

## ■ Auf die Mischung kommt's an

Reaktorexperimente messen den dritten Mischungswinkel für Neutrinos und eröffnen so einen Weg, um die Massenhierarchie zu bestimmen und nach CP-Verletzung zu suchen.

Neutrinos sind die elektrisch neutralen Partner der geladenen Leptonen und kommen wie diese in drei verschiedenen Familien (Flavors) vor: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino. Eine der wichtigsten Entdeckungen der Teilchenphysik in den letzten zwei Jahrzehnten war der Nachweis, dass sich Neutrinos von einer Familie in eine andere umwandeln können. Diese Neutrino-Oszillationen treten auf, da die Neutrinos in Prozessen der schwachen Wechselwirkung in einem Flavor-Eigenzustand erzeugt und nachgewiesen werden, während für ihre Ausbreitung drei quantenmechanische Überlagerungszustände mit definierten Massen maßgeblich sind. Die Oszillationen bedeuten daher auch, dass Neutrinos eine – wenn auch geringe – Masse haben.

Die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Neutrino-Familien hängen entscheidend von den drei Mischungswinkeln  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$  und  $\theta_{13}$  (analog zu den drei Euler-Drehwinkeln im dreidimensionalen Raum) sowie den Massendifferenzen  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  der beteiligten Neutrinos ab. Letztere bestimmen gemeinsam mit der Neutrino-Energie die Frequenz der Oszillationen, deren Amplitude durch  $\sin^2 2\theta_{ij}$  gegeben ist. Die genaue Messung der Mischungswinkel und Massendifferenzen ist eine der zentralen Herausforderungen der Neutrino-Physik. Dazu dienen Experimente mit Neutrinos von der Sonne, aus der kosmischen Strahlung, von Kernreaktoren und von Beschleunigern.

Während es in den letzten Jahren gelang, die beiden Mischungswinkel  $\theta_{12} \approx 34^\circ$  und  $\theta_{23} \approx 45^\circ$  immer genauer zu bestimmen, existierte für den kleinsten Mischungswinkel  $\theta_{13}$  bislang nur eine Obergrenze, sodass  $\theta_{13} = 0$  nicht ausgeschlossen war [1]. Diese unbefriedigende Situation hat sich in den letzten Monaten grundlegend geändert, denn die drei Reaktorexperimente Double Chooz [2], Daya Bay [3] und RENO

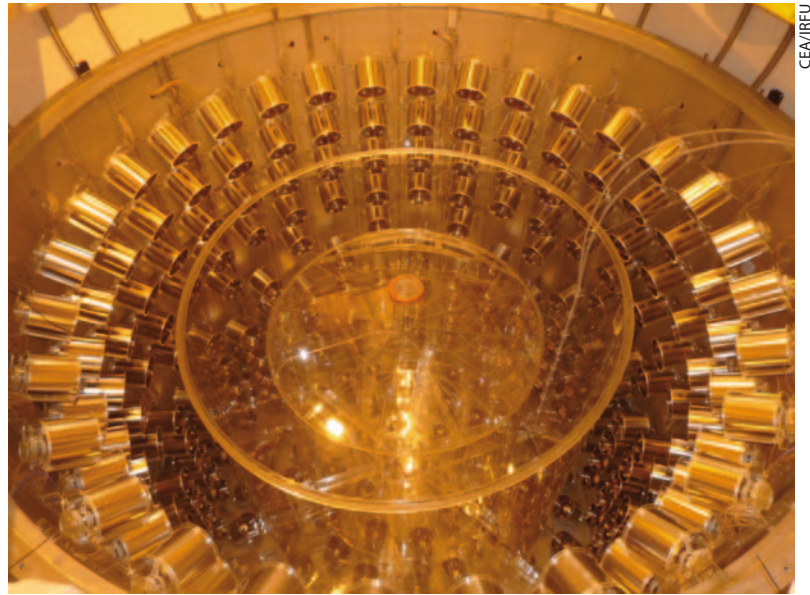


Abb. 1 Der Double-Chooz-Detektor besteht (von innen nach außen) aus zwei Acrylbehältern mit Szintillationsflüssig-

keit sowie Photovervielfachern zum Nachweis des Szintillationslichts.

