

Der Vater der Neutrinoastronomie, Raymond Davis Jr., inspiziert hier in einem Stollen der Homestake-Mine in South Dakota den ersten Sonnenneutrinodetektor der Welt.



NEUTRINOS: TEILCHEN- JAGD UNTER TAGE

Sternbeobachtungen aus Bergwerksstollen, mehrere Kilometer unter der Erde: Neutrino teleskope werden im ewigen Eis oder tief im Meer platziert. Sie fangen Geisterpartikel, die mehrere Billionen Kilometer Blei problemlos durchdringen können.

>> Ivan Semeniuk

Man schrieb das Jahr 1967, als sich am California Institute of Technology («Caltech») eine Gruppe von Physikern und Astronomen zu einem Seminar über ein höchst esoterisches Thema traf. Raymond Davis Jr., Forscher am Brookhaven National Laboratory, präsentierte damals die ersten Daten über die Zahl der Neutrinos, die in der Sonne produziert werden. Ihm folgte sein Kollege John N. Bahcall, Theoretiker am Caltech, der darlegte, wie viele dieser höchst flüchtigen subatomaren Partikel die Sonne laut seinen Berechnungen produzieren sollte.

Bahcall war besorgt. Denn in dem Vortrag des damals noch ohne Festanstellung arbeitenden Assistenzprofessors, der seine bis dahin wichtigste Arbeit vor den Koryphäen seines Fachs vorstellen musste, gab es einen eklatanten Widerspruch:

Seinen Berechnungen zufolge musste die Sonne dreimal mehr Neutrinos produzieren als Davis gemessen hatte, und Bahcall konnte sich diese Abweichung einfach nicht erklären. »Man sah mir wohl an, wie bedrückt ich deswegen war«, sagt Bahcall, heute Forscher am Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey.

Unter den Zuhörern war auch der gefeierte Nobelpreisträger und Caltech-Physiker Richard Feynman. Als er sah, in welchem Dilemma sich sein jüngerer Kollege befand, zog er ihn zur Seite. »Feynman nahm mich auf einen langen Spaziergang mit«, erzählt Bahcall, »wir müssen gut zwei Stunden weggewesen sein.« Feynman lauschte geduldig den Sorgen Bahcalls. Schließlich sagte er: »Sie sollten sich das nicht so zu Herzen nehmen. Ich habe keine Ahnung, was die Antwort auf Ihr Problem ist, aber es ist sehr interessant.« >

Tief unter der Erde jagen Forscher den geisterhaften Neutrinos nach. Dabei benutzen sie ganz unkonventionelle Teleskope. Das Sudbury Neutrino Observatorium befindet sich in einer kanadischen Nickelmine, knapp zwei Kilometer unter der Erdoberfläche (unten).



LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

› Feynmans Worte von damals erwiesen sich im Nachhinein als prophetisch. Denn was als Spaziergang durch die Alleen Pasadenas begann, sollte sich in den folgenden 35 Jahren zu einer bemerkenswerten wissenschaftlichen Entdeckungsfahrt entwickeln. Hunderte von Forschern beschäftigten sich in mindestens einem halben Dutzend Großprojekten auf drei Kontinenten dreieinhalb Jahrzehnte lang mit der Frage der fehlenden Sonnenneutrinos. Und erst kürzlich fanden Wissenschaftler in einer Höhle tief im präkambrischen Fels Nordontarios auf überraschende Weise eine Antwort auf dieses langwierige wissenschaftliche Problem. Dort, am kanadischen Sudbury Neutrino Observatory (SNO), konnten sie nachweisen, dass Bahcalls ursprüngliche Berechnung korrekt gewesen war und alle Experimente seither zu wenig dieser Geisterteilchen gemessen hatten. Neutrinos – das zeigen jetzt die Ergebnisse – sind noch viel seltsamer, als sich die Physiker vorgestellt hatten.

Boten aus den Tiefen des Alls

Und die Geschichte von den Sonnenneutrinos geht weiter. Denn die Instrumente und Technologien, die einst entwickelt wurden, um das von Feynman als interessant eingestufte Problem zu lösen, lassen sich auch dazu verwenden, um in einige der unzugänglichsten Orte des Weltalls zu blicken.

Lange bevor sich Astronomen für Neutrinos zu interessieren begannen, bereiteten diese Partikel den Physikern schon Kopfzerbrechen. Bereits 1930 hatte der österreichische Physiker Wolfgang Pauli ein bis dahin unbekanntes, massearmes, elektrisch neutrales Teilchen vorhergesagt, um das physikalische Problem des Betazerfalls zu erklären. Beim Betazerfall wandelt sich ein Neutron unter Freisetzung eines Elektrons (auch Betateilchen genannt) und eines Neutrinos in ein Proton um. Theoretisch sollte das Elektron dabei stets eine ganz bestimmte Portion Energie mit sich tragen – in der Praxis besaß es jedoch oft zu wenig davon. Und so griff Pauli zu einer Notlösung: Er beschwor die Existenz eines zusätzlichen, unsichtbaren Teilchens, das die Energiedifferenz tragen sollte. Enrico Fermi taufte es auf Grund seiner Leichtigkeit und seiner elektrischen Neutralität Neutrino.

