

Schon wieder Ärger mit den Neutrinos [25. Feb.]

Innerhalb der letzten beiden Jahre hat nun angeblich ein **drittes Neutrinoexperiment** [1] eine **Anomalie** der kleinen, leichten *Elementarteilchen* [1, 2, 3] gefunden.



Das **chinesische Daya Bay-Experiment** [4] (Abb. 1) hat in der letzten Woche neue Messungen veröffentlicht, die darauf hinweisen sollen, dass sich die winzigen Elementarteilchen anders verhalten als vorhergesagt. Die beteiligten Forscher sind der Ansicht, dass neben den bekannten mindestens **eine neue Sorte Teilchen** existiert, die bisher nicht Teil des sog. *Standardmodells der Elementarteilchenphysik* [1] ist.

Was sind Neutrinos?

Nach unserem derzeitigen Verständnis handelt es sich bei Neutrinos um winzige, leichte *Elementarteilchen* [1, 2], unteilbaren kleinsten Bestandteilen des Universums. **Neutrinos wechselwirken extrem selten** mit *gewöhnlicher Materie* [1] wie Sternen, Planeten oder Menschen; sie fliegen vielmehr durch uns hindurch, ohne dass wir dies bemerken.

Die Forscher kennen inzwischen **drei Neutrinosorten** [1] und wissen, dass diese sich - beispielsweise auf dem Weg von der Sonne zur Erde - ineinander umwandeln können. Trotzdem sind Neutrinos noch immer unverstanden.

Inzwischen haben drei Neutrinoexperimente **unerwartete Ergebnisse** und somit eine Abweichung des vorhergesagten Verhaltens dieser kleinen Teilchen gefunden.

Ein erster Hinweis darauf, dass wir das Verhalten von Neutrinos nicht verstehen, stammt **aus dem Jahr 2014** und wurde mithilfe des französischen *Double Chooz-Experimentes* [1, 5] gemessen. Jedoch schien die Messung bzw. die Abweichung von dem "normalen Verhalten" nicht statistisch signifikant, daher geriet sie schnell in Vergessenheit.

Im letzten Jahr tauchte die Meldung auf, dass am *RENO-Experiment* [1] mehr Neutrinos gemessen wurden als erwartet. Zwar erschien eine deutliche Abweichung in den Daten, jedoch war die Auswertung sehr oberflächlich.

Historie und neue Messungen

Die aktuelle abnormale Messung stammt von der **Daya Bay-Kollaboration** [4]: Bei dem chinesischen Experiment wurden viel mehr Neutrinos erzeugt als vorhergesagt.

