

Preisträger des Berichtsjahres 2009

(Die Preisträgervorträge wurden in einer Plenarsitzung am 9. April 2010 vorgetragen)

Der Physik-Preis 2009 wurden Herrn Mark Kowalski, Bonn, für seine wichtigen Arbeiten auf dem Gebiet der Neutrinoemission und -beobachtung aus Supernovae verliehen.

Suche nach astrophysikalischen Neutrinos am Südpol

MAREK KOWALSKI

Zusammenfassung

Mit IceCube entsteht im antarktischen Eis des Südpols der größte Neutrino-detektor der Welt, der, sobald er im Winter 2010/2011 fertiggestellt sein wird, über ein kubikkilometergroßes instrumentiertes Volumen verfügen wird. Das primäre Ziel des IceCube-Neutrinooteleskops ist der erstmalige Nachweis von hochenergetischen, astrophysikalischen Neutrinos. Deren Nachweis würde zum Beispiel einen Einblick in das Innere von Supernovasternexplosionen ermöglichen oder es erlauben, die Quellen der kosmischen Strahlung zu identifizieren. Im Folgenden wird das IceCube-Neutrinooteleskop vorgestellt und werden erste Resultate diskutiert. Weiter wird die Realisierung einer neuartigen Methode beschrieben, die auf der Vernetzung des IceCube-Detektors mit optischen Teleskopen beruht und die Nachweissensitivität von Neutrinos von Supernovae um ein Vielfaches erhöht.



Marek Kowalski, Professor für Teilchenastrophysik an der Universität Bonn, Träger des Physik-Preises 2009

Einleitung

Neutrinos, nahezu masselose neutrale Elementarteilchen, wechselwirken nur über die schwache Kraft. Für die Neutrinoastrophysik ist das Fluch und Segen zugleich – ein Segen, denn Neutrinos können auf Grund der geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit selbst in den dichtesten und heißesten Regionen entweichen, den Kosmos unbeeinträchtigt von kosmischen Magnetfeldern oder absorbierendem Staub durchqueren und so als „Botenteilchen“ z. B. über das Innere von Sternen Auskunft geben. Die Kehrseite, ebenfalls bedingt durch die geringe Wechselwirkungswahrscheinlichkeit, besteht in der Schwierigkeit, Neutrinos nachzuweisen. Motiviert durch die Möglichkeiten der Neutrinoastrophysik, arbeiten Physiker seit den 80er Jahren intensiv daran, die experimentellen Hürden zu meistern.

Da die Rate an Neutrinoereignissen mit der Zahl der atomaren Streuzentren steigt, sind große, massive Detektoren notwendig. Und um die bei der Wechselwirkung entstandenen geladenen Teilchen nachweisen zu können, was z. B. durch die Emission von Cherenkov-Licht möglich ist, muss ein geeignetes Detektormedium gewählt werden. Wasser ist eine Möglichkeit, und die größten Neutrino-detektoren für den Nachweis hochenergetischer Neutrinos werden daher in Seen, Meeren oder im antarktischen

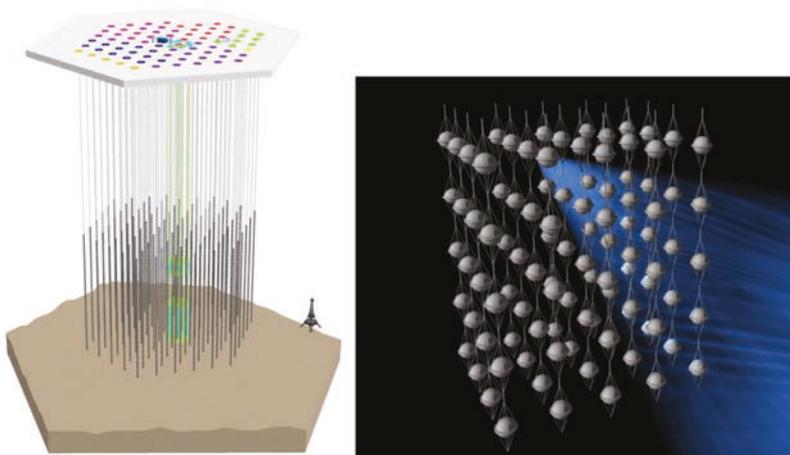


Abbildung 1: Schema des IceCube-Neutrino-Detektors (links) und des Neutrino-Nachweisprinzips (rechts). Die optischen Sensoren sind durch Kugeln repräsentiert, die das bläuliche Cherenkov-Licht registrieren und durch elektrische Kabel die Information an die Oberfläche senden.

