

Neutrinojagd am Südpol

Das Neutrino-Teleskop AMANDA besteht aus Photovervielfachern, die im Tiefeneis unter der Amundsen-Scott-Station am Südpol eingefroren sind. Damit sollen extrem energiereiche Neutrinos nachgewiesen werden, wie sie von galaktischen und extragalaktischen Teilchenbeschleunigern ausgesandt werden.

VON CHRISTIAN SPIERING

Dass es Quellen hochenergetischer Kernteilchen geben muss, die wie ein stetiger Regen auf die Erdatmosphäre treffen und dort Teilchenschauer auslösen, weiß man seit langem. Die Kosmische Strahlung wurde bereits 1912 von Viktor Hess entdeckt. Wir wissen inzwischen, dass sie vorwiegend aus Protonen, leichten und schweren Kernen besteht und dass ihre Energiedichte in unserer Galaxis durchaus mit jener von Sternenlicht, der kosmischen Hintergrundstrahlung oder galaktischen Magnetfeldern konkurrieren kann. Die Kosmische Strahlung ist also alles andere als eine Randerscheinung des Universums.

Noch bemerkenswerter ist, dass sich ihr Energiespektrum bis zu etwa 10^{20} Elektronenvolt (eV) erstreckt – das sind etwa acht Größenordnungen über der Energie, die gegenwärtig an irdischen Beschleunigern erreichbar ist! Der Ursprung der hochenergetischen Kosmischen Strahlung ist jedoch immer noch eines der großen ungelösten Probleme der Astrophysik. Das liegt daran, dass die geladenen Teilchen beim Durchqueren kosmischer Magnetfelder abgelenkt werden und damit ihre Richtungsinformation verlieren. Wir wissen also nicht, woher sie kommen.

Eine Lokalisierung der kosmischen Beschleuniger ist nur mit elektrisch neutralen Informationsträgern wie Photonen oder Neutrinos möglich. Photonen können durch kosmischen Staub und – bei hohen Energien – durch die allgegenwärtige Hintergrundstrahlung absorbiert werden. In vielen Fällen dürften Neutrinos daher die idealen Informationsträger sein.

Exotische Teilchen

Neutrinos gehören ohne Frage zu den exotischsten Vertretern des Teilchenzoos. Ihre Existenz wurde im Jahr 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um die »feh-

lende« Energie im radioaktiven Betazerfall zu erklären. Aufgrund ihrer äußerst schwachen Wechselwirkung konnten sie erst 1955 an einer intensiven Neutrinoquelle nachgewiesen werden, an einem Kernreaktor in den USA.

Es gibt drei Neutrino-Sorten: Elektron-Neutrino, Myon-Neutrino und Tau-Neutrino. Wir wissen heute, dass Neutrinos eine Ruhemasse besitzen – allerdings ist diese wahrscheinlich kleiner als ein Millionstel der Elektronenmasse. Die geringe Neigung zu Reaktionen wird am Beispiel der von der Sonne ausgesandten Neutrinos deutlich. Von etwa 60 Milliarden Sonnenneutrinos im keV- bis MeV-Bereich, die pro Sekunde auf jeden Quadratzentimeter der Erde treffen, reagiert kaum eine Handvoll beim Durchqueren des Erdballs mit einem Atomkern! Diese entmutigend schwache Reaktionsfreudigkeit ist das Hauptproblem bei ihrem Nachweis. Andererseits erlaubt sie den Neutrinos, aus Regionen zu entweichen, aus denen Licht nicht entkommt, zum Beispiel aus dem Innern eines soeben kollabierten Neutronensterns. Das macht sie so interessant für die Astronomie.

Neutrinoquellen

Bisher wurden nur von zwei extraterrestrischen Quellen Neutrinos nachgewiesen: Von der Sonne (Energiebereich keV bis MeV) und im Jahr 1987 von einer Supernova in der Großen Magellanschen Wolke (Bereich einiger MeV).

Vermutete Quellen von Teilchen mit Energien bis etwa 10^{15} eV sind die Stoßwellen, mit denen sich abgesprengte Supernovahüllen in das interstellare Medium ausbreiten. Für höhere Energien könnten Doppelsternsysteme aus einem Neutronenstern und einem normalen Begleitstern eine Rolle spielen. In ihnen wird Materie vom Begleitstern auf eine Akkretionsscheibe um den Neutronenstern gewirbelt und von diesem ge-

schluckt, wobei die freigesetzte Energie zu einem großen Teil in Stoßwellen umgesetzt wird. Ähnlich bilden sich Stoßwellen in Kernen aktiver Galaxien, in deren Zentren massereiche Schwarze Löcher Materie ansaugen. Ein Teil der dabei freigesetzten Energie fließt in Jets, die vom Zentrum der Galaxie in den intergalaktischen Raum geschossen werden und ebenfalls von Stoßwellen durchlaufen werden. Auch die Gammastrahlenausbrüche, extrem energiereiche kosmische Blitze, die zwar vor gut 30 Jahren entdeckt, bis vor wenigen Jahren aber nur im keV- und MeV-Bereich nachgewiesen wurden, könnten vielen Modellen zufolge gleichzeitig energetische Neutrinos erzeugen.

