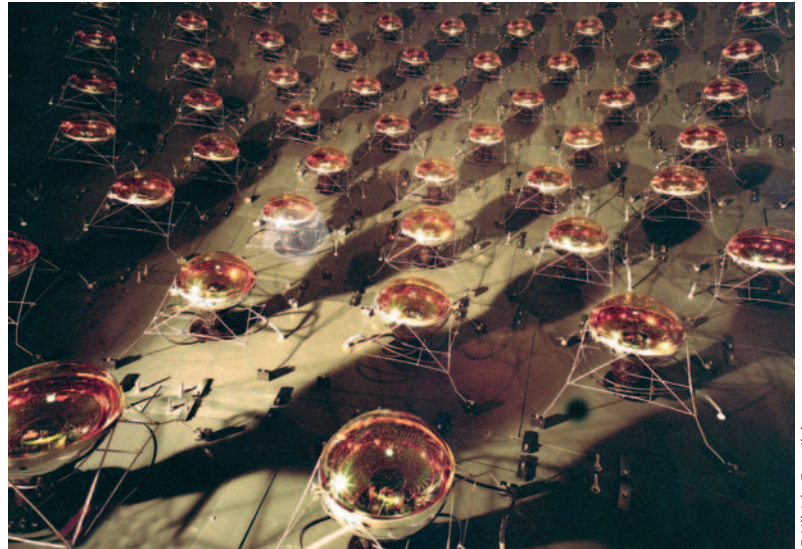


Keine Hinweise auf „sterile“ Neutrinos

Das MiniBooNE-Experiment am Fermilab bestätigt das Standardmodell der Teilchenphysik und beendet eine lange wissenschaftliche Kontroverse.

Neutrinos spielen eine besondere Rolle in der Kosmologie und der Teilchenphysik: Ihre Masse ist viel kleiner als die aller anderen Elementarteilchen, und mit „normaler“ Materie wechselwirken sie extrem selten, da sie als neutrale Elementarteilchen neben der Gravitation nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Neutrinos (ν) ebenso wie die Quarks und geladenen Leptonen in drei Varianten auftreten: als Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos.

Jede der drei Neutrinosorten besteht aus einer Überlagerung verschiedener Massenzustände. Daraus resultiert die wohl bekannteste Eigenschaft von Neutrinos: Alle drei Arten können sich zyklisch ineinander umwandeln, z. B. wird ein Myon-Neutrino nach einer bestimmten Flugstrecke in ein Elektron-Neutrino oszillieren. Neutrino-Oszillationen sind ein quantenmechanisches Interferenzphänomen, da bei der Ausbreitung eines Neutrinos jeder Massenanteil bei gleicher Energie eine andere Geschwindigkeit aufweist. Bei kleinen Massenunterschieden wird daher die Oszillationslänge sehr groß, umgekehrt impliziert ein gro-



F. Ullrich, Fermilab

Bei äußerst seltenen Streuprozessen erzeugen Neutrinos im Mineralöl des MiniBooNE-Detektors Elektronen und Myonen, die schneller sind als die Lichtgeschwindigkeit im Öl. Dadurch emittieren sie Tscherenkov-Strahlung, welche von insgesamt 1250 Photomultipliern detektiert wird.

ßer Massenunterschied eine kurze Flugstrecke bis zur Umwandlung.

Der Nachweis dieser Umwandlungsprozesse ist extrem schwierig [1]. Daher gelang es erst 1998 mit dem Super-Kamiokande-Detektor, ν -Oszillationen zweifelsfrei mit Neutrinos nachzuweisen, die in der Atmosphäre entstanden sind. Dieses Experiment lieferte gemeinsam mit diversen Detektoren für Neutrinos von der Sonne (SNO, Gallex/GNO, SAGE, Homestake)

2001 die Lösung für ein altes Rätsel: Neutrinooszillationen sind demnach dafür verantwortlich, dass auf der Erde weniger Sonnenneutrinos detektiert werden, als das Standardmodell der Sonne vorausagt. Die Massendifferenzen sind allerdings sehr klein und liegen in der Größenordnung von 5–50 meV.^{#)} Detaillierte Untersuchungen mit Neutrinos aus Kernreaktoren (KamLAND) und Hochenergiebeschleunigern (K2K, MINOS)

#) Wir bedienen uns hier der Konvention $c = 1$, sodass die Einheiten von Masse und Energie übereinstimmen.

