

Abbildung 76: links: schematische Ansicht der bisher installierten 59 Trossen. Rechts: perspektivische Ansicht des vollen IceCube-Detektors.

Astroteilchenphysik

Gruppenleiter: S. Schlenstedt

DESY hat sich im Jahr 2008 an drei Experimenten der Astroteilchenphysik beteiligt: an dem weltweit größten Neutrino-Teleskop IceCube am Südpol, an MAGIC, dem Gamma-Teleskop auf La Palma (über eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe), und – 2008 auslaufend – an dem ersten Experiment der Hochenergie-Neutrinoastronomie, NT200 am Baikalsee. Die Hardware-Beiträge von DESY zu IceCube sind 2008 erfolgreich abgeschlossen worden; die Analyse von IceCube-Daten hat nun die höchste Priorität. Die Untersuchungen zum akustischen Nachweis von Neutrinos in Eis wurden weitergeführt. Darüber hinaus wurde mit Arbeiten an der Entwurfsphase von CTA (Cherenkov Telescope Array), einem Gammateleskop der nächsten Generation begonnen. Die Entwicklung in DESY erfolgt auch im Rahmen der Brandenburger/Berliner Forschungslandschaft, zum Beispiel durch eine gemeinsam mit der Humboldt-Universität getragene Nachwuchsstudien-Gruppe und durch die Besetzung einer gemeinsamen Professur für theoretische Astroteilchenphysik an der Universität Potsdam.

IceCube

IceCube wird aus 4800 optischen Modulen bestehen, die an 80 Trossen befestigt sind. Zusätzlich soll ein innerer eng bestückter Kernbereich installiert werden. Dieser *DeepCore* genannte Teildetektor wird die Sensitivität bei geringen Energien entscheidend verbessern und AMANDA ersetzen. AMANDA soll im Jahr 2009 abgeschaltet werden. IceCube wird ergänzt durch den Luftschauer-Detektor IceTop auf der Eisoberfläche.

Nachdem in der Saison 2008/09 neunzehn Trossen installiert wurden, sind jetzt mit insgesamt 59 Trossen etwa 3/4 von IceCube in Betrieb. Die Konstruktion des gesamten Detektors soll im Januar 2011 abgeschlossen sein.

Ein Viertel der digitalen optischen Module (DOMs) wurden bei DESY montiert, davon 233 im Jahr 2008. Der zeitgerechte Abschluss dieser Arbeiten, unter Einhaltung des Kostenrahmens, ist einer der wichtigsten Erfolge der DESY-Gruppe des Jahres 2008. DESY hat auch den Front-End-Teil der Empfangselektronik an der Eisoberfläche (DOR-Card) entwickelt und produziert.

Die Hauptaufgaben der DESY-Gruppe beim Betrieb von IceCube im Jahr 2008 waren a) Massenproduktion von Monte-Carlo-Daten und Vorbereitung von entsprechenden GRID-Werkzeugen, b) Release-Management für Rekonstruktionssoftware, c) Entwicklung von Software für Online-Monitoring und Online-Filtern der Daten am Pol, d) Firmware-Optimierungen für die DOR-Card.

Bei der Analyse liegt das Schwergewicht der Zeuthener Gruppe auf der Suche nach astrophysikalischen Quellen hochenergetischer Neutrinos. Außerdem widmet sich die Gruppe der Vermessung des Spektrums der geladenen kosmischen Strahlung bis 10^{18} eV und der Suche nach exotischen Teilchen wie etwa magnetischen Monopolen.

