



Die DUNE-Kaverne wird in rund anderthalb Kilometer Tiefe am SURF-Labor in South Dakota, USA, gegraben.

MAX-BORN-PREIS

Neutrinosuche im Untergrund

In South Dakota entsteht derzeit eines der ehrgeizigsten Neutrinoexperimente.

Stefan Söldner-Rembold

In einem ehemaligen Goldbergwerk in den Black Hills in South Dakota, USA, haben die Arbeiten zum Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) begonnen. Um die Kavernen für die Detektormodule zu schaffen, sind 800 000 Tonnen Gestein zu bewegen – mehr als 70 Prozent davon ist geschafft. DUNE ist das bisher größte internationale Wissenschaftsprojekt auf US-amerikanischem Territorium, mit Partnern aus über 30 Ländern, darunter zahlreiche europäische Länder und das CERN.

Wenn alles nach Plan verläuft, wird das DUNE-Experiment 2030 die ersten Daten liefern – hundert Jahre nachdem Wolfgang Pauli die Existenz von Neutrinos als „verzweifelter Ausweg“ postulierte, um das Problem des kontinuierlichen Energiespektrums im β -Zerfall zu lösen. Es dauerte 26 Jahre, bis Frederick Reines und Clyde L. Cowan der erste experimentelle Nachweis von Neutrinos mithilfe von Reaktoren gelang. Eine neue Generation gigantischer Neutrino-Observatorien soll nun hel-

fen, die rätselhafte Rolle dieser Teilchen im Universum zu verstehen. So könnten Neutrinos den Schlüssel dazu liefern, warum im Universum Materie über Antimaterie dominiert. Neutrinos sind zudem wichtige Boten astrophysikalischer Ereignisse: Eine Supernova emittiert mehr als 99 Prozent ihrer Energie über Neutrinos, und Neutrinoflüsse von 10^{11} Neutrinos pro Sekunde und Quadratzentimeter erreichen uns von Fusionsreaktionen in der Sonne.

Neutrinos gehören zusammen mit Elektronen zu den Leptonen, tragen aber keine elektrische Ladung und spüren nur die schwache Wechselwirkung, die unter anderem für den β -Zerfall verantwortlich ist. Sie wechselwirken daher nur sehr selten mit Materie – die mittlere freie Weglänge in Wasser eines Neutrinos mit einer Energie von 1 GeV entspricht etwa der Distanz von der Erde zum Mond. Der Nachweis von Neutrinos erfordert daher äußerst intensive Neutrinoquellen und riesige Detektoren.

Die Massen der drei Arten von Neutrinos im Standardmodell sind winzig im Vergleich zu denen anderer Elementarteilchen. Der Grund ist bisher nicht wirklich verstanden,

aber ihre kleinen Massen geben den Neutrinos ungewöhnliche quantenmechanische Eigenschaften. So unterscheiden sich die Eigenzustände von freien und wechselwirkenden Neutrinos. Das in einer Neutrino-Streuung produzierte geladene Lepton identifiziert den Flavour-Eigenzustand des Neutrinos: Ein Elektron-Neutrino erzeugt im von der schwachen Wechselwirkung vermittelten Prozess ein Elektron: $\nu_e + \text{Kern} \rightarrow \text{Elektron} + \text{Kern}$. Entsprechend produziert ein Myon-Neutrino ein Myon. Betrachten wir dagegen die Wellenfunktion des Neutrinos auf seiner Reise von der Sonne zur Erde, spielt die Energie – und damit die Masse – die entscheidende Rolle. Der Unterschied zwischen diesen Betrachtungsweisen führt zu einer Mischung der Zustände und damit zu Neutrino-Oszillationen.