Eis installiert. Dabei wird das transparente Medium mit einem dreidimensional angeordneten Gitter von Lichtsensoren instrumentiert (siehe Abbildung 1). Der mit Abstand größte Neutrinodetektor – das IceCube-Neutrino-Observatory – wird im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit von zirka 250 Physikern am geographischen Südpol gebaut. Wenn der Detektor im Winter 2010/2011 fertiggestellt sein wird, wird er über einen kubikkilometergroßen instrumentierten Block Eis verfügen. Damit wird erstmals die Möglichkeit bestehen, realistische Modelle für die Emission von hochenergetischen Neutrinos zu testen.

Der IceCube-Detektor

Für den Aufbau des IceCube-Detektors werden 2.5 km tiefe Löcher in das Eis geschmolzen. Im Anschluss daran werden die Lichtsensoren, die an Kabeltrossen gehängt werden, in das Eis eingelassen. Auf diese Weise wurden in den Jahren 2005–2010 79 Trossen im Eis installiert, und die letzten sieben Trossen folgen im Winter 2010/2011. Jede Trosse trägt 60 Lichtsensoren, mit Digitalisierungselektronik ausgestattete Fotovervielfacherröhren, die in druckresistente Glaskugeln integriert werden.

Ist die Trosse in das Eis eingelassen, so friert sie innerhalb einer Woche im ewigen Eis der Antarktis ein. Auf diese Weise entsteht ein kubikkilometergroßer Block instrumentiertes Eis [1].

Wechselwirkt ein Myonneutrino mit den Nukleonen des Eises, so kann dabei ein Myon erzeugt werden. Bei hochrelativistischen Neutrinos wird das Myon kilometerweit nahezu mit Lichtgeschwindigkeit durch das Eis fliegen, bevor es durch Ionisationsenergieverluste zum Stehen kommt und dann sehr schnell zerfällt. Solange sich das Myon mit relativistischer Geschwindigkeit durch das Eis bewegt, strahlt es Cherenkov-Licht aus, ein bläuliches Licht, das durch die Lichtsensoren aufgezeichnet wird (siehe Bild 1). Die Ankunftszeiten des Cherenkov-Lichts werden genutzt, um die Myonspur zu rekonstruieren. Die Richtung des Myons, und damit auch die des Neutrinos, lässt sich mit zirka 1 Grad Genauigkeit bestimmen.

IceCube zeichnet atmosphärische Myonen mit einer Rate von 2000 Ereignissen pro Sekunde auf. Diese Myonen werden direkt in der Atmosphäre oberhalb des Detektors erzeugt. Die Myonspuren sind daher abwärtslaufend. Mit einer um fünf Größenordnungen kleineren Rate werden aber auch Myonen mit aufwärtslaufender Spur aufgezeichnet. Diese stammen im Wesentlichen von atmosphärischen Neutrinos, die dank der schwachen Wechselwirkung den Erdball ungehindert durchfliegen können und nur

zufällig in der Nähe des Detektors wechselwirken. Die neutrinoinduzierten Myonen lassen sich über ihre aufwärtslaufende Richtung identifizieren. Das Hauptziel von IceCube besteht darin, aus dem großen Untergrund an atmosphärischen Myonen und Neutrinos ein astrophysikalisches Neutrinosignal zu identifizieren.

Die Suche nach astrophysikalischen Neutrinoquellen

Warum ist der Nachweis von Neutrinostrahlung aus dem Kosmos so wichtig? Die Bedeutung eines solchen Nachweises leitet sich aus einer mittlerweile fast hundertjährigen Entdeckung ab, derjenigen der kosmischen Strahlung [2]. Diese Strahlung besteht aus Protonen und schwereren Kernen, die isotrop, also ohne Vorzugsrichtung, auf die Erde einprasseln. Die kosmische Strahlung wurde mit Energien bis über 10^{20} Elektronenvolt nachgewiesen, also mit um sieben Größenordnungen höheren Energien, als am Large Hadron Colliders am CERN, dem größten erdgebundenen Teilchenbeschleuniger, erzeugt werden. Um so bemerkenswerter ist, dass der Ursprung der kosmischen Strahlung bis heute nicht geklärt ist. Neutrinos können dazu beitragen, dieses Rätsel zu lösen. Der Grund hierfür ist der, dass die Quellen der kosmischen Strahlung aufgrund elementarer Streuprozesse im Inneren auch Neutrinos produzieren sollten. Diese verbreiten sich dann, anders als die kosmische Strahlung selbst, geradlinig durch den Kosmos. Mit dem Nachweis von kosmischen Neutrinos hätte man gleichzeitig die Quellen der kosmischen Strahlung identifiziert.

Mögliche Kandidaten sind Aktive Galaktische Kerne (AGNs), Galaxien mit einem massiven schwarzen Loch im Zentrum, die durch den gravitativen Einfall von Materie gewaltige Energien freisetzen können. Wären diese hinreichend starke Neutrinoquellen, so würden sie über dem isotropen Untergrund von atmosphärischen Neutrinos als Neutrinoquellen identifiziert werden. Untersuchungen der vom IceCube-Teildetektor aufgezeichneten Neutrinhimmelskarte des Jahres 2008 haben allerdings kein Anzeichen für einen Neutrinoüberschuss aus einer Richtung erbracht [1].

