

Die Wechselwirkung eines Neutrinos mit einem Molekül des antarktischen Eises erzeugt einen Teilchenschauer, der im Detektor IceCube zahlreiche der an Trossen aufgehängten Photomultiplier ansprechen lässt (farbige Kugeln). Das nach links oben wegfliegende Myon (Pfeil) setzt die Spur des ursprünglichen Neutrinos fort und zeigt somit dessen Flugrichtung an.

IceCube: Ernie und Bert sind nicht allein

Tief im Eis der Antarktis sucht der Detektor IceCube nach Neutrinos aus den Weiten des Alls. Eine neue Analyse fördert nun zu den bereits bekannten zwei Ereignissen weitere zu Tage, die von Quellen außerhalb des Sonnensystems stammen. Damit öffnet sich den Astronomen ein neues Beobachtungsfenster: die Erforschung des Kosmos mit hochenergetischen Neutrinos.

In einer der Episoden der beliebten Kindersendung »Sesamstraße« debattieren die Protagonisten Ernie and Bert aufgeregt den Verbleib von Ernies tiefgefrorenen Eiswürfeln (englisch: ice cubes), die auf wundersame Weise verschwunden sind. Die Autoren dürften nicht im Traum auf den Gedanken gekommen sein, dass gut vierzig Jahre später die Mitglieder eines 270-Millionen-Dollar-Projekts namens IceCube das wundersame Erscheinen zweier Ereignisse debattieren sollten, und dass zu allem Überfluss ein pfiffiger Doktorand die beiden Ereignisse auf die Namen »Ernie« und »Bert« taufen würde. Schon gar nicht hätten die Filmemacher sich vorstellen können, dass diese Ereignisse womöglich die Vorboten einer neuen Art von Astronomie sind: der Erforschung des Kosmos mit hochenergetischen Neutrinos.

IceCube ist ein Neutrinooteleskop, das im tiefen antarktischen Eis über dem Südpol installiert ist (siehe SuW 6/2011, S. 21). Der Detektor besteht aus 86 Trossen, jede bestückt mit 60 Lichtsensoren. Die Senso-

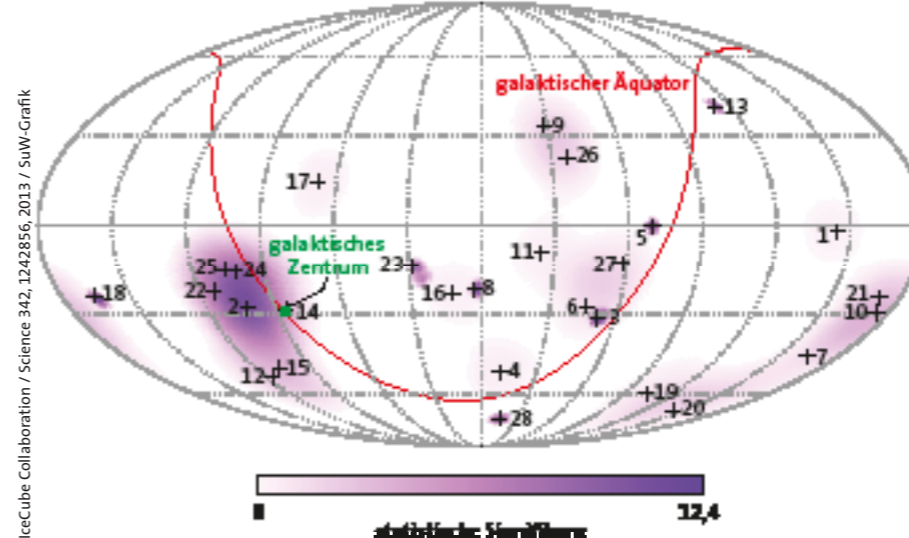
ren registrieren die schwachen Lichtblitze, die bei den äußerst seltenen Reaktionen von Neutrinos erzeugt werden (siehe Bild oben). IceCube wurde gebaut, um jene Neutrinos nachzuweisen, die von weit außerhalb unseres Sonnensystems kommen und die uns erklären können, welche Quellen für die Erzeugung der kosmischen Strahlung verantwortlich sind. Diese Strahlung besteht aus Kernteilchen, die es bis auf das 100-Millionenfache der Energie eines Teilchens im Large Hadron Collider in Genf bringen!