Die Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix (PMNS) beschreibt die Neutrinomischung. Eine komplexe Phase δ in der Matrix ermöglicht die Verletzung der Ladungs-Paritäts-Symmetrie (Charge-Parity- bzw. CP-Verletzung). Dies ist eines der drei notwendigen Sacharow-Kriterien für eine Baryonenasymmetrie im Universum. Während CP-Verletzung in Wechselwirkungen von Quarks lange bekannt ist und die entsprechenden Parameter gut vermessen sind, ist der Nachweis im leptonen Sektor des Standardmodells der Teilchenphysik bisher nicht gelungen. Die Phase δ zu messen und zu zeigen, dass sie einen nicht-trivialen Wert zwischen 0 und π annimmt, ist ein Ziel des DUNE-Experiments.

Was würde eine nichttriviale Phase δ bedeuten? Die im Quarksektor gemessene CP-Verletzung ist zu klein, um die Materie-Asymmetrie im Universum zu beschreiben. Die Leptogenese jedoch ist ein vielversprechendes Modell, um die Asymmetrie der Baryonen zu erklären und damit die Dominanz von Materie über Antimaterie im Universum, wie sie sich etwa aus der Struktur der kosmischen Mikrowellenstrahlung ableitet [1]. Die Leptogenese erklärt den Überschuss von Baryonen indirekt durch eine Verletzung der CP-Symmetrie in den Zerfällen äußerst schwerer Neutrinos in der Anfangsphase des Universums [2].

Verschiedene komplexe theoretische Ansätze versuchen, die für die Leptogenese verantwortliche CP-Verletzung bei hohen Energien und die Phase δ in der PMNS-Matrix zu verbinden. Eine Möglichkeit ist der „Seesaw-Effekt“ (engl. für Wippe), der die kleinen Massen der Neutrinos erklärt – ihre Werte sind umgekehrt proportional zu den Massen der superschweren, für die Leptogenese verantwortlichen

Neutrinos. Der positive Nachweis von CP-Verletzung in Neutrino-Oszillationen durch das DUNE-Experiment würde starke Indizien für die Gültigkeit der Leptogenese liefern.

Die genaue Bestimmung der Elemente der PMNS-Matrix würde zahlreiche Fragen beantworten: Ist die Matrix unitär, und gibt es daher genau drei Neutrino Flavours? Existieren bisher unbeobachtete Neutrinos wie die lange gesuchten „sterilen“ Neutrinos? Wie gruppieren sich die Massen der drei entsprechenden Eigenzustände? Beschreibt allein das Standardmodell die Wechselwirkungen der Neutrinos?

Von Chicago in die Rocky Mountains

Das DUNE-Experiment besitzt drei Komponenten [3] (**Abb. 1**): Am Fermilab nahe Chicago entsteht ein Beschleunigerkomplex, der einen Neutrinostrahl erzeugen wird. Ein Detektor am Fermilab wird die Neutrinos untersuchen, bevor sie das Gelände verlassen. Etwa 1300 Kilometer entfernt befindet sich der unterirdische Ferndetektor im Bau in einem ehemaligen Goldbergwerk, das jetzt Sitz des Sanford Underground Research Facility ist. Fast anderthalb Kilometer unter der Erde in der Nähe der Kaverne für den DUNE-Ferndetektor wiesen Raymond Davis und sein Team im letzten Jahrhundert erstmals nach, dass nur etwa ein Drittel der erwarteten Elektron-Neutrinos von der Sonne die Erde erreichen – ein erster Hinweis auf Neutrino-Oszillationen. Die Distanz zwischen der Neutrinoquelle am Fermilab und dem Detektor in South Dakota sowie die Neutrinoenergie sind so optimiert, dass der gewünschte Oszillationseffekt maximal ist und sich mit großer Genauigkeit messen lässt.

Zwei experimentelle Durchbrüche haben das ehrgeizige DUNE-Programm ermöglicht: die Messung des Mischungswinkels θ_{13} und Fortschritte in der Skalierung von Flüssig-Argon-Neutrinodetektoren. 2012 wiesen drei Experimente fast gleichzeitig nach, dass der Mischungswinkel θ_{13} zwischen dem ersten und dritten Masseneigenzustand größer ist als erwartet. Alle drei Experimente, Double Chooz in Frankreich, Daya Bay in China und RENO in Süd-Korea, fanden ein Defizit im Fluss von Anti-Elektron-Neutrinos aus Kernreaktoren. Der daraus abgeleitete Wert für den Mischungswinkel θ_{13} ist wesentlich größer als erwartet. Die Stärke des CP-verletzenden Effekts in Neutrinoexperimenten mit einer großen Basislänge hängt vom Produkt $\sin \theta_{13} \delta$ ab, sodass ein verschwindender Wert $\theta_{13} \approx 0$ diese Art von Experimenten verhindert hätte.