Eine weitere mögliche Quelle der kosmischen Strahlung sind Gamma-Ray Bursts (GRBs), Lichtblitze aus harter Röntgenstrahlung, die mit Supernovae, dem explosiven Ende von Sternen, in Verbindung gebracht werden. Um Neutrinos von GRBs zu identifizieren, wird nach Koinzidenzen in den Himmelskoordinaten und nach Ankunftszeiten gesucht. Die Daten des IceCube-Teildetektors des Jahres 2008 sowie die der Jahre davor haben leider keine solche Koinzidenz ergeben [1]. Aus der Nichtbeobachtung von

GRB-Neutrinos können bereits wichtige Einschränkungen der Modelle gemacht werden. Supernovae können nach gängigen Modellen ebenfalls energetische Neutrinostrahlung emittieren [3]. Der Nachweis solcher Neutrinos würde die Bildung von relativistischen Jets im Inneren von explodierenden Sternen implizieren.

Durch die Fertigstellung des IceCube-Detektors wird sich die Sensitivität des Detektors signifikant erhöhen. Durch Anwendungen neuer Suchmethoden kann zusätzliche Sensitivität gewonnen werden, so dass der Nachweis von astrophysikalischen Neutrinos damit hoffentlich in greifbare Nähe rückt. Dies wird im Folgenden näher beschrieben.

Eine neue Methode zur Identifizierung transienter Neutrinoquellen

Die übliche Suche nach Neutrinos von GRBs und Supernovae beruht auf dem Abgleich der Neutrinodaten mit optischen oder mit Röntgendaten, mit dem Ziel, Koinzidenzen zwischen dem Neutrino- und dem elektromagnetischen Signal zu finden. Leider ist aber die Beobachtung des Himmels in den verschiedenen Wellenlängenbändern sehr unvollständig. Die meisten GRBs und Supernovae im Universum finden unbeobachtet statt und können daher auch nicht für die „Neutrinojagd“ genutzt werden. Das Problem kann umgangen werden, indem die nachgewiesenen Neutrinos selbst möglichst schnell sogenannte Nachbeobachtungen auslösen [4]. Die so gewonnenen optischen- oder Röntgendaten können dann auf ein mögliches GRB oder Supernovasingnal hin untersucht werden. Gelingt ein solcher Nachweis, so kann die astrophysikalische Quelle rückwirkend den beobachteten Neutrinos zugeordnet werden.

Um diese Suche verwirklichen zu können, musste einiges neu entwickelt werden. Die Neutrinoanalysen finden allgemein im Norden statt, einige Monate, nachdem die Daten gewonnen worden sind, und damit zu spät für mögliche Nachbeobachtungen. Der erste Schritt bestand daher darin, die Analyse an den Südpol zu verlegen und „online“ durchzuführen. Gesucht wird nach „Neutrino Bursts“, zwei oder mehr Neutrinos, die aus einer Richtung zu kommen scheinen und innerhalb von 100 Sekunden den Detektor erreichen. Durch Parallelisierung der Rekonstruktionsprozesse gelingt das Aufspüren von Neutrino Bursts mittlerweile in wenigen Minuten. Ein darauffolgender Neutrinoalarm wird dann über den Iridium-Kommunikationssatelliten in den Norden übermittelt. Dabei ist es wichtig, zu betonen, dass die meisten dieser Neutrino Bursts reine Untergründereignisse sind, d. h. zwei atmosphärische Neutrinoereignisse, die nur zufällig in

räumlicher und zeitlicher Koinzidenz nachgewiesen werden. Erst die Nachbeobachtungen geben Auskunft, ob es sich um astrophysikalische Neutrinos handelte.

Ein Neutrinoalarm vom Südpol wird automatisch an ein Netzwerk von robotischen Teleskopen weitergeleitet. Dabei arbeiten wir mit der ROTSE-Kollaboration zusammen, die ein Netz von vier baugleichen Teleskopen betreibt. Die Teleskope verfügen über ein 1.85×1.85 Quadratgrad großes Gesichtsfeld und sind somit gut auf das Neutrinoauflösungsvermögen von IceCube abgestimmt. Nach einem Neutrinoalarm wird der entsprechende Teil des Himmels regelmäßig über drei Wochen lang beobachtet. Die dabei gewonnenen Bilder werden auf Supernovae durchsucht, d. h. auf neue punktförmige Lichtquellen im ansonsten konstanten Nachthimmel. Die dazu verwendeten Suchalgorithmen wurden für die Supernovakosmologie entwickelt und für unsere Zwecke abgewandelt. Um die Nachweiseffizienz der Suche zu bestimmen, wurden Supernovae simuliert und als künstliche Sterne in die gewonnenen Bilder eingesetzt.

