

IceCube – Neutrinojagd am Südpol

Tief ins Eis der Antarktis versenkt, registriert ein außergewöhnliches Teleskop Teilchen der kosmischen Strahlung: »IceCube« soll ein neues Fenster zum All eröffnen.

In Kürze

- ▶ **Neutrinos transportieren Informationen** aus Regionen des Kosmos, die mit anderen Methoden nicht einsehbar sind. Auch zur Klärung des Ursprungs der energiereichen kosmischen Strahlung können sie beitragen.
- ▶ Am Südpol wird **das bisher größte Neutrino-teleskop** errichtet: IceCube. Es besteht aus zahlreichen Fotovervielfachern, die in das Eis eingelassen werden. Mit dem schrittweisen Ausbau nimmt seine Empfindlichkeit von Jahr zu Jahr zu.
- ▶ Wenn IceCube im Jahr 2011 fertig gestellt sein wird, soll es die Empfindlichkeit von Vorgängerteleskopen **um etwa das Hundertfache** übertreffen.

Am 15. Januar 2005 begannen Physiker und Ingenieure mit einem Strahl 90 Grad Celsius heißen Wassers ein Loch in den Eispanzer am Südpol zu schmelzen. Pro Minute pressten sie 750 Liter in das Eisloch und trieben es dabei um einen weiteren Meter in die Tiefe. Starke Pumpen saugten das abgekühlte Wasser zurück an die Oberfläche, wo es erhitzt und wiederum ins Bohrloch geführt wurde. Nach 52 Stunden reichte das Loch in eine Tiefe von 2450 Metern.

In den nächsten 20 Stunden versenkten Mitarbeiter des Teams eine Kabeltrosse mit 60 Glaskugeln, jede so groß wie ein Medizinball, in den engen Schacht. Die druckfesten Kugeln bergen hochempfindliche Lichtsensoren, die in regelmäßigem Abstand ab 1450 Meter Tiefe bis zum Grund des Bohrlochs angeordnet sind (siehe Bild auf S. 43). Zwei Wochen später war das Schmelzwasser im Bohrloch vollständig gefroren.

Was sich eher nach einem glaziologischen Experiment als nach Astronomie anhört, war dennoch der Baubeginn eines großen Teleskops. Bereits drei Wochen später nahm die erste von 80 Trossen des Neutrinoobservatoriums IceCube ihren Betrieb auf. Bis zum Januar 2011 soll dieses Instrument fertig gestellt sein.

Dann wird es hundertmal so empfindlich sein wie existierende Instrumente und den Himmel nach Neutrinoquellen im Weltall absuchen.

Rund 200 Wissenschaftler aus acht Ländern wollen damit unter anderem den Ursprung der kosmischen Strahlung, das Wesen der Dunklen Materie sowie exotische Elementarteilchen erforschen. Aus Deutschland sind neben dem Teilinstitut des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (Desy) in Zeuthen bei Berlin auch die Universitäten Aachen, Berlin (Humboldt-Universität), Dortmund, Mainz und Wuppertal sowie das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg beteiligt.

Wie kraftvoll geworfene Steine

Fast ein Jahrhundert ist vergangen, seit die kosmische Strahlung entdeckt wurde. Wir wissen inzwischen, dass sie vorwiegend aus Protonen besteht, mit einer Beimischung aus leichten und schweren Kernen. Ihre Energiedichte in unserer Galaxis entspricht ungefähr jener des Sternenlichts, der kosmischen Hintergrundstrahlung oder galaktischer Magnetfelder. Die kosmische Strahlung ist demzufolge keineswegs eine Randerscheinung des Universums, sondern ein wichtiger Bestandteil.

Noch bemerkenswerter ist, welche Energien diese Teilchen erreichen kön-

nen: Bis zu $3 \cdot 10^{20}$ Elektronenvolt wurden gemessen. Das ist das Dreihundertmillionenfache der Energie, auf die es der Beschleuniger »Tevatron« im amerikanischen Fermilab nahe Chicago bringt, der bisherige irdische Rekordhalter. In einer gebräuchlicheren Einheit ausgedrückt, sind das 50 Joule. Dies entspricht der Energie eines kraftvoll geworfenen Steins. Konzentriert auf ein einziges subatomares Teilchen mutet das fantastisch an.

Bislang ist weitgehend ungewiss, woher die Teilchen der kosmischen Strahlung stammen und welche Prozesse sie auf diese gewaltigen Energien beschleunigen. Zu dieser Ungewissheit trägt entscheidend bei, dass geladene Teilchen abgelenkt werden, wenn sie ausgedehnte kosmische Magnetfelder durchqueren. Dabei geht die Information über ihre Ursprungsrichtung verloren. Erst bei Teilchenenergien von mehr als 10^{19} Elektronenvolt können wir die Ablenkung in Magnetfeldern vernachlässigen – doch mit einem Teilchen pro Quadratkilometer und Jahr machen diese nur einen Bruchteil der kosmischen Strahlung aus.

Immerhin gibt es mehrere Kandidaten für kosmische Beschleuniger. Eine wichtige Rolle spielen vermutlich Stoßwellen, die sich mit großer Wucht in ein langsames Medium ausbreiten. Das passiert etwa, wenn massereiche Sterne ▷

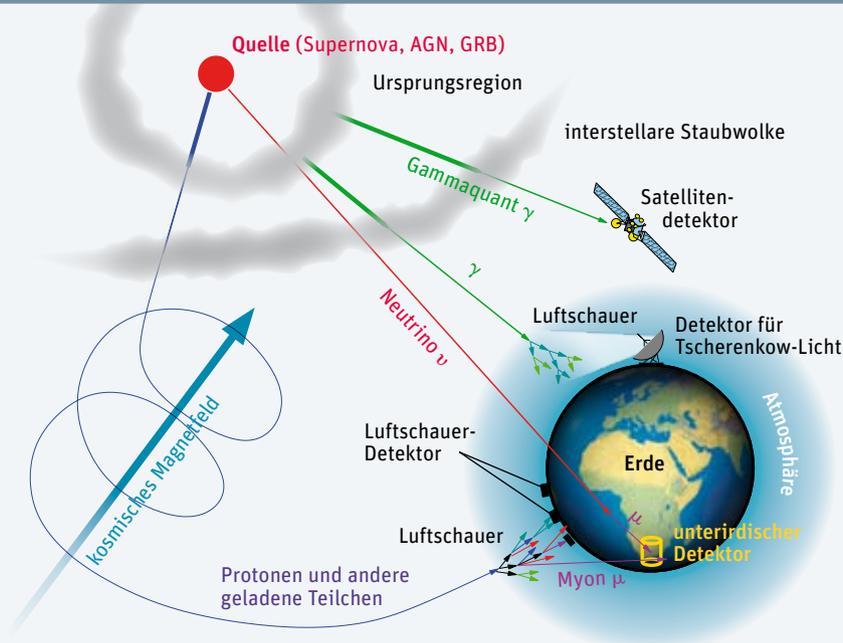


Eisige Fallen für Neutrinos bei der Amundsen-Scott-Station (großes Bild, links). Neben Radioteleskopen beherbergt der astronomische Bereich (rechts) auch die ins Eis eingelassenen Neutrinoobservatorien Amanda und IceCube (im kleinen Bild mit einem Kreis beziehungsweise einem Sechseck markiert).