Fürchtete Pauli noch, dass er die Wissenschaft mit seinem hypothetischen

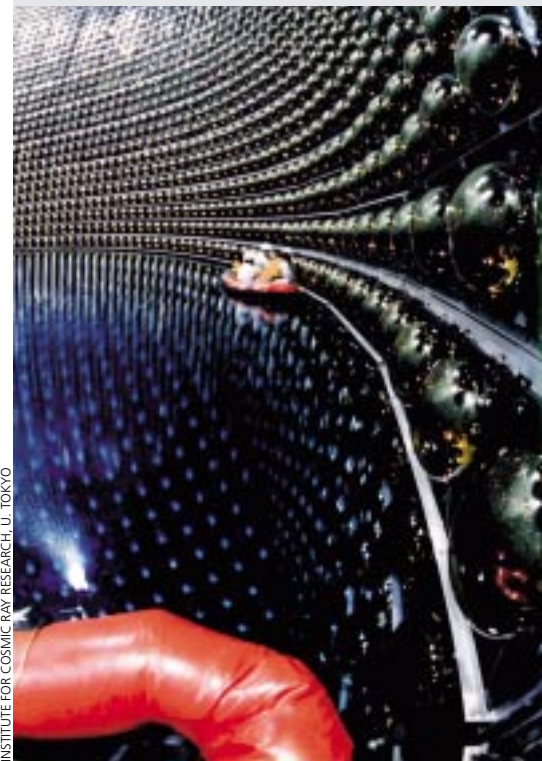
Teilchen, das mit keinem Instrument der damaligen Zeit nachgewiesen werden konnte, über Gebühr belastete, so zeigte sich zum Glück Jahre später, dass es nicht unmöglich war, Neutrinos einzufangen – nur äußerst schwierig. Doch genau dies macht sie für die Astronomie so wertvoll. »Neutrinos schlüpfen einfach durch jede Art von Materie hindurch«, sagt die Physikerin Kate Scholberg vom Massachusetts Institute of Technology (MIT), »sie liefern uns Informationen tief aus dem Innern von Objekten, aus denen kein Photon je nach außen dringt.«

Ihr Talent, sich auch durch dichteste Materie wie Blei hindurchzuschmuggeln, verdanken die Neutrinos der Tatsache, dass sie elektromagnetisch neutral und damit immun gegenüber jenen Kräften sind, die das Wechselspiel zwischen Materie und Licht regeln. Zwar können sie mit anderen Teilchen reagieren, jedoch nur über die schwache Kernkraft, die über eine extrem kurze Reichweite – etwa ein Zehntausendstel des Durchmessers eines Protons – verfügen. Wechselwirkungen mit Neutrinos sind daher überaus selten.

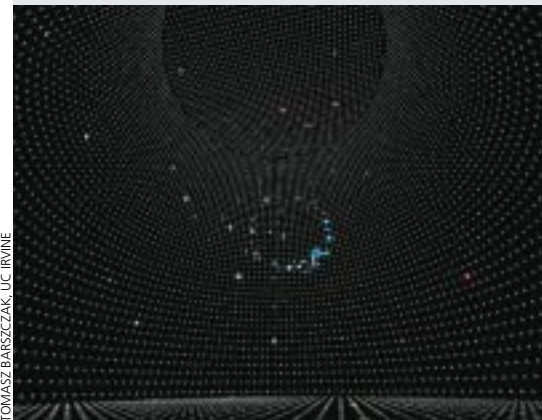
Deswegen müssen Detektoren, mit denen man die geisterhaften Teilchen einfangen will, auch über eine immens große Zahl an Atomen verfügen, damit wenigstens einige wenige mit diesen in Beziehung treten. In den 1950er Jahren gelang es einer Gruppe amerikanischer Physiker unter Leitung von Clyde Cowan und Frederick Reines erstmals die Partikel nachzuweisen. Als Neutrinoquelle benutzten sie den Kernspaltungsreaktor von Savannah River im US-Bundesstaat South Carolina, der etwa 10^{18} Neutrinos pro Sekunde abstrahlte. Der nächste Schritt bestand darin, diese unvorstellbar große Anzahl von Teilchen auf ein möglichst leicht zu treffendes Ziel zu lenken. Eine große Menge Protonen bot sich hier als potenzielle Zielscheibe für die Neutrinos geradezu an.

