

# Wandelbare Geisterteilchen

Für ihre Arbeiten zu Neutrinooszillationen erhalten Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald den Physik-Nobelpreis 2015.

Guido Drexlin, Manfred Lindner und Christian Weinheimer

Mit Hilfe langwieriger und herausfordernder Messungen mit den beiden Experimenten SNO und Super-Kamiokande ließen sich die über viele Jahre bestehenden Probleme der „fehlenden“ Sonnen- und Atmosphärenneutrinos lösen. Dadurch gelang es, die Hypothese zu bestätigen, dass sich Neutrinos im Flug von einer Sorte in eine andere umwandeln. Als Leiter der Kollaborationen haben die beiden diesjährigen Nobelpreisträger damit die Tür zur weiteren Erforschung der Eigenschaften dieser faszinierenden Teilchen weit aufgestoßen.

**D**er diesjährige Physik-Nobelpreis ehrt einen der wichtigsten experimentellen Durchbrüche der Physik in den letzten Jahrzehnten. Der erstmalige experimentelle Nachweis der Oszillation von atmosphärischen Neutrinos mit dem Super-Kamiokande-Detektor in Japan und der Nachweis von Flavour-Übergängen von solaren Neutrinos mit dem Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Kanada zeigten um die Jahrtausendwende, dass Neutrinos entgegen den Annahmen des Standardmodells der Teilchenphysik eine von Null verschiedene Masse besitzen.

In den Neunzigerjahren gab es zwei große Rätsel im Zusammenhang mit Neutrinos. Zum einen „fehlten“ Sonnenneutrinos: Eine Vielzahl an Experimenten (Homestake, GALLEX/GNO, SAGE, Kamiokande) stellte ein signifikantes Defizit an Elektronenneutrinos aus der Sonne fest. Die Anzahl der Elektronenneutrinos, die bei den Kernfusionsreaktionen von Wasserstoff zu Helium im Sonneninnern entstehen, lässt sich gut vorhersagen, sodass entweder neue Astrophysik oder neue Neutrino-



ICRR Universität Tokio

Im Super-Kamiokande-Detektor reinigt ein Forscherteam die etwa 11 000 Photo-

multiplier. Anschließend wird das Volumen komplett mit Reinstwasser gefüllt.

Eigenschaften zur Lösung des Rätsels notwendig waren. Zum anderen fanden sich zu wenige atmosphärische Myonenneutrinos: Trifft kosmische Strahlung die obere Atmosphäre, entstehen durch Zerfälle von Pionen und Myonen Neutrinos. Das Flavour-Verhältnis von Myon- zu Elektronenneutrinos sollte dabei 2:1 betragen. Analysen großvolumiger Wasser-Cherenkov-Detektoren (Kamiokande, IMB) wichen aber mit einem Verhältnis von fast 1:1 deutlich davon ab.

In beiden Fällen wurde frühzeitig das Phänomen der Neutrinooszillation als mögliche Ursache in Betracht gezogen. Am besten zeigt sich dies bei der Untersuchung von atmosphärischen Neutrinos. Hierbei übernahm das Kamiokande-Experiment eine Pionierrolle. Die schon damals von Takaaki Kajita mitgestalteten Analysen zeigten ein überraschendes Defizit von unten kommender Myonenneutrinos, trotz eines symmetrisch aufgebauten Detektors [1].

Da die Statistik dieser frühen Untersuchungen aber nicht für weitergehende Analysen ausreichte, initiierte Kajitas Doktorvater, Masatoshi Koshiba (Physik-Nobelpreis 2002), den Bau des Super-Kamiokande-Detektors gemäß dem zentralen Leitmotiv der Neutrino-physik „think big“. Dieser 50 000 Tonnen schwere Wasser-Cherenkov-Detektor befindet sich in der Kamioka-Mine in der japanischen Provinz Gifu. In einer Tiefe von etwa einem Kilometer ist er gegen Untergrundprozesse durch die kosmische Strahlung gut abgeschirmt. Atmosphärische Myonenneutrinos erzeugen über einen Prozess der schwachen Wechselwirkung im Detektor Myonen. Typischerweise bewegt sich ein solches Myon mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Wasser (ca. 225 000 km/s). Dadurch kommt es – ähnlich wie bei einem Mach-Überschallkegel – zu einer kegelförmigen Abstrahlung von Cherenkov-Licht, welches rund

Prof. Dr. Guido Drexlin, KIT, Karlsruhe; Prof. Dr. Manfred Lindner, MPIK, Heidelberg; Prof. Dr. Christian Weinheimer, Uni Münster



G. Drexlin und C. Weinheimer



D. Parno

Takaaki Kajita (links) erklärte während der DPG-Schule „Neutrino Physics: From the Laboratory to the Cosmos“ im Physikzentrum Bad Honnef die Grundlagen der Neutrinooszillation.