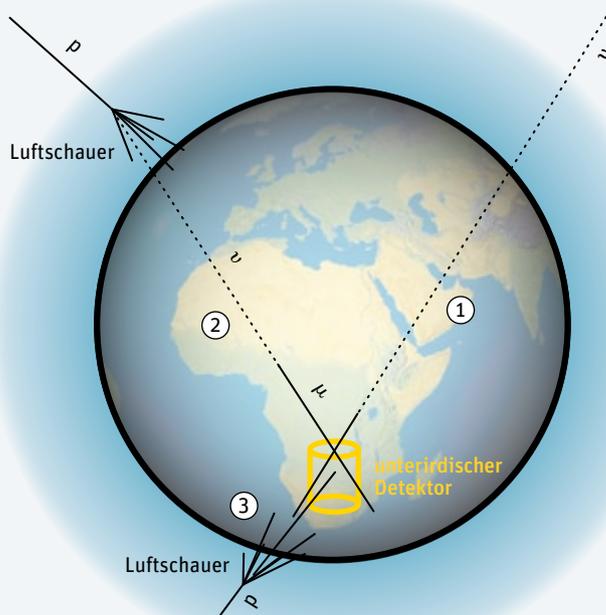
GR. FOTO: FOREST BANKS / NSF UND UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON; KL. FOTO: C. SPIERING

AUS DEM ALL INS LABOR: DIE REISE DER NEUTRINOS



ELEKTRISCH GELADENE TEILCHEN wie Protonen werden von kosmischen Magnetfeldern abgelenkt, wodurch die Information über ihre Ursprungsrichtung verloren geht. Photonen werden von Staub oder von anderen Photonen absorbiert oder gestreut. Da Neutrinos weder absorbiert noch von Magnetfeldern aus ihrer geraden Bahn gebracht werden, bieten sie alternative Möglichkeiten als Boten kosmischer Information.

MYONEN, DIE IN EINEN NEUTRINODETEKTOR VON UNTEN EINTRETEN, müssen aus Wechselwirkungen mit Neutrinos entstanden sein, denn nur diese sind in der Lage, den Erdball zu durchqueren. Außer extraterrestrischen Neutrinos (1) registriert man vorwiegend atmosphärische Neutrinos (2), die aus der Wechselwirkung von Protonen der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre hervorgehen. Myonen können auch oberhalb des Detektors in der Atmosphäre entstehen und bis in die Tiefe durchschlagen (3). Diese Myonen muss man wegfiltern, um nur die klaren, von unten kommenden Neutrino-kandidaten übrig zu behalten.



▷ ihre Hüllen absprennen und als Supernovae verglühen. Die in der Explosion ausgeworfene Materie breitet sich mit einer Geschwindigkeit von einigen zehntausend Kilometern pro Sekunde in den interstellaren Raum aus. An ihrer Front werden geladene Teilchen beschleunigt, bis sie von den umgebenden Magnetfeldern nicht mehr gebunden werden können und entweichen. In den Hüllen von Supernovae können Teilchen vermutlich auf bis zu 10^{16} Elektronenvolt beschleunigt werden. Noch höhere Energien dürften in den Polkappen junger Neutronensterne erreicht werden sowie in den beim Verschmelzen von Galaxien entstehenden Stoßwellen.

Nur zwei Kandidaten kommen jedoch in Frage, wenn es darum geht, die höchsten Teilchenenergien zu erklären: Aktive Galaktische Kerne (*Active Galactic Nuclei*; AGNs) und Gammastrahlenausbrüche (*Gamma Ray Bursts*; GRBs). In beiden Fällen rotiert Materie in einer so genannten Akkretionsscheibe um ein Schwarzes Loch und wird von diesem wie von einem gewaltigen Mahlstrom eingesaugt. Dabei werden große Mengen Gravitationsenergie freigesetzt, die wiederum riesige »Jets« antreiben: Materieströme, die sich annähernd mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum ausbreiten, senkrecht zu der ursprünglichen Materiescheibe. In den Stoßwellen entlang dieser Jets könnten Teilchen bis auf 10^{20} Elektronenvolt beschleunigt werden. Während AGNs ihre Energie über Jahr-millionen abgeben, strahlen GRBs nur über einige Sekunden oder Minuten, dafür jedoch mit umso größerer Intensität.

Sieht man von den energiereichsten Teilchen der Strahlung ab, können die kosmischen Beschleuniger nur mit elektrisch neutralen Informationsträgern wie Photonen oder Neutrinos lokalisiert werden, denn diese werden von kosmischen Magnetfeldern nicht abgelenkt. Sowohl hochenergetische Neutrinos wie auch Photonen müssen in Reaktionen der beschleunigten, geladenen Teilchen entstehen, wenn diese auf Ansammlungen anderer geladener Teilchen oder auf Ultraviolett-Photonen stoßen, die ein dichtes »Photonengas« bilden. Derartige Stoßpartner existieren vermutlich innerhalb oder in der Nähe vieler kosmischer Beschleuniger.

Kosmische Neutrinos werden vor allem in Stößen beschleunigter Protonen oder Atomkerne gebildet, während Pho-

CHRISTIAN SPERING, DESY; WOLFGANG WAGNER, UNIVERSITÄT DORTMUND

So funktionieren Neutrinooteleskope in tiefem Wasser oder Eis: In einem Raumgitter aufgehängte Fotovervielfacher registrieren den Kegel des Tscherenkow-Lichts, den geladene relativistische Teilchen in Eis oder Wasser hinter sich herziehen. Daraus lässt sich die Herkunftsrichtung der Partikel ermitteln.