Der Aufbau von IceCube begann im Dezember 2004 und wurde im Dezember 2010 abgeschlossen. Allerdings gewannen die Wissenschaftler schon vor dem Bauabschluss Daten, und zwar mit den Trossen, die bis zu dem jeweiligen Zeitpunkt schon installiert waren.

Das ultimative Ziel von IceCube ist der Nachweis einzelner Quellen von hochenergetischen Neutrinos aus den Weiten des Kosmos. Diese sind nicht zu verwechseln mit jenen Neutrinos, die beim Aufprall

kosmischer Strahlen auf die Erdatmosphäre erzeugt werden. Von diesen »atmosphärischen Neutrinos« hat IceCube schon mehr als hunderttausend registriert. (Für die niederenergetischen Neutrinos von der Sonne ist IceCube nicht empfindlich.) Interessanter für den Detektor sind extraterrestrische Neutrinos, die uns von weit entfernten Objekten erreichen, wie zum Beispiel den abgesprengten Hüllen explodierender Sterne oder aus der Umgebung Schwarzer Löcher. Ein Neutrinosignal würde den unumstößlichen Beweis erbringen, dass das entsprechende Objekt zu den Quellen der kosmischen Strahlung gehört.

IceCube und sein Vorläuferprojekt AMANDA haben in den letzten zwölf Jahren die Empfindlichkeit für hochenergetische Neutrinos um einen bemerkenswerten Faktor 1000 verbessert. Trotzdem konnten die Wissenschaftler noch keine einzige individuelle Neutrinoquelle dingfest machen. Neutrinos von solchen »Punktquellen« würden als eine Anhäufung von Neutrinoereignissen aus einer



Die wahrscheinlichsten Herkunftsorte der mit dem Detektor IceCube registrierten 28 hochenergetischen Neutrinos sind in dieser Himmelskarte im äquatorialen Koordinatensystem eingetragen. Eine Identifizierung bestimmter Quellen gelingt noch nicht.

bestimmten Himmelsrichtung erscheinen. Stattdessen haben die IceCube-Forscher allmählich immer überzeugendere Hinweise angehäuft, dass es einen winzigen Überschuss von Ereignissen bei den allerhöchsten Energien gibt, einen Überschuss, der nicht in einer bestimmten Richtung liegt, sondern halbwegs gleichmäßig über den Himmel verteilt ist.

Hochenergie-Ereignisse jenseits der Erwartungen für atmosphärische Neutrinos wurden schon in den Daten gefunden, die mit den Teilinstallationen aus 40 beziehungsweise 59 Trossen genommen worden waren. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich dabei um statistische Ausreißer handelt, betrug jedoch immerhin noch einige Prozent. Anne Schukraft, Doktorandin an der RWTH Aachen, legte als erste eine Analyse vor, in der sich ein Überschuss andeutete. Der nächste war Eike Middell vom DESY in Zeuthen, der zusammen mit seiner Mitdotorandin Stefanie Hickfort aus Neuseeland einen noch etwas stärkeren Effekt aus den Daten herauspräparierte.

Der erste klare Schritt wurde jedoch mit einer Analyse der Daten gemacht, die in den Jahren 2010 und 2011 mit 79 und 86 Trossen genommen wurden. Diese in den »Physical Review Letters« veröffentlichte Analyse konzentrierte sich auf Energien größer als ungefähr 500 Teraelektronvolt und förderte zwei Ereignisse mit Petaelektronvolt-Energien zutage ($1 \text{ PeV} = 10^3 \text{ TeV} = 10^{15} \text{ eV}$): »Ernie« und »Bert«. Diese beiden Neutrinoereignisse liegen 2,8 Standardab-

weichungen ($2,8 \sigma$) über der Erwartung für atmosphärische Neutrinos; damit beträgt die Wahrscheinlichkeit für ein zufälliges Ereignis nur etwa ein Prozent. Das war noch immer nicht als »richtige« Entdeckung zu werten, sorgte aber für einen erhöhten Adrenalinspiegel bei den Wissenschaftlern der IceCube-Kollaboration.

