Neutrinos

QUANTENPHYSIK · TEILCHEN UND LICHT

Während Sie diesen Satz lesen, fliegen durch Ihren Daumennagel rund 65 Milliarden Teilchen aus der Sonne [1]. Sie durchqueren Ihren Körper, das Haus, in dem Sie sitzen, und die ganze Erde, und auf der anderen Seite fliegen sie einfach weiter ins All. Keines davon hinterlässt eine Spur. Man nennt sie Neutrinos, und sie gehören zu den häufigsten Teilchen im Universum und zugleich zu den rätselhaftesten.

Dieses Jahr standen sie sogar im Mittelpunkt des Physik-Nobelpreises. Grund genug, sich anzusehen, was diese Geisterteilchen eigentlich sind, wie man sie überhaupt fängt und welche Fragen sie noch aufgeben.

Ein verzweifelter Ausweg

Die Geschichte beginnt mit einem Problem beim radioaktiven Betazerfall. Dabei wandelt sich ein Neutron im Atomkern in ein Proton um und schleudert ein Elektron hinaus. Eigentlich müsste dieses Elektron immer dieselbe Energie haben, so wie eine Kugel aus einer bestimmten Kanone immer gleich schnell fliegt. Die Messungen zeigten aber ein breites Spektrum. Ein Teil der Energie schien spurlos zu verschwinden. Niels Bohr war zeitweise sogar bereit, den Energieerhaltungssatz aufzugeben.

Wolfgang Pauli, Erfinder des Pauli-Prinzips, schlug einen anderen Weg vor. In einem berühmten Brief vom 4. Dezember 1930 an die Teilnehmer einer Physikertagung in Tübingen, die er mit „Liebe Radioaktive Damen und Herren“ ansprach, bot er einen „verzweifelten Ausweg“ an. Vielleicht entstehe beim Betazerfall ein weiteres, elektrisch neutrales und sehr leichtes Teilchen, das die fehlende Energie mitnimmt und das man nicht sieht. Persönlich nach Tübingen kommen könne er leider nicht, schrieb er, weil er in Zürich auf einem Ball unabkömmlich sei [2]. Den Namen Neutrino, „kleines Neutrales“, gab dem Teilchen wenig später der Italiener Enrico Fermi.

Ein Teilchen, das niemand fangen kann

Pauli selbst hielt es für möglich, dass man sein Teilchen nie nachweisen würde. Neutrinos haben keine elektrische Ladung und spüren nur die schwache Kernkraft, die ihrem Namen alle Ehre macht. Ein Neutrino aus der Sonne durchquert die ganze Erde fast immer, ohne ein einziges Mal anzustoßen.

Der Trick ist, sehr viele Neutrinos auf sehr viel Material treffen zu lassen. 1956 stellten Clyde Cowan und Frederick Reines ihren Detektor neben einen Kernreaktor in South

Carolina, aus dem gewaltige Mengen Neutrinos strömen. Gelegentlich stieß eines davon mit einem Proton im Detektor zusammen und hinterließ ein charakteristisches Doppelsignal. Sie schickten Pauli ein Telegramm, und ihre Veröffentlichung trug den nüchternen Titel „Nachweis des freien Neutrinos: eine Bestätigung“ [3]. Seitdem kennt man drei Sorten von Neutrinos, passend zu den drei Verwandten des Elektrons: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos.

Teilchen, die ihre Identität wechseln

Die erstaunlichste Eigenschaft der Neutrinos zeigte sich, als man begann, die Neutrinos aus der Sonne zu zählen. Es kamen nur etwa ein Drittel so viele an, wie die Theorie der Sonne vorhersagte [1]. Lag die Theorie falsch, oder verschwanden die Neutrinos unterwegs?

Weder noch. Die Neutrinos wechseln auf dem Weg ihre Sorte. Ein Elektron-Neutrino, das in der Sonne entsteht, kann auf der Erde als Myon- oder Tau-Neutrino ankommen, und die frühen Detektoren konnten nur eine Sorte sehen. 1998 fand der japanische Detektor Super-Kamiokande diesen Wechsel bei Neutrinos aus der Atmosphäre [4], 2002 bestätigte ihn das kanadische Sudbury Neutrino Observatory für die Sonnenneutrinos [5]. Dafür gab es 2015 den Nobelpreis.