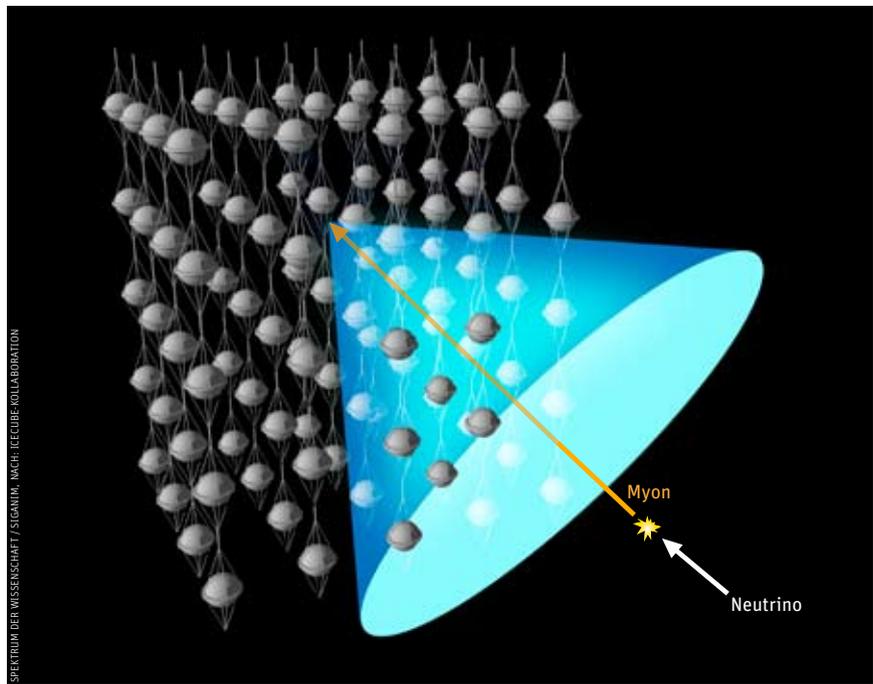
tonen auch bei Stößen beschleunigter Elektronen entstehen. Man hat schon zahlreiche Quellen entdeckt, die Photonen mit Energien von mehreren Tera-Elektronenvolt abstrahlen ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$). Dazu gehören Supernova-Überreste, Doppelsternsysteme und AGNs. Aus dem beobachteten Spektrum der elektromagnetischen Strahlung können wir aber schließen, dass in den Quellen vorwiegend Elektronen beschleunigt werden – kaum die Protonen und Atomkerne der kosmischen Strahlung. Damit bleibt die Frage nach ihrem Ursprung weiterhin unbeantwortet. Der Schlüssel zu diesem Rätsel könnte bei den Neutrinos liegen.

Die Existenz dieser Teilchen wurde 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um die Energiebilanz des radioaktiven Betazerfalls auszugleichen. Der österreichische Physiker setzte voraus, dass diese Teilchen kaum mit Materie reagieren, und hielt es für unmöglich, sie experimentell nachzuweisen. Nachdem in den 1940er Jahren mit den ersten Kernreaktoren starke Neutrinoquellen existierten, gelang es jedoch 1956 Frederick Reines und Clyde Cowan erstmals, Neutrino-Reaktionen aufzuzeichnen.

Durchdringende Boten

Inzwischen haben die Physiker herausgefunden, dass es drei Neutrinosorten gibt: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino. Neutrinos spüren weder die starke Kernkraft, die Protonen und Neutronen in Atomkernen zusammenhält, noch die elektromagnetische Kraft. Sieht man von der Schwerkraft ab, unterliegen sie nur der schwachen Kernkraft, die etwa für den radioaktiven Betazerfall zuständig ist. Aus diesem Grund reagieren sie so selten.

Die uns nächstgelegene kosmische Neutrinoquelle ist die Sonne. Zwar erreichen uns von ihr pro Quadratmeter und Sekunde 60 Milliarden Neutrinos, doch stößt davon kaum ein Dutzend mit einem Atom des Erdinnern zusammen – der Rest durchquert die



Erde ungestört. Paradoxerweise macht genau diese Eigenschaft Neutrinos als kosmische Boten interessant. Fast ungehindert können sie die dicksten Materieschichten durchdringen und aus Regionen entweichen, aus denen kein Licht zu uns kommt. Sie können uns einzigartige Aufschlüsse über das Zentrum der Sonne übermitteln, in dem sich die Kernreaktionen abspielen, aus denen die Sonne ihre Energie bezieht. Neutrinos entkommen auch aus den kompakten Objekten, zu denen massereiche Sterne in Supernova-Explosionen kollabieren.

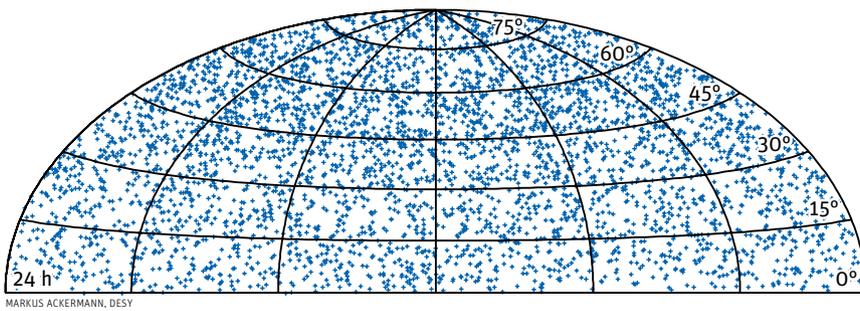
Tatsächlich waren die ersten Quellen, von denen extraterrestrische Neutrinos beobachtet wurden, die Sonne sowie die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, einer Begleitgalaxie des Milchstraßensystems. Am 23. Februar 1987 trafen Neutrinos von SN 1987A auf die Erde und wurden unter anderem in Japan im unterirdischen Kamiokande-Observatorium registriert.

Die Neutrinos der Sonne und dieser Supernova wurden mit Detektoren aufgefangen, mit denen ihre Herkunftsrichtung nur äußerst grob bestimmt werden konnte. Ein Neutrinooteleskop sollte allerdings möglichst genaue Informationen über die Ursprungsrichtung liefern. Das Bild links unten zeigt das Prinzip, nach dem man energiereiche Neutrinos nachweisen kann. Ein Neutrino durchquert die Erde bis in die Nähe des Detektors, wo es – wenn man Glück hat! – auf einen Atomkern des umgebenden Materials

prallt, also Gestein, Erdreich, Wasser oder Eis. Die Erde dient als Filter, der alle Teilchen außer den Neutrinos absorbiert. Um die Störsignale von kosmischen Teilchen, die von oben in den Detektor laufen, gering zu halten, muss ein Neutrino-detektor in großer Tiefe liegen: in einer Höhle, in tiefem Wasser oder in tiefem Eis.

