

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

NEUTRINOS

Auf der Suche nach neuer Physik

Antimaterie

Der feine Unterschied
wird greifbar

Eisdetektor

Neutrinojagd am
Ende der Welt

KATRIN

Leicht, leichter,
Neutrino



Robert Gast
E-Mail: r.gast@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,

seit Jahrzehnten suchen Physiker nach neuen Naturgesetzen für den Mikrokosmos. Zwar haben die Forscher in der Vergangenheit das Standardmodell der Teilchenphysik erarbeitet, das alle bekannten Interaktionen zwischen Elementarteilchen beschreibt. Aber vermutlich ist dieses Regelwerk bloß ein Fragment einer noch umfassenderen Theorie. Leider sind an großen Teilchenbeschleunigern wie dem »Large Hadron Collider« unter Genf bisher keine Hinweise auf die Gesetze dieses übergeordneten Weltmodells aufgetaucht.

Daher richten Physiker ihren Blick nun verstärkt auf eine eher unscheinbare Teilchenfamilie: Neutrinos sind allgegenwärtig in der Natur, hinterlassen aber fast keine Spuren. Entsprechend ambitioniert ist es, ihre genauen Eigenschaften zu erforschen. Doch der Aufwand könnte sich lohnen. Längst nicht alle Eigenarten der Neutrinos werden von den Gleichungen des Standardmodells erfasst. Und so könnte ein genaueres Verständnis der geisterhaften Teilchen maßgeblich dazu beitragen, einen Nachfolger des etablierten Regelwerks zu finden.

Eine spannende Lektüre wünscht

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 27.08.2018

Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
REDAKTIONSLEITER: Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL: Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschtik
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.), Michaela Knappe (Digital)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an service@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2018 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE
04

EISDETEKTOR
Neutrinojagd am Ende der Welt



SVEN LINDSTROM, ICECUBE/NSF

SEITE
17

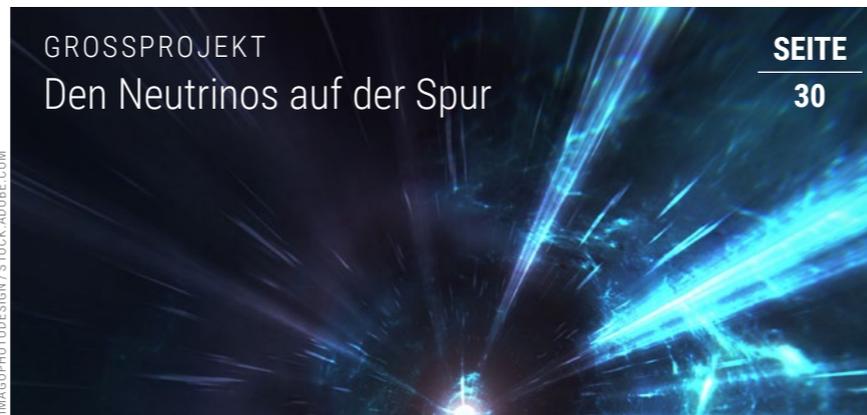
ICECUBE170922A
Das Neutrino, das dem
Schwarzen Loch entkam



ALEXANDR MITIUC / STOCK.ADOBE.COM

GROSSPROJEKT
Den Neutrinos auf der Spur

SEITE
30



IMAGOPHOTODESIGN / STOCK.ADOBE.COM

KATRIN
Leicht, leichter, Neutrino

SEITE
42



1973-2018 CERN / GARGAMELLE: FIRST NEUTRAL CURRENT / CC BY 4.0 (CC BY)