Die Forscher wählten einfach Wasser als Detektormaterial, da jedes Wassermolekül aus zwei Wasserstoffatomen und deren Kern aus jeweils einem Proton besteht. Cowan und Reines stellten also einen 300-Liter-Wassertank direkt neben den Kernreaktor. Es dauerte nicht lange, bis sie erkannten, dass es auch möglich sein müsste, Neutrinos von einem stärkeren, wenn auch ungleich ferneren Kernfusionsreaktor einzufangen: der Sonne.

Ray Davis wurde schließlich der erste waschechte Neutrinoastronom. Sein



INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH, U. TOKYO



TOMASZ BARSZCZAK, UC IRVINE

Super-Kamiokande Japans tief unter der Erde gebauter Neutrino-detektor spielte eine entscheidende Rolle bei der Entdeckung der so genannten Neutrinooszillationen. Die Geisterteilchen besitzen die Eigenschaft, sich von einer Erscheinungsform in eine andere umzuwandeln. Super-K ist seit Januar 2003 mit 5183 Lichtsensoren in Betrieb – halb so viele wie vorgesehen.

In einem Schlauchboot inspizieren Techniker die lichtempfindlichen Super-K-Detektoren, während sich der 50-Millionen-Liter-Tank mit Wasser füllt (ganz oben).

Die Computerdarstellung zeigt, welche Detektoren Licht »sahen«, nachdem ein Sonnenneutrino mit einem Wassermolekül kollidierte (oben).

»Neutrino teleskop« bestand aus einem 400 000 Liter fassenden Tank, den er mit einer Lösung füllte, die reich an Chlor-37-Isotopen war. Chlor-37 wandelt sich aber durch das Einfangen eines solaren Neutrinos in das radioaktive Gas Argon-37 um. Indem Davis maß, wie schnell der Argongehalt im Tank stieg, konnte er abschätzen, wie viele Sonnenneutrinos durch die Flüssigkeit geflogen waren. Sein größtes Problem war dabei die kosmische Strahlung aus der Tiefe des Alls, da deren energie- und massereichen Teilchen ähnliche Reaktionen in seinem Chlortank hervorriefen wie Sonnenneutrinos.

Er löste dieses Problem, indem er seinen Detektor in einen noch tiefer gelegenen Stollen einer Goldmine in South Dakota verlegte. Auf diese Weise, so sein Kalkül, sollte die Erdkruste das Experiment vor der kosmischen Strahlung abschirmen. Seine Taktik erwies sich als erfolgreich: Als erster Mensch fing Davis Neutrinos von der Sonne ein. Damit war er auch der Erste, der nachwies, dass zwischen der theoretisch berechneten und der tatsächlich gemessenen Zahl an solaren Neutrinos eine rätselhafte Lücke klaffte.

Das Rätsel der fehlenden Sonnenneutrinos

Um zu vermeiden, dass er zuviel Vertrauen in seine eigenen Berechnungen setzte, rief sich Bahcall stets in Erinnerung, dass die Geschichte gegen ihn war. »Neue physikalische Gesetze wurden bisher immer im Labor und nicht im Observatorium entdeckt«, betonte er. Die solaren Neutrinos erwiesen sich jedoch als seltene Ausnahme. Denn in diesem Fall begründeten astronomische Beobachtungen einen ganz neuen Zweig der Physik.

Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik gibt es drei verschiedene Neutrinosorten: Elektron-Neutrinos gehen gewöhnlich aus dem Wechselspiel mit Elektronen hervor, während Myon- und Tauon-Neutrinos beim Zusammentreffen der massereicheren Verwandten des Elektrons – dem Myon und dem Tauon – entstehen. Die überraschende Erklärung für das Defizit an Sonnenneutrinos liegt nun darin, dass es gar kein Defizit gibt! Vielmehr verwandeln sich die in den frühen Experimenten nachgewiesenen Elektron-Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde in – von diesen Experimenten nicht mehr nachweisbare – Myon- oder Tauon-Neutrinos, indem sie zwischen diesen drei Erscheinungsformen hin- und herschwingen.

Diese seltsamen Oszillationen wurden erst jüngst am Sudbury Neutrino Observatory bestätigt. Mit diesem Experiment konnten erstmalig nicht nur Elektron-Neutrinos, sondern auch die sonst nicht nachweisbaren Myon- und Tauon-Neutrinos von der Sonne gemessen werden. Das SNO ist in einem zwei Kilometer tiefen Stollen eines Nickelbergwerks beheimatet. Sein Herzstück ist ein tausend Tonnen fassender Tank mit schwerem Wasser – also Wasser (H_2O), welches das Wasserstoffisotop Deuterium (D_2O) statt regulären Wasserstoff enthält.

