

# Astroteilchenphysik

**Gruppenleiter:** S. Schlenstedt

Durch immer vielfältiger werdende Analysen des Spektrums elektromagnetischer Strahlung von Wellenlängen über das sichtbare Licht bis zu höchst-energetischen Gamma-Strahlen wurde in der Astronomie das Verständnis des Universums revolutioniert. Das relativ neue Gebiet der Neutrino-Astrophysik zeigte erste Ergebnisse mit Beobachtungen von Neutrinos von der Sonne und der Supernova 1987a im Energiebereich von keV und MeV. Die Neutrino-Astrophysik für Energien über 100 GeV interessiert sich vorzugsweise für die Neutrinos, 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.

Im Jahre 2006 hat eine HGF-Nachwuchsgruppe (*Helmholtz-University Young Investigators Group*) die Astrophysik-Gruppe des DESY verstärkt. Durch die Zusammenarbeit der Nachwuchsgruppe mit der MAGIC-Kollaboration in einem Multi-Messenger-Programm ergibt sich eine neue Thematik am DESY.

Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinos erfordert wegen der kleinen Neutrino-Anzahlen und großen Entfernungen zu Objekten wie Doppelsternsystemen oder Aktiven Galaktischen Kernen (AGN)

Neutrino-Detektoren mit sehr großen sensitiven Volumina. Das Schwergewicht der Aktivitäten der Gruppe liegt bei Untersuchungen mit dem noch im Aufbau befindlichen IceCube-Teleskop (und seinem Vorgänger-Experiment AMANDA) sowie dem Neutrino-Teleskop am Südpol. Die Beteiligung am zweiten Experiment NT200+ im sibirischen Baikalsee wird vorraussichtlich 2008 beendet. Diese beiden mit Abstand größten Neutrino-Teleskope ergänzen sich durch ihre geographisch komplementäre Lage und die unterschiedliche Methodik.

## IceCube

### Status

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 Luftschauder-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 paarweise an der Position jeder Trosse aufgestellt sind. IceTop ist völlig in das Trigger- und Datennahmesystem von IceCube integriert.

Im Jahre 2006 waren neun Trossen und 16 IceTop-Stationen installiert. Für den Betrieb im Jahre 2007 wurden weitere 13 Trossen ins Eis eingebracht und 10 Stationen in Betrieb genommen. In den Folgejahren

sollen dann bis zu 16 Trossen und eine entsprechende Stations-Zahl installiert werden. Die Konstruktion des gesamten IceCube-Detektors soll im Jahre 2011 abgeschlossen werden.

### Technische Beiträge

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
- Rolle als europäisches Zentrum für die Massenprozessierung von experimentellen wie auch von Monte-Carlo-Daten und als 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  $-45^{\circ}\text{C}$  alle DOMs ausführlich getestet. Neben DESY beteiligen sich Gruppen aus Madison (USA) sowie Uppsala und Stockholm (Schweden) an der Modulfertigung. Durch die Einführung einer einheitlichen Technologie für die Herstellung und das Testen der DOMs in allen drei Labors gelang es, gleiche Qualitätsstandards zu sichern. Im Jahre 2006 wurden bei DESY 258 optische Module gefertigt, wovon 224 zum Südpol verschickt wurden. 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 Ausfallquote von nur 2%, was für die geplante Produktion von 480 DOMs im Jahre 2007 eine große Bedeutung hat.

**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 2006 neun Trossen mit 72 DOR-Karten ausgelesen und neun Karten für die Auslese des IceTop-Detektors verwendet. Für die Datennahme-Saison 2007 wurden 252 DOR-Karten mit verbesserter Firmware produziert, getestet und am Südpol installiert.

**Software** Die Verantwortlichkeit der DESY-Gruppe auf dem Gebiet der Rekonstruktions-Software besteht in Koordination und Versions-Politik, verstärkt durch eigene Software-Beiträge. Die Software steht der Kollaboration für die Daten-Rekonstruktion und die Analyse zur Verfügung. Die erste Online-Version wurde für die Datennahme des Jahres 2006 am Pol installiert, eine erweiterte Version kommt in diesem Jahr zum Einsatz.