Hinter diesem Wechsel steckt reine Quantenphysik. Die drei Sorten, die man bei Entstehung und Nachweis unterscheidet, sind nicht identisch mit den Zuständen, in denen ein Neutrino eine feste Masse hat. Jede Sorte ist eine Überlagerung von Massenzuständen. Diese entwickeln sich unterwegs ein wenig unterschiedlich schnell, und so verschiebt sich die Mischung. Für zwei Sorten lässt sich die Wahrscheinlichkeit, nach der Strecke L die andere Sorte anzutreffen, in einer Zeile aufschreiben:

$$P_{a \to b} = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 \cdot L}{4E}\right) \tag{1}$$

Dabei ist θ ein Mischungswinkel, E die Energie und Δm^2 der Unterschied der Massenquadrate. Die Wahrscheinlichkeit schwankt mit der Strecke periodisch auf und ab (Abb. 1). Das Wichtigste an der Formel steckt in Δm^2. Wären alle Neutrinos masselos, wäre dieser Unterschied null und es gäbe keine Oszillation. Dass Neutrinos ihre Sorte wechseln, beweist also, dass sie eine Masse haben, auch wenn das Standardmodell der Teilchenphysik ursprünglich masselose Neutrinos vorsah.

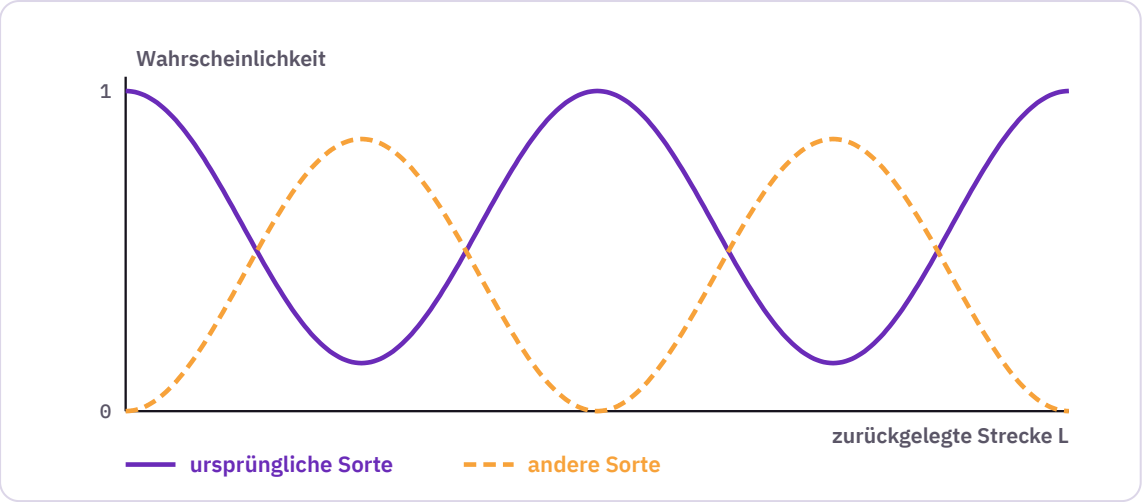


Abb. 1: Neutrino-Oszillation zwischen zwei Sorten, schematisch nach Gleichung (1). Eigene Darstellung.

Wie schwer ist ein Neutrino?

Die Oszillationen verraten nur Massenunterschiede, nicht die Massen selbst. Diese direkt zu messen ist die Aufgabe des Experiments KATRIN am Karlsruher Institut für Technologie. Es untersucht den Betazerfall von Tritium mit einer 70 Meter langen Anlage und einem Spektrometer von 10 Metern Durchmesser, und zwar genau das Ende des Elektronenspektrums, wo sich die winzige Neutrinomasse bemerkbar macht. Im April 2025 veröffentlichte die Kollaboration ihr bisher bestes Ergebnis: Ein Neutrino wiegt weniger als 0,45 Elektronenvolt geteilt durch die Lichtgeschwindigkeit zum Quadrat, das sind etwa $8 \cdot 10^{-37}$ Kilogramm [6]. Zum Vergleich: Ein Elektron ist mindestens eine Million Mal schwerer.