Arthur B. McDonald (rechts) sprach auf dem Festsymposium anlässlich des siebzigsten Geburtstags seines langjährigen Weggefährten R. G. Hamish Robertson in Seattle.

11 000 Photomultiplier (Abb.) registrieren. Daraus lassen sich die Richtung und die Energie des Neutrinos bestimmen. Das beobachtete Abbild des Cherenkov-Rings erlaubt es, Myonenneutrinos (scharfe Ringe) von Elektronenneutrinos (unscharfe Ringe) gut voneinander zu trennen.

Etwas mehr als zwei Jahre nach Inbetriebnahme von Super-Kamiokande im April 1996 wurde die Fachwelt zur internationalen Neutrino-Konferenz 1998 nach Takayama eingeladen. Takaaki Kajita, damals der Leiter der Gruppe zu atmosphärischen Neutrinos, berichtete am 6. Juni 1998 über die ersten Resultate von Super-Kamiokande: Während sich die Elektronenneutrinos wie erwartet verhielten, gab es bei den Myonenneutrinos – in Übereinstimmung mit den früheren Messungen – ein klares Defizit von unten kommender Neutrinos. Charakteristisch für diese Myonenneutrinos ist die lange Wegstrecke von der Quelle bis zum Detektor, die maximal dem Erddurchmesser entspricht. Von oben kommende Myonenneutrinos mit einer kurzen Flugstrecke von etwa 20 Kilometern zeigten hingegen kein Defizit. Diese vom Zenitwinkel der Myonenneutrinos abhängigen Effekte (Abb. 1) ließen sich sehr gut mit der Annahme erklären, dass sich im Flug ein bestimmter Anteil der ursprünglichen Myon- in Taunenneutrinos umwandelt. Für Taunenneutrinos ist der Detektor weitgehend blind. Takaaki Kajita beendete seinen Vortrag mit der

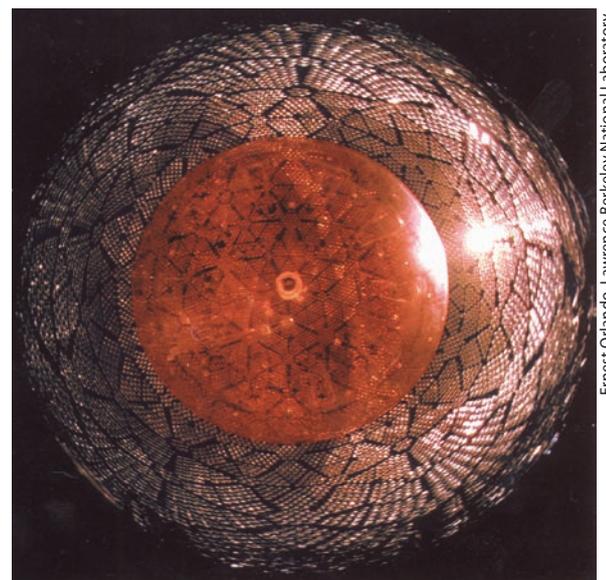
Schlüsselaussage: „I conclude neutrino oscillations with 6.2 sigma.“ Daraufhin gab es minutenlange Standing Ovationen. Am Folgetag ließ sich die New York Times sogar zur Titelschlagzeile „mass found in elusive particle – universe may never be the same“ hinreißen. Der lang ersehnte Beweis für Neutrinooszillation war erbracht [3].

Dieses Resultat einer sehr großen (und möglicherweise maximalen) Mischung von Myon- und Taunenneutrinos ist von grundlegender Bedeutung für unser Verständnis von Neutrinos. Die experimentelle Beobachtung, dass Neutrinos ihren Flavourzustand ändern, bedeutet, dass Neutrinos – entgegen den ursprünglichen Annahmen des Standardmodells – eine von Null verschiedene Masse besitzen. Bei der Neutrinooszillation handelt es sich um ein quantenmechanisches Interferenzphänomen. Daher ist es mit diesen Experimenten nicht möglich, die drei Neutrinomassen direkt zu bestimmen. Stattdessen erhält man die damit verbundenen Differenzen zwischen quadratischen Neutrinomassenwerten  $\Delta m_{ij}^2$  und die Mischungswinkel der PMNS-Matrix  $U$  (Infokasten).