[4] haben, in dieser Reihenfolge, von null verschiedene Werte publiziert ( $\theta_{13} \approx 9^\circ$ ). Anfang Juni haben die Kollaborationen ihre neuesten Ergebnisse auf der Neutrino-Konferenz in Kyoto vorgestellt.<sup>1)</sup>

Alle drei Experimente sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Sie nutzen Kernreaktoren als intensive Quelle von Elektron-Antineutrinos, die bei den auf die Spaltung folgenden Beta-Zerfällen in großer Zahl mit Energien bis ca. 10 MeV entstehen. Während ein Detektor nah am Reaktor den vollen, unoszillierten Neutrino-Fluss misst, suchen ein oder mehrere Detektoren im Abstand von ein bis zwei Kilometern nach einer Abweichung von der erwarteten Neutrino-Rate aufgrund von Oszillationen. Die Neutrinos werden dabei über den inversen Beta-Zerfall, d. h. den Neutrino-Einfang an freien Protonen, nachgewiesen. Als Nachweismedium dienen mehrere Tonnen organischer Flüssigszintillator, in dem ein Gadoliniumkomplex gelöst ist.<sup>2)</sup> Fängt ein Wasserstoffkern ein Elektron-Antineutrino ein, entstehen ein Neutron und ein Positron. Das Neutron wird nach rund 30  $\mu\text{s}$  bevorzugt von

einem Gadolinium-Kern eingefangen und regt diesen an. Unter Emission von charakteristischer Gammastrahlung bei ca. 8,6 MeV kehrt der Kern anschließend in den Grundzustand zurück. Diese verzögerte Koinzidenz erlaubt es, das Antineutrino-Signal vom Untergrund zu trennen; gleichzeitig lässt sich aus der Energie des Positrons die des einfallenden Antineutrinos rekonstruieren. Die experimentelle Signatur der gesuchten Neutrino-Oszillationen besteht darin, dass die Ereignisrate im fernen Detektor energieabhängig unterdrückt ist.

Das erste Reaktorexperiment dieser Generation – Double Chooz<sup>3)</sup> in Frankreich (Abb. 1) – begann im April 2011 mit den Messungen, allerdings nur mit dem entfernten Detektor, während der nahe Detektor noch im Bau ist. Daher wird der erwartete Neutrino-Fluss mit Hilfe von Simulationen aus den Reaktordaten berechnet. Nach einer Messzeit von fünf Monaten veröffentlichte Double Chooz einen ersten deutlichen Hinweis auf  $\theta_{13} \neq 0$  [2], dem in Kyoto nun die Ergebnisse von weiteren sechs Monaten folgten. Der Wert  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,109 \pm 0,030(\text{stat}) \pm 0,025(\text{sys})$  beruht

1) <http://neu2012.kek.jp>

2) Gadolinium besitzt einen sehr hohen Einfangquerschnitt für Neutronen.

3) Am Double-Chooz-Experiment sind deutsche Gruppen an der RWTH Aachen, der Universität Hamburg, dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, der Technischen Universität München sowie der Universität Tübingen beteiligt.