**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** Die Untersuchungen und Entwicklungen wurden 2006 bei DESY fortgesetzt. Erste Messungen zur Abklinglänge akustischer Signale und eventueller Stör-Geräusche im Eis sollen 2007 mit SPATS (*South Pole Acoustic Test Setup*) durchgeführt werden. An diesem Projekt sind neben DESY Gruppen aus Berkeley, Gent, Stockholm und Uppsala beteiligt. 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. Im März 2006 fand in Zeuthen ein Systemtest des gesamten Setups statt. Ende April wurden die Eigenschaften der sensitiven Komponenten in einem See in Nordschweden bei großen Abständen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass SPATS-Transmitter Signale aussenden, die nach mehr als einem Kilometer Entfernung von SPATS Receivern im Wasser registriert werden. Im Eis werden noch bessere Resultate erwartet. Zur Steuerung der Datennahme wurde ein PCI-Businterface entwickelt und gefertigt. Im Herbst wurde das Setup nach nochmaliger Prüfung von Hard- und Software verpackt und zum Südpol geschickt. Im Januar 2007 konnte es dort erfolgreich installiert und in Betrieb genommen werden.

## Physikalische Untersuchungen mit IceCube und AMANDA

Der AMANDA-II-Detektor besteht aus 19 Trossen und nimmt seit dem Jahr 2000 kontinuierlich Daten. AMANDA ist seit diesem Jahr vollständig (topologisch und durch die Datenverarbeitung) in IceCube integriert. Der IceCube-Detektor besteht im Moment aus 22 Trossen, die in den letzten drei Jahren ins Eis eingebracht wurden. Erste physikalische Analysen der IceCube-Daten haben begonnen und werden in Kürze publiziert.

AMANDA-II hat eine effektive Fläche von 25000 m<sup>2</sup> für 1-TeV-Myonen und ist damit etwa 25 mal sensitiver als die größten unterirdischen Neutrino-Detektoren. Vorhersagen für die Neutrino-Flüsse aus astrophysikalischen Objekten wie aktiven galaktischen Kernen oder Gamma Ray Bursts legen für deren Nachweis Detektoren von der Größenordnung eines Kubikkilometers nahe. Mit IceCube wird die Sensitivität, je nach physikalischer Fragestellung, um einen Faktor 30-100 gegenüber AMANDA verbessert.

Im Jahr 2006 wurde in Zeuthen das Prozessieren aller Daten, die in den Jahren 2000–2004 mit AMANDA aufgezeichnet wurden, abgeschlossen. Diese Daten dienen als Standard-Datensatz für die Analysen der Kolla-

boration. Er erlaubt neben der in Zeuthen durchgeführten Suche nach Punktquellen und der Suche nach einem diffus einfallenden Fluss hochenergetischer Neutrinos auch eine Vielzahl von anderen Analysen. Dazu zählen das Studium von in der Atmosphäre erzeugten Neutrinos und die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie in Inneren der Erde und der Sonne.

### Suche nach Punktquellen

Eines der zentralen Analyse-Themen der Gruppe ist die Suche nach Punktquellen kosmischer Neutrinos mit dem AMANDA-II-Detektor und IceCube. Das oben erwähnte gereinigte und gefilterte Datenmaterial der Jahre 2000–2004 umfasst 4282 Ereignisse. Das sind Myonen, die den Detektor von unten durchqueren und von Neutrinos erzeugt wurden, die aus der nördlichen Hemisphäre kommen. Abbildung 60 zeigt eine Himmelskarte dieser Neutrino-Ereignisse. Diese Ereignisse sind jedoch wahrscheinlich fast alle nicht im Kosmos, sondern bei den Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung in der Atmosphäre entstanden. Eine Punktquelle wäre als eine lokale Konzentration von Ereignissen in dieser Karte sichtbar. Da keine signifikante Konzentration entdeckt wurden, konnten nur obere Schranken für erlaubte Neutrino-Flüsse von kosmischen Objekten, die am Nordhimmel sichtbar sind, angegeben werden. Diese Flussgrenzen schränken theoretische Vorhersagen über die Neutrino-Produktion in ausgewählten Objekten bereits erheblich ein. Zurzeit wird diese Suche nach Punktquellen auf mögliche Quellen hochenergetischer Neutrinos am Südhimmel ausgedehnt.