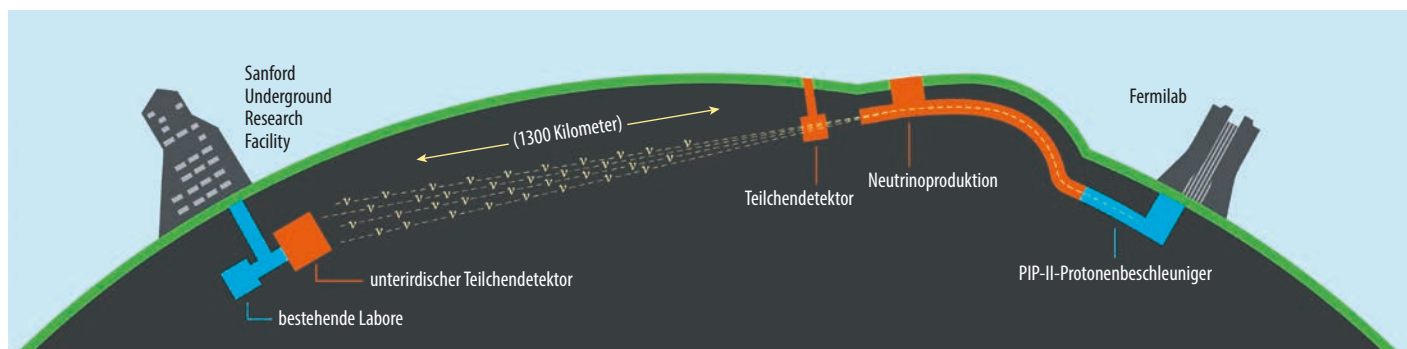


Abb. 1 Das Schema zeigt das riesige DUNE-Experiment, wie es sich derzeit im Bau befindet.

Gleichzeitig gehen die Experimente in der Neutrinophysik verschiedene Wege, ihre Technologie auf große Dimensionen zu skalieren. Der Hyperkamiokande-Detektor in Japan wird 260 Kilotonnen Wasser enthalten, das IceCube-Experiment am Südpol umfasst etwa 1 km^3 klares Eis. Die DUNE-Kollaboration wird vier Kryostaten mit insgesamt etwa 70 000 Tonnen flüssigem Argon als Detektormedium füllen. Experimente mit Wasser oder Eis als Medium benutzen vor allem Cherenkov-Licht, das die in der Neutrinostreuung erzeugten geladenen Teilchen (meist Elektronen oder Myonen) produzieren. In Argon hingegen tragen die spezifische Ionisation und das Szintillationslicht zur Messung bei. Dies erlaubt es, die Energie präzise zu bestimmen und zu rekonstruieren, wie die Oszillationen von der Energie abhängen. So lassen sich die verschiedenen Modellparameter in einem gemeinsamen Fit der Daten von Nah- und Ferndetektoren gleichzeitig bestimmen. Daher kann nur das DUNE-Experiment die Anordnung der Neutrinomassen und die CP-verletzende Phase δ in einer gemeinsamen statistischen Analyse des gemessenen Neutrinospektrums bestimmen [4]. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der Strahl von Neutrinos (oder Anti-Neutrinos) auf dem Weg die Erde durchquert und an den atomaren Elektronen der Erdkruste streut. Dieser „Materieeffekt“ verändert die Oszillation und hilft, die Entartung zwischen den Modellparametern aufzuheben.

Für die Experimente nutzen wir natürliche und künstliche Neutrinoquellen. Neutrinos mit Energien von einigen MeV entstehen in Kernprozessen: in Reaktoren durch β -Zerfall und in der Sonne durch Fusionsreaktionen.