Motiviert durch das Auffinden von Ernie und Bert, führten Kollegen in Madison (USA) eine Analyse derselben Daten durch, diesmal allerdings unter Einschluss niedrigerer Energien bis hinab zu einigen zehn TeV. Resultate dieser Analyse wurden am 14. Mai 2013 auf einer Konferenz in Madison vorgestellt und am 22. November in der Zeitschrift »Science« publiziert. Die Analyse liefert 28 Ereignisse mit Energien zwischen etwa 30 TeV und 1,14 PeV. Ernie und Bert halten stoisch ihre Energie-Spitzenposition. Aber auch die Ereignisse bei etwas niedrigeren Energien (30 TeV bis 250 TeV) können schwerlich durch atmosphärische Neutrinos erklärt werden, oder etwa durch andere Teilchen, die sich unbemerkt von oben in den Detektor stehlen und Neutrinoereignisse vortäuschen. Der Anteil solcher »trivialen« Beiträge zu den 28 Ereignissen wird auf nur 11 abgeschätzt.

Mit einer statistischen Signifikanz von 4,1 Standardabweichungen ($4,1 \sigma$) liegt der Überschuss, der in der Science-Veröffentlichung vorgestellt wird, noch etwas unter der für viele Forscher magischen Marke von 5σ (was einer Zufallswahrscheinlichkeit von 0,00005 Prozent entspräche). Zu-

dem kann man nicht ausschließen, dass der Beitrag vom Zerfall von sogenannten Charmteilchen aus Teilchenreaktionen in der Atmosphäre etwas höher ist, als die Theorie behauptet. Dann blieben weniger als 28 minus 11 Ereignisse für einen extraterrestrischen Anteil übrig, das heißt, man hätte diesen Anteil gegenwärtig etwas überschätzt.

Zum Glück aber hat die IceCube-Kollaboration schon neue Daten ausgewertet, die noch nicht in die Science-Publikation eingeflossen sind. So haben Ernie und Bert inzwischen einen dritten super-energetischen Gefährten bekommen, dem der Name »BigBird« gegeben wurde. Der Zuwachs an Daten geht Hand in Hand mit einem immer besseren Verständnis des Detektors. Darum zweifeln die IceCube-Physiker nicht daran, bald den »Fall der 5-Sigma-Mauer« verkünden zu können.

Alles in allem: IceCube ist gerade dabei, ein neues Beobachtungsfenster zum Kosmos zu öffnen – 40 Jahre, nachdem der erste riesige Neutrinoedetektor eingehend diskutiert wurde. Während vor einigen Monaten noch niemand ernsthaft daran dachte, die Korken knallen zu lassen, holen die IceCube-Forscher inzwischen schon einmal den Sekt aus dem Kühlschrank – zumal die Zeitschrift »Physics World« ihre Entdeckungen mit dem Titel »Durchbruch des Jahres 2013« auszeichnete!

CHRISTIAN SPIERING leitete bis zu seiner Emeritierung 2013 die Neutrino-Astrophysik-Gruppe bei DESY in Zeuthen. Von 2005 bis 2007 war er wissenschaftlicher Koordinator der IceCube-Kollaboration.

Literaturhinweise

Aartsen, M. G. et al: First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube. In: Physical Review Letters 111, 021103, 2013

IceCube Collaboration: Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector. In: Science 342, 1242856, 2013

Spiering, C.: Towards High-Energy Neutrino Astronomy. A Historical Review. In: European Physics Journal H, S. 515–565, 2012

Video »Ernie's Ice Cube Collection« (englisch): <http://goo.gl/CRR1uo>