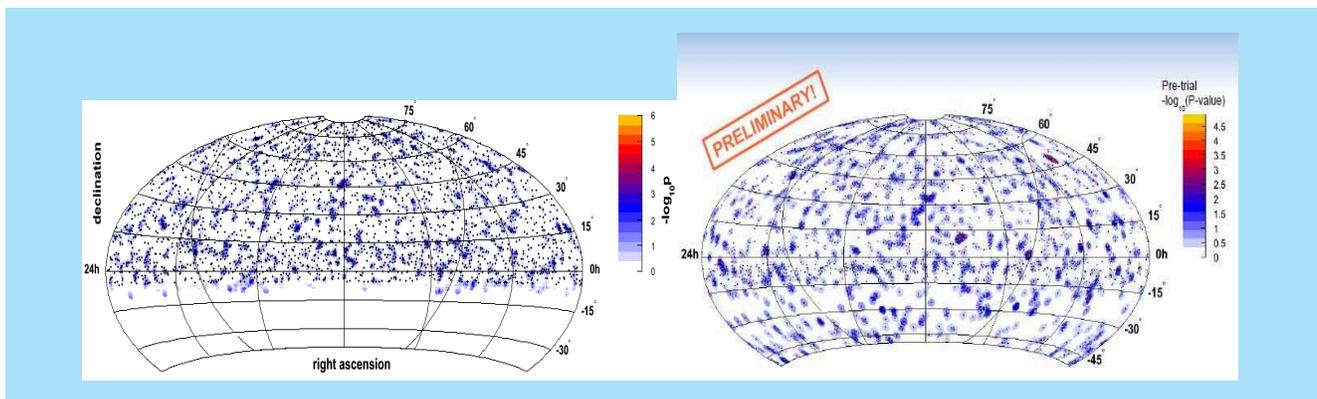


Abbildung 77: Daten des Jahres 2007, links: Neutrino-Himmelskarte (2956 Ereignisse im TeV-PeV-Bereich) für den Nordhimmel; rechts: Himmelskarte für 1885 Ereignisse im PeV-EeV-Bereich unter Einschluss eines großen Teils des Südhimmels.

Neutrino-Punktquellen und Multimessenger-Physik

Die Suche nach Neutrino-Punktquellen und ihre gezielte Verbindung zu Beobachtungen mit Gamma- oder Röntgenstrahlen (Multimessenger-Methoden) werden innerhalb einer Nachwuchsgruppe durchgeführt. Ihre Aktivitäten können in drei Schwerpunkte gruppiert werden:

- Punktquellen-Analyse für den gesamten Nordhimmel (der Standard-Ansatz)
- Punktquellenanalyse für besonders hochenergetische Neutrinos unter Einschluss eines großen Teils der Südhemisphäre,
- Suche nach transienten Phänomenen und Entwicklung von *Neutrino-Triggerern* für Gammateleskope.

zu a) Im Herbst 2008 wurden in der IceCube-Kollaboration drei unabhängige Analysen abgeschlossen, mit denen anhand der im Jahr 2007 genommenen Daten der Nordhimmel nach Punktquellen durchsucht wird. Die Sensitivität dieser Analysen (1 Jahr mit etwa $\frac{1}{4}$ des vollen IceCube-Detektors) ist um etwa einen Faktor 2 besser als jene von 7 Jahren AMANDA und demonstriert damit eindrucksvoll den Schritt in eine neue Ära. Eine der Analysen (siehe Abbildung 77, links) wurde am

DESY durchgeführt, die beobachteten Punkthäufungen dieser wie der anderen beiden Analysen sind jedoch mit statistischen Fluktuationen verträglich.

zu b) Bisherige Analysen konzentrierten sich auf Quellen in der nördlichen Hemisphäre, die für den Südpol *von unten* kommenden Myonen entsprechen. Optimiert man die Analyse auf sehr hohe Energien, so kann man jedoch auch oberhalb des Horizonts nach Quellen suchen, und das Zentrum der Galaxis rückt ins Blickfeld. Eine solche Analyse wurde im DESY für die Daten des Jahres 2007 durchgeführt. Abbildung 77 (rechts), zeigt die entsprechende Himmelskarte, die erstmals auch Teile des Südhimmels – insbesondere das galaktische Zentrum und die durch Auger-Ergebnisse favorisierte Region um Centaurus-A – mit einschließt. Auch hier wurden keine eindeutigen Hinweise auf Punktquellen gefunden.

zu c) Die Entwicklung von on-line Analysen soll zur zeitnahen Auswahl von Neutrino-Ereignissen führen, die Folgebeobachtungen durch MAGIC oder durch optische robotische Teleskope auslösen. Es wurde ein System zur on-line-Monitorierung der Stabilität des IceCube-Detektors entwickelt, das sich auf die Raten der getriggerten bzw. der gefilterten Daten stützt. Das System wird 2009 voll in die Datenverarbeitungskette am Südpol integriert werden. In diesem Zusammenhang wurde auch der Aufbau eines Archivs für Signalzeitreihen aus Gammabeobachtungen fortgeführt. Diese Daten helfen, die statistische Signifikanz eines

eventuellen Zusammentreffens eines Gamma-Flares mit IceCube-Neutrinosignalen genauer zu bestimmen.

