

Neutrino-Astronomie bei hohen Energien

Im Eis der Antarktis entsteht das Neutrino-Teleskop AMANDA

Christian Spiering

Gegenwärtig werden an mehreren Orten der Welt Neutrino-Teleskope in offenem Wasser oder in Eis aufgebaut. Im Gegensatz zu den meisten Detektoren in Tunneln und Höhlen sind diese Instrumente auf hohe Energien von einem TeV und darüber optimiert – d. h. auf Energien, die mit kosmischen Beschleunigungsprozessen verknüpft sind. Eines dieser Teleskope, AMANDA, entsteht am Südpol (Abb. 1).

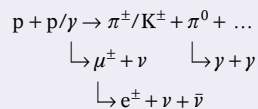
Elektrisch ungeladene Teilchen spielen eine wichtige Rolle bei der Suche nach den Quellen der kosmischen Strahlung. Insbesondere der Ursprung der Teilchen hoher Energie ist nach wie vor eines der großen ungelösten Probleme der Astrophysik. Geladene Teilchen mit Energien unter 10^{20} eV werden durch Magnetfelder abgelenkt – sei es in unserer Galaxis oder außerhalb davon –, sodass die Information über ihren Entstehungsort verloren geht. Eine Lokalisierung der kosmischen „Beschleuniger“ ist daher, abgesehen von den allerhöchsten Energien, nur mit elektrisch neutralen Teilchen wie Photonen oder Neutrinos möglich, die bei den Beschleunigungsprozessen entstehen (vgl. den Beitrag von H. Blümer und K.-H. Kampert in diesem Heft).

Der Photon-Astronomie gelang 1989 der Nachweis von Photonen mit TeV-Energie aus dem Krebsnebel

Gamma-Strahlen und Neutrinos

Hochenergetische Photonen (Gamma-Strahlen) können durch inverse Compton-Streuung entstehen, $e^- + \gamma$ (niedrige Energie) $\rightarrow e^- + \gamma$ (höhere Energie). Man hat bisher ein halbes Dutzend von TeV-Gamma-Quellen entdeckt (siehe den Beitrag über HE-GRA), deren Energiespektrum mit der Annahme verträglich zu sein scheint, dass ihm bei niedrigen Energien Synchrotronstrahlung, bei höheren Energien Compton-Streuung von Elektronen zugrunde liegt. Bei sehr hohen Energien ist der Elektronenbeschleunigung aber eine natürliche Grenze gesetzt, da diese sich durch Abgabe von Synchrotronstrahlung selbst „kühlen“. Das trifft auf sehr schwere Teilchen wie Protonen ($m_p = 1836 m_e$) in geringerem Maße zu. Sie können im Prinzip auf die beobachteten Maximalenergien ge-

bracht werden. Falls sie dann auf Materie (Atomkerne oder Photonengas) prallen, werden in diesem *Beam-Dump* Mesonen erzeugt, bei deren Zerfall sowohl Neutrinos als auch Gammas entstehen:



Gamma-Quanten können also sowohl aus Elektron- als auch aus Hadronprozessen stammen. Neutrinos dagegen sind eine eindeutige Signatur für den hadronischen Charakter des Beschleunigers und qualifizieren ihn damit als eine mögliche Quelle der kosmischen Teilchenstrahlen. Wahrscheinlich kommen häufig beide Prozesse gleichzeitig vor [1].



Abb. 1: Mitglieder der AMANDA-Kollaboration vor einem Bohrturm, mit dem 2 km tiefe Löcher in das ewige Eis am Südpol geschmolzen werden. In der Mitte eine der zahlreichen Glaskugeln mit einem Photo-

multiplier, die später im Tiefeneis einfrieren. Die Fahne zum „Jahr der Physik“ wird von vier deutschen Teilnehmern gehalten (ganz rechts der Autor).

und damit der Schritt aus einem langen Embryonalstadium (mit unzähligen, schrittweise verbesserten Obergrenzen für die Photonflüsse) in die Phase echter Beobachtungen. Inzwischen sind Spektren und Zeit-

verhalten mehrerer Quellen detailliert vermessen (vgl. den Beitrag von H. Krawczynski et al. in diesem Heft). Die Ergebnisse sind – bis jetzt – mit der Annahme verträglich, dass die Photonen aus rein elektromagnetischen Prozessen wie Synchrotronstrahlung und inverser Compton-Streuung stammen. Sie sind also nicht notwendigerweise mit der Beschleunigung von Protonen und schwereren Kernen, d. h. mit der kosmischen Strahlung verknüpft. Anders Neutrinos: Sie können nur aus Zerfallskaskaden stammen, an deren Anfang Hadronen stehen (siehe Infokasten „Gamma-Strahlen und Neutrinos“) und würden daher einen klaren Hinweis auf eine Protonbeschleunigung liefern.

