

HERTHA-SPONER-PREIS

# Neutrinosuche am Ende der Welt

Die genaue Analyse der Teilchenspuren im IceCube-Detektor erlaubt es, zwischen dem Signal atmosphärischer Neutrinos und dem extraterrestrischer Neutrinos zu unterscheiden.

Anne Schukraft

Mit dem IceCube-Experiment am Südpol gelang es erstmals, extraterrestrische Neutrinos zu beobachten. Nach vielen spannenden Erkenntnissen, welche die Astronomie in immer neuen Beobachtungsfenstern vom Mikrowellenhintergrund bis zur Gammastrahlung geliefert hat, könnte dies der Beginn der Neutrinoastronomie sein. Diese wird möglicherweise ein neues Bild des hochenergetischen Universums zeichnen.

Im Jahr 1912 entdeckte der Physiker Victor Hess eine ionisierende Strahlung, die er damals Höhenstrahlung nannte. Die Beobachtung, dass die Intensität der Strahlung mit der Höhe zunahm, ließ die Schlussfolgerung zu, dass diese kosmischen Ursprungs ist. Heute ist bekannt, dass die Strahlung überwiegend aus Protonen besteht, gemischt mit Atomkernen. Ihr Energiespektrum wurde über viele Größenordnungen gemessen. Der Fluss der kosmischen Strahlung, also die Zahl der Teilchen pro Zeit, Fläche und Raumwinkel, nimmt mit der Energie nach einem Potenzgesetz ab. Im Bereich bis zu TeV-Energien sind die Flüsse vergleichsweise groß (wenige Teilchen pro Tag und Quadratmeter), und die kosmische Strahlung lässt sich mit Ballon- und Satellitenexperimenten nachweisen, wie z. B. dem AMS-Experiment auf der Internationalen Raumstation. Bei höheren Energien beträgt der Fluss nur wenige Teilchen pro Quadratkilometer und Jahrhundert, sodass großflächige, erdgebundene Detektoren nötig sind, um mit akzeptabler Wartezeit Daten zu sammeln. Ein Beispiel dafür ist das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien, dessen Instrumente sich über eine Fläche von etwa 3000 km<sup>2</sup> verteilen.

Unbekannt ist bis heute, wie es möglich ist, diese Teilchen auf solch hohe Energien zu beschleunigen, und welche astrophysikalischen Objekte die Quellen der Strahlung sind. Vermutlich ist der ultrahochenergetische Teil extragalaktischen Ursprungs und wird von Aktiven Galaktischen Kernen, den energiereichsten Objekten im Universum, erzeugt [1]. Sie bestehen aus supermassiven Schwarzen Löchern, die stellare Materie mit hoher Rate aufsaugen und hochenergetische Strahlung, u. a. in hochrelativistischen Plasmajets, emittieren. Im Modell der hadronischen Beschleunigung diffundieren geladene Hadronenkerne durch turbulente Magnetfelder und werden durch den wiederholten Übergang zwischen Medien unterschied-



In der IceCube-Oberflächenstation werden die Signale der einzelnen Sensoren gesammelt, weiterverarbeitet und per Satellit an die IceCube-Institute übertragen.

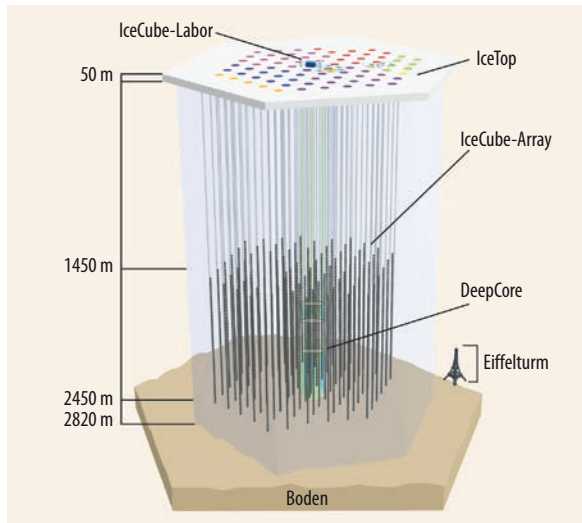
licher Ausbreitungsgeschwindigkeiten beschleunigt. Wechselwirken diese Hadronenkerne mit Materie oder Strahlung in der Umgebung der Quelle, sollten hochenergetische Neutrinos und Gammastrahlung entstehen. Dieses Modell der Beschreibung ist die Grundlage der „Multi-Messenger“-Astroteilchenphysik, die das Ziel hat, gleichzeitig derartige Quellen mit allen Botenteilchen – Hadronen, Photonen, Neutrinos und auch Gravitationswellen – zu untersuchen.