Die Tatsache, dass Neutrinos elektrisch neutral sind und nur über die schwache Wechselwirkung entstehen, erschwert die kontrollierte Erzeugung im Labor. Um Neutrinos mit höheren Energien von einigen GeV zu erzeugen, benutzen wir Beschleuniger und reproduzieren einen Prozess, der in der oberen Atmosphäre stattfindet. Hochenergetische Protonen treffen auf stationäre Kerne und erzeugen Hadronen aller Art, etwa geladene Kaonen und Pionen, die in Paare aus Myonen und Myon-Neutrinos zerfallen ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$). Ein solcher Proton-Beschleuniger existiert am Fermilab als Teil eines großen Komplexes. Dort werden Protonen mit einer Energie von 120 GeV auf Targets aus Beryllium oder Graphit geschossen. Ein magnetisches Horn fokussiert die im Target erzeugten Pionen, bevor sie in Neutrinos zerfallen. Das Umschalten der Polarität erlaubt es, die negativ geladenen Pionen zu selektieren und damit den Strahl von Myon-Neutrinos auf Anti-Myon-Neutrinos umzustellen. Um genügend Neutrinos für DUNE zu erhalten, muss der Beschleuniger einen Protonenstrahl mit einer Leistung von über 2 MW erzeugen, was enorme Anforderungen an das Targetmaterial und seine Kühlung stellt.

Neutrinos nachweisen

Die DUNE-Detektortechnologie basiert auf der Spurendriftkammer (Time Projection Chamber) mit flüssigem Argon als Medium. Die Neutrinos streuen an einem der Argonkerne und erzeugen Teilchen wie Elektronen, Myonen oder Hadronen. Die geladenen Teilchen ionisieren das



Abb. 2 Anodendrähte im Inneren eines ProtoDUNE-Kryostaten. Das gelbe Licht dient zum Schutz der Lichtdetektoren. Die Faltung der Stahlwände absorbiert die mechanischen Kräfte bei der Befüllung mit flüssigem Argon.

Argon – die negativen Ionisationsladungen bewegen sich in Richtung einer Anoden-Ebene. Zwischen einer Kathoden- und der Anoden-Ebene wird über eine Distanz von mehreren Metern ein konstantes elektrisches Feld von etwa 500 V/cm aufrechterhalten. Die riesigen Flüssig-Argon-Detektoren erreichen heutzutage Driftlängen von etwa zehn Metern. Das Signal wird mit Anoden-Drähten ausgelesen, die eine zweidimensionale Rekonstruktion der Wechselwirkung ermöglichen.

Gleichzeitig entsteht Szintillationslicht im UV-Bereich (126,8 nm). Dessen Nachweis mittels Siliziumphotomultipliern erlaubt seine genaue Lokalisierung entlang der Driftrichtung. Anders als bei Spurendriftkammern, die im Zwei-Phasen-Modus mit flüssigem und gasförmigem Argon oder Xenon operieren, wird das Signal bei diesem Detektortyp mit rein flüssigem Argon nicht intern in der Gasphase verstärkt. Wichtig ist daher, dass das Argon rein genug ist, damit elektronegative Verunreinigungen, etwa durch Sauerstoff, die Driftelektronen nicht absorbieren.

Jedes der vier Detektormodule in South Dakota wird etwa 17 000 Tonnen flüssiges Argon bei einer Temperatur von -186°C enthalten, das im industriellen Maßstab als Beiprodukt bei der Verflüssigung von Luft entsteht. Jeder Detektor befindet sich in einem Kryostaten einer Größe von etwa $20 \times 20 \times 60 \text{ m}^3$.

Der DUNE-Nahdetektor am Fermilab ist 574 Meter vom Target im Neutrinostrahl positioniert und dient dazu, die genauen Eigenschaften des Neutrinostrahls zu messen und die systematischen Unsicherheiten durch Vergleich der Nah- und Ferndaten zu minimieren. Zudem kann er mit hoher Statistik Wirkungsquerschnitte für Neutrino-Argon-Prozesse messen. Das ist ebenfalls wichtig, um den systematischen Fehler zu reduzieren.

