



Ein rarer Bote kosmischer Beschleuniger

Der IceCube-Detektor hat erstmals ein Neutrino nachgewiesen, das beim resonanten Glashow-Prozess entstanden sein könnte.

Jürgen Brunner

Wolfgang Pauli schlug 1930 die Existenz von Neutrinos vor, um die Energieerhaltung in Betazerfällen zu gewährleisten. Wenig später formulierte Enrico Fermi die erste effektive Theorie einer schwachen Wechselwirkung, die Betazerfälle und Neutrinoreaktionen beschreibt. Diese verknüpft vier an einem Punkt interagierende Fermionen mit einer Kopplungskonstanten $G_F = (293 \text{ GeV})^{-2}$, welche die „Schwäche“ dieser neuen Kraft gegenüber der elektromagnetischen verdeutlicht.¹⁾

Die vereinheitlichte Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung ersetzte Anfang der 1960er-Jahre die Punktwechselwirkung der vier Fermionen durch den Austausch der Vektorbosonen W und Z . Die unterschiedliche Stärke von elektromagnetischer und schwacher Kraft ergibt sich nun aus den hohen Massen $m_W = 80,4 \text{ GeV}$ und $m_Z = 91,2 \text{ GeV}$ der W - und Z -Bosonen. Bei der Annihilation eines Teilchen-Antiteilchen-Paares mit einer Schwerpunktsenergie, die der jeweiligen Vektorbosonenmasse entspricht, werden diese als reelle Teilchen erzeugt. So entstanden

am LEP-Beschleuniger des CERN in den 1990er-Jahren bei der Kollision von Elektronen und Positronen Millionen von Z -Bosonen, die es erlaubten, das Standardmodell der Teilchenphysik präzise zu untersuchen.

Um W -Bosonen zu erzeugen, muss ein Antielektronenneutrino mit einem Elektron annihilieren. Bereits 1959 hatte Sheldon Glashow bei Vorarbeiten zur Entwicklung der elektroschwachen Theorie darauf hingewiesen, dass dieser Prozess resonant stattfindet, also mit einem deutlich erhöhten Wirkungsquerschnitt bei einer bestimmten Neutrinoenergie E_ν [1]. Diese ergibt sich im Ruhesystem des Elektrons zu $6,3 \text{ PeV}$. Die Energieabhängigkeit des Wirkungsquerschnitts unterscheidet sich von Neutrino-Nukleon-Streuquerschnitten: Bei der Resonanzenergie liegt er um mehr als zwei Größenordnungen höher (**Abb. 1**).

Neutrinos mit Energien im PeV -Bereich lassen sich nicht mit heutigen Teilchenbeschleunigern erzeugen, können aber gemeinsam mit kosmischer Strahlung entstehen. Diese besteht aus hochenergetischen Teilchen, die aus Schockwellen von Supernovae oder den Jets supermas-

siver Schwarzer Löcher in den Zentren aktiver Galaxien stammen. Ein direkter Nachweis dieser kosmischen Beschleuniger ist eines der Forschungsziele von Neutrinoobservatorien wie IceCube.

Seit zehn Jahren weisen die 5160 optischen Module von IceCube am Südpol Neutrinos mit Sekundärelektronenvervielfachern nach. Auf 86 vertikalen Detektorlinien befinden sich die Module zwischen 1450 und 2450 Meter tief im antarktischen Eis; das aktive Detektorvolumen entspricht etwa einem Kubikkilometer. Bei einer Wechselwirkung der Neutrinos entstehen geladene Teilchen, die sich schneller als das Licht im klaren Eis fortbewegen. Das dabei emittierte Cherenkov-Licht weisen die Sekundärelektronenvervielfacher mit einer Zeitauflösung von zwei Nanosekunden nach. Aus der Rekonstruktion der Cherenkov-Kegel lässt sich die Richtung des Neutrinos bestimmen; die Helligkeit des Ereignisses, also die Anzahl nachgewiesener Photonen, erlaubt Rückschlüsse auf die Neutrinoenergie.

