

■ Durchbruch im Eis

Der Detektor IceCube weist kosmische Neutrinos nach und stößt die Tür zur Neutrinoastronomie auf.

Prof. Dr. Uli Katz,
Universität Erlangen-
Nürnberg, Erlangen
Centre for Astropar-
ticle Physics (ECAP),
Erwin-Rommel-Str. 1,
91058 Erlangen

Mehr als ein halbes Jahr-
hundert nach dem ersten
Vorschlag, Neutrino-
teleskope zum Nachweis
hochenergetischer kos-
mischer Neutrinos zu bauen [1],
ist mit dem IceCube-Detektor [2]
am Südpol nun ein Durchbruch
gelungen. Kürzlich veröffentlichte
die IceCube-Kollaboration die Be-
obachtung von 28 Neutrino-Ereig-
nissen mit rekonstruierten Energien
von mehr als 30 TeV, wobei nur ein
Untergrund von $10,6^{+3,9}_{-3,6}$ Ereignissen
zu erwarten war [3]. Auch wenn die
Signifikanz „nur“ $4,1 \sigma$ beträgt und
somit die Grenze von 5σ , ab der üb-
licherweise von einer Entdeckung
gesprochen wird, nicht ganz er-
reicht, bestehen kaum Zweifel, dass
dieser Überschuss das erste jemals
beobachtete Signal hochenerge-
tischer kosmischer Neutrinos ist.

IceCube ist der größte Teilchen-
detektor weltweit, der sich zudem
an einem der unwirtlichsten Orte
befindet: dem Südpol. Der Grund
dafür: Dort bietet das tiefe, klare
Eis – wie das Vorgängerexperiment
AMANDA gezeigt hat – hervorra-
gende Bedingungen, um geladene
Sekundärteilchen nachzuweisen,
die bei Reaktionen von Neutrinos
entstehen. Im Zeitraum von 2004
bis 2010 wurden mit heißem Wasser
86 Löcher ins Eis „gebohrt“ und
in jedes Loch ein Strang mit 60
optischen Modulen herabgelassen.

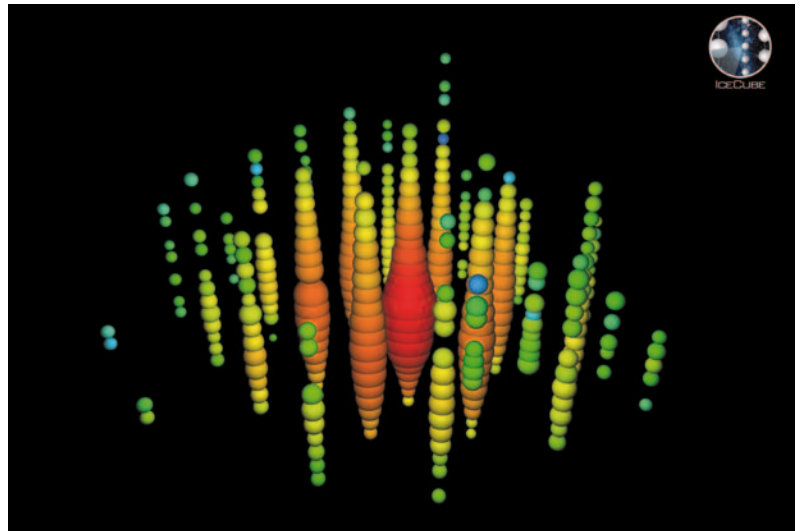


Abb. 1: Die Energie dieses IceCube-Ereignisses („Ernie“) beträgt etwa 1000 TeV (1 PeV). Die farbigen „Kugeln“ zeigen die Photomultiplier-Signale. Ihr

Durchmesser gibt die Signalstärke, ihre Farbe die Zeit an (von rot nach blau). Das Ereignis hat einen Durchmesser von etwa 600 m.