### Der Wandel der Sonnenneutrinos

Auch das zweite Neutrinorätsel der fehlenden Sonnenneutrinos wurde frühzeitig mit der Neutrinooszillation in Verbindung gebracht. In sei-

nem Pionier-Experiment wies Ray Davis (Physik-Nobelpreis 2002) die durch Kernfusion im Sonneninneren entstehenden Elektronenneutrinos zwar seit Anfang der 1970er-Jahre in der Homestake-Mine nach. Allerdings beobachtete er eine deutlich geringere Anzahl als theoretisch erwartet. Das nachfolgende GALLEX-Experiment unter deutscher Federführung fand ebenfalls einen deutlich zu geringen Wert, ähnlich wie das russisch-amerikanische Experiment SAGE. Diese beiden Gallium-basierten Experimente wiesen in Verbindung mit weiteren Ergebnissen erstmals klar darauf hin, dass auch pp-Neutrinos



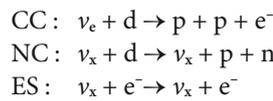
Ernest Orlando, Lawrence Berkeley National Laboratory

Diese Ansicht des Sudbury Neutrino Observatory wurde kurz vor Fertigstellung mit einem Fischaugenobjektiv aufgenommen. In der Mitte ist die Acrylkugel für das schwere Wasser zu sehen, welche von Arrays aus Photomultipliern umgeben ist.

fehlten. Diese stammen aus dem Hauptfusionsprozess der Sonne, der Reaktion zweier Protonen zu Deuterium:  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ . Das Homestake-Experiment war dagegen nur auf die höherenergetischen Neutrinos aus dem Elektroneneinfang von  ${}^7\text{Be}$  und aus dem Betazerfall von  ${}^8\text{B}$  empfindlich. Auch am Super-Kamiokande-Detektor zeigte sich ein deutliches Defizit an Elektronenneutrinos aus dem hochenergetischen  ${}^8\text{B}$ -Zerfall in der Sonne. Der direkte Nachweis der Umwandlung von solaren Neutrinos stand noch aus. Diese Schlüsselaufgabe bildete die wissenschaftliche Motivation für den Bau des Sudbury Neutrino Observatory SNO unter der Leitung von Arthur B. McDonald.

SNO ist ein Wasser-Cherenkov-Detektor in der zwei Kilometer tiefen Creighton-Mine in Sudbury in der kanadischen Provinz Ontario. Das Detektormedium besteht aus 1000 Tonnen schweren Wassers  $\text{D}_2\text{O}$ . Damit ist es möglich, über drei unterschiedliche und voneinander zumindest statistisch abtrennbare Reaktionen solare Elektronenneutrinos getrennt von Myon-

oder Tauneutrinos nachzuweisen:



Während der geladene Strom (CC) nur auf Elektronenneutrinos selektiv ist, ist der neutrale Strom (NC) an Deuterium auf alle drei Neutrino-Flavourzustände gleichermaßen empfindlich. Die elastische Streuung an Elektronen (ES) ist ebenfalls auf alle drei Neutrino-Flavourzustände sensitiv, dabei aber etwa sechsmal empfindlicher auf Elektronenneutrinos. Diese Unterschiede sind ausschlaggebend, um Umwandlungsprozesse von höherenergetischen solaren Neutrinos aus dem  ${}^8\text{B}$ -Zerfall nachzuweisen.

Am 18. Juni 2001 veröffentlichte das SNO-Experiment seine ersten Ratenmessungen der Elektronenneutrinos im geladenen Strom und aller Neutrinos durch elastische Streuung. Ein Jahr später präsentierte SNO auch die eindrucksvollen, im neutralen Strom gemessenen Daten (Abb. 2). Alle drei Nachweis Kanäle treffen sich in einem Punkt, wenn sich zwei Drittel der

von der Sonne emittierten, höherenergetischen Elektronenneutrinos auf ihrem Weg zur Erde in Myon- oder Tauneutrinos umwandeln. Der über die NC-Reaktion bestimmte Gesamtfluss der solaren Neutrinos stimmt sehr gut mit dem Standardsonnenmodell überein. Damit war endgültig der Weg frei, um die bahnbrechenden Messungen von Ray Davis mit dem Physik-Nobelpreis auszuzeichnen [5].