auf einer kombinierten Analyse der absoluten Ereignisrate sowie der Form des Energiespektrums (Abb. 2). Daya Bay in China veröffentlichte im Februar 2012 nach nur 2,5 Monaten Messzeit mit drei nahen und drei fernen Detektoren das Ergebnis mit der bislang stärksten statistischen Signifikanz [3]. Das in Kyoto präsentierte aktualisierte Ergebnis ist:  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,089 \pm 0,010(\text{stat}) \pm 0,005(\text{sys})$ . RENO in Südkorea begann im August 2011 die Messungen mit jeweils einem nahen und fernen Detektor und veröffentlichte im April 2012 ein erstes Resultat:  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,113 \pm 0,013(\text{stat}) \pm 0,019(\text{sys})$  [4]. Im Gegensatz zu Double Chooz beruhen die Ergebnisse der beiden anderen Experimente auf einer reinen Ratenanalyse, da die gemessenen Energiespektren bisher von der charakteristischen Form für Neutrino-Oszillationen abweichen. Wie in Kyoto diskutiert, könnte dies am unvollständig verstandenen Untergrund liegen, der sich in Messperioden mit abgeschalteten Reaktoren verlässlich bestimmen lässt. Während dies bei Double Chooz mit seinen beiden Kernreaktoren bereits acht Tage lang möglich war, weisen RENO und Daya Bay Neutrinos aus jeweils sechs Reaktoren nach, was ein gleichzeitiges Abschalten zu Wartungszwecken recht unwahrscheinlich macht.

Mit diesen Ergebnissen haben die Reaktorexperimente bereits nach relativ kurzer Messzeit und mit hoher Signifikanz gezeigt, dass

$\theta_{13}$  ungleich null ist. Eine höhere Statistik, vor allem aber eine rigorose Kontrolle sämtlicher systematischer Unsicherheiten und die Bestimmung der experimentsspezifischen Untergründe werden es in den nächsten Jahren erlauben, den Wert des Mischungswinkels noch genauer zu messen.

Was bedeuten diese Ergebnisse für die Zukunft der Neutrinophysik? Auch dies war ein zentrales Thema der Diskussion in Kyoto. Der nun bekannte, relativ große Wert von  $\sin^2 2\theta_{13} \approx 0,1$  ( $\theta_{13} \approx 9^\circ$ ) eröffnet die Möglichkeit, mithilfe von Oszillationen zwischen allen drei Flavours die Massenhierarchie der Neutrinos zu bestimmen – noch ist nämlich unbekannt, ob  $m_1 < m_2 < m_3$  oder  $m_3 < m_1 < m_2$  gilt. Dazu gibt es mehrere Vorschläge. Man kann zum einen ausnutzen, dass die Oszillationen modifiziert werden, wenn sich Neutrinos durch Materie wie die Erde bewegen. Messungen atmosphärischer Neutrinos am Neutrino-Teleskop IceCube am Südpol mit der vorgeschlagenen Niederenergieerweiterung PINGU kämen hierfür infrage. Auch Beschleunigerexperimente mit Strecken deutlich über 1000 Kilometer wären gut geeignet. Die europäische Kollaboration LAGUNA-LBNO erstellt hierzu eine Machbarkeitsstudie für einen Strahl vom CERN nach Pyhäsalmi (Finnland). Zum anderen wird vorgeschlagen, die Oszillationsfrequenz so genau zu vermessen, dass

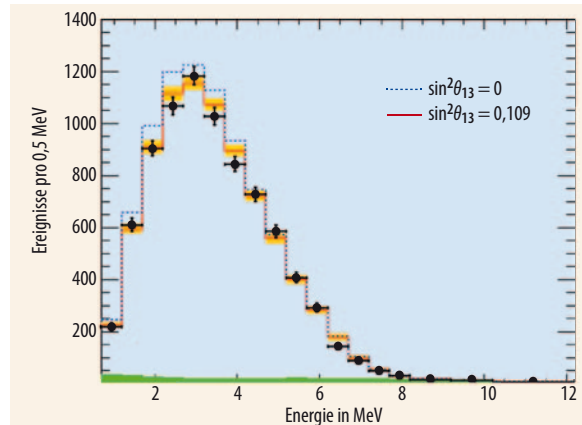


Abb. 2 Das vom Double-Chooz-Experiment gemessene Anti-Neutrinospektrum zeigt, dass der Mischungswinkel  $\theta_{13}$  nicht verschwindet (blau), sondern endlich ist,  $\sin^2 2\theta_{13} = 0,109$  (rot). Der systematische Fehler ist gelb eingezeichnet, der Untergrundbeitrag grün.

sich die zwei möglichen Massenhierarchien unterscheiden lassen. Dazu wären prinzipiell Reaktorexperimente mit rund 60 Kilometer entfernten Detektoren (z. B. in Daya Bay oder RENO) denkbar.