Nach wenigen Tagen waren die
Löcher wieder zugefroren, sodass
heute in einer Tiefe zwischen 1450
und 2450 Meter ein Kubikkilometer
Eis mit über 5000 Modulen instru-
mentiert ist. Diese sind mit Photo-
multipliern ausgestattet, die das
Cherenkov-Licht registrieren, das
die geladenen Sekundärteilchen auf
dem Weg durchs Eis emittieren. Die
auf Nanosekunden genau bestimm-
ten Ankunftszeiten erlauben es
gemeinsam mit den Positionen der
optischen Module, Richtung und
Energie der Sekundärteilchen und
damit der einlaufenden Neutrinos

zu rekonstruieren. Dabei gilt es zu
unterscheiden zwischen Neutrino-
Reaktionen, bei denen ein großer
Anteil der Neutrinoenergie auf ein
Myon übertragen wird und dies-
es dann auf einer bis zu mehrere
Kilometer langen Trajektorie Licht
abstrahlt („Spur“), und anderen Er-
eignissen, die einen typischerweise
fünf bis zwanzig Meter langen
Teilchenschauer erzeugen („Kaska-
de“). Insbesondere Reaktionen von
Myon-Neutrinos mit Nukleonen
($\nu_\mu N \rightarrow \mu N$) verursachen Spur-
Ereignisse. Kaskaden-Ereignisse
entstehen bei Reaktionen der Art
 $\nu_e N \rightarrow e X$ und $\nu N \rightarrow \nu X$ (alle Neu-
trinosorten) sowie für $\nu_\tau N \rightarrow \tau X$,
wenn das τ nicht in ein Myon zer-
fällt; dabei lösen der hadronische
Endzustand X und gegebenenfalls
das Elektron bzw. das Tau den Teilchen-
schauer aus.

Für die Suche nach Quellen
kosmischer Neutrinos spielen die
Spur-Ereignisse eine besondere Rol-
le, da sie die beste Richtungsrekon-
struktion erlauben. Das erste klare
Anzeichen kosmischer Neutrinos
tauchte jedoch bei der Suche nach
Kaskaden mit höchster Energie auf:
Zwei Ereignisse mit Energien von
etwa $1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$ [4] (genannt Er-
nie und Bert, Abb. 1) wollten nicht so
recht zum erwarteten Untergrund

1) vgl. die Laudatio auf
S. 52 in diesem Heft.

2) www.km3net.org

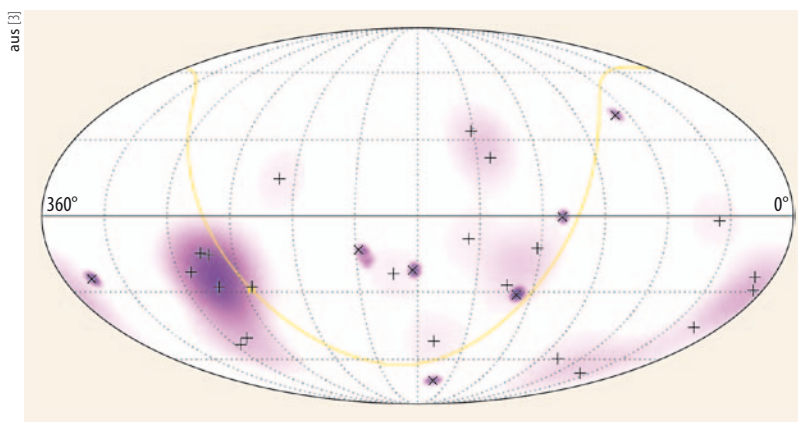


Abb. 2 IceCube hat 28 Ereignisse nach-
gewiesen (x: Spur, +: Kaskade), die über
den Himmel verteilt sind. In dieser Karte
in äquatorialen Koordinaten zeigen die
gelbe Linie und das gelbe Quadrat die
Positionen der galaktische Ebene bzw.

des galaktischen Zentrums. Je kräftiger
die Farbe an einem Himmelspunkt ist,
desto stärker weicht die gemessene
Ereignisverteilung dort von der Erwartung
für einen isotropen Neutrinofluss ab.