Die Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung gestaltet sich schwierig, da die galaktischen Magnetfelder die geladenen Hadronen ablenken, sodass diese sich schwer zurückverfolgen lassen. Quellen von

## KOMPAKT

- Neutrinos reisen unbeeinflusst durch das Universum und sind daher ideale Botenteilchen für die Astronomie. Allerdings gelingt ihr Nachweis nur über die Beobachtung von Sekundärteilchen.
- Bei der Wechselwirkung der verschiedenen Neutrinosorten mit Nukleonen entstehen kaskaden- bzw. spurartige Signaturen, aus denen sich auf die Richtung und Energie der Neutrinos rückschließen lässt.
- Die Signale kosmischer Neutrinos sind mehrere Größenordnungen kleiner als der Untergrund atmosphärischer Myonen und Neutrinos. Verschiedene Techniken erlauben es aber, den Untergrund zu unterdrücken.

Dr. Anne Schukraft, MicroBoone, Fermilab, PO Box 500, Batavia IL 60510-5011, USA – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Hertha-Sponer-Preises 2014 auf der DPG-Jahrestagung in Berlin



**Abb. 1** Das IceCube-Experiment befindet sich am geographischen Südpol und besteht aus 5000 Sensoren, die 1,5 bis 2,5 Kilometer tief im Eis installiert sind. Die 86 Kabeltrossen mit jeweils 60 solcher Sensoren sind horizontal 125 Meter voneinander entfernt und über eine Fläche von einem Quadratkilometer verteilt.

Gammastrahlung in und außerhalb unserer Galaxie wurden bereits in großer Zahl gefunden – allerdings nur bis zu Energien von 100 TeV. Ein Grund hierfür ist, dass Photonen auf ihrem Weg zur Erde, u. a. aufgrund von Wechselwirkung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung, durch Absorption verloren gehen können. Da Gammastrahlung in astrophysikalischen Objekten auch durch elektromagnetische Prozesse wie Bremsstrahlung und inverse Compton-Streuung entstehen kann, bestätigt die Beobachtung von Gammaquellen allein noch nicht das Modell hadronischer Beschleunigung. Neutrinos sind sehr leicht, elektrisch neutral und wechselwirken nur schwach mit Materie. Dies macht sie zu idealen Botenteilchen für die Astronomie, da sie unbeeinflusst durch das Universum reisen. Ihre Beobachtung würde den hadronischen Beschleunigungsprozess direkt bestätigen und könnte die Quellen der kosmischen Strahlung preisgeben.

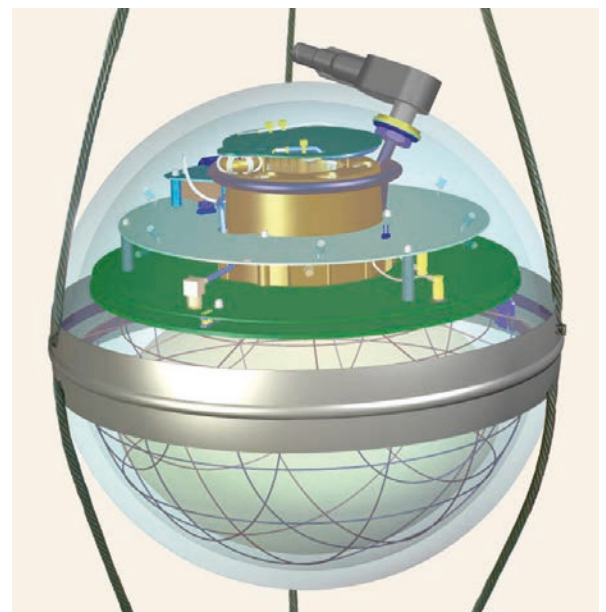
Umgekehrt führt dies dazu, dass Neutrinos für Teilchendetektoren unsichtbar sind. Ihre Beobachtung gelingt durch den Nachweis von Sekundärteilchen, die in der seltenen Wechselwirkung von Neutrinos mit Materie entstehen. Diese Teilchen erzeugen in einem transparenten, dielektrischen Medium eine Lichtspur (Cherenkov-Licht), die sich mit optischen Sensoren nachweisen lässt. Der IceCube-Detektor besteht aus mehr als 5000 solcher Sensoren (Photomultiplier) (**Abb. 1**) [2]. Das Eis hat besonders gute optische Eigenschaften für die Ausbreitung der Cherenkov-Photonen. Die Sensoren sind so sensitiv, dass sie einzelne Photonen detektieren können. Sie befinden sich in Druckgehäusen mit Elektronik zur sofortigen Digitalisierung der Photomultiplier-Signale, die über lange Kabel zur Oberfläche gelangen (**Abb. 2**). Satelliten übermitteln schließlich die gesammelten Signale aller Sensoren an die Forschungsinstitute zur Auswertung. Am Bau und Betrieb von IceCube sowie der Datenauswertung betei-

