

■ Folgenreicher Nachweis

Erstmals ist der Nachweis der kohärenten Streuung von Neutrinos an Kernen gelungen.

Mehr als vier Jahrzehnte nach der Postulierung der kohärenten Neutrino-Kern-Streuung gelang der COHERENT-Kollaboration vor kurzem die erstmalige Beobachtung dieses Prozesses [1]. Möglich war dieser experimentelle Durchbruch durch die Kombination einer hierfür ideal geeigneten Neutrinoquelle mit Energien bis 50 MeV und eines extrem untergrundarmen Detektors zum Nachweis der niederenergetischen Rückstoßkerne, die kinetische Energien von nur wenigen keV besitzen.

Der Nachweis astrophysischer Neutrinos aus der Sonne oder einer Supernova sowie terrestrischer Neutrinos aus Kernreaktoren und Beschleunigern erfordert den Einsatz riesiger Detektoren. Die wohl bekanntesten Beispiele sind Super-Kamiokande mit einer Targetmasse von 40 kt H₂O und der SNO-Detektor mit 1000 t D₂O, deren Resultate entscheidend waren für den Nachweis einer von Null verschiedenen Neutrinomasse (Physiknobelpreis 2015, [2]). Die enorme Größe dieser Detektoren

ist den sehr kleinen Wirkungsquerschnitten von Neutrinos geschuldet, die im Energiebereich von einigen MeV meist sehr viel kleiner als 10⁻⁴⁰ cm² sind. Bei diesen Prozessen wechselwirkt das Neutrino über geladene (CC, Charged Current) oder neutrale (NC, Neutral Current) schwache Ströme mit einem Elektron eines Atoms oder einem Neutron bzw. Proton eines Atomkerns.

Bei einem *kohärenten* NC-Streuprozess eines Neutrinos an einem Kern erfolgt dagegen die Wechselwirkung mit allen Neutronen des einige Femtometer großen Kerns (Abb. 1). Um die kohärente Wechselwirkung über das gesamte Kernvolumen nicht zu zerstören, darf der Impulstransfer des Neutrinos nicht zu groß sein. Daher spielt dieser Effekt nur bei Neutrinoenergien kleiner als 50 MeV eine Rolle, bei höheren Energien „sieht“ das Neutrino den Aufbau des Kerns aus den einzelnen Nukleonen. Der große Vorteil dieses Prozesses ist der etwa um einen Faktor N^2 (N = Anzahl der Neutronen im Kern) erhöhte Wirkungsquerschnitt gegenüber Reaktionen mit nur einem Nukleon. Dies erlaubt den Einsatz moderner Detektoren, wie Szintillatoren oder Ge-Detektoren, mit Massen deutlich kleiner als 1 t. Die große experimentelle Herausforderung besteht im Nachweis des sehr kleinen Signals, da der Rückstoßkern nur wenige keV an kinetischer Energie erhält. Das erfordert Detektoren mit entsprechend niedriger Energieschwelle, extrem geringer Eigenaktivität sowie einer sehr guten Untergrundabschirmung. Durch diese Anforderungen ließ der erste Nachweis auf sich warten.

Die 80-köpfige COHERENT-Kollaboration aus 21 Institutionen in vier Ländern (USA, Russland, Kanada und Süd-Korea) benutzt für ihre Untersuchungen die weltweit stärkste gepulste Spallationsneutronenquelle SNS in Oak Ridge (Tennessee, USA). Dort wird mit einer Frequenz von 60 Hz ein intensiver, nur 1 μ s langer Protonenstrahl

von rund 1 GeV Strahlenergie auf ein Quecksilber-Target geleitet. Dabei entsteht eine große Anzahl niederenergetischer Pionen π^+ und Myonen μ^+ , die in Ruhe im Target zerfallen und Elektron-Neutrinos sowie Myon-Neutrinos und Myon-Antineutrinos mit Energien bis etwa 50 MeV erzeugen. Die Vorteile dieser Quelle liegen in den im Vergleich zu Kernreaktoren relativ hohen Neutrinoenergien, die gerade noch das Kohärenzkriterium erfüllen, sowie in der gepulsten Natur der Neutrinostrahlen. Der sehr intensive Fluss an Spallationsneutronen nahe am Target erfordert umfangreiche Abschirmmaßnahmen, im Falle der SNS mehr als 19 m Material zur Moderation. Das stellt sicher, dass die beobachteten Rückstoßkerne wirklich von Neutrinos und nicht von Neutronen stammen.