AMANDA

Das Nachweisprinzip von AMANDA (Antarctic Myon And Neutrino Detection Array) ist in Abb. 1 skizziert. Ein Neutrino durchquert die Erde bis in die Nähe des Detektors, wo es mit einem Atomkern des umgebenden Materials – Gestein oder Eis – reagiert. Die Erde wird als Filter benutzt, der alle anderen Teilchen außer den Neutrinos absorbiert. Falls es sich bei dem Neutrino um ein Myon-Neutrino handelt, so wird bei etwa zwei Dritteln der Wechselwirkungen ein Myon (eine Art schweres Elektron) erzeugt, das bis zum Detektor weiterfliegen und dort registriert werden kann. Der mittlere Winkel zwischen primärem Neutrino und Myon ist für hohe Energien kleiner als ein Grad und liegt damit unterhalb der Messgenauigkeit, mit der AMANDA die Myonrichtung bestimmen kann.

Zum Vergleich: Der Winkeldurchmesser des Mondes beträgt ein halbes Grad. Die Photovervielfacher registrieren das Cherenkov-Licht, das die Myonen abstrahlen. Gemessen werden die Ankunftszeit (mit einer Genauigkeit von ein bis fünf Nanosekunden) und die Stärke der Lichtsignale, woraus die Richtung

