mit seinen beiden Nachbarn austauscht. Dadurch ändert sich die (Wellen)länge λ_j , d.h. der Abstand zwischen Rippelkamm j und seinem Nachbarn $j+1$, gemäß der Massenbilanzgleichung $d\lambda_j/dt = -f(\lambda_{j-1}) + 2f(\lambda_j) - f(\lambda_{j+1})$. Das Modell setzt voraus, dass die Wechselwirkungsfunktion f , die den (dimensionlos gemachten) Massenverlust bzw. -gewinn des j -ten Rippels pro Zeiteinheit angibt, allein von der Rippelgröße λ abhängt. Nun kommt



es darauf an, diese Funktion $f(\lambda)$ zu finden. Dafür wurden in der Vorgängerarbeit [2] einfache, konvexe Testfunktionen verwendet, die lediglich die Bedingungen erfüllen, dass sie bei einer charakteristischen Länge λ_c ein Maximum besitzen und für $\lambda \rightarrow 0$ und $\lambda \rightarrow \lambda_{\max}$ verschwinden. Auf diesen „cartoonartigen“ Modellfunktionen basierende Simulationen lieferten ein qualitativ ähnliches Szenario (Selektion einer stabilen Rippellänge) wie die jetzt vorgestellten Experimente.

In der aktuellen Veröffentlichung gehen die Autoren einen Schritt weiter. Die Wechselwirkungsfunktion wird direkt aus den experimentellen Daten gewonnen. Hierfür wird eine neue Analyseverfahren verwendet, die man als „nichtlineare, nichtparametrische Regression“ bezeichnen kann. Sie wurde 1985 von L. Breiman und J. H. Friedman

Jeder kennt die Rippeln im Sand, die durch das Auf- und Abströmen des Wassers am Strand entstehen. Warum sie entstehen, ist aber noch nicht vollständig verstanden (Foto: C. Krülle)