

TEILCHENPHYSIK

Verwandlung im Untergrund

Dass sich unterschiedliche Neutrinos ineinander umwandeln können, ist schon seit 1998 bekannt. Der direkte Nachweis solcher Oszillationen steht aber noch aus. Nun nähern sich internationale Forscherteams dem Durchbruch.

VON GEORG WOLSCHIN

Neutrinos haben das Zeug dazu, den Teilchenphysikern den Weg in eine »neue Physik« zu weisen. Sie besitzen Eigenschaften, die das Standardmodell der Elementarteilchenphysik **nicht unmittelbar vorhersagt, und** könnten Aufschluss darüber geben, warum Materie und Antimaterie im Universum so ungleich verteilt sind. Kein Wunder, dass Forscher in aller Welt die Eigenschaften der »Geisterteilchen« genau bestimmen wollen. Jüngst nun meldeten die Forscher des T2K-Experiments in Japan neue Ergebnisse. Wäre es dort nicht im März 2011 zu dem großen Erdbeben gekommen, hätten die Wissenschaftler sogar noch mehr Daten veröffentlichen können.

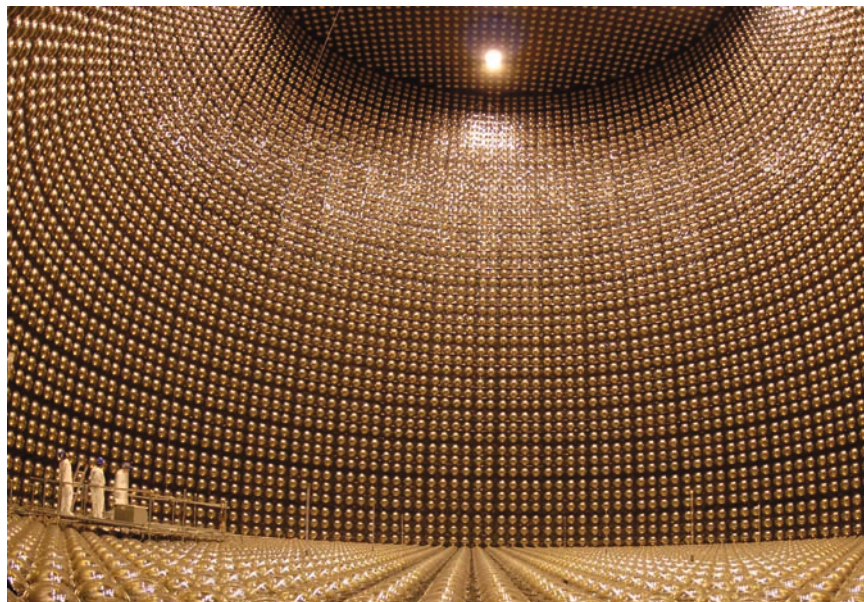
Drei Neutrinoarten existieren in der Natur: das Elektron-Neutrino, das Myon-Neutrino und das Tau-Neutrino. Dank Messungen am japanischen Super-Kamiokande-Detektor wissen wir seit 1998, dass diese Teilchen oszillieren, sich also ineinander umwandeln können. Dieser Effekt hatte jahrzehntelang für Verwirrung unter Physikern gesorgt. So kommen von den Elektron-Neutrinos, die bei Kernfusionsprozessen in der Sonne entstehen, viele als Myon-Neutrinos auf der Erde an. Die Folge: Detektoren, die nur Elektron-Neutrinos nachweisen, registrieren gemessen an theoretischen Vorhersagen zu wenige von ihnen – ein vermeintliches »solares Neutrino-Defizit«, das schon seit den 1960er Jahren bekannt war. Einen analogen Effekt hatten die Super-Kamiokande-Forscher 1998 bei der Umwandlung von Myon-Neutrinos,

die beim Einfall kosmischer Strahlung in die Erdatmosphäre entstehen, in Tau-Neutrinos beobachtet.

Alle drei Neutrinoarten sind ungeladen, besitzen sehr geringe Massen (einige Millionstel der Elektronenmasse oder weniger) und reagieren neben der Gravitation nur auf die schwache Wechselwirkung. Nach welchen Regeln die Teilchen oszillieren, hängt von den bisher nicht genau bekannten Neutrino-massen und den so genannten Mischungswinkeln ab. Diese sind ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein Neutrino der einen Art in einen Ver-