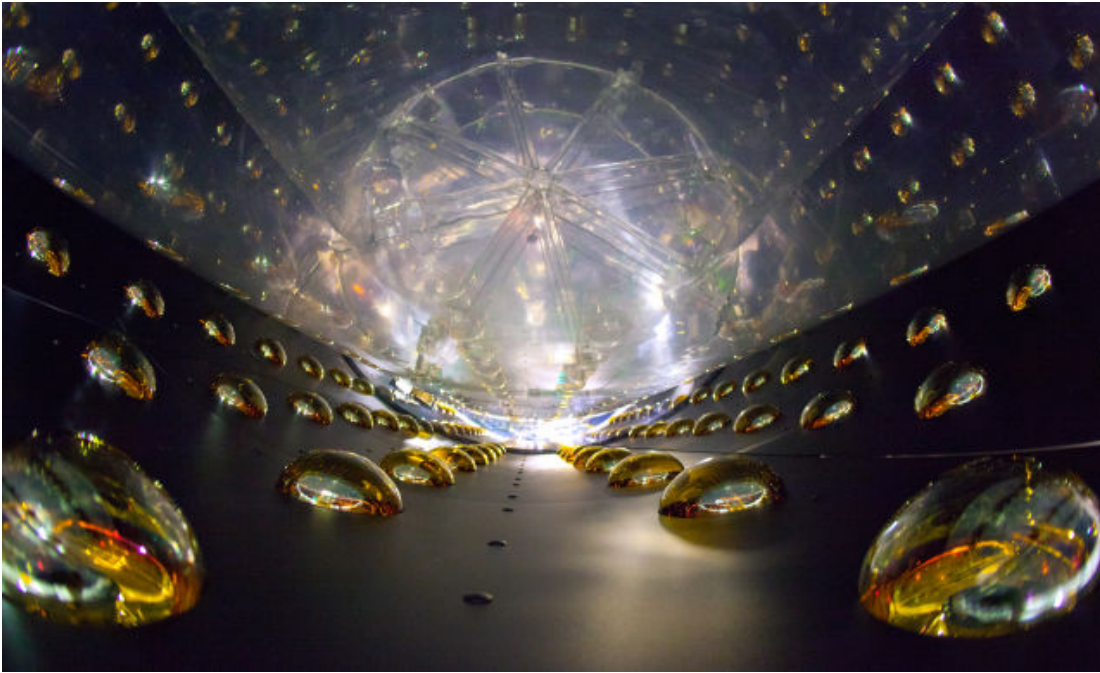


Abb. 1 Das Innere des chinesischen Daya Bay-Detektors.
© R. Kaltschmidt/LBNL

Die **statistische Signifikanz** [1] liegt bei **4,1 σ** [1]. Das bedeutet, mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als einem 10.000-tel handelt es sich um eine rein zufällige Messung. Dennoch erreichte das Experiment nicht die für eine "physikalische Entdeckung" notwendigen 5 σ [1].

Für ein derart selten wechselwirkendes Teilchen wie das Neutrino ist das eine bemerkenswerte statistische Signifikanz und deutet auf die Qualität des Neutrinodetektors. Bis vor einigen Jahren hielt man die Messung von Neutrinos eher für unwahrscheinlich.

Die Wissenschaftler *Reines* und *Cowan* [1] erhielten für die Entdeckung von Neutrinos **im Jahr 1995** den *Nobelpreis für Physik* [1], 65 Jahre nach der Vorhersage der kleinen Teilchen.

Im Jahr 2015 wurde der Nobelpreis erneut für die Neutrinosforschung vergeben: dieses Mal für die Entdeckung sog. **Neutrinooszillationen** [1]. Neutrinos besitzen offenbar die Eigenschaft, sich während ihrer Reise im Universum von einer Sorte in eine andere umwandeln zu können (Abb. 2). Das funktioniert nur, wenn Neutrinos eine, wenn auch sehr geringe - Masse besitzen.

Neutrinooszillationen

Dabei verhalten sich die unterschiedlichen Neutrinosorten nicht als einzelne, voneinander isolierte Teilchen, sondern vielmehr als Teil einer Teilchenfamilie, innerhalb derer ein Wechsel der Identität "normal" ist. Die Forscher glauben, dass **drei Neutrinosorten** (*flavors* [1]) existieren: *Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos* [1].



Abb. 2 Schematische Darstellung von Neutrinooszillationen.

Während ihrer Reise im Universum oszillieren Neutrinos, sie wandeln sich von einer in eine andere Neutrinosorte um. Beispielsweise ist ein Elektron-Neutrino eine Mischung aus anderen Neutrinosorten. Da jede Neutrinosorte eine geringe, aber leicht voneinander zu unterscheidende Masse besitzt, bewegen sich die verschiedenen Neutrinosorten mit leicht unterschiedlichen Geschwindigkeiten.

© M. Strassler

Während den Neutrinooszillationen ist die Identität eines bestimmten Neutrinos nicht statisch: **ein Neutrino kann seine Identität wechseln**, ähnlich einem Geheimagenten.

Beginnt man beispielsweise ein Experiment mit ausschliesslich Elektron-Neutrinos, kann man im Laufe der Zeit in einem entfernten Detektor einige Myon-Neutrinos messen, die sich durch diese Oszillationen "gebildet" haben. Dabei ist die Anzahl der oszillierten Neutrinos abhängig von der Entfernung zum Detektor. Die Messung der Neutrinos, die ihre Identität geändert haben, wird mit der theoretischen Vorhersage verglichen. Daher kennt man diesen Vorgang.