+) vgl. Phys. Blätter, Mai 1995, S. 375, und Dezember 1995, S. 1149

KURZGEFASST

■ Licht in Dunkle Materie

In einem Galaxiencluster, der 5 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt ist, hat das Hubble-Teleskop erstmals Dunkle Materie entdeckt, deren Struktur nicht derjenigen der Galaxien oder des heißen Gases in dem Cluster entspricht. Die Dunkle Materie bildet demnach einen Ring mit einem Durchmesser von 2,6 Millionen Lichtjahren, der vermutlich bei der Kollision zweier Galaxiencluster vor ein bis zwei Milliarden Jahren entstanden ist. Dunkle Materie wurde postuliert, weil die Gravitationskräfte der sichtbaren Materie allein den Zusammenhalt der Galaxiencluster nicht erklären können. Da sie – wie der Name schon sagt – nicht sichtbar ist, lässt sich Dunkle Materie nur indirekt nachwei-

sen. Aufgrund des Gravitationslinseneffekts verzerrt sie das auf der Erde sichtbare Bild von weiter entfernten Galaxien.

M. J. Jee et al., Astrophys. J. 662, Juni 2007

■ Einzelnes Atom als Photonenquelle

In der Arbeitsgruppe von Gerhard Rempe am MPI für Quantenoptik ist es gelungen, ein einzelnes Rubidium-85-Atom in einem Resonator bis zu 30 Sekunden lang zu fangen und damit bis zu 300 000 einzelne Photonen zu erzeugen. Zuverlässige Einzel-Photonen-Quellen sind eine essenzielle Komponente für die Quanteninformationsverarbeitung.

M. Hijlkema et al., nature physics 3, 253 (2007)

■ Supraleitendes Lithium

Experimente einer finnischen Arbeitsgruppe haben gezeigt, dass das leichteste und einfachste aller Metalle, Lithium, auch unter Normaldruck supraleitend wird – allerdings erst bei einer Temperatur von 0,4 mK. In früheren Experimenten war der Übergang nur bei sehr hohem Druck beobachtet worden, allerdings bei wesentlich höheren Temperaturen (z. B. 20 K bei 48 GPa). Da Lithium mit seinem einzelnen Valenzelektron eine sehr einfache elektronische Struktur aufweist, ist es eine wichtige Modells substanz auf dem Weg zu einer Theorie, die es erlaubt, die Sprungtemperatur vorherzusagen.

J. Tuoriniemi et al., Nature 447, 187 (2007)

haben diese Ergebnisse inzwischen auch unter Laborbedingungen bestätigt. Dies bedeutet, dass Neutrinos mit Energien im MeV-Bereich erst nach einer Flugstrecke von mehreren Kilometern oszillieren.

Kurz vor diesen wissenschaftlichen Durchbrüchen veröffentlichte die LSND-Kollaboration (Liquid Scintillator Neutrino Detector) am Los Alamos National Laboratory im Januar 1995 eine Aufsehen erregende Evidenz für Oszillationen zwischen Myon- und Elektron-Antineutrinos, die sogar Eingang fand in die Titelseite der *New York Times*.⁴⁾ Von besonderem Interesse waren diese Resultate für das vergleichbare KARMEN-Experiment (Karlsruhe Rutherford Mittelenergie Neutrino-Experiment) am Rutherford-Appleton Laboratory in England. Beide Experimente benutzten Neutrinos mit Energien bis 50 MeV aus der Zerfallskette gestoppter Pionen und Myonen zur Oszillationssuche. Das LSND-Experiment nahm bis 1998 Daten und sammelte insgesamt knapp 100 Überschussereignisse, die als Elektron-Antineutrinos und damit als Evidenz für ν -Oszillationen interpretiert wurden. Zur Überprüfung dieses Resultates wurde die Empfindlichkeit des KARMEN-Experiments wesentlich erhöht. In einer Messphase von 1997 bis März 2001 zeigten die KARMEN-Daten jedoch keinen Überschuss von Elektron-Antineutrinos und damit kein Anzeichen für Oszillationen [3].

Da die Flugstrecke der Neutrinos in beiden Experimenten weniger als 50 Meter betrug, waren LSND und KARMEN besonders sensitiv auf Massenunterschiede von ca. 1 eV. Bei derart kurzen Abständen kommen die Mischungseffekte zwischen den drei bekannten Neutrinos noch nicht zum Tragen. Daher wurde zur Erklärung des LSND-Signals die Existenz einer bzw. mehrerer neuer Neutrinosorten mit Massen von ca. 1 eV postuliert, die als virtuelle Zwischenzustände die Oszillation zwischen Myon- und Elektron-Antineutrinos vermitteln sollten. Da diese Neutrinos nur der Gravitation und nicht der schwachen Wechselwirkung unterliegen sollen, werden

sie als „sterile“ Neutrinos bezeichnet. Ihr indirekter Nachweis durch die Beobachtung von ν -Oszillationen bei kurzen Abständen würde eine Revolution in der Teilchenphysik auslösen.