Der IceCube-Detektor hat bisher etwa eine Million atmosphärischer Neutrinos mit Energien zwischen

1) Alle Angaben in natürlichen Einheiten: $c = \hbar = 1$.

10 GeV und 500 TeV nachgewiesen, die entstehen, wenn kosmische Strahlen in der Erdatmosphäre wechselwirken. Oberhalb von 30 TeV ließen sich Dutzende Neutrinos astrophysikalischen Ursprungs beobachten, eine Handvoll davon auch mit einigen PeV. Diese entstehen außerhalb unseres Sonnensystems und hinterlassen im Wesentlichen zwei Signaltypen in IceCube. Myonneutrinos erzeugen durch den Austausch eines geladenen W-Bosons ein hochenergetisches Myon, das mehrere Kilometer im Eis zurücklegen kann und sich als Spur im Detektor zeigt. Bei allen anderen Reaktionen entstehen Elektronen und Hadronen, die sehr schnell sekundär wechselwirken und als Teilchenschauer eine Ausdehnung von wenigen Metern erreichen. Im Vergleich zur Dimension des Detektors emittiert also eine Punktquelle das Cherenkov-Licht, sodass sich die verschiedenen Reaktionen nicht anhand der Schauertopologie unterscheiden lassen.

Um nur Neutrinoereignisse aus dem Innern des Detektors zu selektieren, konzentrierten sich frühere Analysen hochenergetischer Schauerereignisse auf ein stark reduziertes Volumen im zentralen Teil des IceCube-Detektors [3]. Nun hat die Kollaboration dieses Kriterium abgeschwächt und ein Ereignis gefunden, das am 8. Dezember 2016 um 01:47:59 UTC eine Energie von $(6,05 \pm 0,72)$ PeV im Detektor hinterließ – ein Rekordwert (Abb. 2) [4]. Der Fehler enthält statistische Unge-

nauigkeiten der Messung und systematische Unsicherheiten, die sich unter anderem aus der Modellierung der Lichtausbreitung im Eis ergeben. Diese Energie ist kompatibel mit der Energie der Glashow-Resonanz, wobei der größte Anteil direkt aus einem Schauer stammt.

Um zu zeigen, dass es sich tatsächlich um ein „Glashow-Ereignis“ handelt, muss das Signal astrophysikalischen Ursprungs sein. Da das Spektrum der kosmischen Strahlen mit der Energie steil abfällt, lässt sich ein atmosphärischer Ursprung für das Ereignis mit einer Signifikanz von mehr als 5σ ausschließen. Die Form des Signals ist keine Spur (Abb. 2), sodass es sich nicht um die Reaktion $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$ handeln kann. Die Reaktionen $\nu_e + N \rightarrow e + X$ sowie $\bar{\nu}_e + N \rightarrow \bar{\nu}_e + X$ mit einem Targetnukleon N und dem hadronischen Endzustand X sind mit dem gemessenen Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit von einem Prozent kompatibel, lassen sich also nur mit einer Signifikanz von $2,3\sigma$ ausschließen. Der eindeutige Nachweis des resonanten Glashow-Prozesses ist also nicht gelungen, aber ein wichtiger erster Schritt dorthin.

Der Nachweis derartiger Ereignisse hilft auch, potenzielle kosmische Neutrinoquellen zu verstehen. Zwei Prozesse können in den Beschleunigern für kosmische Strahlung einen begleitenden Neutrinofluss hervorrufen. Bei der resonanten Wechselwirkung von Protonen mit hochenergetischen Photonen entstehen π^+ -Mesonen, die in positive Myonen und Neutrinos