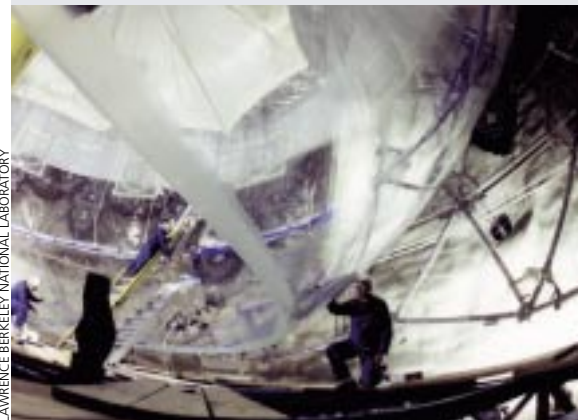
Neutrinos können mit Deuteriumkernen auf zwei unterschiedliche Weisen reagieren. Eine davon steht nur Elektron-Neutrinos offen, die andere jedoch Neutrinos aller drei Arten.

Die Gesetze der Elementarteilchenphysik schreiben vor, dass alle Sonnenneutrinos als Elektron-Neutrinos geboren werden. Das SNO wies jedoch nach, dass nicht alle in dieser Form weiterexistieren. Vielmehr ändert ein beträchtlicher Teil von ihnen auf dem Weg vom Sonneninnern zu den Detektoren auf der Erde seinen Typ. Daraus lässt sich schließen, dass zumindest manche Neutrinoarten eine Masse besitzen müssen, da die Frequenz, mit der sie zwischen den unterschiedlichen Formen hin- und herwechseln, vom Massenunterschied zwischen den Neutrinentypen abhängt. »Dies ist tatsächlich ein Beweis für eine Physik, die über das Standardmodell hinausgeht«, ist sich SNO-Direktor Art MacDonald von der Queen's University in Kanada sicher. »Es weist uns in Richtung einer umfassenderen Theorie, die dem Ganzen zu Grunde liegt.«

Einen anderen Hinweis lieferte das japanische Experiment Super-Kamiokande, kurz Super-K, der 50 000 Tonnen schwere Nachfolger von Kamiokande. Super-K ist nicht nur in der Lage, solare Neutrinos einzufangen, sondern weist auch Myon-Neutrinos nach, die entstehen, wenn kosmische Strahlung auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre trifft. Solche atmosphärischen Neutrinos, die zehn bis hundert Mal mehr Energie als Sonnenneutrinos besitzen, bilden sich nahezu gleichmäßig über jedem Punkt der Erde. Super-K jedoch empfängt von unten weniger Myon-Neutrinosignale als von oben, da das Signal unten erst durch den gesamten Erdkörper laufen muss. Das bedeutet, dass die Neutrinos mit dem längeren Weg durch viele tausend >

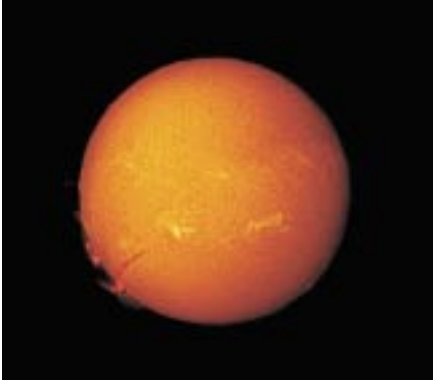


SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY



LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

Das Sudbury Neutrino Observatory Schwere Maschinen heben Anfang der 1990er Jahre die Höhle für die Versuchsanlage aus (Bild ganz oben). Das Sudbury Neutrino Observatory besteht aus einer Acrylglaskugel (Bild oben), die mit tausend Tonnen schwerem Wasser gefüllt und von 9600 großflächigen, lichtempfindlichen Detektoren umgeben ist. Darüber liegen zwei Kilometer Felsgestein, das die Anlage vor der sonst allgegenwärtigen kosmischen Strahlung schützt. Weitere 7000 Tonnen sehr reinen Wassers schirmen den Detektor vor anderer Strahlung ab. Das unterirdische Neutrino teleskop nahm im Jahr 1999 die Suche nach den Geisterteilchen auf.



PAUL HYNDMAN



DENNIS DI CICCO, S&T



NODAO, ALURA, NSF

> Kilometer Erdgestein genug Zeit haben, ihren Typ zu ändern. In diesem Fall verwandeln sie sich in Tauon-Neutrinos.

Das so genannte Kamland-Projekt – ein Experiment, das die Neutrinoemissionen verschiedener japanischer Kernspaltungsreaktoren misst – hilft den Neutrinojägern indes, so manche Theorien zur Elektron-Neutrino-Umwandlung auszuschließen. In Verbindung mit Messungen des SNO und aus anderen Versuchen offenbarte es, dass solare Neutrinos die meisten ihrer Oszillationen bereits im Sonneninneren durchmachen und nicht erst im Vakuum zwischen Sonne und Erde.