Der hauptsächlich von der Universität Bern entwickelte NDLaR-Detektor nutzt dazu eine dem Ferndetektor ähnliche Technologie, liest das flüssige Argon aber nicht mit Drähten, sondern mit Pixeln aus, die eine vollständige Rekonstruktion der Spuren ermöglichen. Für die genaue Vermessung des Neutrinostrahls ziehen außerdem der Magnet und Teile des KLOE-Detektors aus dem INFN in Frascati

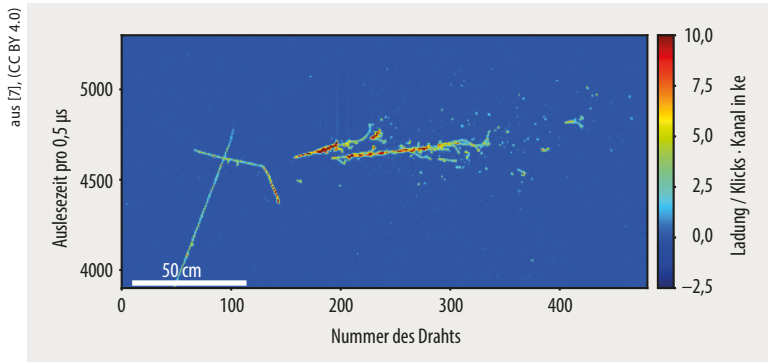


Abb. 3 Bei diesem vom ProtoDUNE-Detektor am CERN aufgezeichneten Ereignis [7] entsteht in der Reaktion $\pi^+ n \rightarrow \pi^0 p$ zunächst ein Proton, anschließend findet der Zerfall $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ statt. Ein kosmisches Myon ist auf der linken Seite ebenfalls sichtbar. Die Farbskala zeigt den spezifischen Energieverlust. KI-Algorithmen helfen, solche Ereignisse zu rekonstruieren.

an das Fermilab um. Zusätzlich werden die DUNE-Nahdetektoren nach neuen Phänomenen und Teilchen suchen – etwa Dunkle Materie oder schwere neutrale Leptonen – die sich im Neutrinostrahl des Beschleunigers verbergen könnten [5].

Um das Argon-Detektorkonzept zu testen und weiterzuentwickeln, sind am CERN seit 2019 zwei ProtoDUNE-Kryostaten in Betrieb (**Abb. 2**). Da dort kein Neutrinostrahl zur Verfügung steht, dienen Strahlen aus geladenen Teilchen dazu, Teilchenspuren in den ProtoDUNE-Detektoren zu erzeugen. Zusätzlich bombardieren Myonen aus der kosmischen Strahlung kontinuierlich die Detektoren (**Abb. 3**). Die Flüssig-Argon-Detektoren sind eher langsam, da die Driftelektronen mehrere Millisekunden benötigen, bis sie die Anoden erreichen – eine im Vergleich zum Szintillationslicht lange Zeit, über welche die Auslese des Detektors integriert werden muss. Während die Elektronen zur Anode driften, durchqueren 20 bis 30 kosmische Myonen den Detektor. Sie helfen dabei, den ProtoDUNE-Detektor zu kalibrieren, während sie im DUNE-Detektor das Neutrinosignal stören und überlagern würden. Daher entsteht der Ferndetektor rund anderthalb Kilometer unter der Erdoberfläche. Die erhebliche Ionisation, welche die kosmischen Myonen in ProtoDUNE erzeugen, beeinflusst das elektrische Feld der Kammer, mit makroskopischen Verzerrungen, die bei einem Detektor an der Oberfläche zu korrigieren wären.