Dr. Christian Spiering, DESY Zeuthen, Platanenallee 6, D-15738 Zeuthen, e-mail: csspier@ifh.de

Photonen können durch kosmischen Staub und – bei hohen Energien – diffuse Infrarotstrahlung und die allgegenwärtige 3K-Hintergrundstrahlung absorbiert werden ($\gamma + \gamma_{\text{IR}}$ (oder $\gamma_{3\text{K}}$) $\rightarrow e^+ + e^-$). Abbildung 2 zeigt die mittlere freie Weglänge von Photonen als Funktion ihrer Energie. Die 3K-Strahlung führt dazu, dass man mit PeV-Photonen nur etwa 10 kpc weit sehen kann. Das entspricht etwa dem Radius unserer Galaxis. Bei niedrigeren Energien ist das diffuse Infrarotfeld der begrenzende Faktor. Ein weiterer Faktor können die Objekte selbst sein, in denen Photonen und Neutrinos erzeugt werden. Falls die Materiesäule zwischen Erzeugungsort und Außenwelt dicker als 50 – 100 g cm^{-2} ist, wechselwirken die meisten Photonen im Innern des Objektes. In vielen Fällen könnten daher Neutrinos nicht nur komplementäre, sondern sogar die idealen Informationsträger sein.

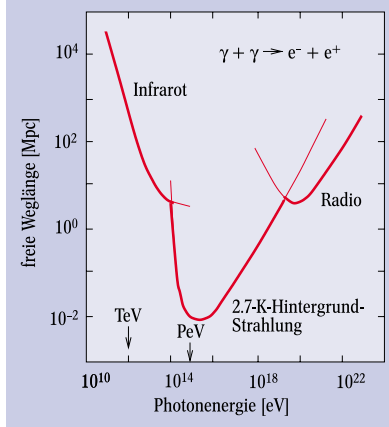


Abb. 2: Die mittlere freie Weglänge von Photonen als Funktion ihrer Energie. Zehn kpc (0,01 Mpc) entspricht dem Radius unserer Galaxis, 100 Mpc der typischen Entfernung zu den nächsten aktiven galaktischen Kernen. Wegen der ungenauen Kenntnis des Infrarothintergrundes unterliegt die Absorption bei Energien unterhalb von 100 TeV großen Unsicherheiten.

geschluckt, wobei die freigesetzte Energie zu einem großen Teil in Stoßwellen umgesetzt wird. Ähnlich bilden sich Stoßwellen in Kernen aktiver Galaxien (Active Galactic Nuclei, AGN), in deren Zentren supermassive Schwarze Löcher Materie ansaugen. Ein Teil der dabei freigesetzten Energie fließt in Jets, die vom Zentrum der Galaxie in den intergalaktischen Raum geschossen und ebenfalls von Stoßwellen durchlaufen werden. Auch „Gamma Ray Bursts“, extrem energiereiche kosmische Blitze, die zwar vor knapp 30 Jahren entdeckt, bis vor etwa zwei Jahren aber nur im keV- und MeV-Bereich nachgewiesen wurden, könnten vielen Modellen zufolge gleichzeitig Neutrinos hoher Energie erzeugen.

Teleskope für hochenergetische Neutrinos

Abbildung 3 zeigt das Nachweisprinzip von Teleskopen für hochenergetische Myon-Neutrinos: Ein Neutrino durchquert die Erde bis in die Nähe des Detektors, wo es mit einem Atomkern des umgebenden Materials – Gestein, Erdreich, Wasser oder Eis – wechselwirkt. Bei etwa zwei Dritteln dieser Ereignisse wird ein Myon erzeugt, das bis zum Detektor weiterfliegen und dort registriert werden kann. Da die Reichweite eines Myons mit seiner Energie wächst – für 400-GeV-Myonen beträgt sie in Wasser etwa einen Kilometer –, lassen sich Myonen aus hochenergetischen Neutrinos auch dann noch detektieren, wenn sie außerhalb des Detektors erzeugt werden. Als Maßstab für die Größe dieser „offenen“ Detektoren wird darum anstelle ihres Volumens häufig ihr Querschnitt (ihre „Fläche“) angegeben [2].

