



Abbildung 90: *Installationsteam des vierten SPATS Strings. Vorne rechts Delia Tosi (DESY).*

Astroteilchenphysik

Gruppenleiter: S. Schlenstedt (bis 30.9.2007); C. Spiering (ab 1.10.2007)

Das Jahr 2007 war für die internationale Hochenergie-Astroteilchenphysik äußerst erfolgreich. Mit Gamma-Teleskopen wurde die Anzahl identifizierter Gamma-Quellen im TeV-Bereich auf etwa siebzig gesteigert. Spektakulär ist auch die von der Auger-Kollaboration berichtete Korrelation zwischen Aktiven Galaktischen Kernen und höchstenergetischen kosmischen Strahlen. Wenn sich der Auger-Befund erhärten sollte, würde er den Eintritt in die Ära der Astronomie mit geladenen kosmischen Strahlen markieren. Ein drittes Beobachtungsfenster soll durch die Hochenergie-Neutrinoastronomie geöffnet werden. Das größte Experiment auf diesem Gebiet ist IceCube, das zentrale Projekt der Astroteilchen-Gruppe in Zeuthen. IceCube hat in der Saison 2007/08 die Hälfte seiner projektierten Größe von einem Kubikkilometer erreicht und wird 2008 in völlig neue Sensitivitätsbereiche vorstoßen.

Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinos erfordert wegen der kleinen Neutrino-Querschnitte und der großen Entfernungen zu Objekten wie Doppeltsternsystemen oder Aktiven Galaktischen Kernen (AGN) Neutrino-Detektoren mit sehr großen sensitiven Volumina. Das Schwergewicht der Aktivitäten der Gruppe liegt bei Untersuchungen mit dem im Aufbau befindlichen IceCube-Teleskop und dem Abschluss der Daten-Analyse für sein Vorgänger-Experiment AMANDA. Die Beteiligung am Experiment NT200+ im sibirischen Baikalsee wird 2008 beendet.

Anders als die etablierte Astronomie mit Neutrinos aus der Sonne interessiert sich die Neutrino-Astrophysik bei Energien über 100 GeV vorzugsweise für die Neu-

trinos, die in hochenergetischen astrophysikalischen Prozessen im Zerfall beschleunigter geladener Teilchen in Stoßwellen und starken variablen Magnetfeldern nahe der Quelle entstehen. Zusätzliche Informationen erhofft man sich durch Kombination der Studien astrophysikalischer Objekte mit unterschiedlichen Botenteilchen (Multi-Messenger). Aus den gleichzeitigen Beobachtungen von elektromagnetischer Strahlung zusammen mit Beobachtungen von Neutrinos erwartet man ein vollständigeres Verständnis der den Objekten zugrunde liegenden physikalischen Prozesse. Dieses Prinzip ist der zentrale Ansatz einer 2006 etablierten Helmholtz-Nachwuchsgruppe, die mit der Astroteilchen-Gruppe in Zeuthen eng verzahnt ist. Durch die Zusammenarbeit der Nachwuchsgruppe mit der MAGIC-Kollaboration und durch die parallel dazu begonnene Mitarbeit an einer Prototyp-Studie für CTA, einem Gamma-Observatorium der nächsten Generation, ergibt sich eine zusätzliche Thematik am DESY. Sie wird den Standort Zeuthen mit einer reichen Ausbeute an Beobachtungsdaten wissenschaftlich beleben.

Status des IceCube-Experiments

Der IceCube-Detektor wird aus 4800 Digitalen Optischen Modulen (DOM) bestehen, die an 80 Trossen mit 125 m Abstand zwischen den Trossen und 17 m Abstand zwischen den DOMs entlang einer Trosse aufgehängt werden. Der Detektor im Eis wird ergänzt durch den Luftschauer-Detektor IceTop auf der Eisoberfläche, für den 320 DOMs eingesetzt werden. IceTop besteht aus großen, mit Eis gefüllten Tanks, die jeweils zwei DOMs enthalten und als Stationen paar-

weise an der Position jeder Trosse aufgestellt sind. Ice-Top ist völlig in das Trigger- und Datennahmesystem von IceCube integriert.

Beginnend mit der Saison 2004/05 wurden zunächst eine, dann acht (05/06), dreizehn (06/07) und achtzehn (07/08) Trossen installiert. Der Detektor besteht damit gegenwärtig aus 40 Trossen und 40 IceTop-Stationen. Die Konstruktion des gesamten IceCube-Detektors soll im Jahr 2011 abgeschlossen werden, wobei in den letzten beiden Jahren Modifikationen und Erweiterungen der Grundkonfiguration zu einer weiteren Verbesserung der Sensitivität bei besonders hohen und besonders niedrigen Energien führen sollen.