- 04 EISDETEKTOR
Neutrinojagd am Ende der Welt
- 17 ICECUBE170922
Das Neutrino, das dem Schwarzen
Loch entkam
- 24 TEST DER RELATIVITÄTSTHEORIE
Neutrinos vs. Einstein
- 27 KOSMISCHE BOTSCHAFTER
Erde vernichtet Geisterteilchen
- 30 GROSSPROJEKT
Den Neutrinos auf der Spur
- 39 PROTODUNE
Blick in eine Neutrino-Falle
- 40 HIMMELSDURCHMUSTERUNGEN
Wie wiegt man Neutrinos?
- 42 KATRIN
Leicht, leichter, Neutrino
- 51 KOSMOLOGISCHES RÄTSEL
Sind Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen?
- 55 ANTIMATERIE
Der feine Unterschied wird greifbar
- 60 MESSGERÄTE
Kleinsten Neutrinodetektor der Welt
- 62 ASTROTEILCHENPHYSIK
»Immer neugierig bleiben«

EISDETEKTOR

Neutrinojagd am Ende der Welt

von Francis Halzen

Mit dem IceCube-Experiment am Südpol haben Forscher Dutzende jener flüchtigen Elementarteilchen eingefangen, die das halbe Universum durchqueren. Die Boten aus den Tiefen des Alls können dazu beitragen, kosmische Rätsel zu entschlüsseln.

Seit 2010 steht am Südpol eines der ambitioniertesten Experimente der Physik: Tief eingelassen in das antarktische Eis, fängt dort der Teilchendetektor IceCube flüchtige, hochenergetische Neutrinos aus dem Weltall ein. Auf diese Weise wollen wir ferne kosmische Phänomene untersuchen – insbesondere jene rätselhaften, energiereichen Vorgänge, die vermutlich die so genannte kosmische Strahlung erzeugen.

Neutrinos hinterlassen nur sehr selten Spuren im IceCube-Detektor. Ihre Masse ist verschwindend gering, und sie besitzen keine elektrische Ladung. Deshalb treten sie kaum mit Materie in Wechselwirkung und bewegen sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit. Die meisten Neutrinos aus dem All sausen geradewegs durch unseren Planeten hindurch. So waren mein Team und ich auch nicht überrascht, dass die Detektoren während der ersten Jahre der Messungen nichts Ungewöhnliches aufzeichneten. Das änderte sich jedoch 2012.

Francis Halzen ist Teilchenphysiker, Astrophysiker und Kosmologe an der University of Wisconsin-Madison. Er ist wissenschaftlicher Leiter (principal investigator) des IceCube-Experiments.

Eines Tages leuchtete plötzlich während einer Teambesprechung unser Bildschirm auf und zeigte in den Daten Signaturen, wie wir sie nie zuvor gesehen hatten: Sie deuteten auf zwei Neutrinos hin, und zwar mit mehr als der 1000-fachen Energie des energiereichsten Neutrinos, das jemals in einem irdischen Beschleuniger produziert worden war. Im Vergleich zu jenen Neutrinos, die uns stetig von der Sonne erreichen, waren sie sogar fast um das Milliardenfache energiereicher.

Die beiden Neutrinos mussten in einem turbulenten kosmischen Prozess weit draußen im Universum entstanden sein. Als wir begriffen, dass wir da gerade ein bahnbrechendes Ereignis beobachteten, breitete sich allgemeine Euphorie im Raum aus. Aus der Laune des Augenblicks heraus taufte einer unserer Doktoranden die beiden Teilchen »Ernie« und »Bert«, nach den bekannten Figuren der Sesamstraße. Das war viel einfacher zu merken als die langen Zahlenreihen, die wir gewöhnlich jedem Neutrino-Ereignis zuordnen.

Doch bis wir uns sicher waren, dass »Ernie« und »Bert« tatsächlich das waren, wofür wir sie hielten, sollte ein Jahr vergehen. Denn wir mussten erst eine völlig neue Da-