Um die offene Frage nach der Existenz von sterilen Neutrinos zu untersuchen und den Widerspruch zwischen LSND und KARMEN aufzuklären, war eine neue Messung erforderlich. Daher schlug ein US-Forscherteam am Fermilab Ende 1997 das MiniBooNE-Experiment (Booster Neutrino Experiment) vor. Am dortigen Boosterring sollte bei höheren Energien ab 500 MeV und einem größeren Detektorabstand von 500 m mit anderer Systematik nach Oszillationen zwischen Myon- und Elektron-Neutrinos bei Massendifferenzen von ca. 1 eV gesucht werden. Der Nachweis der ersten ν -Ereignisse gelang in dem mit 800 Tonnen Mineralöl gefüllten MiniBooNE-Detektor (Abb. 1, 2) im September 2002. Die große Herausforderung lag dabei im eindeutigen Nachweis der wenigen Hundert auf der Basis von LSND erwarteten Elektronneutrinos vor einem Hintergrund von mehreren Hunderttausend konventionellen Neutrinowechselwirkungen. Entsprechend zeitintensiv gestaltete sich die Datenanalyse, bei der die Region der erwarteten Oszillationsereignisse über die gesamte Messzeit verdeckt blieb („blinde“ Analyse). Anfang 2007 war es endlich soweit: Die beteiligten Wissenschaftler sahen zum ersten Mal die MiniBooNE-Signale.

Im Rahmen eines Sonderseminars am Fermilab stellten am 11. April die beiden MiniBooNE-Sprecher William Louis und Janet Conrad die mit Spannung erwarteten Resultate öffentlich vor. In der Signalregion verbleibt nach Abzug von Untergrundeignissen kein Oszillationssignal [4]. Das Fehlen überschüssiger Elektronneutrinos widerlegt – unter der Annahme, dass die Oszillationseigenschaften von Neutrinos und Antineutrinos identisch sind – eindeutig die Oszillationshypothese von LSND und bestätigt somit die Resultate von KARMEN. Damit ist die wissen-

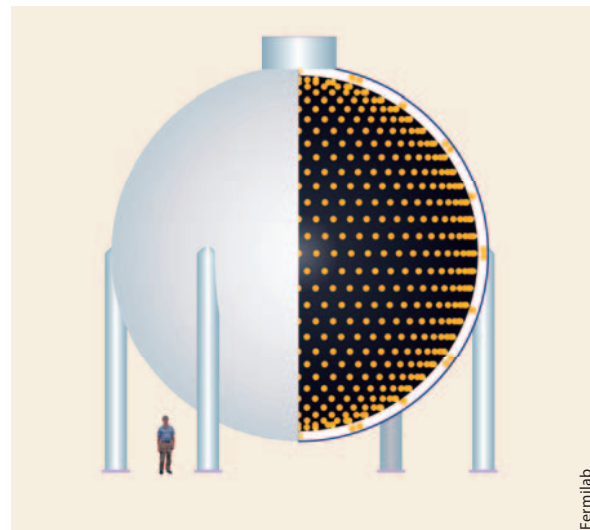


Abb. 2 Der Durchmesser des mit Mineralöl gefüllten MiniBooNE-Detektors beträgt 12 Meter. Alle 20 Sekunden wird darin ein Neutrino detektiert.

schaftliche Kontroverse zwischen den beiden Experimenten mehr als 12 Jahre nach der ersten Veröffentlichung von LSND entschieden. Gleichzeitig ist der Hypothese von leichten sterilen Neutrinos mit Massen um 1 eV die experimentelle Grundlage entzogen.

Neutrinos und ihre Eigenschaften bleiben auch nach den Ergebnissen von MiniBooNE im Zentrum des Interesses. Die wichtigste Frage der Neutrino-Physik bleibt nach wie vor unbeantwortet: Wie schwer ist ein Neutrino? Dieser Frage wird das Karlsruhe Tritium Neutrino-Experiment (KATRIN) mit bisher unerreichter Präzision nachgehen, das derzeit am Forschungszentrum Karlsruhe von einer internationalen Kollaboration aufgebaut und ab 2010 mit den Messungen beginnen wird [5].

Guido Drexlin

Prof. Dr. Guido Drexlin, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Experimentelle Kernphysik, Postfach 6980, 76128 Karlsruhe, und Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Kernphysik, Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

- [1] G. Drexlin, *Phys. Blätter*, Februar 1999 S. 25
- [2] A. Aguilar et al., *Phys. Rev. D* **65**, 112007 (2001)
- [3] B. Armbruster et al., *Phys. Rev. D* **65**, 112001 (2002)
- [4] A. A. Aguilar-Arevalo et al. (MinibooNE Kollab.), arXiv:0704.1500v2, erscheint in *Phys. Rev. Lett.*
- [5] J. Angrik et al., *wiss. Berichte FZKA* 7090 (2005)