Eine Kombination der Resultate von SNO mit allen weiteren Experimenten (Homestake, GALLEX/GNO, SAGE, KamLAND, Borexino) zeigt, dass die Lösung des solaren Neutrino-Problems auf Neutrinooszillationen mit einem großen Mischungswinkel von ca.  $\theta_{12} = 33^\circ$  beruht. Für Neutrinoenergien im Bereich mehrerer MeV verstärkt der MSW-Effekt die Flavourumwandlung beim Durchgang durch Materie.

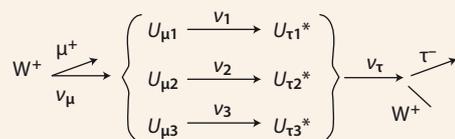
Arthur B. McDonald und sein Team haben mit dem SNO-Experiment extreme Herausforderungen in der experimentellen Messtechnik erfolgreich gemeistert. Sie reduzierten die sehr hohe Un-

### NEUTRINOMISCHUNG- UND OSZILLATION

Die Flavour-Eigenzustände der Neutrinos sind die Partner des Elektrons, Myons und Tau-Leptons bei der Wechselwirkung mit W-Bosonen (geladener Strom, CC). Das Phänomen der **Neutrinomischung** bedeutet, dass diese Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  nicht-triviale Überlagerungen der Eigenzustände von Neutrinomassen  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  und  $\nu_3$  sind. Deren Mischung lässt sich durch eine unitäre  $3 \times 3$ -Matrix  $U$  beschreiben. Diese ähnelt der CKM-Matrix der Quarks und heißt PMNS-Matrix nach ihren Ideengebern Pontecorvo, Maki, Nakagawa und Sakata:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} |\nu_i\rangle, \alpha = e, \mu, \tau.$$

Bildet sich ein Neutrino-Flavour-Eigenzustand durch schwache Wechselwirkung, z. B. ein atmosphärisches  $\nu_\mu$  aus dem  $\pi^-$ -Zerfall, breitet sich eine kohärente Überlagerung von Massen-Eigenzuständen aus. Da die Massen verschieden sind, propagieren deren Phasen leicht unterschiedlich. Bis zur Detektion kann sich die Zusammensetzung so ändern, dass ein anderer Flavour-Eigenzustand z. B. ein  $\nu_\tau$  vorliegt.



In einem Disappearance-Experiment ist der Detektor für diesen neuen Flavour-Eigenzustand blind. Wird der neue Fla-

avour-Eigenzustand nachgewiesen, spricht man von einem Appearance-Experiment.

Bei der Oszillation von atmosphärischen und solaren Neutrinos reicht die vereinfachte Betrachtung der Mischung von zwei Neutrinozuständen. Ein einziger Mischungswinkel beschreibt dann die Mischungsmatrix  $U$ . Beispielsweise ergibt sich für die Oszillation atmosphärischer Myonneutrinos:

$$\begin{pmatrix} |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

Die Umwandlungswahrscheinlichkeit  $P$  ist eine Funktion der Energie  $E$  der Neutrinos und der Flugstrecke  $L$  vom Entstehungsort bis zum Detektor sowie der Differenz der quadratischen Neutrinomassen, hier  $\Delta m_{32}^2 = |m_3^2 - m_2^2|$ . Für die Umwandlung eines Myon- in ein Tauneutrino beträgt sie:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 \cdot L}{4E}\right)$$