Ein Blick ins Herz der Sonne

Da die Physiker die verschollenen Sonnenneutrinos endlich aufgespürt haben, kann ihnen die Herkunft dieser Teilchen einiges über den Stern verraten, aus dem diese stammen. So basieren die SNO-Messungen lediglich auf der kleinsten Untergruppe solarer Neutrinos: jenen mit mehr als fünf Millionen Elektronenvolt (MeV)

Die Neutrinoastronomie begann vor fast vier Jahrzehnten mit einer ersten Inventur der Neutrinos von der Sonne (oben links). Nur einmal gelang es bisher, Geisterteilchen einzufangen, die zweifelsfrei von der Explosion der Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke stammten (oben Mitte). Astronomen hoffen, irgendwann auch einmal Neutrinos aus unserer Milchstraße oder aus aktiven Galaxien wie Centaurus A (oben rechts) einfangen zu können.

Energie. Zum Vergleich: Die Elektronen, die auf die Phosphorbeschichtung eines herkömmlichen Fernsehschirms treffen, besitzen zumeist tausend Elektronenvolt oder ein Tausendstel MeV. Die hochenergetischen Teilchen entstehen in spezifischen Kernreaktionen, an denen das Element Bor-8 beteiligt ist. Dies hat einige Wissenschaftler motiviert, nach Wegen zu suchen, um Neutrinooszillationen auch in sehr viel niedrigeren Energiebereichen nachzuweisen, wo die große, aber schweigende Mehrheit der Geisterteilchen darauf wartet, untersucht zu werden. Ihr besonderes Interesse richtet sich dabei auf jene Partikel, die im Proton-Proton-Zyklus entstehen – der bei weitem wichtig-

sten Kernreaktion der Sonne. Etliche Teams arbeiten nun an Experimenten, mit denen diese niederenergetischen Teilchen, die 98 Prozent aller solaren Neutrinos ausmachen, untersucht werden können. Könnten auch sie erfolgreich »geerntet« werden, hätte das wichtige Auswirkungen auf die Sonnenforschung. Untersuchungen an Proton-Proton-Neutrinos würden klären helfen, ob diese oder eine andere Kette von Kernreaktionen – bekannt als CNO-Zyklus – bei der Energieerzeugung der Sonne eine größere Rolle spielt als bisher angenommen.

Damit wäre es zum ersten Mal möglich, die Neutrino-Produktion der Sonne, die tief in ihrem Kern stattfindet, mit der >

Wann entflammt die nächste Supernova in unserer Milchstraße?

Die letzte Supernova in unserer Galaxis wurde 1604 beobachtet, zu einer Zeit als das Teleskop noch nicht erfunden war. Seither explodierten vermutlich etliche Sterne innerhalb unserer Milchstraße, ohne dass wir davon etwas mitbekamen. Man geht heute davon aus, dass durchschnittlich alle drei Jahrzehnte eine Supernova »hochgeht«. Doch der Staub im Zentrum unserer Galaxis verbirgt diese vor unseren Blicken. Neutrinos durchdringen jedoch selbst dichtesten Staub. Sie gelangen daher sehr leicht vom kollabierenden Kern einer Supernova zu uns. Abgesehen von der Supernova 1987A – die sich knapp außerhalb unserer Milchstraße in der benachbarten Großen Magellanschen Wolke ereignete – wurden noch keine Neutrinos eines explodierenden Sterns beobachtet. Das deutet darauf hin, dass die nächste Supernova in unserer Galaxie eigentlich längst überfällig ist. Wenn es end-

lich passiert, werden vermutlich die Neutrinodetektoren als Erste anschlagen.

Physiker und Astronomen haben das »Supernova Early Warning System« (Snews) eingerichtet (<http://cyclo.mit.edu/snnet>). Es soll Forschern, die an den verschiedenen Neutrinodetektoren arbeiten, die Möglichkeit geben, untereinander und mit anderen Astronomen Kontakt aufzunehmen, sobald erste Signale eintreffen, die auf einen gerade explodierenden Stern hindeuten. Dank ihrer Vertrautheit mit dem nächtlichen Sternhimmel und den großen Bildfeldern ihrer Instrumente spielen aber auch die Amateurastronomen bei der Suche nach dem optischen Gegenstück eine wichtige Rolle. Mit etwas Glück wird es diese Kooperation zwischen Hobbyastronomen und Astrophysikern schaffen, das allererste Licht aus dem Kernkollaps einer Supernova einzufangen – etwas, das nie zuvor gelang.



ALAN DYER

Die Milchstraße Die nächste Supernova kommt bestimmt.