Weitere Analysen mit IceCube

Kaskadenereignisse

Im Gegensatz zu Punktquellsuchen, die sich auf Myonspuren und deren Richtungsrekonstruktion und damit im Wesentlichen auf Myonneutrinos stützen, tragen alle drei Neutrinosorten zu Kaskadenereignissen bei. Diese sind gekennzeichnet durch eine gute Energieauflösung von 30 %, wie sie für Spektren-Messungen wichtig sind. Die Winkelauflösung ist dagegen schlecht, gegenwärtig etwa 25° in Eis, verglichen zu 5° in Wasser. In enger Zusammenarbeit mit der Gruppe an der Humboldt-Universität hat die DESY-Gruppe auf ihren bisherigen Arbeiten für AMANDA aufgebaut und die Analysewerkzeuge für Kaskadenrekonstruktion im Hinblick auf IceCube weiterentwickelt. Das Hauptpotential für Verbesserungen kommt dabei aus zwei Richtungen: a) die Benutzung der vollen Wellenform anstatt der Ankunftszeit des ersten Photons, b) die Fokussierung auf das tiefste Eis, wo die Lichtstreuung geringer und der entsprechende Einfluss auf die Rekonstruktion weniger störend ist. Das Ziel ist dabei die Untersuchung atmosphärischer Elektronneutrinos. Im Mittelpunkt steht die Vorbereitung der Analyse der Daten, die mit 40 Trossen im Jahr 2008 genommen wurden.

Magnetische Monopole

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 676 (Teilchen, Strings und das frühe Universum) wurden Arbeiten zur Simulation von magnetischen Monopolen in IceCube begonnen. Magnetische Monopole, supersymmetrische Q-balls and Quark-Nuggets sind extrem schwere Kandidaten für exotische Materie im Universum, mit Massen im Bereich von 10^4 bis 10^{27} GeV und typischen Geschwindigkeiten von 10^{-4} – 10^{-3} der Lichtgeschwindigkeit. Zusammen mit der Simulation des Monopoldurchgangs durch IceCube wird die Entwicklung eines geeigneten Triggers vorangetrieben.

IceTop

Die Erweiterung von IceCube durch den Oberflächendetektor IceTop dient hauptsächlich der Bestimmung der Massenzusammensetzung der primären kosmischen Strahlung in einem Energiebereich von $3 \cdot 10^{14}$ – 10^{18} eV. Die wichtigsten Messgrößen sind dabei die Lage des Schauermaximums und das Verhältnis der elektromagnetischen und myonischen Komponenten eines Schauers. IceCube hat im Vergleich zu ähnlichen Experimenten die einzigartige Möglichkeit, Myonen im tiefen Eis in Koinzidenz mit dem Schauer an der Oberfläche nachzuweisen.

Als Grundlage für die Untersuchungen zur Massenzusammensetzung sind bei DESY und der Humboldt-Universität die Algorithmen für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschauern entwickelt worden. Die Anwendung auf Daten von zwei Monaten des Jahres 2007 lieferte erste Ergebnisse für ein Energiespektrum. Die Analyse wird zurzeit auf alle Daten von 2007 ausgedehnt und soll zu der ersten Publikation physikalischer Ergebnisse von IceTop führen.

Die Messung von IceTop-IceCube Koinzidenzen kann durch andere Verfahren zur Massenbestimmung ergänzt werden. Bei DESY/HU sind interessante alternative Messgrößen gefunden worden, die sensitiv auf die Massenzusammensetzung sind und eine unabhängige Überprüfung der Simulationsmodelle erlauben. Eine der Messgrößen ist die Zenithwinkel-Abhängigkeit des Schauermaximums, die in der oben vorgestellten Analyse zu einer komplementären Bestimmung der Massenzusammensetzung geführt hat. Eine weitere Messgröße ist die Anzahl der Myonen in Schauern, gemessen mit IceTop an der Oberfläche. Für größere Abstände zum Schauerzentrum ist es gelungen, Myon-Signale aus dem elektromagnetischen Untergrund zu isolieren. Da diese Myonen tendenziell viel niederenergetischer als die Myonen im tiefen Eis sind, stellt auch das eine unabhängige Methode zur Überprüfung der Schauermodelle dar.