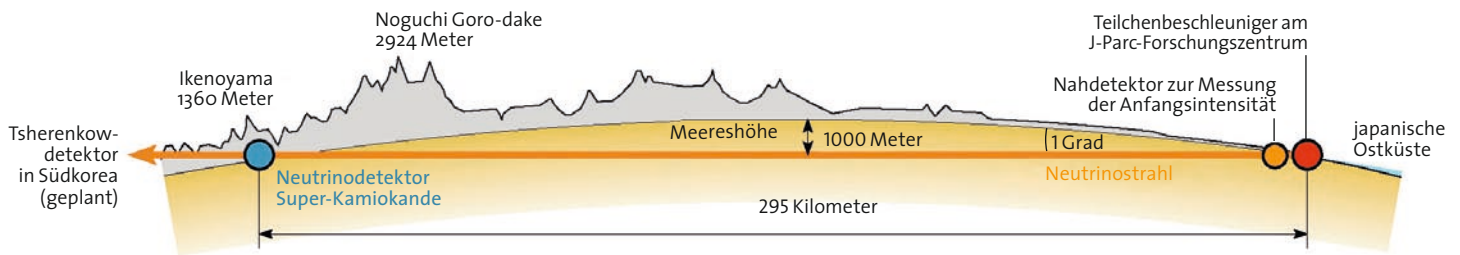
treter einer anderen Art umwandelt. Zwei der drei Mischungswinkel sind experimentell bereits mit einiger Genauigkeit ermittelt worden; der dritte (θ_{13} , Theta-13) fehlt.

Bislang ließ sich das Phänomen der Oszillation aber nur indirekt nachweisen. Forscher registrierten stets das Verschwinden der ursprünglichen Neutrinoart, nicht jedoch das Auftauchen der jeweils neuen. **Derzeit wollen mehrere große Forschergruppen den direkten Nachweis nachholen.** Sehr weit fortgeschritten ist dabei die T2K-Gruppe (Tokai-to-Kamioka). Die etwa 500 Wis-



KAMIOKA OBSERVATORY, ICR (INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH), UNIVERSITÄT TOKYO

Der Neutrindetektor Super-Kamiokande ist in einem ehemaligen Blei- und Zinkbergwerk bei der Stadt Kamioka (heute: Hida) in den japanischen Alpen errichtet. In dem rund 40 mal 40 Meter messenden Instrument wurde 1998 der erste Nachweis der Oszillation von Neutrinos erbracht. Damit war klar: Entgegen den damaligen Annahmen des Standardmodells der Teilchenphysik besitzen diese Teilchen Masse.



MIT FRDL. GEN. DER HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION (KEK)

senschaftler aus der ganzen Welt nutzen keine natürliche Neutrinoquelle, sondern einen künstlich erzeugten Strahl aus Myon-Neutrinos (Grafik oben). Er stammt aus einem Linearbeschleuniger des J-PARC-Forschungszentrums in Tokai an der japanischen Ostküste. Von hier aus reisen die Myon-Neutrinos 295 Kilometer weit durch die Erdkruste zum Super-Kamiokande-Neutrino-detektor im Westen Japans.

Am 11. März 2011 wurden die Messungen unterbrochen, als Japan zunächst von einem Erdbeben erschüttert und anschließend durch einen Tsunami getroffen wurde. Der an der östlichen Steilküste gelegene Beschleuniger erlitt leichte Erdbebenschäden und wurde vorübergehend stillgelegt. Allerdings war er tsunamisicher, anders als die zerstörten Kernkraftwerke in Fukushima mehr als 100 Kilometer weiter nördlich. Bis Anfang 2012 soll der Schaden beseitigt sein und der Betrieb wieder aufgenommen werden. In der bisherigen Laufzeit des Experiments von Januar 2010 bis März 2011 registrierte der Super-Kamiokande 88 Neutrinoereignisse. Sechs davon ließen sich klar als Elektron-Neutrinos (siehe auch Bild auf S. 18) identifizieren, die durch Oszillationen aus Myon-Neutrinos hervorgegangen waren, schrieb die T2K-Forscherguppe im Juli 2011 im Fachmagazin »Physical Review Letters«.

Eine der in diesem Zusammenhang wichtigsten Messgrößen ist der Mischungswinkel θ_{13} . Die T2K-Forscher haben dafür einen Wert ermittelt, der ein wenig größer ist als erwartet, sich aber

Die 295 Kilometer lange Neutrino-Flugstrecke zwischen dem japanischen Beschleunigerzentrum J-PARC und dem Neutrino-detektor Super-Kamiokande führt in bis zu 1000 Meter Tiefe durch die Erdkruste. Dabei wandeln sich einige der von einem Beschleuniger erzeugten Myon-Neutrinos in Elektron-Neutrinos um, die im Detektor gemessen werden. Auf ähnliche Weise arbeiten auch OPERA (dabei fliegen die Neutrinos vom europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf zum italienischen Untergrundlabor Gran Sasso) und MINOS (vom Fermilab in Illinois zum Untergrundlabor Soudan in Minnesota).

mit den theoretischen Modellen noch verträglich. Er muss jetzt durch unabhängige Messungen bestätigt werden. Würden sich Myon-Neutrinos nicht in Elektron-Neutrinos verwandeln können, betrüge der Winkel null Grad.