Myonen, die von unten auf den Detektor treffen,

können nur aus Neutrinos entstanden sein, da nur diese in der Lage sind, den Erdball zu durchqueren. Der Erdball wird also als Filter für Neutrinos benutzt. Außer den (noch nicht nachgewiesenen) Neutrinos extraterrestrischen Ursprungs („1“ in Abb. 3) registriert man vorwiegend die Atmosphären-Neutrinos („2“ in Abb. 3), die bei Wechselwirkungen geladener kosmischer Teilchen in der Erdatmosphäre entstehen. Für den Nachweis von Neutrinos ist es wichtig, die von unten kommenden Myonen klar von jenen zu unterscheiden, die durch die Zerfälle von Pionen in der Erdatmosphäre oberhalb des Detektors erzeugt worden sind („3“ in Abb. 3). Das Verhältnis dieser Myonen von oben (Untergrund) zu den von unten kommenden Myonen beträgt für 1 km Wassertiefe 10^6 , für 4 km „nur“ noch etwa 10^4 . Neutrino-teleskope müssen daher in großer Tiefe angeordnet werden.

Der mittlere Winkel zwischen primärem Neutrino und Myon hängt von der Neutrinoenergie ab: $\langle \theta_{\nu\mu} \rangle \approx 1^\circ / \sqrt{E_\nu}$ (TeV). Für Neutrinoenergien oberhalb 1 TeV ist er also kleiner als ein Grad und liegt damit unterhalb der Messgenauigkeit, mit der die meisten Detektoren die Myonrichtung bestimmen können. Zum Vergleich: Der Winkeldurchmesser des Mondes beträgt $0,5^\circ$.

Mit unterirdischen Detektoren ist es bisher nicht gelungen, hochenergetische extraterrestrische Neutrinos zu identifizieren. Die Verteilung von vielen hundert Neutrinos, die mit dem derzeit größten unterirdischen Neutrino-detektor Superkamiokande in Japan (Fläche etwa 1000 m^2) registriert wurden, zeigt in keiner Richtung eine signifikante Anhäufung. Verteilung und Anzahl der Neutrinos sind verträglich mit der Annahme, dass es sich bei ihnen allen um Atmosphären-Neutrinos handelt. Die Flächen, die zum Nachweis extraterrestrischer Neutrinos notwendig erscheinen, liegen jedoch zwischen einigen zehntausend Quadratmetern und einem Quadratkilometer. So große Flächen sind unterirdisch sowohl aus statischen wie aus Kostengründen nicht realisierbar. Der einzige Ausweg besteht darin, die Detektoren tief in offenem Wasser – flüssigem Wasser oder Eis – anzuordnen.

Unterwasserteleskope bestehen aus einer gitterförmigen Anordnung von Photomultipliern, mit deren Hilfe das Cherenkov-Licht von hochenergetischen Myonen registriert wird (Abb. 4). Gemessen werden die Ankunftszeit (mit einer Genauigkeit von 1 – 5 ns) und die Stärke der Lichtsignale, woraus sich Richtung und Energie der Myonen rekonstruieren lassen.

Der wesentliche Parameter eines solchen Detektors ist seine „effektive Fläche“, d. h. die Fläche, mit der er ein bestimmtes Teilchen „sieht“. Da Myonen mit wachsender Energie über Paarerzeugung und Bremsstrahlung vermehrt elektromagnetische Teilchenkaskaden entlang ihrer Bahn erzeugen, produzieren sie auch mehr Licht und sind damit über größere Entfernungen zu sehen. Die effektive Fläche von Unterwassertele-skopen steigt also mit der Myonenergie – im Gegensatz zu Untergrunddetektoren, deren Fläche fixiert ist.

Die effektive Fläche hängt von verschiedenen Faktoren ab. Sie wächst mit der Anzahl der Photomultiplier, mit deren Durchmesser und mit der Durchsichtigkeit des Wassers oder Eises, d. h. mit der Lichtmenge, die von einem Myon gesammelt werden kann. Andererseits fällt sie, wenn man gezwungen ist, die Auswahlkriterien für eindeutige Ereignisse sehr eng zu fassen. Das kann beispielsweise notwendig sein, wenn die Rich-

tungsrekonstruktion ein von oben kommendes Myon gelegentlich als ein von unten kommendes interpretiert und damit die Anzahl der Neutrinoereignisse merklich durch falsch rekonstruierte Ereignisse verfälscht wird – bei einem Oben-zu-Unten-Faktor von 10^4 bis 10^6 ein sehr reales Problem!

Unterwasserdetektoren sind für Energien von einem TeV und darüber optimiert. Dies liegt an dem besseren Signal-zu-Untergrund-Verhältnis bei hohen Energien. Weitere Gründe sind die geringe Winkelabweichung zwischen Myon und Neutrino bei höheren Energien und schließlich die Möglichkeit, die Energie von Myonen oberhalb von einem TeV über ihre Lichtabstrahlung abzuschätzen.