### 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 Nachweiswahrschein-

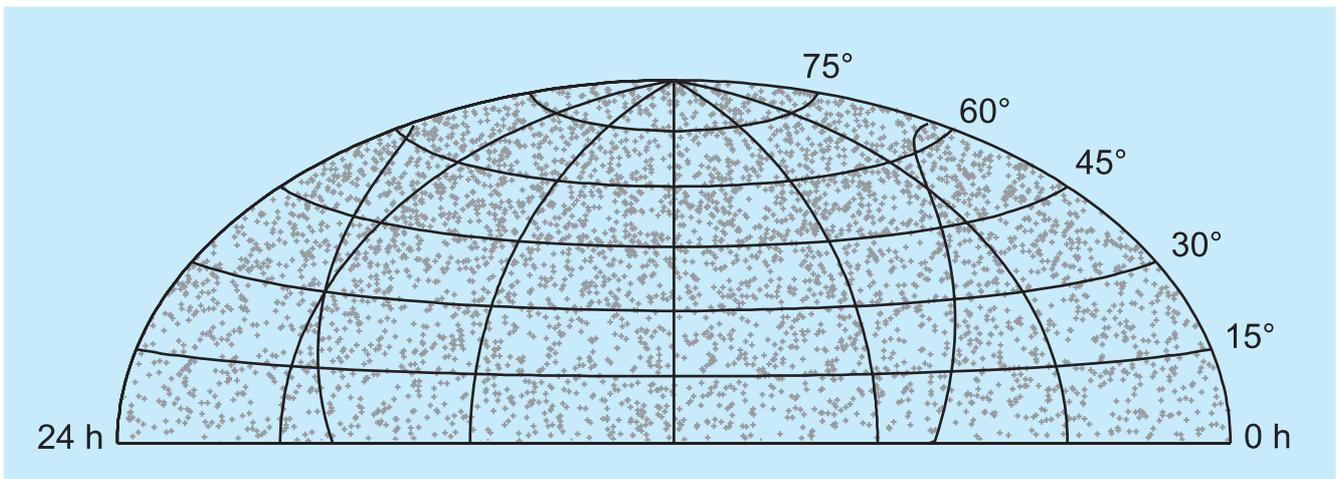


Abbildung 60: Himmelskarte mit AMANDA-II gemessener Neutrino-Ereignisse (2000–2004).

lichkeit 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. Wenn AMANDA ein Neutrino aus einer Richtung detektiert, in welcher sich ein vorab definierter Quellkandidat befindet, wird ein Alarm an MAGIC gesendet. Das Cherenkov-Teleskop versucht dann eine Beobachtung der Quelle durchzuführen, falls Sichtbarkeit und Wetter dies zulassen. Ein technischer Test des ToO-Systems mit AMANDA wurde von September bis Dezember 2006 erfolgreich durchgeführt. In den nächsten Monaten wird es für den IceCube Detektor angepasst und optimiert werden.

Gerade im Bereich der GeV/TeV- $\gamma$ -Astronomie wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt. Neben zahlreichen anderen Ergebnissen steht heute eine große Datenmenge von Beobachtungen von AGNs zur Verfügung. Die Nachwuchsgruppe arbeitet an einem Archiv für historische und aktuelle Beobachtungen von GeV/TeV- $\gamma$ -Strahlen sowie an der Kombination und Auswertung der archivierten Datensätze. In Abbildung 61 ist eine aus den archivierten Daten er-

zeugte Lichtkurve des prominenten BL-Lac-Objektes Markarian-421 dargestellt. Dieser Datensatz ist in seiner Vollständigkeit unübertroffen.