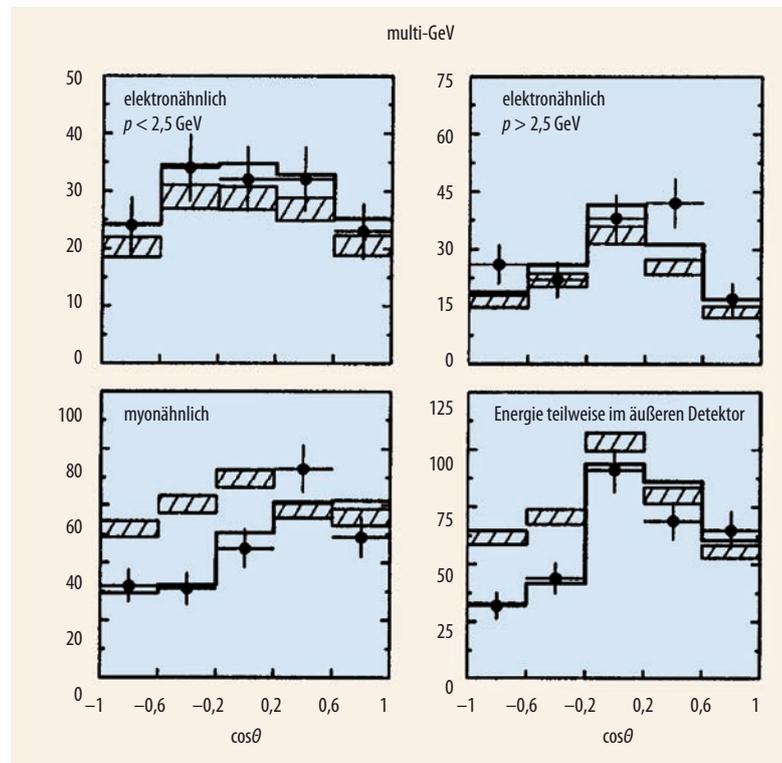
Die Wahrscheinlichkeit  $P$  ist eine periodische Funktion der Flugstrecke  $L$ . Dieses Verhalten heißt **Neutrinooszillation**.

Fliegen Neutrinos durch Materie, modifizieren Materieeffekte  $P$  zusätzlich. Da Elektronenneutrinos an Elektronen eine andere kohärente Vorwärtsstreuung erfahren als Myon- oder Tauneutrinos, kommt es zu einer materieverstärkten Oszillation. Diesen Resonanzeffekt beschrieben Mikheyev, Smirnov und Wolfenstein in ihren wegweisenden Arbeiten, sodass er heute als MSW-Effekt bezeichnet wird.

tergrundrate aus der Aktivität der Umgebung und dem Detektormaterial und bestimmten die Energie- und Ortsauflösung des großvolumigen Detektors exakt. Auch die logistischen Herausforderungen waren gewaltig: Im Gegensatz zu anderen Untergrundlaboren besteht der vertikale Zugang zum SNO-Experiment nur in einem kleinen Personen- und Materialaufzug der Minengesellschaft. Der etwa 20 Meter durchmessende Detektor wurde daher modular aufgebaut, und die Teile wurden einzeln zum Ort des Experiments gebracht. Um den Untergrund möglichst niedrig zu halten, musste sich der ganze SNO-Bereich in einen Reinraum verwandeln, was mitten in einer aktiven Nickel-Mine großen Aufwand bedeutete.

Zwei Jahre nach dem Vortrag von Takaaki Kajita versammelte sich die gesamte Neutrino-Community 2000 auf Einladung von Arthur B. McDonald zu einer Konferenz im kanadischen Sudbury. Jeder der mehr als 400 Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatte die Möglichkeit, das beeindruckende SNO-Labor zu besuchen. Nach der Ankunft in zwei Kilometern Tiefe und einem 20-minütigen Marsch in Bergmannskluft bei etwa 40 °C Umgebungstemperatur zeigte sich eine vollkommen andere Welt. Nach eiligem Wechsel in Reinraumzüge befand man sich in einem riesigen, wohlgeköhlten Reinraumarsenal mit dem Daten nehmenden SNO-Detektor direkt unter den Füßen.

Eine Vielzahl an weiteren Experimenten bestätigte in den letzten Jahren die bahnbrechenden Ergebnisse von Super-Kamiokande und SNO. Solare, atmosphärische, Beschleuniger- und Reaktor-neutrinos dienen dazu, die Elemente der Neutrinomischungsmatrix  $U$  sowie die Differenzen der Neutrinomassenquadrate  $\Delta m_{ij}^2$  zu bestimmen. Trotz der großen Erfolge dieser hochpräzisen Messungen sind noch viele fundamentale Eigenschaften von Neutrinos unbekannt, wie z. B. ihre absolute Massenskala und die Frage, ob Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind.



**Abb. 1** Die Anzahl der atmosphärischen Elektron- und Myonneutrinos ist als Funktion des Cosinus des Zenitwinkels aufgetragen. Die gemessenen Werte aus dem Super-Kamiokande-Experiment (Punkte) weichen deutlich von der Vor-

hersage ohne Neutrinooszillation (schraffiert) ab. Ein Fit an die Daten (Linie) ergibt eine Myon- nach Tau-neutrinooszillation mit  $\Delta m_{32}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  und  $\theta_{23} = 45^\circ$ .