Technische Beiträge zum IceCube-Experiment

Die DESY-Gruppe hat bei der Konstruktion und Inbetriebnahme von IceCube folgende Schwerpunktaufgaben:

- Montage und Test von 1300 DOMs
- Bereitstellung von magnetischen Abschirmungen und von Aufhängungen für 5200 Module
- Entwicklung von Karten für DOR (Digital Optical Module Readout), dem Empfangsteil der DOMs an der Oberfläche
- Koordination und Management der Rekonstruktions-Software
- Europäisches Zentrum für die Massenprozessierung von experimentellen sowie Monte-Carlo-Daten, deutsches Analysezentrum
- Untersuchung der Möglichkeit, höchstenergetische Neutrinos durch akustische Methoden nachzuweisen

DOM-Produktion: Seit der Fertigstellung des Produktions- und Test-Labors im Jahre 2004 werden kontinuierlich optische Module produziert. In vierzehntägigen Zyklen werden im Kühlraum zwischen +20 und -45°C alle DOMs ausführlich getestet. Neben DESY beteiligen sich Gruppen aus Madison (USA)

sowie Uppsala und Stockholm (Schweden) an der Modulfertigung. Eine einheitliche Technologie für die Herstellung und das Testen der DOMs in allen drei Labors sichert gleiche Qualitätsstandards. Im Jahre 2007 wurden bei DESY 480 optische Module gefertigt. Die gewissenhafte Arbeit der beteiligten Kollegen der AT-Gruppe, der Mechanik, von Experiment-Support und der Werkstätten sowie die exakte Einhaltung der Technologie führte zu einer Produktionseffizienz von 98%.

DOR-Karte: Die digitalisierten DOM-Informationen werden über elektrische Kabel zur DOR-Karte übertragen. Diese Elektronik wurde am DESY entworfen. Am Südpol wurden im Jahre 2007 22 Trossen mit 176 DOR-Karten ausgelesen und 12 Karten für die Auslese des IceTop-Detektors verwendet. Für die Datennahmesaison 2008 wurden 252 DOR-Karten produziert, getestet und am Südpol installiert.

Software: Die Verantwortlichkeit der DESY-Gruppe im Jahre 2007 auf dem Gebiet der Rekonstruktions-Software bestand in der Koordination und dem Versions-Management. Die Software steht der Kollaboration für die Daten-Rekonstruktion und die Analyse zur Verfügung. Die Koordinationsaufgaben werden im Frühjahr 2008 abgeschlossen sein.

Computing: Auf den Rechnern des Batch-Clusters des DESY Zeuthen wurden neben AMANDA-Rekonstruktions- und Simulationsaufgaben auch IceCube-Simulationsrechnungen für die Kollaboration ausgeführt. Es wurden Signal- und Untergrund-Ereignisse für verschiedene Detektor-Konfigurationen generiert, wobei der AMANDA-Detektor berücksichtigt wurde. Eine weitere Aktivität ist die Vorbereitungen des Zugriffs auf die Daten sowie Simulations-Produktion mit Hilfe von GRID-Tools. Diese Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit der IT-Gruppe ausgeführt.

Akustischer Neutrino-Nachweis: Mit diesen Arbeiten soll untersucht werden, ob das polare Eis für den akustischen Nachweis von Teilchenreaktionen geeignet ist, so dass bei einer möglichen späteren Erweiterung

von IceCube durch Radio-Sensoren auch akustische Sensoren eingesetzt werden könnten. Beide Methoden würden von der großen Abklinglänge von Radio- und Schallwellen in Eis profitieren und die Überdeckung eines extrem großen Volumens mit einem großen Sensorabstand erlauben – eine Bedingung zum Nachweis der niedrigen erwarteten Neutrino Flüsse bei Energien oberhalb von 100 PeV. In der Saison 2006/07 wurde dafür SPATS, das *South Pole Acoustic Test Setup*, erfolgreich installiert. SPATS besteht aus drei 400 m langen Trossen mit je sieben akustischen Stationen aus einem Sender und drei Empfängern, die alle bei DESY entwickelt, gebaut und getestet wurden. Erste Messungen zur Refraktion akustischer Signale und zu Störgeräuschen im Eis ergaben, dass beide hinreichend gering sind. Schlüssige Aussagen zur Abklinglänge sollen 2008 mit Hilfe eines vierten Strings und einer *mobilen Pinger*-Station gewonnen werden. Der String wurde im Dezember 2007 installiert und in Betrieb genommen. Daran sind neben DESY Gruppen aus Aachen, Berkeley, Gent, Stockholm, Uppsala und Wuppertal beteiligt. Alle Sensoren und Signalgeber funktionieren wie vorgesehen und tragen zum SPATS Datenstrom bei.