Auch bei den Mischungen geht es voran. Das chinesische Experiment JUNO, ein kugelförmiger Tank mit 20 000 Tonnen Flüssigkeit 700 Meter unter der Erde in Jiangmen, nahm im August 2025 den Betrieb auf. Schon nach 59 Messtagen lieferte es die bisher genauesten Werte für mehrere Oszillationsparameter und verringerte deren Unsicherheit um den Faktor 1,6 gegenüber allen bisherigen Messungen zusammen [7]. Eine der großen offenen Fragen, die JUNO beantworten soll, ist die Reihenfolge der Massen: Welches der drei Neutrinos ist das schwerste?

Boten aus dem All

Weil Neutrinos durch alles hindurchfliegen, bringen sie Nachrichten aus Gegenden mit, die man sonst nicht sehen kann, aus dem Inneren der Sonne, aus explodierenden Sternen oder aus den Zentren ferner Galaxien. Der Physik-Nobelpreis 2026 ging an Francis Halzen für das Neutrino-Teleskop IceCube, das einen Kubikkilometer antarktisches Eis mit Lichtsensoren durchzieht und hochenergetische Neutrinos aus dem Weltall nachgewiesen hat. Die ganze Geschichte steht in unserem Artikel zum Physik-Nobelpreis 2026.

Im Mittelmeer entsteht mit KM3NeT ein ähnliches Teleskop im Wasser. Sein Detektor ARCA, rund 3450 Meter tief vor der Küste Siziliens, registrierte am 13. Februar 2023 ein Neutrino mit einer geschätzten Energie von etwa 220 Peta-Elektronenvolt, das energiereichste, das je beobachtet wurde [8]. Das ist rund dreißigtausendmal mehr Energie, als der Large Hadron Collider am CERN einem einzelnen Proton mitgibt, nämlich 6,8 Tera-Elektronenvolt [9]. Woher es kam, ist noch offen.

Pauli hatte sein Teilchen einst als verzweifelte Notlösung erfunden. Fast hundert Jahre später ist es zu einem Werkzeug geworden, mit dem man ins Innere von Sternen und in die entferntesten Winkel des Universums schaut. Und es hat seine Geheimnisse noch längst nicht alle preisgegeben.

Zum Weiterlesen

Eine kurze Geschichte der Zeit

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2025 · ISBN 978-3-608-98895-6

Erklärt die Elementarteilchen und Kräfte, zu denen das Neutrino gehört, und die Physik der Sterne, aus denen viele Neutrinos kommen.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. A. Davour: *Ice at the South Pole reveals cosmic particle accelerators.* Popular information, Nobel Prize in Physics 2026. nobelprize.org.
2. W. Pauli: Brief an die Teilnehmer der Tagung in Tübingen vom 4. Dezember 1930 (Pauli-Archiv, CERN). Gekürzte englische Fassung: pp.rhul.ac.uk.
3. C. L. Cowan Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire: *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.* In: Science 124 (1956), S. 103–104, doi:10.1126/science.124.3212.103.
4. Super-Kamiokande Collaboration (Y. Fukuda u. a.): *Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos.* In: Physical Review Letters 81 (1998), S. 1562–1567, doi:10.1103/PhysRevLett.81.1562.

5. SNO Collaboration (Q. R. Ahmad u. a.): *Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory.* In: Physical Review Letters 89 (2002), 011301, doi:10.1103/PhysRevLett.89.011301.
6. KATRIN Collaboration (M. Aker u. a.): *Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data.* In: Science 388 (2025), S. 180–185, doi:10.1126/science.adq9592. Dazu: KIT, Presseinformation 029/2025, kit.edu.
7. JUNO Collaboration: *Measurement of reactor neutrino oscillation with the first JUNO data.* In: Nature 654 (2026), S. 343–348, doi:10.1038/s41586-026-10538-z. Dazu: Nature Asia, Pressemitteilung vom 11. Juni 2026, natureasia.com.
8. KM3NeT Collaboration: *Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT.* In: Nature 638 (2025), S. 376–382, doi:10.1038/s41586-024-08543-1. Dazu: Nikhef, nikhef.nl.
9. CERN: *LHC Run 3 Media Kit.* home.cern.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Neutrinos. Stand: Oktober 2026. URL:
https://quanten.de/neutrinos.html (PDF:
https://quanten.de/pdf/neutrinos.pdf)
```

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Physik-Nobelpreis 2026 · Das Pauli-Prinzip · Antimaterie · Das Higgs-Boson

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/neutrinos.html