Die Antworten haben weitreichende Konsequenzen für unser Verständnis von Prozessen auf den kleinsten Skalen der Elementarteilchen bis zu den größten Skalen des Universums. Die Massen der Neutrinos sind um viele Größenordnungen kleiner als die der geladenen Fermionen. Hinter der Neutrinomasse steckt daher vermutlich nicht oder nicht nur ihre Yukawa-Kopplung an das Higgs-Boson.

Neue Ansätze zur Massengenerierung (z. B. Seesaw-Mechanismus) sind möglich, da Neutrinos neutrale Fermionen sind. Dabei ändert sich die im Standardmodell erhaltene Leptonenzahl, sodass Massen und Eigenschaften der Neutrinos die erste neue Physik jenseits des Standardmodells darstellen. Trifft dies zu, kann im frühen Universum auf natürliche Weise ein Ungleichgewicht zwischen geladenen Leptonen und Antileptonen entstehen (Leptogenese). Damit ließe sich ein anderes großes Problem lösen: die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Universum.

Deshalb geht z. B. das JUNO-Experiment der Frage nach, ob  $m_3$  größer oder kleiner ist als  $m_1$  und  $m_2$  bzw. wie die Massenhierarchie der Neutrinos aussieht. Mit der CP-Verletzung im Neutrinosektor und der Leptonenzahlverletzung beschäftigt sich z. B. das GERDA-Experiment, während man z. B. mit dem KATRIN-Experiment nach dem absoluten Wert der Neutrinomasse sucht [6].

## Tatkraft und Ausdauer

Die Verleihung des Physik-Nobelpreises an Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald ehrt zwei herausragende Persönlichkeiten. Das 2007 beendete SNO-Experiment und das noch immer laufende Super-Kamiokande-Experiment waren schwierige und sehr aufwändige Unternehmungen. Dank des Muts, der Tatkraft und vor allem des Könnens der beiden Nobelpreisträger und ihrer Teams waren bahnbrechende Entdeckungen möglich. Aber es bedurfte auch

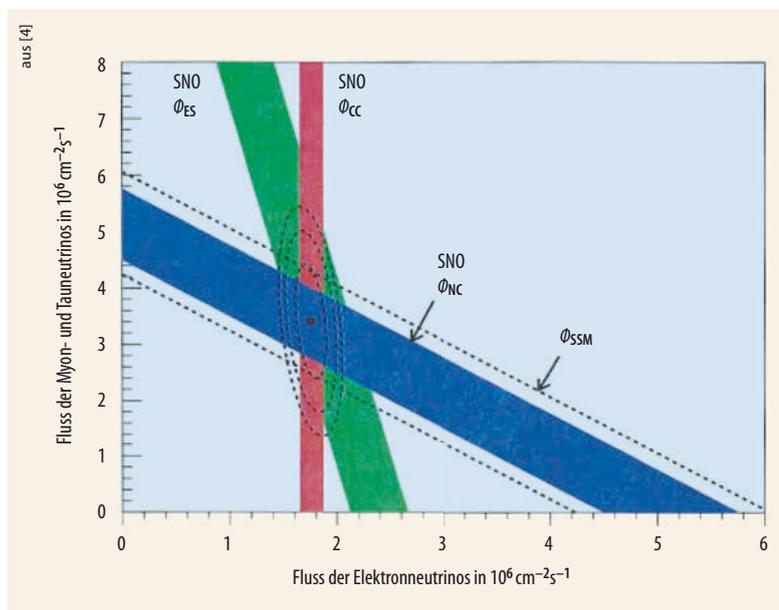


Abb. 2 Das SNO-Experiment erlaubt es, sowohl den Fluss von Elektron-Neutrinos  $\Phi_e$  als auch den Fluss von Myon- und Tau-Neutrinos  $\Phi_{\mu\tau}$  von der Sonne zu bestimmen. Die Ergebnisse zum neutralen Strom (blau) stimmen mit den Vorhersagen

des Standardsonnenmodells (gestrichelt) gut überein. Die Werte aus neutralem Strom, elastischer Streuung (grün) und geladenem Strom (rot) überlappen an einer Stelle, was sich durch Neutrinooszillationen erklären lässt.

mutiger und visionärer Entscheidungen vonseiten der jeweiligen Geldgeber, diese teuren Experimente aufzubauen und über einen langen Zeitraum zu betreiben.