> Leuchtkraft an ihrer Oberfläche in Beziehung zu setzen. Die im Sonneninnern erzeugten Photonen benötigen rund eine Million Jahre, um sich vom Kern zur Oberfläche vorzuarbeiten, während solare Neutrinos die gleiche Strecke in gerade einmal zwei Sekunden zurücklegen. Ein Vergleich zwischen der Leuchtkraft des Kerns und der Sonnenoberfläche würde zeigen, wie stabil die Energieerzeugung der Sonne über einen Zeitraum von einer Million Jahre wirklich ist.

Geboren im solaren Feuer

Dass auch Neutrinos aus anderen Sonnensystemen auf der Erde eingefangen werden können, bestätigte sich auf dramatische Weise im Februar 1987, als eine Welle hochenergetischer Teilchen Neutrinodetektoren in Japan und den USA anschlagen ließ. Zeitgleich flammte die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke auf, einer Nachbargalaxie, rund 160 000 Lichtjahre von der Erde entfernt. Die Neutrinos aus der Supernova 1987A bestätigten damit eine Theorie, die besagt, dass 99 Prozent der bei einer Sternexplosion freigesetzten Energie in Form von Neutrinos fortgeschleudert wird. Jedes einzelne dieser Teilchen besitzt in etwa so viel Energie wie die hochenergetischsten unter den Sonnenneutrinos. Anlagen wie Super-K und SNO eignen sich gut dazu, diese einzufangen. Würde heute ein Stern in unserer Milchstraße in ähnlicher Weise kollabieren und kurze Zeit darauf als Supernova explodieren, würden zuallererst diese Experimente Tausende von Neutrinossilgen melden.

Die Computermodelle über die Abläufe in einer Supernova wurden zwar seit 1987 immer weiter verfeinert, doch konnten sie sich bisher noch nicht in der Praxis beweisen. »Wir wissen noch immer wenig darüber, wie Neutrinos in Supernovae gebildet werden«, bestätigt der theoretische Astrophysiker George M. Fuller von der University of California in San Diego. »Die Detektoren sind mittlerweile jedoch so gut, dass sie uns beim Ausbruch einer Supernova ein sehr detailliertes Bild von den tatsächlichen Geschehnissen vermitteln könnten.«

So nehmen Forscher an, dass der anfängliche Kollaps im Kern eines massereichen Sterns riesige Mengen an Elektron-Neutrinos mit Energien zwischen 10 und 15 MeV freisetzt. Diese hochenergetischen Partikel bilden sich, wenn die

dann immens starke Schwerkraft Elektronen und Protonen im Stern zusammengepresst, sodass eine gewaltige Menge an Neutronen entsteht. Nur einen Wimpernschlag später erreicht der kollabierende Kern seine größte Dichte. Er »schnellt« erneut auseinander und eine Stoßwelle läuft entgegen dem hereinstürzenden Material nach außen. Diese liefert auch die Energie, die zahlreiche andere Teilchen produziert, darunter eine Welle von Neutrino-Antineutrino-Paaren aller drei Typen mit Energien bis zu zwanzig MeV. »Über die Beobachtung der Veränderung des Neutrinosignals wird es möglich sein, die Explosion in Echtzeit zu verfolgen«, glaubt Adam Burrows von der University of Arizona.

Faszinierend wäre etwa ein Signal von Elektron-Neutrinos, das während des ersten Ausbruchs abrupt abfällt. Dies würde zeigen, dass der sich bildende Neutronstern kollabiert und ein Schwarzes Loch gebiert. Verlockend ist auch die Aussicht, dass Neutrinos die Astronomen sehr frühzeitig von einer Supernova in unser Milchstraße in Kenntnis setzen können. Denn jene Neutrinos, die als Erste während einer Sternexplosion freigesetzt werden, müssten den zum Untergang verdammten Himmelskörper theoretisch in Sekundenschnelle verlassen und – da sie fast mit Lichtgeschwindigkeit reisen – die Erde Stunden vor der sichtbaren Explosion erreichen. Forscher vom SNO, Super-K und von anderen Projekten sind derzeit dabei, ein Netzwerk aufzubauen, das Astronomen in der ganzen Welt – darunter auch Amateure – sofort benachrichtigt, sollte ein supernova-verdächtiges Neutrinosignal empfangen werden (Kasten S. 34).