Warum finden wir im Universum praktisch keine Antimaterie vor?

Ein weitere entscheidende Frage ist die, in welchem Maß Neutrinos einer grundlegenden Symmetrie der Natur gehorchen: der Ladungsparitätssymmetrie (CP- oder Charge-Parity-Symmetrie). Bei dieser Transformation tauscht man jeweils ein Teilchen durch sein Antiteilchen aus und umgekehrt, wobei unter anderem die Ladung der Teilchen ihr Vorzeichen wechselt, und nimmt überdies eine Raumspiegelung vor, vertauscht also oben und unten sowie links und rechts. Dann prüft man, ob sich das Resultat der Transformation genauso verhält wie das Original, beide also symmetrisch sind. Als Maß der Symmetrie nutzen die Physiker eine Größe namens δ_{CP} (Delta-CP). Sie soll ihnen verstehen helfen, warum wir im Universum praktisch nur Materie, aber so gut wie keine Antimaterie vorfinden,

obwohl beide nach gängiger Theorie einst zu gleichen Teilen entstanden.

Für das T2K-Experiment erzeugen die Forscher im Beschleuniger zunächst gepulste Protonenstrahlen mit bis zu $9 \cdot 10^{13}$ Protonen pro Puls. Diese werden in ein Synchrotron und dann weiter in den Hauptbeschleuniger geleitet, der sie schließlich auf eine Energie von 30 Milliarden Elektronvolt beschleunigt. Anschließend lenken Magnetfelder die Partikel so aus dem Ring, dass sie auf den weit entfernten Super-Kamiokande zielen. Zunächst einmal prallen sie aber auf einen Graphitstab mit 2,6 Zentimeter Durchmesser und 90 Zentimetern Länge. Dabei entstehen zumeist Pionen und Kaonen. Auf ihrem Flug durch einen 96 Meter langen Tunnel zerfallen diese vor allem in Myonen, die schweren Verwandten der Elektronen, und Myon-Neutrinos. Der Zerfall erfolgt überwiegend in Vorwärtsrichtung, so dass das Ziel, der Super-Kamiokande, weiter im Fokus bleibt.

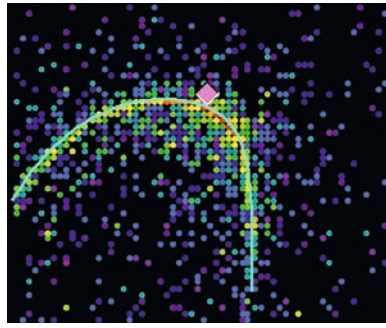
Das Zentrum des Strahls zielt allerdings etwa 2,5 Grad unter den Detektor. Das Instrument selbst wird also nur von einer »Off-Axis«-Strahlkomponente

MIT FRIEDLICHEN DER T2K-KOLLABORATION UND DES KAMIOKA-OBSERVATORY, ICRP, UNIVERSITÄT TOKYO

Lichtblitze im Wassertank

Die Wände des mit 50 000 Tonnen Wasser gefüllten Neutrino-detektors Super-Kamiokande sind mit etwa 11 200 Photomultipliern bedeckt. **Treten Neutrinos in Wechselwirkung mit dem Wasser, registrieren die Instrumente so genannte Tscherenkow-Lichtblitze.**

Unterscheiden lassen sich die Teilchenarten, weil die von einfallenden Elektron-Neutrinos erzeugten Elektronen andere Lichtkegel bilden als die von Myon-Neutrinos erzeugten Myonen. Jeder farbige Punkt im Foto entspricht ei-



nem Photomultiplier, der einen Lichtblitz – in diesem Fall von einem Elektronereignis – registriert hat.

te getroffen. Doch genau darin befinden sich besonders viele Neutrinos mit vergleichsweise niedriger Energie, und für diese ist die Oszillationswahrscheinlichkeit besonders hoch.