Neues von Daya Bay

Nun scheint es, dass die Neutrinos weitere Überraschungen für uns bereithalten: Das Neutrinoexperiment Daya Bay (Abb. 3) befindet sich an der Südküste Chinas, rund 55 Kilometer nordöstlich von *Hongkong* [1], in der Nähe von sechs grossen *Kernreaktoren* [1]. Die gemessenen Neutrinos werden künstlich erzeugt.



Abb. 3 Neutrino-Detektoren in Daya Bay (Halle 3).

Die Detektoren befinden sich in einem Bassin, das mit ultrareinem Wasser gefüllt ist.

© Daya Bay Coll.

Die drei bisher bekannten Neutrinosorten sind Bestandteil von *Teilchenwechselwirkungen* [1] bei *radioaktiven Zerfällen* [1], die im Bereich der *schwachen Kernkraft* [1] stattfinden.

In Daya Bay werden in jeder Sekunde rund 3.500 Milliarden *Elektron-Antineutrinos* [1] erzeugt. Die grosse Anzahl der erzeugten Neutrinos stellt sicher, dass immer wieder Neutrinos gemessen werden. Innerhalb einer Produktionsperiode von 217 Tagen konnten die Detektoren mehr als 300.000 Neutrinos messen. Die Detektoren befinden sich in Abständen von 360 Metern bis zu 1,9 Kilometern von den Reaktoren entfernt.

Das chinesische Experiment kann die Neutrinooszillationen bestätigen. In dem Experiment werden die Neutrinosorten mithilfe eines *Reaktors* [1], in dem sich eine bekannte Mischung von *Uran-* [1] und *Plutonium-Isotopen* [1] befindet, gemessen. Die radioaktiven Isotope zerfallen, dabei werden Neutrinos frei und mit viel Glück im entsprechenden Detektor gemessen.

Dabei haben die Forscher beobachtet wie sich *Elektron-Antineutrinos* [1] in *Tau-Antineutrinos* [1] umwandeln. Die Oszillation beider Neutrinosorten hängt von der Energie ab. Üblicherweise sollten im Detektor immer gleich viele Neutrinos der unterschiedlichen Sorten ankommen, je nachdem welche Sorten an dem Experiment beteiligt sind. Dagegen hat Daya Bay eine *Energieverteilung* [1] gemessen, die sich **von der Vorhersage** unterscheidet.

Die mathematische Auswertung der Messungen ist nicht sehr kompliziert und basiert auf Modellen der Kernfusion bzw. anschliessender Zerfallsprozesse. Dieser Auswertung können die Forscher entnehmen wie sich die dazugehörige Energieverteilung der Neutrinos durch die Oszillationen verändert hat und die Parameter (Eigenschaften) der Oszillationen mit anderen Experimenten vergleichen.

Probleme

Das Daya Bay-Experiment beobachtet zu wenige Neutrinos. Im konkreten Fall erwartete man, dass ein bestimmter Anteil der beteiligten Neutrinos oszilliert und zu Elektron-Neutrinos wird. Jedoch beobachtet man am Daya Bay stets weniger Neutrinos als man erwartet.

Die Anpassung (*Fit*) der Oszillationsparameter an das dazugehörige Energiespektrum berücksichtigt jedoch nicht die Gesamtzahl der Teilchen. Das gilt nicht nur für das Daya Bay-Experiment, sondern auch alle anderen Reaktor-Neutrinoexperimente. Möglicherweise hat dies zur Folge, dass auch das Daya Bay-Experiment 6 Prozent hinter der Vorhersage zurückliegt.