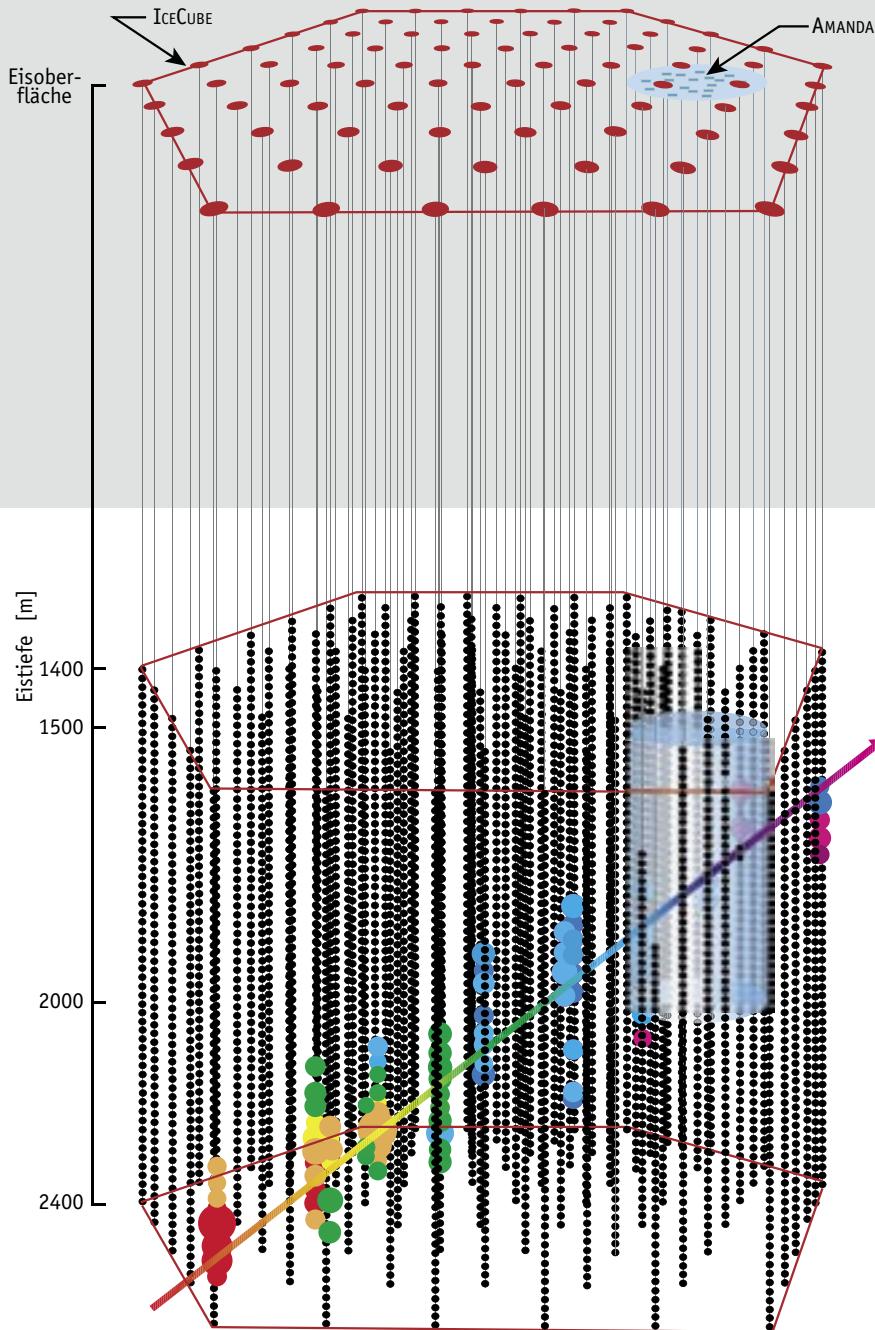


Abb. 1: Schema des Aufbaus der Neutrino-Teleskope AMANDA und IceCube. Die im Eis versenkten Photovervielfacher messen die bei der Wechselwirkung zwischen Neutrinos und den Kernen der im Eis enthaltenen Atome frei werdende Cherenkov-Strahlung. Daraus kann man auf die Energie und die Herkunftsrichtung der Neutrinos schließen. (Bild: AMANDA-Kollaboration)

Abb. 2: Ein Photovervielfacher wird versenkt. (Bild: Christian Spiering, DESY)



und die Energie der Myonen rekonstruiert werden können.

Die 677 Photovervielfacher von AMANDA befinden sich in druckfesten Glaskugeln, die an langen Kabeltrossen befestigt sind, durch welche die Signale an die Oberfläche geleitet werden. Der Eisschild über dem Südpol ist drei Kilometer dick, die Löcher, in denen die Kugeln in Tiefen zwischen anderthalb und zwei Kilometern eingefroren sind, werden mit einem 80°C heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen (Abb. 2).

Mit einer Höhe von 500 Metern und einem Durchmesser von 200 Metern ist AMANDA der größte Teilchendetektor, der bislang gebaut wurde (Abb. 3). AMANDA ist etwa dreißigmal so empfindlich wie Super-Kamiokande, der bisher größte Neutrinodetektor in einer stillgelegten Goldmine in Japan. Den-

noch zeigt die Himmelskarte der knapp 3400 Neutrinos, die mit AMANDA im Verlauf von vier Jahren registriert worden sind, keine signifikante Anhäufung in irgendeiner Richtung (Abb. 4).

Sonnenneutrinos kann AMANDA nicht nachweisen, denn die phantastische Empfindlichkeit bei hohen Energien wird mit der »Blindheit« bei niedrigen Energien erkauft. Bei den von AMANDA nachgewiesenen Neutrinos scheint es sich um Neutrinos zu handeln, die durch Stöße der Kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre erzeugt wurden.

Diese »atmosphärischen« Neutrinos fallen aus allen Richtungen annähernd gleichmäßig ein. Immerhin konnte mit AMANDA das Spektrum der atmosphärischen Neutrinos bis zum Hundertfachen der maximalen Energie gemessen werden, bis zu der die Daten der bisheri-

gen unterirdischen Neutrinodetektoren reichen, nämlich bis zu 100 TeV.

Vielseitige Anwendungen

AMANDA ist ein Mehrzweck-Instrument. Es wird auch für die Suche nach Teilchen der Dunklen Materie oder für die Suche nach magnetischen Monopolen – superschweren, isolierten magnetischen Nord- oder Südpolen – verwendet. Beide Teilchenarten spielen Schlüsselrollen in der Kosmologie. Bisher wurde keines von ihnen nachgewiesen, auch nicht durch AMANDA. Die Ausschlussgrenzen von AMANDA sind jedoch weit schärfer als die aller vorherigen Suchprogramme. Aus der Nichtbeobachtung von Monopolen können wir schließen, dass selbst eine Fläche von der Größe eines Fußballfeldes von weniger als einem Monopol pro Jahr getroffen wird!