ligen sich etwa 300 Wissenschaftler und Studenten aus 45 Forschungseinrichtungen in 12 Ländern. Die Fertigstellung des Detektors dauerte sieben Jahre, da sich die Sensoren aufgrund der schwierigen klimatischen Bedingungen nur während der antarktischen Sommermonate installieren ließen. Der Detektor wird über eine Satellitenverbindung aus dem Norden und durch zwei Wissenschaftler vor Ort das ganze Jahr rund um die Uhr betrieben.

## Spuren und Kaskaden

IceCube detektiert zwei verschiedene Klassen von Neutrinoereignissen, die sich durch die Signatur im Detektor unterscheiden. In der Wechselwirkung eines Myonenneutrinos mit einem Nukleon entsteht beim Austausch eines W-Bosons (geladener Strom) ein Myon ( $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$  und  $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + X$ ). Myonen haben eine Reichweite von mehreren Kilometern in Eis und erzeugen Cherenkov-Photonen, die sich um die Myonspur im Eis ausbreiten (**Abb. 3**). Meistens findet die ursprüngliche Wechselwirkung des Neutrinos (hadronische Kaskade) außerhalb des Detektors statt und die Myonen laufen in das Detektorvolumen hinein. Der Detektor ist dadurch effektiv um ein Vielfaches größer als das instrumentierte Volumen.

Bei der Wechselwirkung eines Elektronenneutrinos über den geladenen Strom entsteht entsprechend ein Elektron ( $\nu_e + N \rightarrow e^- + X$  und  $\bar{\nu}_e + N \rightarrow e^+ + X$ ). Dieses wechselwirkt und erzeugt eine etwa zehn Meter lange Teilchenkaskade. Dabei entstehen Photonen, die durch das Eis propagieren und die Sensoren erreichen. Zu beobachten ist aufgrund der geringen Reichweite verglichen mit dem Abstand der Sensoren eine sphärische Signatur. Diese ist eine Überlagerung der hadronischen



**Abb. 2** Die digitalen optischen Module haben etwa die Größe eines Basketballs und bestehen aus einem sphärischen Photomultiplier (untere Hälfte) sowie Elektronik zur Kalibrierung und Digitalisierung der Signale.

Kaskade der Neutrino-Nukleon-Wechselwirkung und der elektromagnetischen Kaskade des stoppenden Elektrons.

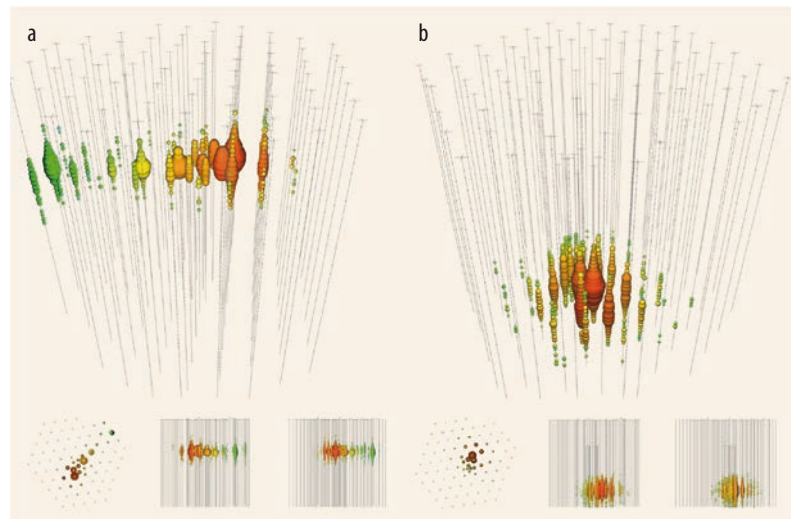
Die Wechselwirkung eines Tauneutrinos über den geladenen Strom ( $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$  und  $\bar{\nu}_\tau + N \rightarrow \tau^+ + X$ ) und die Wechselwirkung aller Neutrinosorten über den neutralen Strom (Z-Boson-Austausch,  $\nu + N \rightarrow \nu + X$  und  $\bar{\nu} + N \rightarrow \bar{\nu} + X$ ) erzeugen ebenfalls diese kaskadenartige Signatur.