### Suche nach diffusen Quellen

Bestimmte Neutrino-Wechselwirkungen können isolierte elektromagnetische und hadronische Schauer (Kaskaden) erzeugen. 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.

Nach diesem physikalischen Endzustand wird erstmalig im AMANDA-Datensatz der Jahre 2000–2004 gesucht, der in Zeuthen prozessiert worden ist. Der Datensatz ist fünfmal größer als in vorherigen Kaskaden-Analysen, sodass man eine entsprechend höhere Sensitivität erreichen kann.

Mit dem 1-km<sup>3</sup>-Volumen des IceCube-Detektors kann man hochenergetische Neutrinos mit Energien über 10<sup>17</sup> eV beobachten. Bei diesen Energien werden Bremsstrahlung und Paar-Erzeugung durch den Landau-

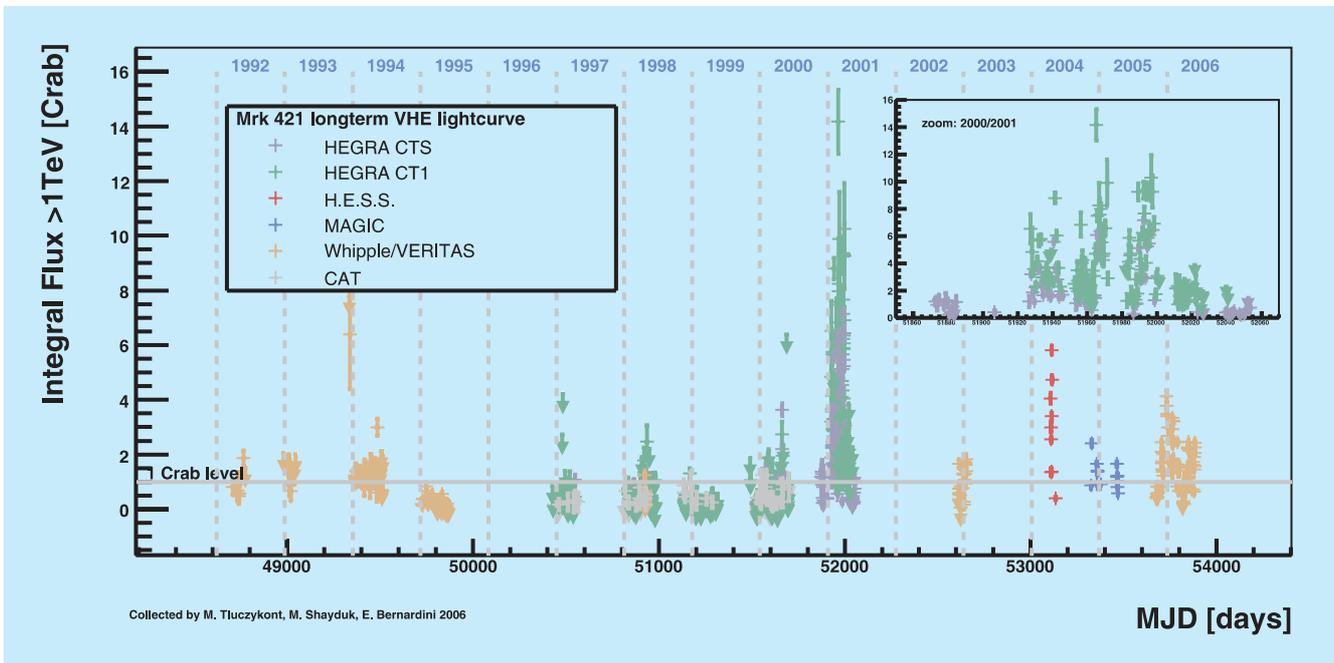


Abbildung 61: Lichtkurve des BL-Lac-Objektes Markarian-421 aus Daten der letzten 15 Jahre.