Problematische Geisterteilchen

Die energiereichsten Neutrinos sind zwar die vielversprechendsten, aber auch die problematischsten der Geisterteilchen. Auf der einen Seite reagiert ein Neutrino umso wahrscheinlicher mit anderen Teilchen, je mehr Energie es besitzt und ist damit auch leichter zu entdecken. Fatalerweise wird jedoch gerade der hochenergetische Bereich des Neutrinospektrums von atmosphärischen Neutrinos – also Teilchen, die sich erst in der irdischen Atmosphäre bilden und damit das kosmische Neutrinosignal verdecken – überflutet. Zumindest gilt dies bis zu Energien von rund 1 TeV (einem Teraelektronenvolt, 10^{12} eV). Jenseits dieser Energieschwelle produziert die



BEIDE BILDER: STEVEN BARWICK; UC IRVINE



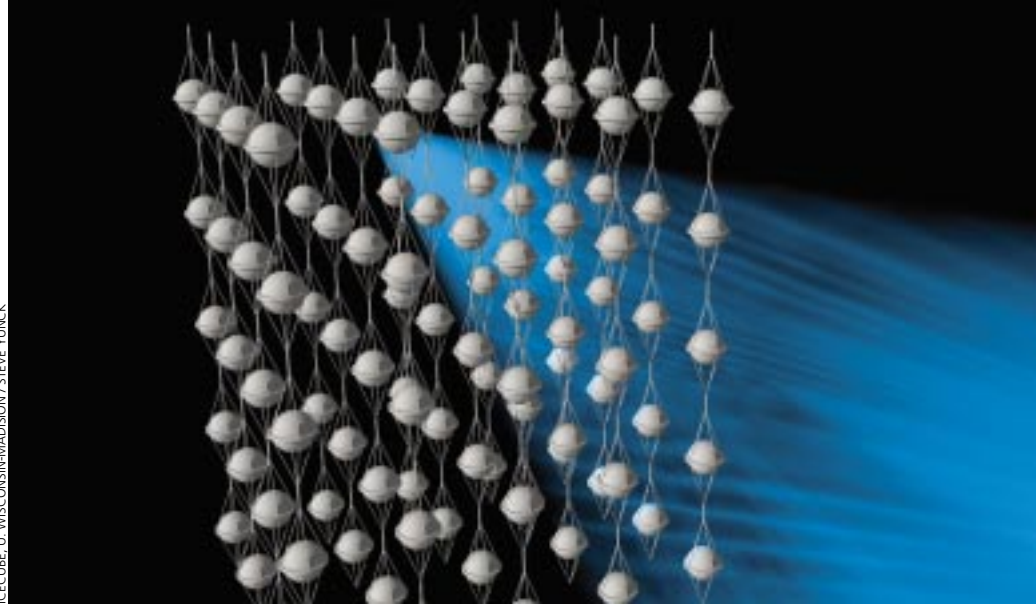
Amanda und IceCube Nur einen Kilometer vom Südpol entfernt schmilzt das Amanda-Bohrteam Löcher ins durchsichtige antarktische Eis (ganz oben). Dort werden Fotoverstärker in kilometerlangen Ketten im ewigen Eis versenkt, wo sie auf Lichtblitze von Neutrinos warten, die mit Elektronen oder Atomkernen zusammenprallen. Zwar hat Amanda (oben, Bild der Versuchsstation) bereits Hunderte von Teilchen entdeckt, doch wurden diese wahrscheinlich von der kosmischen Strahlung erst in der Erdatmosphäre erzeugt. Eine verbesserte Version des Experiments mit dem Namen IceCube könnte jedoch empfindlich genug sein, um auch aus den Tiefen des Alls stammende Neutrinos zu finden.

Atmosphäre deutlich weniger Neutrinos und so öffnet sich den Astronomen dort ein Fenster ins energiereiche Universum.

Woher diese Neutrinos stammen, wird im Moment unter den Forschern noch heftig diskutiert. Zumindest eine Quelle gilt als sicher: Extrem energiereiche kosmische Strahlen, die bei ihrer Reise durchs All mit Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds kollidieren, sollen Neutrinos mit Energien von bis zu einer Million Billionen Elektronenvolt (einem Exaelektronenvolt, 10^{18} eV) erzeugen. Da sich Neutrinos im Gegensatz zur kosmischen Strahlung dank ihrer Immunität gegenüber intergalaktischen Magnetfeldern geradlinig fortbewegen, ist es möglich, ihren Weg bis zur Entstehung zurückzuvollziehen. Auf diese Weise, so hoffen die Forscher, sollten auch die Ursprünge der energiereichen kosmischen Strahlung identifiziert werden können. Zwei potenzielle Quellen dieser Strahlungsform sind zum einen Gammastrahlenausbrüche (siehe ASTRONOMIE HEUTE 11/2004, S. 30), die durch den plötzlichen Kollaps rotierender massereicher Sterne ausgelöst werden, sowie supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum aktiver Galaxien.

Näher an der Erde liegt eine weitere Neutrinoquelle: galaktische Mikroquasare – Schwarze Löcher mit der Masse eines einzelnen Sterns (ASTRONOMIE HEUTE 1-2/2004, S. 26). Das Gleiche trifft für die Überreste von Supernovae zu, die in der Lage sind, in ihren verknäulten Magnetfeldern Teilchen zu beschleunigen.