Erwartete Ereigniszahl detektiert

Die Kollaboration betreibt in einem Tunnel nahe am Target eine Reihe von Detektoren zum Nachweis der Neutrinos aus der Pion-Myon-Zerfallskette. In [1] wurden zunächst die Resultate für einen sehr untergrundarmen Cäsiumiodid-Detektor mit einer Targetmasse von 14,6 kg vorgestellt. Nach einer 15-monatigen Messzeit verbleibt in einem 12 μ s langen Analyseintervall (5,5 Myonen-Lebensdauern) eine Rate von (134 ± 22) Streueignissen an ¹³³Cs- und ¹²⁷I-Kernen, in Übereinstimmung mit der Erwartung des Standardmodells von (173 ± 48) . In einem vergleichbaren Intervall ohne Strahl ergibt sich hingegen kein Überschuss (Abb. 2). Diese Statistik impliziert ein Konfidenzlevel von $6,7 \sigma$ für den (ersten) Nachweis der kohärenten Neutrino-Kernstreuung und setzt Neutrino-Quark-Kopplungen jenseits des Standardmodells enge Grenzen [1]. Weitere Resultate der andauernden Messungen an der SNS werden folgen.

Was bedeuten diese schönen Resultate für die Zukunft der Neutri-

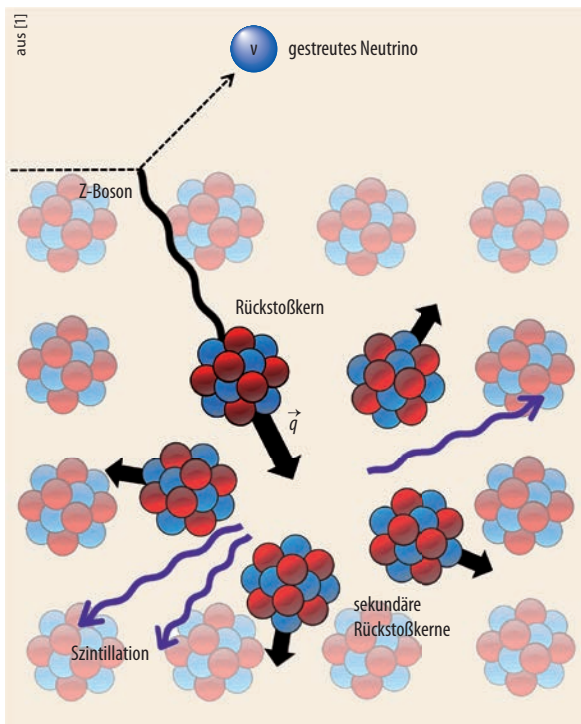


Abb. 1 Bei der kohärenten elastischen Streuung reagiert das einlaufende Neutrino durch Austausch eines Z-Bosons mit einem ganzen Atomkern des Detektormaterials.

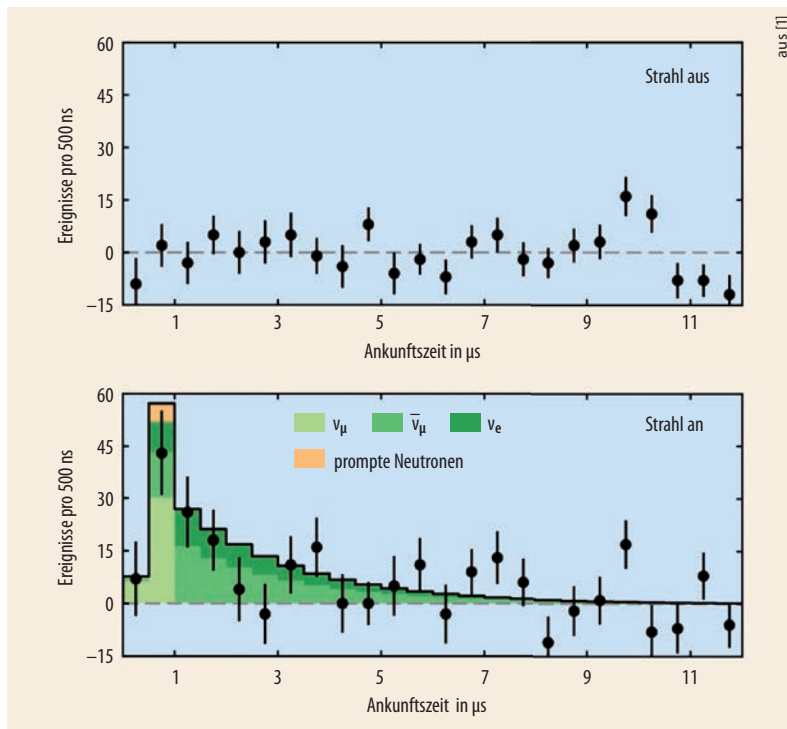


Abb. 2 Die kohärente elastische Neutrino-Kernstreuung zeigt sich deutlich in der zeitlichen Verteilung der „On-Beam-Ereignisse“. Das beobachtete Signal folgt dem Proton-on-Target-Trigger der SNS innerhalb von etwa 10 μ s. Eine Kombina-

tion prompter ν_{μ} aus einem Pionzerfall sowie verzögerter ν_e und $\bar{\nu}_{\mu}$ aus dem nachfolgenden Myonzerfall beschreibt es gut. Der strahlinduzierte Untergrund, z. B. durch prompte Neutronen, fällt dagegen gering aus.