Der *mobile Pinger* wurde in sechs IceCube-Bohrlöchern bis zu einer Tiefe von 500 m in die Wassersäule versenkt. Die von ihm emittierten akustischen Pulse wurden von den Sensoren der SPATS-Strings registriert. Die Auswertung wird wegen der für alle Messungen identischen Quelle eine Kalibrierung des Detektorsystems erlauben. Eine weitere Information liefert die Entfernungsabhängigkeit der Lautstärke, mit der die beim Bohren in der Höhe des Bohrkopfes entstehenden Geräusche registriert werden. Aus der Vielzahl komplementärer Informationen wird das Jahr 2008 eine verlässliche Aussage zur Abklinglänge liefern.

Physikalische Untersuchungen mit IceCube und AMANDA

AMANDA nimmt seit dem Jahr 2000 Daten und ist seit 2006 vollständig in IceCube integriert. Der IceCube-Detektor besteht im Moment aus 40 Trossen, die in den

letzten vier Jahren ins Eis eingebracht wurden. Erste physikalische Analysen der IceCube-Daten mit neun Trossen wurden publiziert. Die gegenwärtige Ausbaustufe von IceCube mit 40 Trossen übertrifft die Sensitivität von AMANDA, je nach physikalischer Fragestellung, um einen Faktor 15–30. Die DESY Gruppe trägt zu den kollaborationsweiten Arbeiten gegenwärtig vor allem durch Massenproduktion von Monte-Carlo-Daten und zur Ausarbeitung von on-line-Filtern bei. Bei der Datenanalyse ist besonders die enge Zusammenarbeit mit der Emmy-Noether-Gruppe von M. Kowalski an der Humboldt-Universität hervorzuheben.

Suche nach Punktquellen: Die Punktquellenanalyse liegt in der Hand der Helmholtz-Nachwuchsgruppe von E. Bernardini. Nachdem aus den AMANDA-Daten der Jahre 2000–2004 die bislang besten Obergrenzen auf den Neutrino flux aus Punktquellen kosmischer Neutrinos abgeleitet wurden, wurde im Jahr 2007 eine ergänzende Suchstrategie entwickelt. 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. Entsprechende Analysen wurden in DESY für AMANDA und für die 22-Trossen-Stufe von IceCube begonnen. Damit ergibt sich die Möglichkeit, nach Korrelationen zwischen PeV-Neutrinos und jenen Quellen geladener kosmischer Strahlung zu suchen, die kürzlich von der Auger-Kollaboration berichtet wurden und die auf der Südhalbkugel liegen.

Das Multi-Messenger Programm: Bei der Beobachtung elektromagnetischer Strahlung konzentriert sich die Helmholtz-Nachwuchsgruppe vor allem auf sehr hochenergetische Gamma-Strahlung (GeV/TeV), die mit Hilfe von Cherenkov-Teleskopen erstmals 1989 nachgewiesen wurde. Durch die Kombination von Gamma-Daten der letzten Jahre mit Neutrino-Beobachtungen kann die Nachweiswahrscheinlichkeit für Neutrino-Signale erhöht und das Verständnis kosmischer Objekte verbessert werden.

Da Cherenkov-Teleskope ein sehr eingeschränktes Gesichtsfeld haben, existieren jedoch oft keine Beobachtungen von GeV/TeV-Photonen zeitnah zu gemessenen Neutrino-Ereignissen. Aus diesem Grund wurde zusammen mit der MAGIC-Kollaboration ein *Target-of-Opportunity* (ToO) Programm entwickelt und Ende 2006 durchgeführt. Immer wenn AMANDA ein Neutrino aus einer Richtung nachwies, in welcher sich einer von fünf vorab definierten Quellkandidaten befand, wurde ein Alarm an MAGIC gesendet. Das MAGIC-Teleskop versuchte dann eine Beobachtung der Quelle durchzuführen, falls Sichtbarkeit und Wetter dies zuließen. Fünf Alarme wurden ausgesandt, auf zwei konnte MAGIC reagieren, allerdings ohne einen korrelierten Gamma-Ausbruch zu beobachten. Die technologische Machbarkeit solcher Programme wurde erfolgreich demonstriert. Gegenwärtig arbeitet die Gruppe zusammen mit der Emmy-Noether-Gruppe der Humboldt-Universität daran, einen on-line-Filter für IceCube am Südpol zu installieren. Damit wird auch IceCube Alarmdaten aufgrund exakt rekonstruierter Neutrinoereignisse verschicken können.