Darüber hinaus eröffnen diese Ergebnisse auch neue Perspektiven für die Suche nach leptonischer CP-Verletzung, die zu einer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeit von Neutrino- und Antineutrino-Oszillationen führt. CP-Verletzung im Leptonsektor ist ein vielversprechender Ansatz, um mittels der Leptogenese den Überschuss von Materie gegenüber Antimaterie im heutigen Universum zu erklären. Längerfristig haben Beschleunigerexperimente zur Suche nach CP-Verletzung nun eine realistische Aussicht auf Erfolg. An entsprechenden Projektstudien wird in Europa, USA und Japan intensiv gearbeitet.

Marianne Göger-Neff,

Lothar Oberauer und Stefan Schönert

- [1] M. Apollonio et al. (CHOOZ Collab.), Phys. Lett. **B466**, 415 (1999); F. Boehm et al. (Palo Verde Collab.), Phys. Rev. Lett. **84**, 3764 (2000); vgl. Physik Journal, Juli 2011, S. 31
- [2] H. de Kerret, LowNull1, 9-12, November, 2011; Y. Abe et al. (Double Chooz Collab.), arXiv:1112.6353 (2011), Phys. Rev. Lett. **108**, 131801 (2012)
- [3] F. P. An et al. (Daya Bay Collab.), arXiv:1203.1669 (2012), Phys. Rev. Lett. **108**, 171803 (2012)
- [4] Soo-Bong Kim et al. (Reno Collab.), arXiv:1204.0626 (2012), Phys. Rev. Lett. **108**, 191802 (2012)

Dr. Marianne Göger-Neff, Prof. Dr. Lothar Oberauer, Prof. Dr. Stefan Schönert, Lehrstuhl für experimentelle Physik und Astroteilchenphysik, Physik-Department, TU München

## KURZGEFASST

### ■ Eine kleine Ewigkeit

Ein Speicher, der bei Raumtemperatur und mehrere Sekunden lang funktioniert – normalerweise wäre das nicht der Rede wert, wohl aber bei einem Quantenspeicher. Zwei Forscherteams haben kürzlich gezeigt, dass sich Qubits in den Hyperfein-Zuständen von einzelnen „Verunreinigungen“ in äußerst reinen Kristallen speichern lassen. Ein Team erreichte mit Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren für Nitrogen Vacancy) und einzelnen  $^{13}\text{C}$ -Isotopen in einem Diamanten, der zu 99,99 % aus  $^{12}\text{C}$  besteht, eine Speicherzeit von einer Sekunde. Die andere Gruppe verwendete  $^{31}\text{P}$ -Donatoren in einem Si-Kristall, der zu 99,995 % aus  $^{28}\text{Si}$  bestand, und steigerte die Spei-

cherzeit auf über drei Minuten – eine kleine Ewigkeit für Quantenspeicher. M. Steger et al., Science **336**, 1280 (2012); P. C. Maurer et al., *ibid.*, 1283

### ■ Hall-Effekt in kalten Gasen

Kalte Gase entpuppen sich mehr und mehr als „Spielwiese“, um die unterschiedlichsten Phänomene aus der Festkörperphysik zu simulieren. Nun ist es Forschern am NIST (USA) gelungen, den Hall-Effekt an einem Bose-Einstein-Kondensat aus Rb-Atomen zu beobachten, die sich in einem simulierten Magnetfeld befinden. Dies verspricht neue Einsichten in die Transporteigenschaften der kalten Gase. L. J. LeBlanc et al., PNAS doi: 10.1073/pnas.1202579109