Aus der Anzahl und den Ankunftszeiten der detektierten Photonen an den optischen Modulen lässt sich auf die Richtung und Energie des Neutrinos schließen. Die zeitliche Abfolge der Photondetektionen ist dabei die wichtigste Information für die Richtungsrekonstruktion. Für lange, helle Myonspuren (Abb. 3) gelingt dies mit hoher Genauigkeit (0,5 Grad und weniger). Für kaskadenartige Ereignisse ist das schwieriger. Durch Kombination von Amplituden- und Zeitinformation ist es möglich, die Richtung auf besser als 15 Grad zu rekonstruieren. Umgekehrt verhält es sich bei der Energierekonstruktion: Die Energie von kaskadenartigen Ereignissen ist bis auf 10 Prozent zu bestimmen, wenn die komplette Energie des Neutrinos im Detektor deponiert wird. Bei durchgängigen Myonen ist jeweils nur ein Ausschnitt der Spur zu beobachten. In diesem Fall korreliert der beobachtete Energieverlust des Myons mit der Neutrinoenergie.

## Die Nadel im Heuhaufen

Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinoereignissen gleicht der Suche nach der Nadel im Heuhaufen, da die Messraten von Untergründereignissen aus der Atmosphäre dominieren. Dabei handelt es sich um atmosphärische Myonen und Neutrinos, die in Luftschauern durch die Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit den Molekülen der Atmosphäre in den Zerfällen geladener Sekundärmesonen entstehen. Die Rate atmosphärischer Myonen, die den Detektor trotz der großen Tiefe aus Luftschauern oberhalb des Eises erreichen, beträgt etwa 3 kHz und ist damit sechs Größenordnungen höher als die Rate atmosphärischer Neutrinos. Diese ist wiederum mindestens drei Größenordnungen höher als ein mögliches extraterrestrisches Signal.

Verschiedene Techniken erlauben es aber, atmosphärische Myonen zu erkennen und auszusortieren. Bei spurartigen Ereignissen mit sehr guter Richtungsrekonstruktion lässt sich die Tatsache ausnutzen, dass Myonen die Erde nicht durchdringen können und deshalb nur von oben in den Detektor treffen. Durch Beschränkung auf von unten kommende Spuren entsteht ein reiner Datensatz von Neutrinoereignissen. Im nächsten Schritt wird das Energiespektrum des atmosphärischen Neutrinoergrunds untersucht. Extraterrestrische Neutrinos würden sich als Abweichung vom erwarteten Untergrundspektrum bei sehr hohen Energien zeigen. Diese Analysen geben erste Hinweise auf extraterrestrische Neutrinos. Ihre Stärke

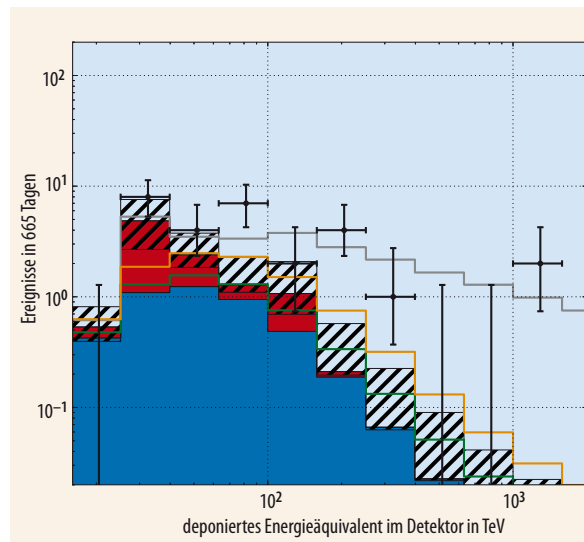


**Abb. 3** IceCube beobachtet spurartige (a) und kaskadenartige (b) Ereignisse [4]. Die unteren Bilder zeigen die Ansicht von oben bzw. von den Seiten. Graue Punkte markieren optische Module ohne Signal. Farbige Module haben Photonen aufgezeichnet, wobei die Farbe die Ankunftszeit der Photonen (von rot nach