Obwohl diese beiden Neutrinoreservoir weniger Geisterteilchen produzieren als Gammastrahlenausbrüche oder aktive Galaxien, macht ihre relative Nähe zur Erde sie doch zu recht viel versprechenden Kandidaten. »Vermutlich werden wir irgendwann Neutrinos aus Supernovaresten unserer näheren Umgebung entdecken – möglicherweise irgendwo im Sternbild Schwan«, glaubt Francis Halzen von der University of Wisconsin. Halzen ist der Chefwissenschaftler von »IceCube«, einem ein Quadratkilometer großen Detektor, mit dessen Bau noch in diesem Jahr begonnen werden soll. IceCube muss deshalb so überwältigend groß sein, weil hochenergetische Neutrinos zwar stärker reagieren, aber vermutlich sehr selten sind. Möglich werden IceCubes beeindruckende Dimensionen erst dadurch, weil das Detektormaterial in Form von schier end-



ICECUBE, U. WISCONSIN/MADISON/STEVE YUNCK

losem, optisch durchsichtigem Antarktiseis bereits vor Ort vorhanden ist. Forscher sind gerade dabei, kilometerlange Ketten von Photodetektoren in der antarktischen Eisplatte zu versenken. Diese sollen die raren Lichtblitze einfangen, die entstehen, wenn hochenergetische Neutrinos im Eis mit Protonen kollidieren.

IceCubes Technologie wird bereits heute vom Vorläuferexperiment Amanda, dem »Antarctic Muon and Neutrino Detector Array«, unter den harschen Wetterbedingungen am Südpol getestet. Bisher hat Amanda schon hunderte hochenergiereicher Geisterteilchen aus der nördlichen Hemisphäre nachgewiesen. Da die kosmische Strahlung den Detektor mit atmosphärischen Neutrinos geradezu überflutet, konzentrieren sich die Forscher bei diesem Experiment alleine auf die Teilchen, die von der anderen Seite der Erde stammen. Diese müssen zuvor den gesamten Erdkörper durchqueren, bevor sie die Detektoren von Amanda erreichen. Schmutzeffekte durch kosmische Strahlung der nördlichen Himmelsphäre werden damit so gut wie ausgeschlossen.

Meerwasser statt Eis

Bisher fiel keines der von Amanda eingefangenen Signale zeitlich mit einem Gammastrahlenausbruch zusammen. Auch lassen sich die bisher gemessenen Ereignisse nicht zu astronomisch aussagekräftigen Himmelsmustern zusammenfassen. Daher handelt es sich bei ihnen vermutlich um besonders energiereiche atmosphärische Neutrinos. Nach der Erweiterung des Experiments zur vollen Größe soll IceCube gegen Ende dieses Jahrzehnts in der Lage sein, Neutrinoquellen im All punktgenau zu lokalisieren.

Wie Perlen an einer Schnur hängen die Neutrinodektoren von IceCube in dieser künstlerischen Darstellung im Eis der Antarktis.

Doch IceCube ist nicht der einzige Versuch der Forscher, energiereiche Neutrinos einzufangen. Entwürfe für Anita, »Antarctic Impulsive Transient Array«, sehen einen Detektor vor, der dank eines Ballons rund 35 Kilometer über der Antarktis schweben und von dort Radiowellen einfangen soll, die durch ins Eis einschlagende Neutrinos erzeugt werden. Andere Projekte setzen auf Meerwasser statt Eis als Detektormedium. So sind zur Zeit mit »Antares« an der Südküste Frankreichs, »Nestor« im östlichen Mittelmeer und »Baikal« in Russland drei weitere gewaltige Unterwasser-Neutrinoanlagen im Aufbau.

»Das Goldene Zeitalter der Neutrinoastronomie ist angebrochen«, sagt Scholberg. »Viele der grundlegenden Fragen der Geisterteilchen sind bereits geklärt und wir besitzen eine neue Generation von Detektoren, die sich dem Punkt nähern, an dem wir mit ihnen die ersten Früchte für die Forschung ernten können.« Angesichts solcher Zukunftsperspektiven mache er sich keine Sorgen mehr über Neutrinos, gesteht John Bahcall. »Es macht mir enorm viel Spaß«, sagt er. »Jetzt Sorge ich mich nur noch darum, dass die Leute, die mich bezahlen, irgendwann herausfinden, wieviel Spaß mir die Arbeit macht und mich irgendwann nicht mehr bezahlen!« <<

Ivan Semeniuk ist Reporter mit den Fachgebieten Astronomie und Raumfahrt für den kanadischen Discovery Channel.