Nicht nur im Beschleuniger erzeugte Neutrinos sind für DUNE von Interesse. Nachdem die Supernova 1987A in der großen Magellanschen Wolke explodierte, haben mehrere Neutrinodektoren dieses kosmische Ereignis registriert – sie beobachteten damals insgesamt 24 Neutrinos innerhalb von 10 Sekunden. Sollte während der Lebensdauer des DUNE-Detektors eine solche Supernova stattfinden – ein Ereignis, das etwa einmal pro Generation zu erwarten ist –, könnte der Detektor je nach Entfernung der Supernova mit etwa 1000 Neutrino-Ereignissen für 10 Sekunden „aufleuchten“. Die Reichweite des DUNE-Detektors umfasst die gesamte Milchstraße oder sogar etwas weiter.

Eine Kernkollaps-Supernova „ist effektiv eine durch die Schwerkraft angetriebene Neutrino-bombe“ [6]. Die Neutri-

nos werden in der Neutronisierungsphase der Supernova während des Kollapses im Prozess $e^- p \rightarrow \nu_e n$ prompt erzeugt und entweichen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus der dichten Materie. Da sie die Erde vor dem optischen Signal erreichen, könnten Neutrinodektoren optische Teleskope vorwarnen. In Argon sind vor allem Elektron-Neutrinos zu beobachten, anders als in den Experimenten 1987, die mit Wasser als Detektormedium nur Anti-Elektron-Neutrinos nachweisen konnten. Das macht DUNE einzigartig im Vergleich zu anderen Neutrinodektoren.

Die enormen Massen von Neutrinodektoren, verbunden mit der Fähigkeit, Prozesse genau zu rekonstruieren und damit von Untergrundprozessen zu unterscheiden, eröffnen weitere Physikfelder über Neutrinos hinaus. Protonenzerfälle – noch nie beobachtet, aber von verschiedenen Theorien jenseits des Standardmodells vorhergesagt – würden eine eindeutige Signatur in den Detektoren hinterlassen. Wobei auch hier der Nachweis von $p \rightarrow e^+ \pi^0$ über Cherenkov-Licht im Wasser und die im Argon beobachtbaren Zerfälle $p \rightarrow K^+ \nu$ verschiedene Klassen von Modellen testen können.

Bis zu den ersten Messungen der DUNE-Kollaboration werden noch Jahre vergehen. Daten des ersten Ferndetektormoduls sind 2029 zu erwarten. Manche Messungen werden schnell eindeutige Ergebnisse zeigen, etwa die Bestimmung der Anordnung der Neutrinomassen. Eine signifikante Messung der CP-Phase wird dagegen länger dauern, und für die Beobachtung einer Supernova braucht es ein wenig Glück. In jedem Fall wird DUNE Ergebnisse von einzigartiger Präzision liefern, die das Potenzial haben, unser Verständnis von Neutrinos und ihrer Rolle in der Entstehung des Universums zu revolutionieren.

Literatur

- [1] N. Aghanim et al. (Planck Coll.), *A&A* **641**, A6 (2020)
- [2] W. Buchmüller, R.D. Peccei und T. Yanagida, *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **55**, 311 (2005)
- [3] DUNE Far Detector Technical Design Report, Volumes I, III, and IV, JINST; iopscience.iop.org/journal/1748-0221/page/extraproc95
- [4] B. Abi et al. (DUNE Coll.), *Eur. Phys. J. C* **80**, 978 (2020)
- [5] B. Abi et al. (DUNE Coll.), *Eur. Phys. J. C* **81**, 322 (2021)
- [6] B. Abi et al. (DUNE Coll.), *Eur. Phys. J. C* **81**, 423 (2021)
- [7] B. Abi et al. (DUNE Coll.), *JINST* **15**, P12004 (2020)

Der Autor

DPG / Jürgen Loesel 2023



Stefan Söldner-Rembold studierte Physik an der Universität Bonn, promovierte an der TU München und habilitierte sich an der Uni Freiburg. Von 1999 bis 2003 war er als Heisenberg-Stipendiat am CERN und am Fermilab tätig. Seit 2003 lehrt er an der University of Manchester. Er ist Fellow des Institute of Physics und der American Physical Society.

Von 2018 bis 2022 war er Sprecher der DUNE-Kollaboration.

Prof. Dr. Stefan Söldner-Rembold, Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Oxford Road, Manchester, M13 9PL, United Kingdom