Bei dem Stoß verwandelt sich das Neutrino häufig in ein geladenes Teilchen, zum Beispiel in ein Myon, einen schweren Verwandten des Elektrons. Das Myon übernimmt den größten Teil der Energie des Neutrinos und fliegt in annähernd gleicher Richtung weiter. Dabei zieht es einen Lichtkegel hinter sich her, vergleichbar mit dem Überschallkegel eines Düsenflugzeugs. Dieses schwache bläuliche Leuchten, Tscherenkow-Licht genannt, lässt sich mit empfindlichen Sensoren registrieren. Ein Neutrinooteleskop besteht aus vielen solcher Messeinheiten, die selbst ein einzelnes Lichtquant in elektrische Signale umwandeln: so genannte Fotovervielfacher.

Diese Detektoren werden in druckfeste Glaskugeln eingeschlossen, die gitterförmig ein großes Volumen überspannen. Sie registrieren Stärke und Ankunftszeit des Lichtblitzes. Aus den Zeitdaten, die auf wenige milliardstel Sekunden genau gemessen werden, kann man bestimmen, woher die Neutrinos kamen. Ein Computer vergleicht, wann die Blitze von verschiedenen Fotovervielfachern registriert wurden, und berechnet die Lage des Lichtkegels im Raum. ▷



◀ Rund 4300 Neutrinos in fünf Jahren: Diese Karte des Nordhimmels zeigt die Ursprungsrichtungen der vom Neutrinooteleskop Amanda dort registrierten Elementarteilchen.

▷ Daraus folgt die Bahn des Myons und aus dieser wiederum die Ursprungsrichtung des Neutrinos, im Fall von IceCube mit einer Genauigkeit von etwa einem Grad, also etwa zwei Vollmonddurchmessern. Aus der Stärke der Lichtblitze schließen die Forscher auf die Energie der Myonen.

Bereits in den 1980er Jahren wurde deutlich, dass Neutrinoendetektoren in Tunneln oder Höhlen zu klein sind, um die schwachen Neutrinoflüsse von Supernova-Hüllen oder AGNs nachzuweisen. Damals erkannte man, dass Detektoren ein Volumen von zumindest einem hundertstel Kubikkilometer, vielleicht aber sogar einem ganzen Kubikkilometer aufweisen müssten. Einen solchen Detektor kann man zwar nicht mehr in einer Höhle unterbringen, dafür jedoch tief in offenem Wasser oder Eis.

Nachdem ein in den 1970er Jahren begonnenes Projekt im Pazifik vor Ha-

wai gescheitert war, gelang es 1996 mit einem russisch-deutschen Experiment im sibirischen Baikalsee, eine Hand voll Neutrinos nachzuweisen – der Beweis, dass Unterwasserteleskope funktionieren. Auch unsere Gruppe aus dem Zeuthener Teilinstitut des Desy war daran beteiligt. Mit einer Höhe von 70 Metern und einem Durchmesser von 40 Metern war das Teleskop, das in einem Kilometer Tiefe im See schwebte, allerdings zu klein, um extraterrestrische Neutrinos nachweisen zu können. Sowohl die Richtungsverteilung als auch die Zahl der gemessenen Neutrinos vertrugen sich mit der Annahme, dass sie alle aus Stößen kosmischer Primärteilchen in der Erdatmosphäre stammten (siehe Grafik S. 45).

Eine wirkliche Erfolgchance sollte erst Amanda haben, das *Antarctic Myon And Neutrino Detection Array*, der Vorläufer von IceCube. Der vollständig aus-

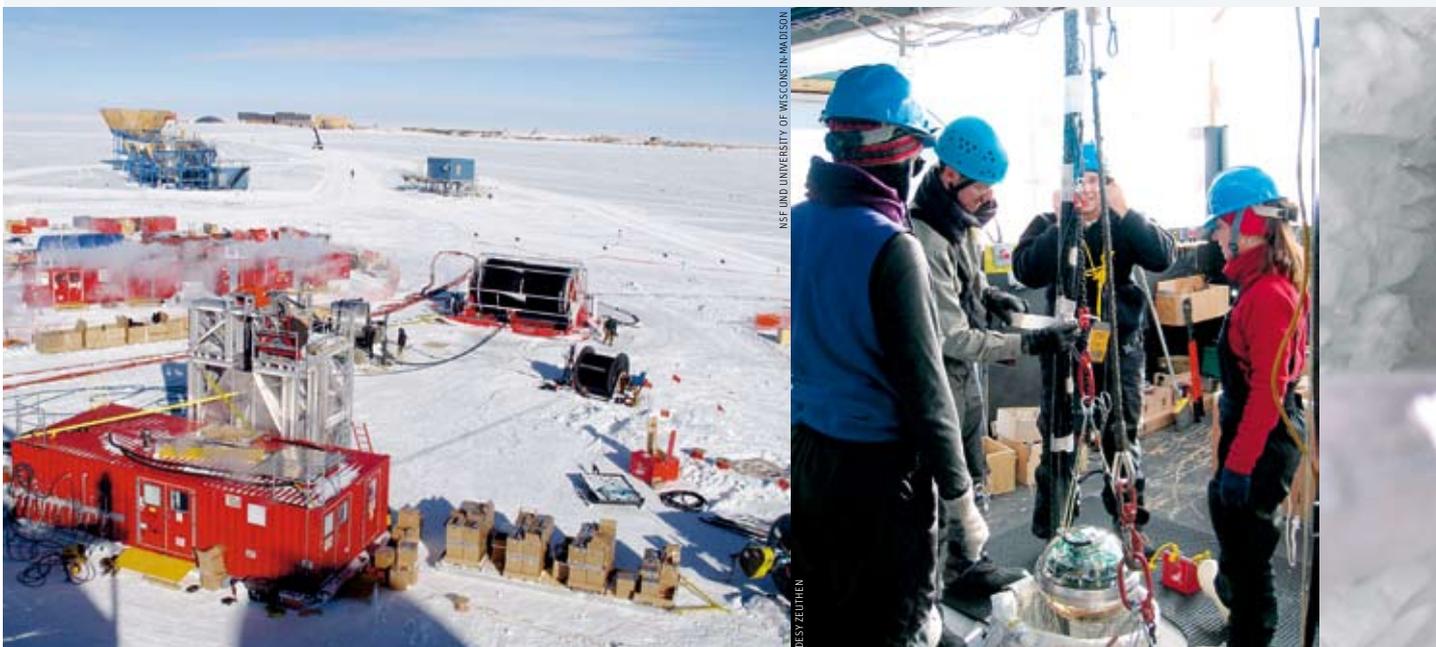
gebaute Amanda-Detektor ist inzwischen seit sieben Jahren in Betrieb. Die Glaskugeln mit ihren Fotovervielfachern wurden nicht in Wasser herabgelassen, sondern am Südpol in den drei Kilometer dicken Eisschild der Antarktis versenkt. Wie später bei IceCube wurden die Löcher mit einem heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen. Amanda besteht aus 677 Fotovervielfachern, die an 19 Trossen befestigt sind. Die meisten davon sind zwischen 1500 und 2000 Meter Tiefe innerhalb eines Zylinders mit zweihundert Meter Durchmesser angeordnet.