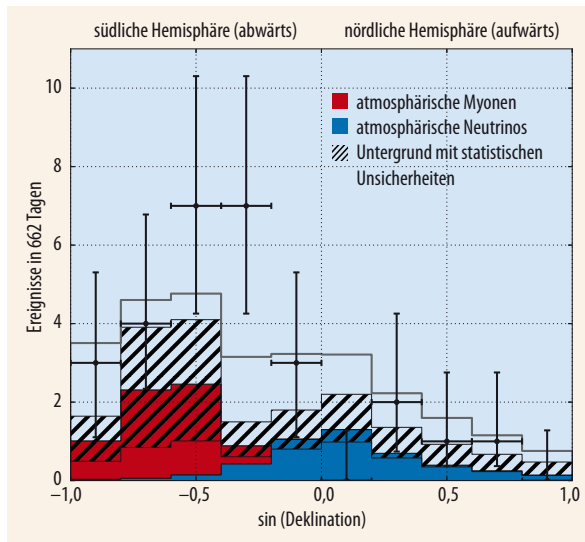
blau) angibt und der Durchmesser mit der Photonanzahl skaliert. Die Richtung des Myons ist anhand der Farbskala erkennbar. Die Richtung der Kaskade lässt sich nur mittels minimaler und in dieser Darstellung nicht sichtbarer Zeitunterschiede in der Photonenverbreitung erkennen.

besteht vor allem in der präzisen Messung des atmosphärischen Untergrunds [3].

Eine andere Möglichkeit, um den Untergrund atmosphärischer Myonen zu reduzieren, ist die eines Vetos aus äußeren Sensoren: Ist die hadronische Kaskade der Neutrino-Nukleon-Wechselwirkung im Inneren des instrumentierten Detektorvolumens zu beobachten, so lässt sich dieses „startende“ Ereignis eindeutig einem Neutrino zuordnen. Atmosphärische Myonen sind daran zu erkennen, dass sie von außen eindringen.



**Abb. 4** Energiespektrum der beobachteten startenden hochenergetischen Ereignisse verglichen mit Untergründerwartungen atmosphärischer Myonen (rot) und Neutrinos (blau): Die grüne Kurve zeigt eine theoretische Vorhersage für atmosphärische Neutrinos. Die gelbe Kurve zeigt die obere Flussgrenze für den atmosphärischen Neutrinoergrund aus der Messung nicht-startender aufwärts laufender Myoneneutrinos [4]. Die Datenpunkte liegen über den Kurven des Untergrunds und deuten auf die Beobachtung kosmischer Neutrinos hin.



**Abb. 5** Auch die Zenitverteilung der startenden Ereignisse verglichen mit der Richtungsverteilung des atmosphärischen Untergrunds deutet auf kosmische Neutrinos. Die Datenpunkte sind nicht allein mit atmosphärischen Signalen zu erklären und weichen insbesondere in der südlichen Hemisphäre deutlich vom Untergrund ab [4].

Diese Technik reduziert deutlich den Untergrund der von oben kommenden atmosphärischen Neutrinos, da diese in der Regel von atmosphärischen Myonen aus dem gleichen Luftschauer begleitet werden, die das Veto aktivieren.

Mit IceCube wurden in zwei Jahren 28 startende Ereignisse mit Energien zwischen 30 TeV und 1,2 PeV beobachtet [4]. Das sind deutlich mehr Ereignisse als die nach Theorie und anderen Messungen erwarteten 10,6 Untergrundereignisse von atmosphärischen Myonen ( $6,0 \pm 3,4$ ) und Neutrinos ( $4,6 + 3,7 - 1,2$ ). Zudem gibt es weitere Indizien dafür, dass sich hier erstmals extraterrestrische Neutrinos gezeigt haben. Im Energiespektrum der gemessenen Ereignisse zusammen mit der erwarteten Energieverteilung des atmosphärischen Untergrunds fällt das Untergrundspektrum schnell mit der Energie ab und kann die Form des beobachteten Energiespektrums nicht beschreiben (Abb. 4).