Dennoch zeigt das gemessene Energiespektrum am Daya Bay einen **erhöhten Wert** (*bump*), der nicht mit den auf Kernmodellen basierenden Vorhersagen übereinstimmt. Im Energiebereich von 5 *Megaelektronenvolt* (MeV) [1] wurden zu viele Neutrinos gemessen.

Erklärungsversuche

Die am Daya Bay gemessene Diskrepanz kann mithilfe von **vier Argumenten** erklärt werden: die Messung, die Reise, die Erzeugung und ein unverständlicher Hintergrund.

(1) Die Messung

Die drei zu Beginn genannten Experimente verwenden allesamt die gleiche Art Detektor, einen *Flüssigszintillator* [1] mit einem *Gadolinium-Target* (Gd) [1]. Leider sind die *Wirkungsquerschnitte* (Wechselwirkungen) [1] von Neutrinos mit Atomkernen immer noch nicht gut verstanden, weil Neutrinos so selten mit Materie wechselwirken und daher nur wenige Daten zur Verfügung stehen.

Daher kalibrieren die Experimentatoren ihre Detektoren mit anderen radioaktiven Quellen. Bei diesen Referenzexperimenten haben sich bisher keine erhöhten Werte (bumps) gezeigt. Das deutet nicht darauf, dass der Detektor für die bumps verantwortlich sei, so einer der Verantwortlichen.

(2) Die Reise

Das allgemeine Fehlen von Neutrinos in den Messungen könnte mit Oszillationen in eine bisher unentdeckte neue Neutrinoart, das sog. **sterile Neutrino** [1], erklärt werden. Eine Wechselwirkung unter der Beteiligung eines sterilen Neutrinos kann nicht im Bereich der schwachen Kernkraft liegen, sondern lediglich durch *Gravitation* [1], daher bezeichnet man derartige potentielle Neutrinos als steril. Sterile Neutrinos sind wahrscheinlich viel schwerer nachzuweisen als gewöhnliche Neutrinos.

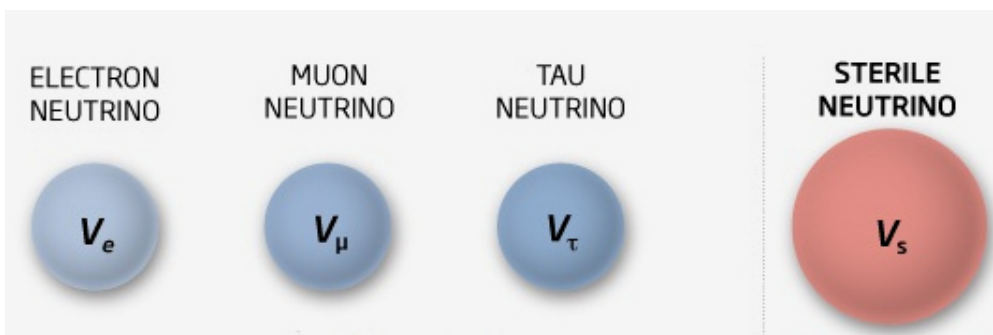


Abb. 4 Schematische Darstellung einer neuen Neutrinofamilie.

Die beobachtete Neutrinoanomalie könnte mithilfe eines vierten sog. sterilen Neutrinos (rechts) erklärt werden. Bisher ist ein viertes Neutrino nicht gemessen worden.

© somerandompearsonsblog.blogspot.com

Allerdings kann die Existenz von sterilen Neutrinos nicht ausgeschlossen werden. Zwar werden die Messungen der sog. *Kosmischen Hintergrundstrahlung* [1] meist so gedeutet, dass sie lediglich drei Neutrinosorten zulassen. Jedoch sind zahlreiche Forscher der Meinung, die Messungen liessen Platz für ein sehr selten auftauchendes steriles Neutrino, falls dessen Masse ausreichend gross sei.

Ein relativ schweres steriles Neutrino könnte sozusagen als "**warme Dunkle Materie**" [1] wirken. Ein Grossteil der grossskaligen Struktur des Universums kann mithilfe von sog. *kalter Dunkler Materie* [1] erklärt werden: Materie, die sich langsam genug bewegt und dennoch gravitative Materieanhäufungen bilden kann. Es existieren einige Anomalien, die durch warme Dunkle Materie erklärt werden könnten.