AUF EINEN BLICK

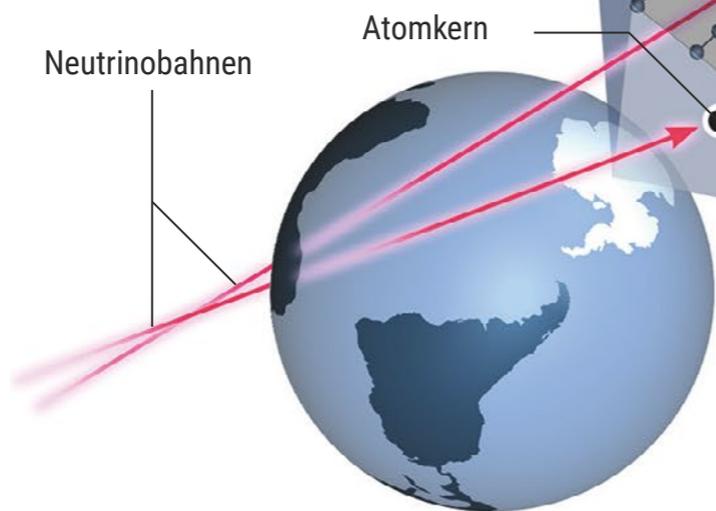
Zeugnis kosmischer Extreme

- 1 IceCube ist ein Teilchendetektor für Neutrinos, eingelassen in das antarktische Eis. Die Elementarteilchen durchqueren Materie gewöhnlich völlig unbeeindruckt. Doch gelegentlich treffen sie im Eis auf einen Atomkern und erzeugen so ein Signal.
- 2 Das Projekt hat mehrere Dutzend Neutrinos aufgespürt, deren Energien alle bisherigen Messergebnisse übertrafen. Viele davon stammen vermutlich von extremen kosmischen Ereignissen im fernen Universum.
- 3 Die kosmischen Neutrinos könnten bei der Untersuchung dieser mysteriösen Phänomene helfen – und damit zugleich auch eine Erklärung für die Herkunft der kosmischen Strahlung liefern, der die Erde ausgesetzt ist.