Auch die Zenitverteilung liefert Hinweise auf ein extraterrestrisches Signal (Abb. 5). Das Veto atmosphärischer Myonen und Neutrinos funktioniert erfolgreich für Luftschauer, die von oben auf den Detektor treffen. Von unten kommende Ereignisse müssen die Erde durchquert haben, was nur Neutrinos schaffen. Die Mehrheit der beobachteten Ereignisse stammt aber aus der südlichen Hemisphäre, wo das Veto atmosphärischer Myonen und Neutrinos sehr effektiv ist. Dies stimmt damit überein, dass sehr hochenergetische Ereignisse, wie die eines extragalaktischen Neutrinosignals, vor allem aus der südlichen Hemisphäre zu erwarten sind, da die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit mit Materie mit der Energie ansteigt und Neutrinos mit PeV-Energien und höher die Erde nicht mehr durchdringen können.

Ein besonderes Indiz ist das Verhältnis kaskadenartiger zu spurartiger Ereignisse: Der atmosphärische Myonuntergrund verursacht nur spurartige Ereig-

nisse. Der atmosphärische Neutrinoertrag aus Luftschauern besteht vor allem aus Myonenneutrinos und führt zu mehr spurartigen als kaskadenartigen Ereignissen (das Verhältnis schwankt abhängig von der Energie zwischen 1 : 0,05 bis maximal etwa 1 : 1). Für Neutrinos aus extraterrestrischen Quellen sind alle Sorten etwa gleich häufig zu erwarten, weil das initiale Verhältnis über die kosmische Wegstrecke durch Neutrinooszillationen fast vollständig vermischt. Da nur Myonenneutrino-Wechselwirkungen über den geladenen Strom spurartige Ereignisse erzeugen, müssten mehr kaskadenartige Ereignisse auftreten (Rate  $\sim 1 : 3$ ). Von den beobachteten 28 Ereignissen haben nur sieben eine spurartige Signatur, was die zuvor diskutierten Hinweise für extraterrestrische Ereignisse weiter stützt. Die Abweichung von der atmosphärischen Untergrundhypothese beträgt 5,7 Standardabweichungen und ist damit signifikant.

Automatisch stellt sich die Frage nach der Herkunft dieser hochenergetischen Ereignisse. Die geringe Statistik von nur 36 startenden Spuren erlaubt bislang noch keine Rückschlüsse auf die Quellen. Erschwerend kommt die schlechte Richtungsrekonstruktion von kaskadenartigen Ereignissen hinzu. Für die Suche nach den Quellen wird man sich nun verstärkt auf die spurartigen Ereignisse mit einer sehr guten Richtungsrekonstruktion konzentrieren. Inzwischen zeigen sich auch in neueren und bisher unveröffentlichten Analysen aufwärtslaufender spurartiger Ereignisse Hinweise auf eine extraterrestrische Komponente. Die IceCube-Daten der kommenden Jahre sollten es erlauben, dem Rätsel nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung näher zu kommen. Auf jeden Fall bereichert das Beobachtungsfenster hochenergetischer Neutrinos unser Bild des Universums [5].

#### Literatur

- [1] F. Halzen und U. Katz, *Advance in High Energy Physics* **2013**, 680584 (2013)
- [2] A. Achterberg et al. (IceCube Coll.), *Astroparticle Physics* **26**, 155 (2006)
- [3] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Phys. Rev. D* **89**, 062007 (2014)
- [4] M. G. Aartsen et al. (IceCube Coll.), *Science* **342**, 1242856 (2013)
- [5] L. A. Anchordoqui et al., *Journal of High Energy Astrophysics* **1**, 1 (2014)

#### DIE AUTORIN

**Anne Schukraft** studierte und promovierte an der RWTH Aachen und beschäftigt sich seit ihrer Diplomarbeit mit der Suche nach extraterrestrischen Neutrinos mit den AMANDA- und IceCube-Neutrino-detektoren. Im Moment arbeitet sie als PostDoc am Fermilab in den USA am Bau des Flüssigargondetektors MicroBooNE zur Untersuchung von Neutrinooszillationen.



T. Kleinod / DPG