Pomeranchuk-Migdal (LPM) Effekt unterdrückt. Daher sind die Kaskaden von Elektron- oder Tau-Neutrinos bis zu mehreren 100 m lang. Die Analyse, die sich mit diesen Daten beschäftigt, schließt Kaskadensimulation basierend auf einer Parametrisierung des longitudinalen Energieverlustes und Simulationsrechnungen im LPM-Regime und neue Informationen über die Eis-Eigenschaften ein. Das Ziel ist eine verbesserte Richtungsrekonstruktion für Kaskaden-Ereignisse und damit eine Punktquellen-Suche bei höchsten Energien.

### Analyse von kosmischen Strahlung

Mit IceTop soll das Energiespektrum der geladenen kosmischen Strahlung oberhalb von etwa  $3 \cdot 10^{14}$  eV gemessen werden. Die interessanteste Fragestellung ist die Bestimmung der Beiträge von Kernen verschiedener Massen unter den Primärteilchen. Die experimentellen Aussagen zu dieser so genannten chemischen Zusammensetzung der kosmischen Strahlung sind bisher noch sehr unsicher. Mit der Möglichkeit, die Luftschauber

in Koinzidenz mit hochenergetischen Myonen im Eis nachzuweisen, eröffnet IceTop einen Erfolg versprechenden Zugang.

Die wichtigsten Arbeiten bei DESY waren die Entwicklung eines Algorithmus für die Rekonstruktion und Energiebestimmung von Luftschaubern und ein Kalibrationsalgorithmus für die gemessenen Signale in den IceTop Tanks. Die DESY-Gruppe entwickelte dazu eine neue Parametrisierung der lateralen Energieverteilung eines Schauers. Für die genaue Anpassung dieser Funktion an die gemessenen Tanksignale und um daraus Energie und Richtung des Schauers zu bestimmen, ist die Kenntnis der Verteilungen der Fluktuationen notwendig. Die Anwendung auf die Daten lieferte erste Ergebnisse für ein Energiespektrum, was dann mit den Daten des größeren Detektors in 2007 zu der ersten Publikation physikalischer Ergebnisse von IceTop führen soll.

Ein weiterer wichtiger Beitrag der DESY-Gruppe war die Entwicklung eines robusten Kalibrationsalgorithmus für die Tanksignale, ausgedrückt durch das mittlere Signal eines vertikal einfallenden Myons im Tank.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein besseres Verständnis der verschiedenen Beiträge zur Form des Signalspektrums erreicht. Das vorgeschlagene Kalibrationsverfahren ist von der IceTop-Arbeitsgruppe als Standard akzeptiert worden.

### Das Baikal-Experiment

Das Baikal-Experiment ist das Pionier-Experiment für die Messung hochenergetischer Neutrinos. Es wurde 1998 als NT200 mit 192 Photoröhren (PM) 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 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 in guter Übereinstimmung mit dem von AMANDA publizierten Limit. Mit NT200 wurde außerdem die niedrigste Grenze für den Fluss re-

lativistischer magnetischer Monopole bestimmt und ein neues, konkurrenzfähiges Limit für den indirekten Nachweis für die Suche nach Neutrinos aus der Annihilation dunkler Materie erhalten. Die Arbeiten bei DESY konzentrieren sich auf die Suche nach Neutrinos, die von einem massiven Lichtausbruch des Soft-Gamma-Repeater 1806-20 stammen.

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.

Im Tunka-Tal nahe dem Baikalsee wurde der erste von 19 Clustern des Luftschauerdetektors Tunka-133 installiert. Das Experiment wird von DESY und dem FZK unterstützt. Daten von Tunka-133 werden komplementäre Informationen zu KASCADE-Grande und IceTop liefern.