Die Nachwuchsgruppe vervollständigt ihr Archiv für historische und aktuelle Beobachtungen von GeV/TeV-Gammastrahlen. Durch Hinzufügen neuerer Beobachtungsdaten kann sie schrittweise präzisiertere Werte für die Wahrscheinlichkeit angeben, mit der sich ein bestimmtes Objekt in einem Zustand erhöhter Gamma-Emission befindet. Die Kenntnis der Wahrscheinlichkeit für solche Ausbrüche ist eine Voraussetzung, um die Signifikanz korrelierter Neutrinoereignisse angeben zu können.

Suche nach diffusen Quellen: Bestimmte Neutrino-Wechselwirkungen können isolierte elektromagnetische und hadronische Schauer (Kaskaden) erzeugen, insbesondere die Reaktionen von Elektron- und Tau-Neutrinos. Die Analyse solcher Endzustände hat verschiedene Vorteile: eine gute Energieauflösung, mit der man das härtere astrophysikalische Spektrum vom atmosphärischen Spektrum unterscheiden kann, und einen niedrigeren Untergrund von anderen Wechselwirkungen. Durch den niedrigeren Untergrund hat man eine größere geometrische Akzeptanz

als in der Punktquellen-Suche. In DESY wurde erstmalig mit hoher Statistik nach Kaskaden aus Neutrino-Wechselwirkungen gesucht (Daten der Jahre 2000–2003). Die abgeleitete Obergrenze an den Fluss von $4 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1}$ liegt nur unwesentlich höher als jene aus der Untersuchung für Myon-Neutrinos und stellt damit eine wichtige Ergänzung zu dieser da.

Ebenfalls vorangetrieben wurden die vorbereitenden Arbeiten zur Suche nach Neutrinos mit Energien über 10^{17} eV mit IceCube. Bei diesen Energien werden Bremsstrahlung und Paar-Erzeugung durch den Landau-Pomeranchuk-Migdal (LPM) Effekt unterdrückt. Daher sind die Kaskaden von Elektron- oder Tau-Neutrinos bis zu mehreren 100 m lang.

Analyse von kosmischen Strahlen: Mit IceTop sollen Energiespektrum und Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung zwischen $3 \cdot 10^{14} \text{ eV}$ und 10^{18} eV gemessen werden. Die Kenntnis der Massenzusammensetzung ist wesentlich für das Verständnis des Ursprungs der kosmischen Strahlung. Experimentell wird sie bei diesen Energien über die Vermessung der durch die kosmischen Primärteilchen ausgelösten Luftschauer erschlossen. IceCube hat in der Kombination mit IceTop die einzigartige Möglichkeit hochenergetische Myonen im Eis in Koinzidenz mit Luftschauern an der Oberfläche zu messen. Damit wird ein im Vergleich zu anderen Experimenten komplementärer Zugang zur Bestimmung der Massenzusammensetzung eröffnet.

Die 2006 begonnene Entwicklung eines Algorithmus für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschauern konnte 2007 abgeschlossen werden. Die statistischen Fluktuationen von Höhe und Ankunftszeit der Signale, deren Kenntnis für die Rekonstruktion wichtig ist, wurden untersucht. Der Rekonstruktionsalgorithmus wurde auf die im Jahre 2007 mit 26 Stationen genommenen Daten zur Bestimmung des Energiespektrums zwischen 1 und 100 PeV angewandt und bildet die Grundlage für die bevorstehende erste Publikation einer Analyse von IceTop-Daten. Das Spektrum aus einer vorläufigen Analyse der Daten von 2006 mit 16 Stationen ist in Abbildung 91 gezeigt.