Die Idee, die Fotovervielfacher ins Eis der Antarktis zu versenken, stammt von Francis Halzen von der Universität Wisconsin in Madison. Amanda und IceCube verdanken ihre Existenz nicht zuletzt der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Station am geografischen Südpol, die eine für antarktische Verhältnisse ex-

WIE MAN EIN TELESKOP IM EIS VERSENKT

DIE BOHRANLAGE VON ICECUBE besteht aus einem Heizkraftwerk und einem Pumpsystem, über das heißes Wasser in die Tiefe getrieben wird (links). Links im Hintergrund zu sehen ist hier ein Observatorium zur Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung und – am Horizont – die Amundsen-Scott-Station. Die kugelför-

migen optischen Module enthalten die Fotovervielfacher; sie werden an Kabeltrossen in das aufgeschmolzene Bohrloch eingeführt (Mitte und rechts). Über die Kabel gelangen die Signale der Module später in das IceCube-Laboratory, wo sie archiviert und vorläufig ausgewertet werden.



zellente Infrastruktur zu Verfügung stellt. Montagearbeiten können im antarktischen Sommer – November bis Februar – durchgeführt werden. Aber auch im Winter ist die Station besetzt, sodass das Teleskop ganzjährig betrieben werden kann. Die geografische Position ergänzt die der anderen Projekte. Vom Südpol beobachtet man durch die Erde hindurch den Nordhimmel, die Projekte auf der Nordhalbkugel haben dagegen bevorzugt den Südhimmel im Blickfeld.

Nadeln im Heuhaufen

Zwar ist Eis etwas weniger transparent als Wasser, hat aber andere wichtige Vorteile. Erstens ist es stabil. Einmal eingefroren, bewegen sich die Glaskugeln nicht von der Stelle. Zweitens nützt die kalte Umgebung in der Tiefe der Kugeln (etwa -40 Grad Celsius) dem verlässlichen Betrieb von Fotovervielfachern und Elektronik. Und schließlich ist Eis ein steriles Medium, in dem weder Lebewesen noch der Zerfall radioaktiver Isotope Störlicht erzeugen.

Aus den Milliarden von Spuren, die wir mit Amanda aufgezeichnet haben, konnten wir einige tausend aufwärtslaufende Spuren aus Neutrinoreaktionen

herausfiltern. Die »Himmelskarte« dieser Ereignisse verrät, dass sich die Hoffnungen der Optimisten noch nicht erfüllt haben (Bild links oben). Über einem statistisch annähernd gleichmäßig verteilten Untergrund von Neutrinos, die wahrscheinlich fast alle in der Erdatmosphäre erzeugt worden sind, ist keinerlei punktförmige Anhäufung zu erkennen, wie man sie für eine einzelne extraterrestrische Quelle erwarten würde. Einige astrophysikalische Modelle, die hohe Neutrinoflüsse von AGNs vorhersagten, kann man darum bereits ausschließen.

Wenn man Beobachtungen interpretiert, die nur auf wenigen Neutrinoreaktionen beruhen, muss man Vorsicht walten lassen. Das illustriert eine zunächst viel versprechende Beobachtung von Neutrinos aus der Richtung einer aktiven Galaxie mit dem Namen ES1950+650. Über vier Jahre hinweg hatten wir fünf Neutrinos in einem Kreis mit einem Radius von $2,25$ Grad um diese Quelle beobachtet – in guter Übereinstimmung mit den knapp vier atmosphärischen Neutrinos, die wir von dort erwarten würden, wenn die Ereignisse zufällig über den Himmel verteilt

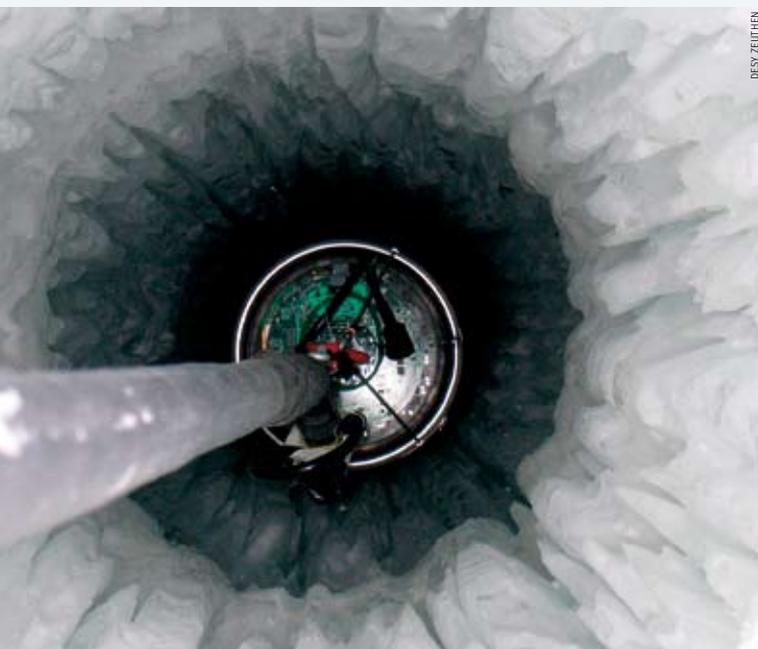
wären. Nichts Aufregendes, würde man denken.

Drei der fünf Neutrinos trafen jedoch innerhalb eines Zeitraums von nur 66 Tagen ein, und mehr noch: Zwei dieser drei fielen ziemlich genau mit Intensitätsmaxima der Gammastrahlung zusammen, die andere Astronomen für ES1950+650 registriert hatten. Das sah nach allem anderen als nach Zufall aus! Physiker sprechen in solchen Fällen allerdings erst dann von einer Entdeckung, wenn die Zufallswahrscheinlichkeit kleiner als ein Hunderttausendstel ist. Zwar ließ sich diese für unsere Beobachtungen nicht exakt angeben, sie betrug jedoch wohl eher ein Prozent als ein Hunderttausendstel. Nach sorgfältiger Analyse war darum klar, dass wir unsere Hoffnungen auf eine Entdeckung vorerst begraben mussten.