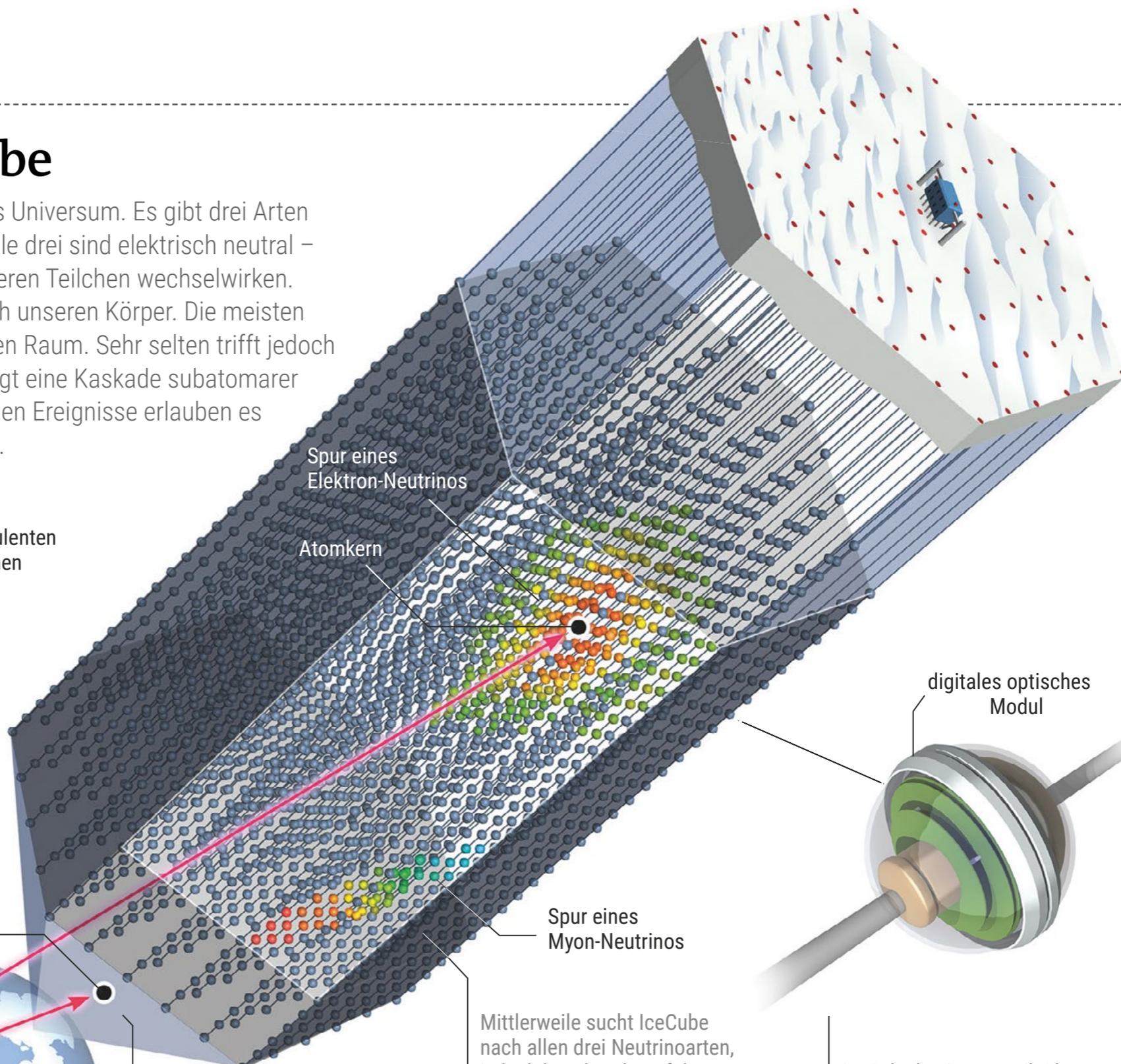
Im Inneren von IceCube

Neutrinos huschen beinahe unbehelligt durch das Universum. Es gibt drei Arten von ihnen: Myon-, Tau- und Elektron-Neutrinos. Alle drei sind elektrisch neutral – und so leicht und schnell, dass sie kaum mit anderen Teilchen wechselwirken. In jeder Sekunde sausen Billionen von ihnen durch unseren Körper. Die meisten durchqueren die Erde, als handle es sich um leeren Raum. Sehr selten trifft jedoch ein einzelnes Neutrino auf einen Atomkern, erzeugt eine Kaskade subatomarer Teilchen und einen kurzen Lichtblitz. Diese seltenen Ereignisse erlauben es Forschern, die flüchtigen Partikel zu untersuchen.

IceCube sucht nach Neutrinos von turbulenten astrophysikalischen Ereignissen im fernen Universum. Viele der von IceCube entdeckten Neutrinos haben zunächst die Erde durchquert und sind erst dann im Eis auf einen Atomkern gestoßen. Die dabei entstehenden Sekundärteilchen, etwa Myonen, erzeugen Lichtblitze, die die Sensoren registrieren.

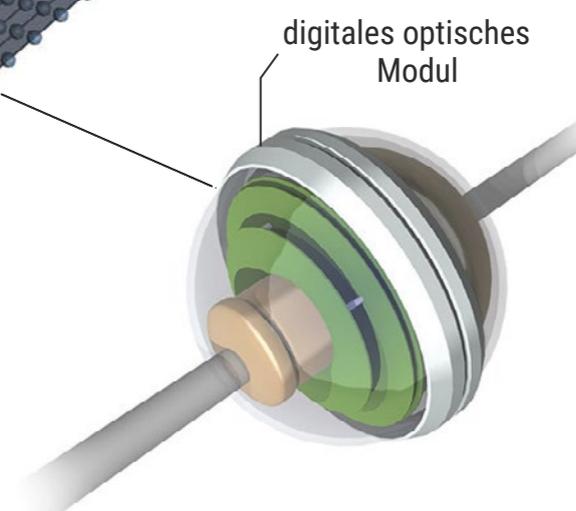


Zunächst spezialisierte sich IceCube auf Myon-Neutrinos, die außerhalb des Detektors mit Atomkernen im Eis reagierten. Die bei Kollisionen erzeugten Myonen hinterlassen kilometerlange Leuchtspuren, welche die Ausmaße des Detektors übersteigen.