Bevor der Myon-Neutrinostrahl auf die Reise geht, durchläuft er noch einen Detektor, der die anfängliche Intensität des Neutrino-flusses misst (siehe Grafik S. 17). Seine zwei Komponenten vermessen den zentralen Strahl sowie den Off-Axis-Anteil. Mit letzterer Messung lässt sich vor allem die Zahl der im entfernten Detektor zu erwartenden Myon-Neutrinos bestimmen. Dabei müssen Myon-Neutrinos berücksichtigt werden, die durch Oszillationen verloren gehen, aber auch Elektron-Neutrinos, die den anfänglichen Strahl verunreinigen, wenngleich er immerhin zu über 99 Prozent aus Myon-Neutrinos besteht. Modellrechnungen zufolge wären im Messzeitraum aber lediglich 1,5 solcher Untergründereignisse zu erwarten gewesen. Bei derzeit sechs nachgewiesenen Elektron-Neutrinos beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass diese tatsächlich auf Oszillationen von Myon-Neutrinos zurückzuführen sind, 99,3 Prozent.

Das legt den Schluss nahe, dass die T2K-Forscher tatsächlich die Oszillation zwischen Myon- und Elektron-Neutrinos direkt nachgewiesen haben, indem sie das »Erscheinen« einer anderen Neutrinoart registrierten. Allerdings ist die Zahl der Messungen noch zu ge-

ring – insgesamt wollen die T2K-Forscher 50-mal mehr Daten erheben. In der Teilchenphysik gilt eine Messung erst dann als zuverlässig, wenn sie eine so genannte statistische Signifikanz von fünf Standardabweichungen aufweist. Je höher dieser Wert, desto sicherer können die Physiker sein, dass kein Zufall im Spiel ist. Im T2K-Experiment beträgt die Signifikanz erst 2,5 Standardabweichungen.

Als Myon-Neutrino gestartet, als Tau-Neutrino angekommen

Unterdessen erhielt das Team aber Unterstützung aus den USA. Am Fermilab im Bundesstaat Illinois erzeugen Kollegen vom MINOS-Experiment ebenfalls einen Strahl aus Myon-Neutrinos, um ihn im unterirdischen Soudan-Detektor in **Minnesota nachzuweisen. Im Juni 2011** berichteten die Forscher, auf mehr Elektron-Neutrinos gestoßen zu sein, als ohne Oszillationen zu erwarten gewesen wären. Allerdings liegt die Signifikanz **ihrer noch nicht publizierten Ergebnisse** bei bisher nur 1,7 Standardabweichungen.

Schon vor einiger Zeit sind auch die Forscher von OPERA fündig geworden. Mittels eines Teilchenbeschleunigers am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf erzeugen sie Myon-Neutrinos, die sich auf ihrem Weg in den 730 Kilometer entfernten OPERA-Detektor im italienischen Gran Sasso-Laboratorium in Tau-Neutrinos

umwandeln. Im Fachmagazin »Physics Letters B« hatten sie bereits 2010 über die Entdeckung eines solchen Tau-Ereignisses berichtet. Auch ihr Resultat könnte daher als erster direkter Oszillationsnachweis für Neutrinos gelten, wenn es sich bestätigen lässt. Die statistische Signifikanz beträgt bisher 2,4 Standardabweichungen. Das OPERA-Experiment machte übrigens im vergangenen September Schlagzeilen, als es möglicherweise Neutrinos mit Überlichtgeschwindigkeit beobachtete. Viele Forscher bezweifeln das jedoch – **die intensive Suche nach möglichen Fehlerquellen könnte Jahre dauern.**

Neben dem dritten Mischungswinkel und dem Wert von δ_{CP} beschäftigt die Neutrino-forscher eine weitere Frage. **Sie hängt unter anderem damit zusammen, dass die Masse eines Neutrinos sich quantenphysikalisch aus einer Überlagerung der drei Neutrinoarten ableiten lässt, so wie auch die Neutrinoart das Ergebnis jeweils dreier einander überlagernder Massezustände ist. Die so genannte Hierarchie der Massezustände wollen Forscher ebenfalls untersuchen. Für diese Zwecke ist es am besten, den Weg des Neutrinostrahls durch die Erde zu verlängern und sowohl Experimente mit Myon-Neutrinos als auch mit Antineutrinos durchzuführen.** Denn beim Durchgang durch Materie besitzen Neutrinos und Antineutrinos unterschiedliche Oszillationswahrscheinlichkeiten.

Der T2K-Neutrinostrahl soll künftig daher nicht nur im Super-Kamiokande nachgewiesen werden, sondern auch in einem Tscherenkow-Detektor in Südkorea. Die noch zu errichtende Anlage wäre nahezu doppelt so groß wie der Super-Kamiokande; auf dem Weg zu ihr müssten die Teilchen rund 1000 Kilometer zurücklegen. Richtig Fahrt wird die Neutrino-forschung in Japan aber erst wieder aufnehmen, wenn die Schäden an den Anlagen und im Land behoben sind.

Georg Wolschin ist habilitierter Physiker und Wissenschaftsjournalist; er forscht in theoretischer Physik und lehrt an der Universität Heidelberg.