no- und Astroteilchenphysik? Zum einen kann dies dazu dienen, nach Physik jenseits des Standardmodells zu suchen, z. B. nach sterilen Neutrinos, die nicht über CC- und NC-Prozesse wechselwirken, sondern sich über Oszillationseffekte manifestieren würden. Weitere interessante Fragen sind, ob Neutrinos eine innere Struktur und ein magnetisches Moment besitzen oder neuen Wechselwirkungen mit Materie unterliegen [3]. Kohärente Streuprozesse von Neutrinos spielen auch in der Astrophysik eine wichtige Rolle, z. B. beim Neutrino-Transport in Neutronensternen und bei Kernkollaps-Supernovae.

Die vielleicht wichtigste Quer-Verbindung ergibt sich bei der Suche nach der Dunklen Materie in Form von supersymmetrischen WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle). Der Nachweis eines WIMPs im GeV-TeV-Massenbereich aus dem galaktischen Halo basiert ebenfalls auf einem Streuprozess an einem Targetkern, führt also wie die kohärente Neutrino-Kernstreuung zu einem Rückstoßkern im keV-Bereich. Während

bei der heutigen Generation von Experimenten zum Nachweis von schweren WIMPs (XENON1T, LUX) kohärente Streuprozesse von Neutrinos als Untergrund noch keine Rolle spielen, gilt dies nicht für zukünftige Projekte wie DARWIN [4]: Kohärente Streuprozesse von Neutrinos aus der Sonne, der Hin-

tergrund aus Supernova-Neutrinos und niederenergetische Atmosphären-Neutrinos beeinflussen wesentlich die Sensitivität dieses geplanten Experiments. Ein genaues Studium kohärenter Neutrino-Reaktionen an Xenon und anderen Targetkernen ist daher sehr wichtig. Die SNS und die zukünftige European Spallation Source (EES) in Lund, Schweden, bieten hierfür ideale Voraussetzungen.

Der erstmalige Nachweis kohärenter Neutrino-Kernstreuung hat die Tür zu einem neuen Forschungsfeld mit Neutrinos aufgestoßen mit weit reichenden Implikationen für die Astroteilchen- und Astrophysik. Weitere Experimente auf Basis der kohärenten Neutrino-Streuung an Kernen werden unser Wissen um die Eigenschaften von Neutrinos signifikant erweitern [3] und verheißen langfristig die Miniaturisierung von Neutrino-detektoren und sogar die Nutzung von Neutrinos in technologischen Anwendungen.

Guido Drexlin und Kathrin Valerius

- [1] D. Akimov et al. (COHERENT Collaboration), *Science* (2017), DOI: 10.1126/science.aao0990
- [2] G. Drexlin, M. Lindner und C. Weinheimer, *Physik Journal*, Dezember 2015, S. 24
- [3] M. Lindner, W. Rodejohann und X. Xu, *JHEP* **03**, 097 (2017)
- [4] J. Aalbers et al. (DARWIN Collaboration), *JCAP* **11**, 017 (2016)

Prof. Dr. Guido Drexlin und Dr. Kathrin Valerius, Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76944 Eggenstein-Leopoldshafen

KURZGEFASST

■ Kosmisches Netz enger geknüpft

Im kosmologischen Standardmodell haben sich die großräumigen Strukturen des heutigen Universums – das kosmische Netz – aus winzigen Fluktuationen unter dem Einfluss der Gravitation entwickelt. Für eine dreidimensionale Visualisierung untersuchte ein internationales Team die exakten Entfernungen und Geschwindigkeiten von über 8000 Galaxien. Dieses Bild stimmt gut mit dem Standardmodell überein. Wie erwartet bewegen sich die Galaxien auf Masseanhäufungen oder Knoten im kosmischen Netz zu, während sie von Leerräumen wegtreiben. Neue Techniken erlaubten es, auch Galaxien einzubeziehen, die zuvor durch den Staub in der Scheibe der Milchstraße nicht beobachtbar waren. D. Pomarède et al., *ApJ* **845**, 55 (2017)

■ Physikalisches Ping-Pong

Eine feste oszillierende Oberfläche kann einen weichen, verformbaren Ball oder einen Flüssigkeitstropfen mit deutlich höherer Geschwindigkeit in die Luft schleudern als einen festen Ball gleicher Masse. Diesen Schluss zogen Wissenschaftler aus Nizza nach ihren Experimenten mit Wassertropfen, die sie mit einer oszillierenden, wasserabweisenden Membran beschleunigten. Sie zeigten, dass eine Art Synchronisation zwischen der internen Vibration des Projektils und der Frequenz der schwingenden Oberfläche die kinetische Energie des Projektils mehr als verdoppeln kann. Diese Erkenntnis könnte man sich in der Ballistik oder in der Mikrofluidik zunutze machen. C. Raufaste et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 108001 (2017)