Auch im Energiespektrum der bislang gemessenen Neutrinos ließ sich kein Hinweis auf einen extraterrestrischen Anteil aufspüren. Zwar erstreckt es sich bis 100 TeV, fast hundertmal höher, als jemals mit unterirdischen Detektoren gemessen werden konnte, aber selbst bei höchsten Energien

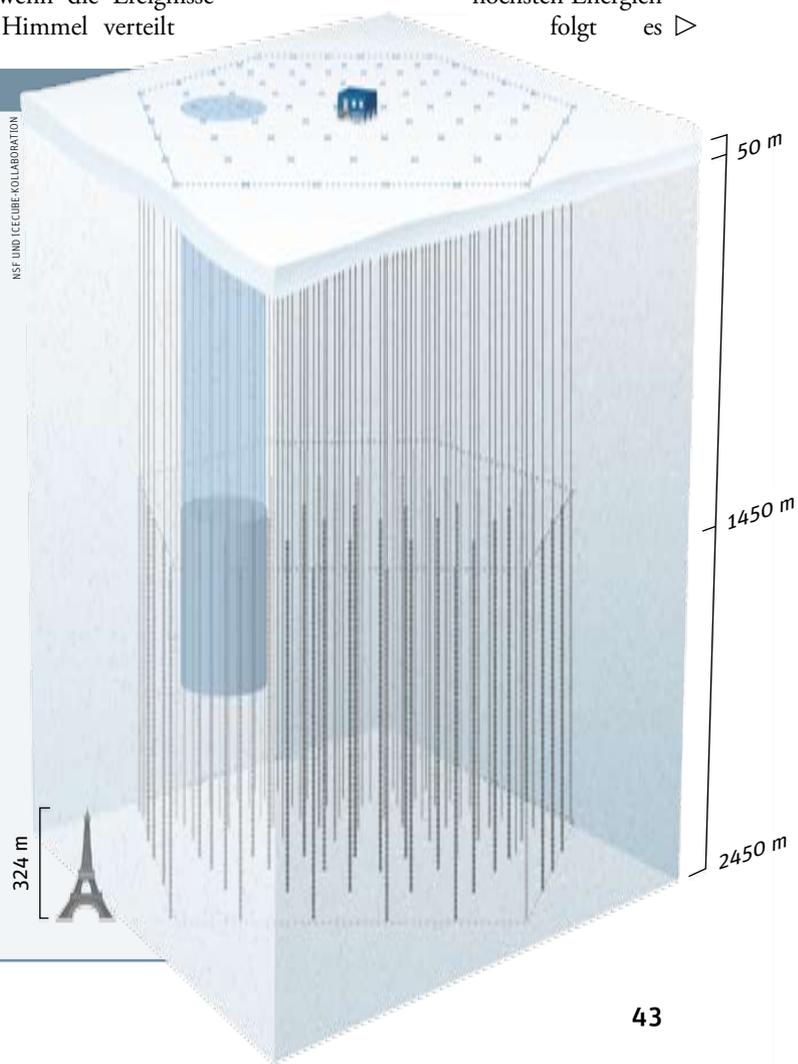
folgt es ▷

Schema von IceCube und IceTop (ganz rechts). Der dunkle Zylinder markiert die Lage des Teleskops Amanda, das in IceCube integriert ist. Wenn IceCube im Jahr 2011 fertig gestellt ist, soll es 4800 optische Module an 80 Kabeltrossen umfassen. Es wird weltweit das größte und empfindlichste Neutrino-teleskop sein.



NSF UND ICECUBE-KOLLABORATION

DESY ZEUTHEN



▷ dem Verlauf, den man für Neutrinos aus der Erdatmosphäre erwartet. Extraterrestrische Neutrinos sollten bei hohen Energien vermehrt auftreten. Auch wenn sie nicht aus wenigen starken Quellen stammen sollten, die sich in einer Himmelskarte hervorheben, sondern aus vielen schwachen Quellen: Sie sollten sich zu einem Überschuss bei hohen Energien summieren. Da dies nicht beobachtet wurde, scheiden bestimmte Modelle auf Grund zu hoher Flussvorhersagen aus.

Amanda hat ein Volumen von 0,016 Kubikkilometern – die eindeutige Identifizierung einer Quelle wäre da eher ein Glücksfall gewesen. Tatsächlich war Amanda schon immer als Vorstufe zu einem kubikkilometergroßen Teleskop gedacht: IceCube.

Seitdem die erste Trosse von IceCube im Januar 2005 installiert wurde, sind

weitere 21 Trossen hinzugekommen – acht in der Saison 2005/06 und 13 in der Saison 2006/07. Längst haben wir die Bohrgeschwindigkeit der ersten Saison überboten. In den kommenden Jahren werden wir darum 15 bis 16 Trossen pro Saison installieren können. Wenn IceCube im Januar 2011 schließlich fertig gestellt sein wird, soll es 80 Trossen mit insgesamt 4800 Kugeln umfassen, den »optischen Modulen«.

Jedes dieser Elemente misst im Durchmesser 32 Zentimeter. Ihr Fotovervielfacher sammelt fast 40 Prozent mehr Tscherenkow-Licht ein als der von Amanda. Während die Module von Amanda im Wesentlichen nur einen Lichtdetektor umschließen, enthalten diejenigen von IceCube zusätzlich eine aufwändige Elektronik. Deren wichtigste Aufgabe besteht darin, das analoge Signal zu digitalisieren, also in eine Zahlenfolge umzuwandeln, die Stärke und zeitlichen Verlauf des Signals verschlüsselt. Die notwendige Zeitgenauigkeit von wenigen Nanosekunden stellte die Entwickler vor große Herausforderungen. Die Fronten von Signalen, die kilometerlang durch ein Kupferkabel laufen, verschmieren nämlich auf über 100 Nanosekunden. Dass die Zeitunschärfe der Signale mit der neuen Elektronik nur drei Nanosekunden beträgt, ist deshalb ein wichtiger Erfolg.