Beide Kollaborationen haben aufgrund ihrer Thematik nur wenige wissenschaftliche Publikationen pro Jahr veröffentlicht. Trotzdem haben unzählige Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler durch ihre Mitarbeit bei SNO und Super-Kamiokande weltweit Karriere in der akademischen Welt gemacht. Auch einige deutsche Kolleginnen und Kollegen waren während ihrer Promotions- und Postdoktorandenzeit Teil der Kollaborationen, wie z. B. Karsten Heeger, Carsten Krauss, Christine Kraus, Kai Martens, Michael Smy und Kai Zuber.

Der Nobelpreis ist für beide Forscher der Höhepunkt einer ganzen Reihe von Auszeichnungen und Ehrungen. Zuletzt wurden die beiden Kollaborationen gemeinsam mit drei weiteren Forscherteams aus der Neutrino-Physik mit dem „2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics“ geehrt. Zudem hat Takaaki Kajita 2013 den Julius-Wess-Preis des KCETA-Zentrums in Karlsruhe erhalten. Mit seinen

Vorträgen dort und während der DPG-Schule 2004 übertrug er seine Faszination für Neutrinos auf die jüngere Forschergeneration. Auch Arthur B. McDonald ist Deutschland sehr verbunden. So war er z. B. langjähriges Mitglied im Fachbeirat des Max-Planck-Instituts für Kernphysik und gehörte zu den Gutachtern des KATRIN-Experiments. Seine präzisen Fragen lassen keine rhetorischen Ausflüch-

te zu, sondern bringen stets schnell die wahre Sachlage zum Vorschein. Dabei gibt er seinem Gegenüber immer das Gefühl, dass es ihm nur darum geht, das Beste aus einem Experiment oder Förderprogramm herauszuholen.

Beide Nobelpreisträger zeichnet eine weitere Gemeinsamkeit aus: Ihre jeweiligen Doktorväter, Masatoshi Koshiba bzw. William Alfred Fowler, erhielten selbst den Physik-Nobelpreis. Da dies häufiger passiert, liegt der Schluss nahe, dass exzellente Vorbilder und Lehrer neben dem eigenen Talent wohl auch eine gewichtige Rolle spielen. Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald haben selbst schon viele junge Forscher im Gebiet der Neutrino-Physik angespornt, unser physikalisches Weltbild nachhaltig zu erweitern. Vielleicht tritt einer davon einmal selbst in ihre Fußstapfen und begründet eine dritte Nobel-Generation.

#### Literatur

- [1] Y. Fukuda et al., Phys. Lett. B. **335**, 237 (1994)
- [2] Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998)
- [3] G. Drexlin, Phys. Blätter, Februar 1999, S. 25
- [4] Q. R. Ahmad et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 011301 (2002)
- [5] T. Kirsten und J. Trümper, Physik Journal, Dezember 2002, S. 22
- [6] M. Lindner und C. Weinheimer, Physik Journal, Juli 2011, S. 31

#### DIE AUTOREN

**Guido Drexlin** (FV Teilchenphysik) studierte Physik und promovierte an der Uni Karlsruhe. Nach einem Forschungsaufenthalt am RAL wurde er am FZK Gruppenleiter und 2004 zum Professor an der Uni Karlsruhe berufen. Er ist der Projektleiter von KATRIN am Karlsruher Institut für Technologie und einer der beiden Sprecher der KATRIN-Kollaboration.



**Manfred Lindner** (FV Teilchenphysik) studierte an der LMU München und promovierte am MPI für Physik. Über das Fermilab in Chicago und das CERN in



Genf kam er als Heisenberg-Stipendiat an die Uni Heidelberg. 1993 folgte er dem Ruf der TU München. Seit 2006 ist er Direktor am MPI für Kernphysik in Heidelberg. Er ist maßgeblich an den Projekten GERDA, Double Chooz und XENON beteiligt.

**Christian Weinheimer** (FV Hadronen und Kerne sowie FV Teilchenphysik) studierte und promovierte an der Uni Mainz. Nach einem Aufenthalt als CERN-Fellow habilitierte er sich in Mainz und nahm 2001 einen Ruf an die Uni Bonn an. Seit 2004 ist er Professor der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster. Er ist einer der beiden Sprecher der KATRIN-Kollaboration und auch an XENON beteiligt.