von atmosphärischen Neutrinos und Myonen passen – also solchen, die in der Atmosphäre durch Reaktionen von Teilchen der kosmischen Strahlung entstehen. Bereits zuvor waren Ereignisüberschüsse in mehreren Analysekanälen aufgetreten, die jeweils für sich nicht sehr signifikant, aber zusammengenommen doch ein klares Indiz für eine Entdeckung waren. Den Durchbruch brachte schließlich eine Analyse, welche die äußeren Detektorlagen als Veto gegen Ereignisse nutzte, bei denen ein geladenes Teilchen von außen in den Detektor eindringt. Damit wird der Untergrund atmosphärischer Myonen so weit unterdrückt, dass sich auch Neutrinos selektieren lassen, die aus der oberen Hemisphäre kommen. Auch von oben kommende atmosphärische Neutrinos werden stark unterdrückt, da sie in den allermeisten Fällen von Myonen begleitet werden. Diese Analyse deckt somit den vollen Raumwinkel ab und ist zudem auf Spur- und Kaskaden-Ereignisse etwa gleich sensitiv.

Die 28 gefundenen Ereignisse (darunter Ernie und Bert) beinhalten 7 Spur- und 21 Kaskaden-Reaktionen. Dies allein ist ein starker Hinweis auf ihre kosmische Herkunft, da für atmosphärischen Untergrund ein viel stärkerer Spuranteil erwartet würde: In der Atmosphäre entstehen überwiegend Myon-Neutrinos, während aus dem Kosmos aufgrund von Neutrinooszillationen gleich viele ν_e , ν_μ und ν_τ ankommen sollten. Die Verteilung der rekonstruierten Energien ist gut verträglich mit einer zum erwarteten Untergrund zusätzlichen kosmischen Komponente, deren Fluss proportional zu E_ν^{-2} ist. Dieser kosmische Fluss scheint bei einigen PeV aufzuhören, da sonst noch mehr hochenergetische Neutrinos beobachtet worden wären. Die vielleicht spannendste Frage lautet aber: Wo kommen diese Neutrinos her? In der Himmelskarte der rekonstruierten Herkunftsrichtungen fällt eine Anhäufung von Ereignissen in der Nähe des galaktischen Zentrums auf, die allerdings statistisch nicht signifikant ist (Abb. 2). Dies macht deutlich, dass

die Erforschung hochenergetischer kosmischer Neutrinos nun erst beginnt – mehr Daten sind notwendig, um aus diesen Neutrinos solide astrophysikalische Aussagen abzuleiten.

Mit diesem großartigen Ergebnis von IceCube ist ein Wendepunkt der Neutrinoastronomie erreicht: Zum ersten Mal sehen wir bestätigt, dass unsere Instrumente ausreichend empfindlich sind, um den Jahrzehnte alten Traum der „Beobachtung des Universums im Licht der Neutrinos“ wahr werden zu lassen. Daran haben auch deutsche Forscher großen Anteil: Die IceCube-Gruppen aus DESY-Zeuthen und neun Universitäten haben maßgeblich zu Aufbau, Betrieb, Methodenentwicklung und Datenanalyse beigetragen. Sie waren intensiv an den Studien beteiligt, die schlussendlich das Signal zu Tage förderten. Stellvertretend sei hier Anne Schukraft (RWTH Aachen, jetzt Fermilab) genannt, die für ihre wegweisenden Untersuchungen den Hertha-Sponer-Preis 2014 erhält.¹⁾

Wie geht es weiter? Natürlich warten wir alle gespannt auf weitere IceCube-Daten. Darüber hinaus wird aber auch intensiv an der Verbesserung der instrumentellen Möglichkeiten gearbeitet. Neben einer möglichen IceCube-Erweiterung ist hier insbesondere das KM3NeT-Projekt²⁾ eines mehrere Kubikkilometer großen Detektors im Mittelmeer zu nennen, das auf den Erfahrungen mit dem Neutrinooteleskop ANTARES aufbaut und in vieler Hinsicht komplexer ist zu IceCube. Für 2015/16 steht eine erste Konstruktionsphase an, als nächster Ausbauschnitt soll ein IceCube-großes Teleskop verwirklicht werden. Die nächsten Durchbrüche der Neutrinoastronomie sind damit in Reichweite!

Uli Katz

- [1] siehe U. F. Katz und Ch. Spiering, Prog. Part. Nucl. Phys. **67**, 651 (2012) und Referenzen darin
- [2] A. Achternberg et al. (IceCube Coll.), Astropart. Phys. **26**, 155 (2006)
- [3] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), Science **342**, 1242856 (2013)
- [4] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013)