Jedoch erscheint es für viele Forscher sehr unwahrscheinlich, dass eine derartige Oszillation für den bump des Energiespektrums verantwortlich ist. Eine neuartige Neutrinooszillation könnte bestenfalls eine **Teilerklärung** liefern.

(3) Die Erzeugung

Die Berechnung des Energiespektrums zur Erklärung der fehlenden Neutrinos und des bumps basiert auf Kernfusions- und Zerfallsmodellen, insbesondere welche Isotope am Experiment beteiligt sind und wie sie zerfallen. Dabei stellt insbesondere die Anzahl der Isotope im Experiment eine Fehlerquelle dar.

Falls unser Verständnis der beteiligten radioaktiven Zerfälle unvollständig ist, könnte das bedeuten, dass wir nicht verstehen, wieviele Neutrinos überhaupt in dem Experiment entstehen. Möglicherweise bedeutet das kein bestehendes Neutrinodefizit.

(4) Der Hintergrund

Die Experimente Daya Bay und RENO geben an, ihr Signal sei mit der Leistung des Kernreaktors verknüpft, daher sei es unwahrscheinlich, dass es sich bei dem bump um einen Hintergrundeffekt handelt. Allerdings kann nach der Meinung einiger Wissenschaftler nicht ausgeschlossen werden, dass die Leistung des Reaktors von der Uhrzeit oder der Jahreszeit abhängt; beide könnten mit dem Hintergrund verknüpft sein - oder auch nicht.

FAZIT

Die konservativste Erklärung des bumps im Energiespektrum der Neutrinos bleibt bisher, dass die **Prozesse in dem beteiligten Kernreaktor unverstanden** sind. Gegenwärtig erscheint es jedoch vielen Forschern eher unwahrscheinlich, dass es sich bei dem bump um eine grundlegend neue Physik handelt, die an den beobachteten Prozessen beteiligt ist. Das gemessene Signal sei eher von der Modellierung des Energiespektrums abhängig, so einer der Kritiker.

Dennoch könnte die Messung am Daya Bay und den anderen beiden Experimenten real sein und nichts mit der Anwesen- oder Abwesenheit von sterilen Neutrinos zu tun haben. Dann wäre das Ergebnis **doch ein Hinweis auf eine neue Physik**.

Worum auch immer es sich bei der chinesischen Kernreaktor-Antineutrino-Anomalie handelt, benötigt eine **Bestätigung durch weitere Experimente**.

Am Daya Bay bereitet man sich auf den nächsten Run vor und hofft die aktuellen Messungen bestätigen zu können. Zur Aufklärung der Anomalie plant nun das *Fermilab* [1] den Bau einer Neutrinoquelle sowie mehreren Detektoren.

Falls Sie Fragen und Anregungen zu diesem Thema haben, schreiben Sie uns unter **kontakt@ig-hutzi-spechtler.eu**

Ihre
IG Hutzi Spechtler – Yasmin A. Walter

Quellenangaben:

[1] Mehr Information über astronomische Begriffe
www.wikipedia.de

[2] Mehr über Neutrinos
http://ig-hutzi-spechtler.eu/aktuelles_neutrinos_rennen_z%C3%A4hne.html
http://ig-hutzi-spechtler.eu/aktuelles_sonnenneutrinos.html

[3] Mehr Information über die Entdeckung und Daya Bay
Interactions NewsWire #4-16 (12 Feb 2016)
IHEP Press Release on behalf of the Daya Bay Collaboration (12 Feb 2016)
Homepage von Daya Bay: <http://dayabay.ihep.ac.cn/twiki/bin/view/Public/>

[4] An, F. P., et al. (*Daya Bay Collaboration*), *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016)

[5] Mehr Information über Double Chooz
<http://doublechooz.in2p3.fr>