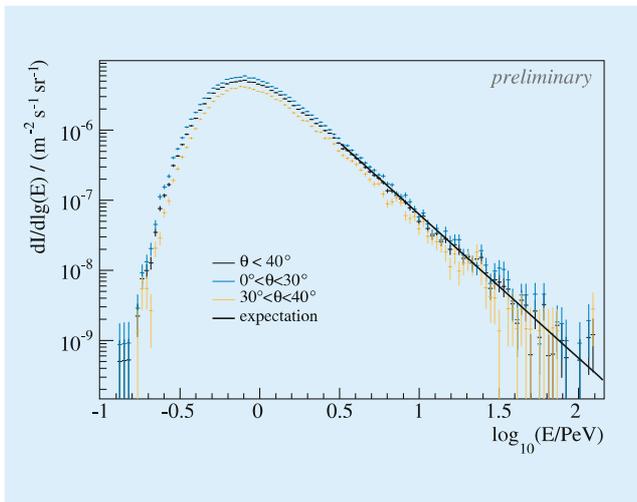


Abbildung 91: Das mit IceTop (16 Stationen) gemessene Energiespektrum für verschiedene Zenitwinkel im Vergleich mit dem durch andere Anlagen gemessenen Spektrum (vorläufiges Resultat ohne Akzeptanzkorrektur bei kleinen Energien).

MAGIC

Das Potential der Multi-Messenger Analysen wird durch die Teilnahme der Nachwuchsgruppe am MAGIC Gamma-Teleskop verstärkt. Dabei geht es in erster Linie um die Erweiterung der verfügbaren Zeitreihen von Gamma-Beobachtungen und die Vorbereitung und Teilnahme an entsprechenden Beobachtungen. Die Gruppe beteiligt sich auch an der Monte-Carlo-Massenproduktion und am MAGIC-Schichtbetrieb auf La Palma. Die Arbeiten zu einem *Neutrino-Target-of-Opportunity-Trigger* (NToO) wurden oben schon erwähnt. Die Einwerbung von Helmholtz-Mitteln zum Kauf von verbesserten Photosensoren erlaubt es, einen großen Teil der MAGIC-Kameras mit diesen Sensoren auszustatten und somit die Energieschwelle zu senken.

Das Baikal-Experiment

Das Baikal-Experiment ist 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. Anfang 2005 wurde die Anlage um drei Trossen zum viermal empfindlicheren Teleskop NT200+ erweitert.

Die geringe Lichtstreuung im Baikalsee ermöglicht die Suche nach Kaskaden aus Neutrinowechselwirkungen unterhalb des Detektors in einem sehr großen Volumen. Die im Jahr 2006 publizierte obere Grenze für den Fluss hochenergetischer, diffus eintreffender Neutrinos aus den Daten der Jahre 1998–2002 ist inzwischen durch AMANDA um das Vierfache unterboten worden. Sie ist aber, bei gleichem Datenmaterial, durch eine verbesserte Analyse, nochmals um einen Faktor zwei verbessert worden und stellt darum eine wichtige Bestätigung von AMANDA mit einer unabhängigen Methode dar. Im Jahr 2007 wurde ebenfalls eine Grenze für den Fluss relativistischer magnetischer Monopole publiziert und eine neue, konkurrenzfähige Obergrenze für den indirekten Nachweis für die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie erhalten.

DESY hat eine Linux-PC basierte, 100 mal schnellere Daten-Verbindung vom Ufer zum Unterwasser-Teleskop NT200+ entwickelt, sowie einen Unterwasser-Lasermodul beigesteuert, der mit Nanosekunden-Lichtpulsen eine synchrone Eichung des Teleskops mit einer einzigen Lichtquelle erlaubt. Schließlich wurde mit Hilfe von DESY die Satelliten-Kommunikation zwischen dem Uferzentrum und Europa durch Installation einer Breitband-Verbindung verbessert und überwacht.

Die DESY-Gruppe betrachtet ihre Aufgabe an diesem Pionier-Projekt als erfüllt und wird die aktive Mitarbeit am Projekt daher Mitte 2008 beenden. Die frei werden Ressourcen sollen den Vorarbeiten zum CTA-Projekt zugute kommen.

CTA

Das *Cherenkov Telescope Array* CTA ist das große europäische Zukunftsprojekt der hochenergetischen Gamma-Astronomie. Es soll aus einer mehrere Qua-

dratkilometer überdeckenden Konfiguration aus Cherenkov-Luftschauer-Teleskopen bestehen, deren Spiegeldurchmesser zwischen 7–8 m für die kleinen Teleskope und 25–30 m für die großen liegt. CTA wird die Sensitivität existierender Projekte im zentralen Energiebereich von 1 TeV um das Zehnfache verbessern

und darüber hinaus den Messbereich bis zu wesentlich höheren und niedrigeren Energien erweitern. DESY beteiligt sich an der Design-Phase des Projekts, die 2007 begann. Diese Phase soll im Jahr 2009 zum Bau erster Prototypen und 2012 zum Baubeginn für das volle Observatorium führen.