Die Daten werden mit bis zu zwei Megabit pro Sekunde von jedem Modul aus der Tiefe an die Oberfläche geschickt und laufen im IceCube Laboratory (ICL) zusammen, einem zweistöckigen, hermetisch isolierten Gebäude. Wie auch das riesige Hauptgebäude der Südpolstation steht das ICL auf Stelzen. Damit soll vermieden werden, dass der Treibschnee entlang den Wänden Schneewehen bildet und schließlich das Gebäude begräbt.

Im ICL werden die Signale von einer Empfangselektronik aufgenommen und an ein leistungsfähiges Computersystem weitergeleitet. Hier werden die vielen Einzelsignale zu »Ereignissen« zusammengefügt, zu Signalgruppen also, die zeitlich zusammenpassen und von ein

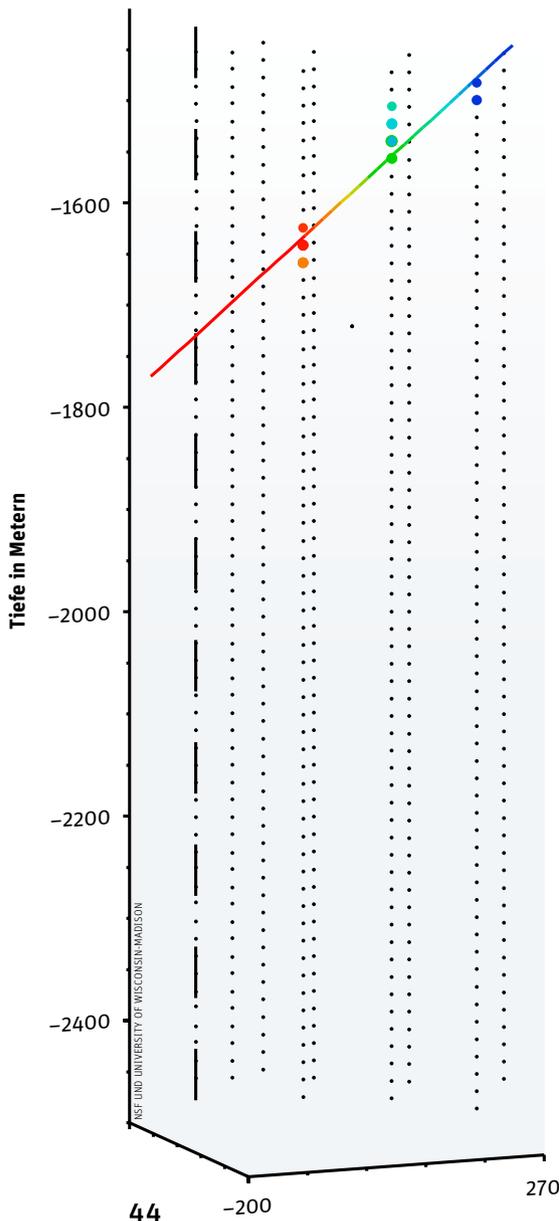
und derselben Teilchenreaktion stammen könnten. Aus den Ankunftszeiten wird dann die Richtung rekonstruiert. Wenn die Spur von unten zu kommen scheint, hat man einen Neutrino kandidaten, der am gleichen Tag über Satellit auf die Nordhalbkugel übertragen wird. 90 Prozent der Daten werden allerdings auf Magnetbänder geschrieben, die später ausgeflogen werden.

Ein Deckel für IceCube

IceCube wird ergänzt durch IceTop, eine Oberflächen-Anordnung zum Nachweis so genannter Luftschauser. IceTop besteht aus eisgefüllten Tanks mit jeweils zwei Meter Durchmesser, die über einen Quadratkilometer der Eisoberfläche verteilt sind. In jedem Tank sind zwei Glaskugeln mit Fotovervielfachern eingefroren. Sie registrieren das Tscherenkow-Licht von Teilchen, die aus Luftschausern stammen – ausgelöst durch Stöße energiereicher Protonen oder Kerne hoch in der Atmosphäre. Kombiniert man Messwerte von IceTop und IceCube, so kann man außer der Richtung und der Energie des Schauers auch abschätzen, ob das eingetretene Teilchen leicht oder schwer war.

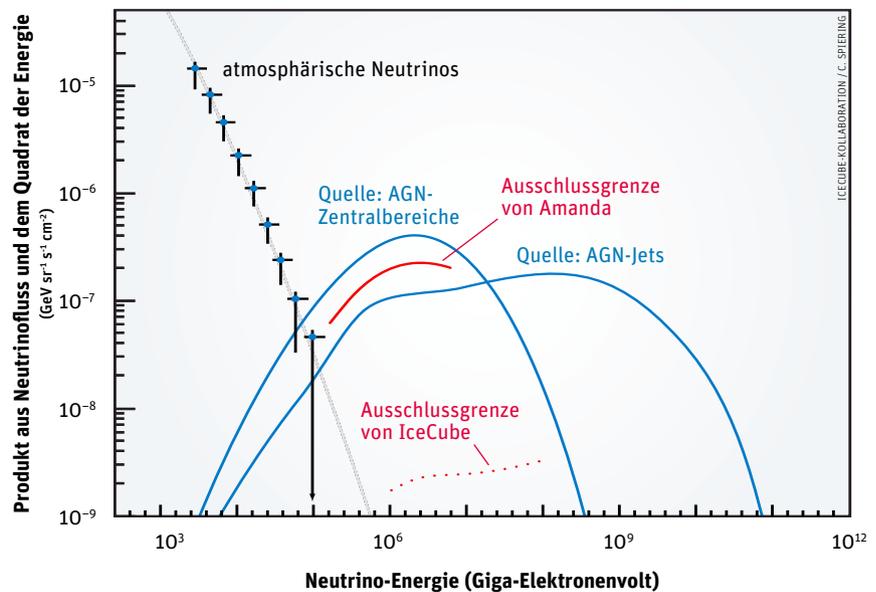
Wir können also bestimmen, ob es eher ein Proton oder ein Kern mittlerer Masse wie Kohlenstoff oder Sauerstoff oder ein schwerer Kern wie Eisen war. Verschiedene Entstehungsszenarien der kosmischen Strahlung sagen unterschiedliche Verhältnisse der darin enthaltenen chemischen Elemente voraus, und deshalb ist das eine wichtige Information.