R&D zum akustischen Nachweis von Neutrinos

Mit diesen Arbeiten soll untersucht werden, ob das polare Eis geeignet ist, bei einer möglichen späteren Erweiterung von IceCube durch Radio-Sensoren auch akustische Sensoren zum Einsatz zu bringen. Beide Methoden würden von einer großen Abklinglänge von Radio- und Akustikwellen in Eis profitieren und die Überdeckung eines extrem großen Volumens mit einem großen Sensorabstand erlauben – eine Bedingung zum Nachweis der niedrigen erwarteten Neutrinoflüsse bei Energien oberhalb von 100 PeV. In der Saison 2006/07 und im Dezember 2007 wurde darum SPATS, der South Pole Acoustic Test Setup, installiert. SPATS besteht aus vier 500 m langen Trossen mit je sieben akustischen Stationen aus einem Sender und drei Empfängern, die größtenteils bei DESY entwickelt, gebaut und getestet wurden. Außerdem wurde ein mobiler Pinger in mehreren IceCube Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von 500 m versenkt und die von ihm emittierten akustischen Pulse von den Sensoren der SPATS-Strings registriert.

Die bisherigen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: a) Die Tiefenabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wurde mit 0.5 % Genauigkeit vermessen und zeigt, dass Brechungseffekte unterhalb von 200 m vernachlässigbar sind. b) Das akustische Rauschen ist konstant und sinkt leicht mit der Tiefe ab. Da eine Eichung der Sensoren bei 50 bar und -50°C nicht realisierbar ist, kann der Absolutwert des externen Rauschens im Moment nur unter gewissen Annahmen angegeben werden. Er ist kleiner als 10 mPa, das heißt nahe am internen Rauschen der Sensoren. Transiente Ereignisse mit Amplituden jenseits des gaussischen Rauschens sind selten. c) Die akustische Abklinglänge lässt sich im Moment nur ungenau angeben, denn die Messdistanzen sind geringer als die ursprünglich erwartete Abklinglänge von >1 km und die gegenwärtigen systematischen Fehler groß. Die Daten deuten auf Werte unterhalb eines Kilometers hin. Die Analyse der jüngsten Daten soll ein genaueres Bild liefern und Ende 2009 abgeschlossen sein.

Baikal

Das Baikal-Experiment war das erste Experiment, dem die Messung hochenergetischer Neutrinos unter Wasser gelang. Es wurde 1998 als NT200 mit 192 Photoröhren an 8 Trossen in Betrieb genommen. Seit seiner Erweiterung auf das Teleskop NT200+ im Jahr 2005/06 erlaubt ein am DESY entwickeltes System eine um zwei Größenordnungen schnellere Datenübertragung zum Ufer. Im Mittelpunkt der Arbeiten der Kollaboration im Jahr 2008 stand die Vorbereitung abschließender Publikationen zu NT200: die Suche nach Punktquellen, die Suche nach Koinzidenzen von Neutrinoereignissen mit Gamma Ray Bursts, die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie und die Suche nach langsamen schweren Teilchen. Die entsprechenden Veröffentlichungen sollen im Jahr 2009 eingereicht werden.

MAGIC

MAGIC hat im Jahr 2008 eine Reihe wichtiger Entdeckungen gemacht, u. a. den spektakulären Nachweis des veränderlichen Signals des Pulsars im Innern des Krebsnebels. Die DESY-Nachwuchsgruppe hat sich bei der Analyse von Monitoring-Daten aktiver galaktischer Kerne (Markarian 421 und 501, 1ES1959+650) engagiert und insbesondere die Koinzidenzen von Gamma-Ausbrüchen von Mkr 421 (MAGIC, VERITAS) mit Röntgenausbrüchen (SWIFT/XRT) und Variationen im MeV-Bereich (Agile) und im optischen Bereich (WEBT) untersucht. Die abgeleitete zeitabhängige Spektralverteilung lässt sich durch inverse Comptonstreuung an selbst erzeugten Synchrotronphotonen (SSC – Self-Synchrotron Compton Model) beschreiben.

Cherenkov Telescope Array

Gamma-Strahlen mit Energien oberhalb von 100 GeV werden mit abbildenden Cherenkov-Teleskopen nachgewiesen. Seit dem Nachweis der ersten solchen Quelle

im Jahre 1989 hat diese Technik eine stürmische Entwicklung genommen. Die meisten der inzwischen 75 bekannten Quellen wurden durch H.E.S.S. in Namibia und MAGIC auf La Palma nachgewiesen. So beeindruckend die Ergebnisse, die mit den gegenwärtigen Instrumenten erzielt wurden, auch sind: sie können nur die Spitze des Eisbergs darstellen. Eine weitere astronomische und astrophysikalische Erforschung des Hochenergie-Universums erfordert empfindlichere Anlagen.