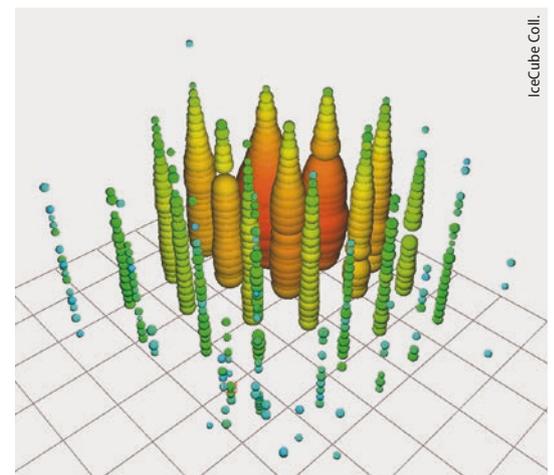


Abb. 2 Im IceCube-Detektor haben die Sekundärelektronenvervielfacher auf das „Glashow-Ereignis“ reagiert, indem sie unterschiedliche Ladungen (Kugelgröße) zwischen den Zeiten 0 (rot) und etwa 1 μ s (blau) registrierten.

zerfallen ($p\gamma$ -Prozess). Konkurrierend liefert der pp -Prozess π^+ - und π^- -Mesonen und damit sowohl Neutrinos als auch Antineutrinos. Da nur letztere zu einem Glashow-Resonanz-Signal führen, würde ein Nachweis auf die Prävalenz des pp -Prozesses hinweisen. Längere Datenreihen von IceCube sowie weitere, größere Detektoren sollten demnächst die Messung eines signifikanten Glashow-Resonanz-Signals ermöglichen. Dazu gehören die Neutrinooteleskope der nächsten Generation, die im Baikalsee (GVD) und im Mittelmeer (KM3NeT [5]) bereits konstruiert werden, sowie die IceCube-Erweiterung IC-Gen2, die sich am Südpol in Planung befindet [6].

[1] Sh. L. Glashow, Phys. Rev. **118**, 316 (1960)
 [2] G.-Y. Huang und Q. Liu, JCAP03, 005 (2020)
 [3] R. Abbasi et al. (IceCube Coll.), arXiv:2011.03545 (2020)
 [4] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), Nature **591**, 220 (2021)
 [5] S. Adrián-Martínez et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **43**, 084001 (2016)
 [6] M. G. Aartsen et al. (IceCube-Gen2 Coll.), arXiv:2008.04323 (2020)

Der Autor

Dr. Jürgen Brunner, Centre de Physique des Particules de Marseille, 163, Avenue de Luminy, Case 907, 13288 Marseille Cedex 09, Frankreich

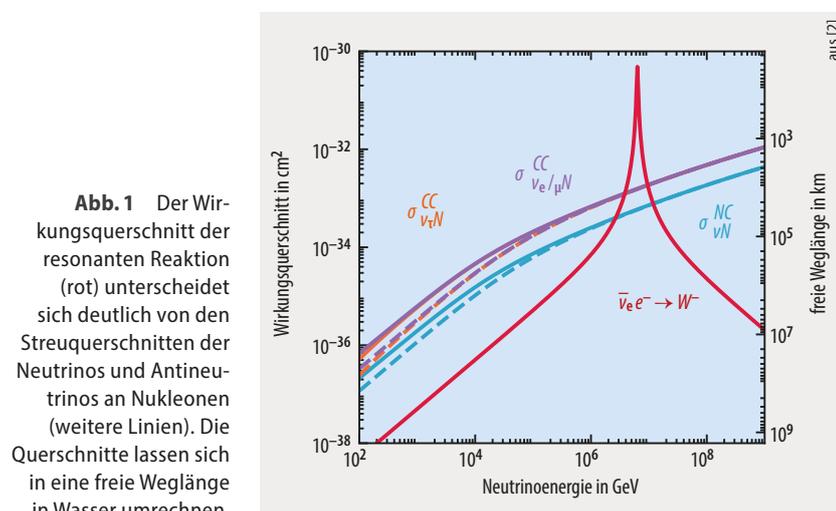


Abb. 1 Der Wirkungsquerschnitt der resonanten Reaktion (rot) unterscheidet sich deutlich von den Streuquerschnitten der Neutrinos und Antineutrinos an Nukleonen (weitere Linien). Die Querschnitte lassen sich in eine freie Weglänge in Wasser umrechnen.