Das Nachbeobachtungsprogramm läuft seit Dezember 2008, und die Daten des ersten Jahres (vom 18.12.2008 bis 31.12.2009) werden zur Zeit analysiert. Selbst für den Fall, dass keine Supernova identifiziert werden sollte, lassen sich interessante obere Grenzen über Häufigkeit, relativistische Boost-Faktoren und kinetische Energien von möglichen Jets in Supernovae ermitteln. Eine relativ allgemeine, wenngleich noch vorläufige obere Grenze lässt sich bereits aus der Nichtbeobachtung von drei oder mehr Neutrinos innerhalb des kurzen Zeitfensters von 100 s ableiten. So gilt z. B. für einen mäßig relativistischen Jet mit $\Gamma = 5$ und beobachteten Gamma-Ray Burst Jet-Energie von $E_j = 3 \times 10^{51}$ ergs [3] die folgende obere Grenze (90% Vertrauensintervall) auf die Supernovarate (ρ):

$$\rho < 1.2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$$

Mit einer gemessenen Supernovarate von $\rho_0 = 2.3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$ [5] sollte also maximal jede zweite Supernova einen solchen verborgenen Jet in sich tragen. Da die Analyse nur mit einem Teildetektor durchgeführt wurde, wird sich die Sensitivität in den kommenden Jahren noch um zirka eine Größenordnung verbessern lassen.

Zusammenfassung und Ausblick

IceCube ist der mit Abstand größte existierende Neutrinodetektor, der zur Zeit mit einer Rate von fast 10^{11} Myonen und hunderttausend Neutrinos pro Jahr Ereignisse aufzeichnet. Das Hauptziel von IceCube besteht in dem Nachweis von hochenergetischen, astrophysikalischen Neutrinos. Die Daten des Jahres 2008, die mit einem Teildetektor von IceCube (etwa mit 0.5 Kubikkilometer instrumentiertem Volumen) aufgezeichnet wurden, sind mit dem Ziel analysiert worden, ein astrophysikalisches Signal zu identifizieren. Bisher gab es leider noch kein Anzeichen für astrophysikalische Neutrinos.

Um die Sensitivität von IceCube weiter zu steigern, können Multi-Messenger-Methoden eingesetzt werden. Es wurde eine Methode entwickelt, die mit Hilfe von automatisierten Nachbeobachtungen die Sensitivität auf transiente Neutrinoquellen wie Supernovae oder Gamma-Ray Bursts um bis zu dem Dreifachen erhöhen kann. Dazu wird IceCube mit einem Netz von optischen Teleskopen verbunden, die mit ihren Beobachtungen nach möglichen elektromagnetischen Partnern zu dem Neutrinosegment suchen. Das System gewinnt seit Dezember 2008 Daten und wird kontinuierlich weiterentwickelt. In den kommenden Monaten wird das Netz um weitere optische Teleskope erweitert. Zusätzliche Nachbeobachtungen werden ab 2011 mit dem SWIFT-Röntgensatellit durchgeführt werden. Die Röntgendaten werden insbesondere die Sensitivität auf Gamma-Ray Bursts erhöhen, denn diese produzieren ein hartes Nachleuchten (Afterglow), das mit SWIFT oft über Tage hinweg sichtbar bleibt.

Mit der Inbetriebnahme des vollständigen IceCube-Detektors wird sich in den kommenden Jahren die Sensitivität auf den astrophysikalischen Neutrinofluss erheblich verbessern. Es bleibt abzuwarten, was dabei gefunden werden wird. Es ist eine Reise, die hoffentlich mit dem Entdecken von astrophysikalischem Neuland erst beginnen wird.

Danksagung

Ich danke den Wissenschaftlern der IceCube-Kollaboration für die gute Zusammenarbeit und meinen Mitarbeitern Anna Franckowiak und Andreas Homeier für ihre wesentlichen Beiträge zum Supernovachbeobachtungsprogramm von IceCube.

Literatur

1. A.Karle for the IceCube collaboration, in Proc. of the 31st International Cosmic Ray Conference (2010), <http://arxiv.org/abs/1003.5715>
2. V. F. Hess, *Physikalische Zeitschrift* 13: 1084 (1912)
3. S. Ando, J. Beacom, *Phys. Rev. Lett.* 95:061103 (2005); S. Razzaque, P. Meszaros, E. Waxman, *Phys. Rev. Lett.* 93, 181101 (2004)
4. M. Kowalski & A. Mohr, *Astroparticle Phys.* 27:533 (2007)
5. S. Ando, J. Beacom, H. Yuksal, *Phys. Rev. Lett.* 95:171101 (2005)