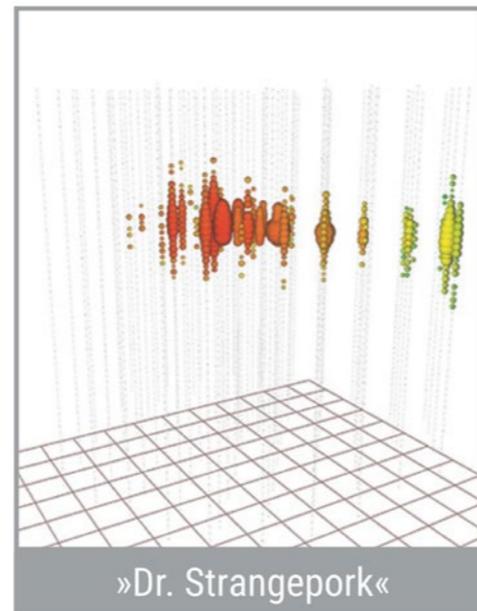
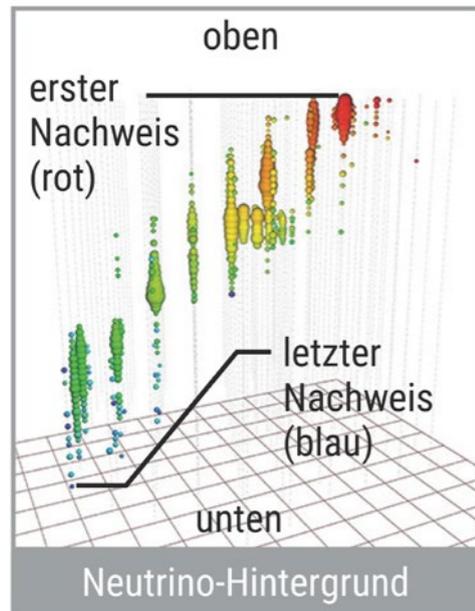


Mittlerweile sucht IceCube nach allen drei Neutrinoarten, jedoch beschränkt auf den inneren Kernbereich der Anlage. Dort sind Störeffekte durch andere kosmische Strahlungsquellen minimal. Neben den Spuren eines Myon-Neutrinos ist in der Grafik ein Lichtblitz eines Elektron-Neutrinos im Detektorkern zu sehen.

IceCube besitzt, verteilt über sein gesamtes Volumen von einem Kubikkilometer, 5160 digitale optische Module. Diese DOMs enthalten, eingehüllt in eine schützende Glaskugel, mit Gel isolierte Photomultiplier sowie jeweils einen Computer zur Datenerfassung.



Was wir bisher gesehen haben – und wonach wir noch suchen



Bei den meisten der von IceCube registrierten Teilchen handelt es sich um »Hintergrundrauschen« von Prozessen in der irdischen Atmosphäre. Sie besitzen relativ niedrige Energien und erzeugen Schauer von Sekundärteilchen, die den Detektor von oben nach unten mit einer Detektionsrate von 3000 pro Sekunde passieren.

Kosmische Neutrinos kommen von allen Seiten und sind wesentlich energiereicher. Die Lichtblitze von kosmischen Myon-Neutrinos beziehungsweise deren Sekundärteilchen zeigen sich als Streifen (»Dr. Strange«), während die Sekundärteilchen von Tau- und Elektron-Neutrinos eher Lichtblitze hinterlassen (»Bert«, »Ernie« und »Big Bird«).

IceCube sucht immer noch nach Anzeichen von »GZK«-Neutrinos, die durch Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung entstehen. Die Energie eines solchen GZK-Neutrinos könnte noch einmal um das 1000-Fache größer sein als jene der anderen kosmischen Neutrinos.