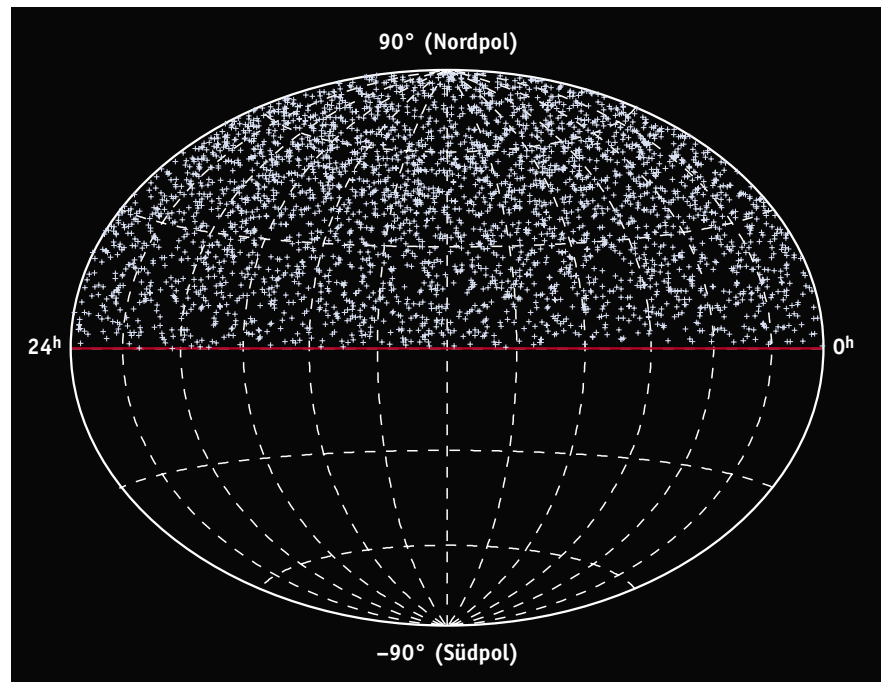


◀ Abb. 3: Die Signale der Photovervielfacher laufen im Gebäude von MAPO, dem Martin Pomerantz Observatory am Südpol, zusammen und werden dort gespeichert. Im Bild vorn sieht man das aufklappbare Observatorium AST/RO. (Bild: Christian Spiering, DESY)

▼ Abb. 4: Die mit AMANDA zwischen 2000 und 2003 beobachteten Neutrinos sind gleichmäßig über den Himmel verteilt. Ihre Herkunftsrichtungen lassen sich keinen bekannten kosmischen Quellen zuordnen. (Bild: Markus Ackermann, AMANDA-Kollaboration)

Eine andere, wichtige Funktion von AMANDA besteht in der Frühwarnung bei einem Supernova-Ausbruch. Einige Stunden vor dem Eintreffen eines Lichtsignals auf der Erde würde AMANDA vermutlich einen etwa zehn Sekunden langen Neutrino-Schwall registrieren und, zusammen mit anderen Neutrinodetektoren, ein Alarmsignal an die astronomische Welt senden. Die »optischen« Astronomen hätten dann eine gute Chance, das Einsetzen des Lichtsignals nicht zu verpassen und könnten so den Stern noch vor der Explosion mit entsprechenden Teleskopen aufsuchen.

Die Vorhersagen für die zu erwartenden Neutrino-Flüsse von Objekten wie engen Doppelsternsystemen oder aktiven Galaxien sind äußerst ungenau. Verschiedene Modellvorhersagen differieren um zwei bis drei Größenordnungen. Optimistischen Modellen zufolge hätte man schon mit AMANDA einige Quellen entdecken können. AMANDA hat diese Modelle nunmehr experimentell ausgeschlossen. Glaubt man konservativeren Modellen, dann muss man den Detektor nochmals um einen Faktor 20 bis 30 vergrößern, um ein ausreichend hohes Entdeckungspotenzial zu erreichen. Genau das geschieht im Moment. Um AMANDA herum wird ein etwa dreifach so großer Detektor installiert, der nach dem gleichen Prinzip wie AMANDA funktioniert. Dieser »IceCube« getaufte Detektor wird 4800 Photovervielfacher umfassen und ein Volumen von einem Kubikkilometer einschließen. IceCube wird etwa tausendmal so empfindlich wie Super-Kamiokande sein und damit ein neues Fenster ins Universum nicht nur leicht ankippen, sondern weit aufstoßen. AMANDA und IceCube sind in-



ternationale Projekte, mit deutscher Beteiligung durch das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) mit seinem Institutsteil in Zeuthen bei Berlin, sowie durch die Universitäten Mainz, Dortmund und Wuppertal. Die Installation von IceCube soll im antarktischen Sommer 2004/2005 beginnen und im Jahre 2010 abgeschlossen sein.

Wenn man in die Geschichte der Astronomie zurückblickt und sich der vielen bahnbrechenden Entdeckungen erinnert, die beim Öffnen neuer Beobachtungsfenster wie etwa der Radioastronomie oder der Röntgenastronomie gemacht wurden, dann darf man die Messungen von IceCube mit einiger Spannung erwarten. □



Nach seiner Promotion an der Berliner Humboldt-Universität und einem Aufenthalt am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (Russland) arbeitet **Christian Spiering** am Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen bei Berlin, das seit 1992 ein Teilinstitut von DESY ist.