Ein so ehrgeiziges Projekt lässt sich nur in internationaler Kooperation verwirklichen. Die Amundsen-Scott-Station am Südpol, die von der US-amerikanischen National Science Foundation (NSF) betrieben wird, stellt dabei die Logistik bereit. Für den Bau von IceCube hat der US-Kongress der NSF einen Zusatzaushalt von 240 Millionen US-Dollar genehmigt. Den Großteil der Restkosten – etwa 30 Millionen US-Dollar – teilen sich Deutschland, Schweden und Belgien, die alle bereits an Amanda beteiligt waren. Neue IceCube-Teilnehmer sind Neuseeland, die Niederlande, England und Japan. Neuseeland hat dabei eine geografische Schlüsselposition inne. Die Stadt Christchurch auf der Südinself Neuseelands beherbergt das International Antarctic Center, von dem aus die amerikanischen Hercules-



◀ Dieses von IceCube registrierte Neutrinoereignis zeigt die Spuren eines Myons, dessen Tscherenkow-Strahlung von unten nach oben die Anlage passierte und dabei von Fotovervielfachern an drei Trossen nachgewiesen wurde.

2013 wissen wir es genauer: Entstehen Neutrinos in den Jets Aktiver Galaktischer Kerne (AGNs)? Die vorliegenden Daten widersprechen einem Modell, das die AGN-Zentralbereiche als Neutrinoquelle annimmt (obere blaue Linie). Mit der Annahme, dass die registrierten Teilchenflüsse (blaue Punkte mit Fehlerbalken) ausschließlich aus atmosphärischen Wechselwirkungen stammen, sind sie aber verträglich. Amanda registriert jedoch nur Flüsse oberhalb der eingezeichneten Ausschlussgrenze (durchgezogene rote Linie). IceCube hingegen wird auch schwächere Teilchenflüsse messen (ab 2013 sogar bis herab zur gepunkteten roten Linie) und damit ein Modell prüfen können (untere blaue Linie), das die Entstehung von Neutrinos in den Jets der AGNs annimmt.



Transportflugzeuge zur Antarktis aufbrechen. Sie transportieren Menschen und Material nach McMurdo, der US-amerikanischen Station am Rand des kalten Kontinents. Von dort fliegt man dann in einer zweiten Etappe die restlichen 1400 Kilometer zum Südpol.

Auch die optischen Module gelangen auf diesem Weg dorthin. Sie werden in Madison (Wisconsin), Zeuthen (Deutschland) sowie Stockholm und Uppsala (Schweden) zusammengesetzt, getestet und dann nach Christchurch gebracht. Alle installierten Module arbeiten präzise, woher sie auch stammen. Bleibt die Ausfallrate so gering wie bisher, werden auch nach 15 Jahren noch über 95 Prozent von ihnen funktionieren.

Auch alle anderen Aufgaben sind auf die Kooperationspartner verteilt. Dazu gehört, den Detektor zu überwachen, Software zu schreiben, aufwändige Simulationsrechnungen durchzuführen und die Daten auszuwerten. So stellt zum Beispiel das Desy in Zeuthen mit einer leistungsfähigen Rechnerfarm das europäische Datenzentrum zur Verfügung. Die Koordination des Gesamtprojekts liegt in den Händen der Universität von Wisconsin in Madison.

IceCube wird tausendmal so groß sein wie die größten unterirdischen Neutrino-detektoren. Darum ist auch die Erwartung hoch, dass ihm die Entdeckung von Neutrinos aus kosmischen Beschleunigern gelingt. Die Frage, ob Gammastrahlenausbrüche die kosmischen Strahlen höchster Energie erzeugen, könnte schon nach einer Laufzeit von ein bis zwei Jahren beantwortet werden.

Vielleicht werden aber auch ganz andere Beobachtungen von IceCube im Nachhinein als die wichtigsten gelten. Dazu könnten Hinweise auf die Dunkle Materie zählen. Sie tritt nur schwach mit der normalen Materie aus Atomkernen und Elektronen in Wechselwirkung, ähnlich wie die Neutrinos. Ihre Bestandteile scheinen im Vergleich zu den Neutrinos jedoch sehr schwer zu sein. Darum nennt man die entsprechenden Teilchen auch Wimps (*Weakly Interacting Massive Particles*).

Auf Grund ihrer Masse könnten sie von der Schwerkraft großer Himmelskörper wie etwa der Sonne eingefangen werden. Dort könnten sie sich in einem dichten Schwarm ansammeln. Stoßen zwei Wimps zusammen, könnten sie in zwei Bündel normaler Elementarteilchen zerstrahlen, darunter auch Neutrinos. Besteht die Dunkle Materie aus Wimps, dann müsste man gelegentlich eines der Zerfallsneutrinos aus der Richtung der Sonne beobachten.

Diese Teilchen müssen energiereicher sein als diejenigen, die bei den Fusionsprozessen im Zentrum der Sonne frei werden. Weder das Baikal-Teleskop noch Amanda haben einen derartigen Überschuss von der Sonne oder aus dem Erdzentrum registriert. IceCube wird die Suche nach den Wimps mit dreißigfacher Empfindlichkeit fortsetzen.

Besonders spektakulär wäre es, eine Sternexplosion in der Nähe zu beobachten. Eine Supernova im Zentralbereich unserer Milchstraße würde IceCube mit 10^{20} Neutrinos im Mega-Elektronenvolt-Bereich bombardieren, die den Detektor

innerhalb von wenigen Sekunden durchqueren. In einem solchen Fall rechnen wir damit, eine Million Reaktionen nachweisen zu können. Allerdings brauchen wir dafür Geduld: Nur alle 30 bis 50 Jahre dürfte es zu einem solchen Ereignis kommen. ◁



Nach seiner Promotion an der Berliner Humboldt-Universität und einem Aufenthalt am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (Russland) arbeitet **Christian Spiering** am Desy-Teilinstitut in Zeuthen bei Berlin. Von 1997 bis 2005 war er wissenschaftlicher Koordinator des europäischen Teils von Amanda und von 2005 bis 2007 wissenschaftlicher Koordinator der internationalen IceCube-Kollaboration.

Neutrinojagd im tiefsten See der Erde. Von Christian Spiering in: *Humboldts Erben*. Von Gisela Graichen (Hg.). Lübbe-Verlag, 2000

Astroteilchenphysik. Von Claus Grupen. Springer-Verlag, 2000.

Raumschiff Neutrino – Die Geschichte eines Elementarteilchens. Von Christine Sutton. Birkhäuser-Verlag, 1994

Neutrino astrophysics: A new tool for exploring the universe. Von Eli Waxman in: *Science*, Bd. 315, S. 63, 2007

Neutrino astrophysics experiments beneath the sea and ice. Von Francis Halzen in: *Science*, Bd. 315, S. 66, 2007

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/893101.

Hören Sie dazu auch unseren **Podcast** unter www.spektrum.de/talk.