In Europa hat sich ein Konsortium zum Bau des *Cherenkov Telescope Array*, CTA, gegründet. Mit CTA werden die Messungen zu hohen wie zu niedrigen Energien erweitert. Gleichzeitig soll die Sensitivität im gegenwärtig zugänglichen Energiebereich um etwa eine Größenordnung gesteigert und die Winkelauflösung verbessert werden. Bei niedrigen Energien wird CTA die Lücke zum Satelliten-Experiment GLAST/Fermi schließen. CTA wird eine Vielzahl astronomisch interessanter Beobachtungsergebnisse liefern und darüber hinaus auch mit Antworten zu kosmologischen Fragen beitragen können.

Abbildung 78 zeigt eine mögliche Konfiguration von CTA. Mehrere dicht angeordnete, sehr große Teleskope in der Mitte sorgen für eine hohe Sensitivität unterhalb 100 GeV, für den Bereich von 0.1-10 TeV sind viele Teleskope mittlerer Größe wichtig. Zum Nachweis der geringen Flüsse oberhalb von 10 TeV muss ein sehr großes Gebiet mit Teleskopen abgedeckt werden. Da bei Gamma-Wechselwirkungen dieser Energien sehr viel Licht erzeugt wird, können die Teleskop-Durchmesser klein und deren Abstände größer sein. Mit CTA wird die Entdeckung von etwa 1000 Quellen erwartet.

CTA wird als Observatorium betrieben werden, bei dem Nutzer wie bei großen optischen Teleskopen Beobachtungszeit beantragen können und bei denen ein starkes Konsortium für den Betrieb der Infrastruktur verantwortlich ist.

Mit der Beendigung der Mitarbeit beim Baikal-Experiment und dem Abschluss der Hardware-Arbeiten für IceCube ergibt sich in Zeuthen die Möglichkeit, Projekte vorzubereiten, die in der nächsten Dekade IceCube

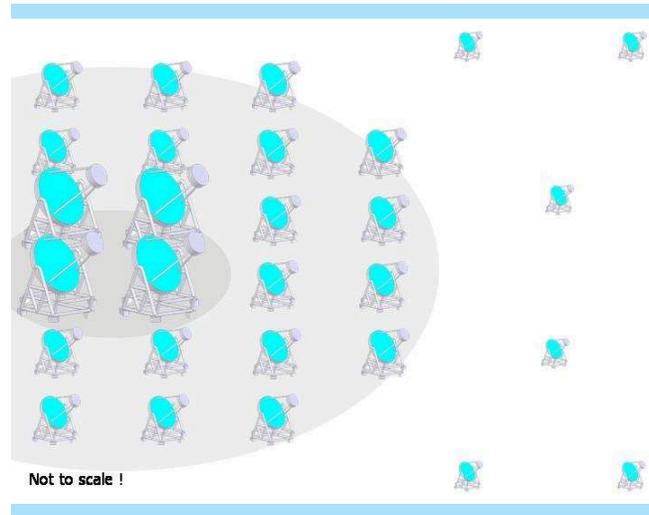


Abbildung 78: Mögliche Konfiguration von CTA

erst ergänzen und danach in seiner Rolle als Hauptaktivität ersetzen. Nach ausführlicher Diskussion der bestehenden Optionen hat sich die Gruppe Astroteilchenphysik für eine Mitarbeit an CTA entschieden. Es bildet eine ideale Grundlage für eine engere Bindung zur Potsdamer Universität und zu den Potsdamer Astronomen sowie zur Humboldt-Universität zu Berlin. Gamma-Resultate liefern wesentliche Informationen für die Interpretation der mit IceCube gewonnenen Befunde. Im Rahmen des *Multi-Messenger*-Ansatzes werden sie in diesem Sinne schon jetzt genutzt.

DESY beteiligt sich in den kommenden Jahren an der Design-Phase für CTA, einschließlich der Entwicklung und des Baus von Prototypen. Die gegenwärtigen Haupt-Aktivitäten sind:

- Mitarbeit bei der Optimierung der CTA-Konfiguration
- Entwurf eines Drive- und Control-Systems zur Bewegung der Teleskope
- Design eines Teleskops mittlerer Größe
- Vorarbeiten zur schnellen Kamera-Auslese.

Eine genauere Festlegung der Aufgaben beim Bau von CTA in den Jahren nach 2012 wird im Verlauf der Design-Phase erfolgen.