Teleskope in Seen und Meeren

Der Vorreiter für Unterwasserteleskope war das Projekt DUMAND (Deep Underwater Myon and Neutrino Detector), das in 4,5 km Tiefe vor Hawaii verwirklicht werden sollte. 1975 begonnen, wurde es wegen technischer Schwierigkeiten und starkem Zeitverzug 1996 abgebrochen. Zwei weitere Neutrinooteleskope sind gegenwärtig im Mittelmeer in Vorbereitung: NESTOR vor dem Peloponnes und ANTARES vor der französischen Küste. ANTARES wird sich voraussichtlich in den nächsten drei bis vier Jahren zu einem Teleskop mit tausend Photomultipliern und einer Fläche von etwa 30 000 m² entwickeln.

Dass Neutrinooteleskope unter Wasser überhaupt machbar sind, hat ein russisch-deutsches Experiment im sibirischen Baikalsee gezeigt, an dem Deutschland seit 1988 durch das heutige DESY-Teilinstitut in Zeuthen bei Berlin beteiligt ist [3]. Im März/April 1993 gelang es uns, die weltweit erste Anordnung von 36 Photomultipliern an drei Trossen zu installieren und Myonspuren räumlich zu rekonstruieren. Mit diesem Detektor wurden auch die ersten zwei aufwärts laufenden Myonen und damit die ersten Neutrino-kandidaten identifiziert. Seit 1998 umfasst das Baikal-Teleskop 192 Photomultiplier an acht Trossen und registriert durchschnittlich alle zwei bis drei Tage ein Ereignis mit klarer Neutrino-Signatur. Die Energieschwelle liegt bei etwa 10 GeV.

Trotz der verheerenden Lage für die russische Forschung gelang es, die Auswirkungen auf das Baikal-Experiment durch materielle und technische Unterstützung aus Deutschland teilweise abzufangen. Allerdings scheint ein Ausbau des Detektors zu einem wirklich großen Teleskop gegenwärtig schwer vorstellbar. Deshalb hat die DESY-Gruppe ihren Schwerpunkt seit 1995 auf das Projekt AMANDA verlegt [4]. Das Baikal-Teleskop mit seiner vergleichsweise niedrigen Energieschwelle könnte allerdings in Zukunft eine Lücke zwischen den kleinen Untergrundexperimenten und den hundert- bis tausendmal größeren Detektoren im Meer oder im Eis füllen. Darüber hinaus kann das Teleskop als ein Gerät, das in das internationale Programm zur Über-

wachung von Qualität und Zirkulation des Tiefenwassers im Baikalsee eingebunden ist, eine einzigartige Rolle spielen.

AMANDA

AMANDA (Antarctic Myon And Neutrino Detection Array) wird gegenwärtig im drei Kilometer dicken Eisschild am Südpol aufgebaut [5]. Der Südpol empfiehlt sich durch eine Reihe von Eigenschaften als Standort für ein Neutrinooteleskop. Die Amundsen-Scott-Station der USA bietet eine für antarktische Verhältnisse exzellente Infrastruktur. Montagearbeiten lassen sich im antarktischen Sommer (von November bis Februar) durchführen. Aber auch im Winter ist die Station besetzt, sodass das Teleskop ganzjährig betrieben werden kann. Weitere Vorteile sind, dass störende Lichtsignale durch K^{40} -Zerfälle oder Biolumineszenz, wie in Gewässern, fehlen und dass die Photomultiplier, einmal ins Eis eingebracht, ihre Position nicht verändern. Darüber hinaus misst eine Anordnung aus Szintillatorplatten auf dem Eis die Richtung von Luftschauern. (Die Funktionsweise solcher Detektoren ist in dem Artikel von H. Blümer und K.-H. Kampert erklärt.) Die aus diesen Schauern bis zu AMANDA durchdringenden Myonen behalten die Richtung des Schauers bei. Der Richtungsvergleich zwischen Schauern und in AMANDA gemessenen Myonen bietet die einzigartige

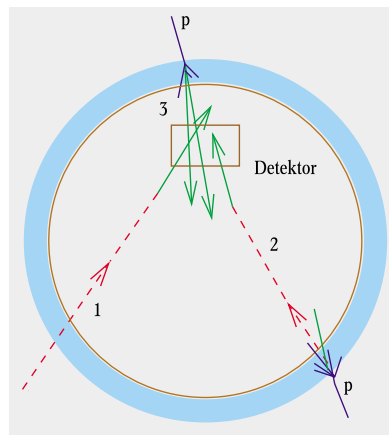
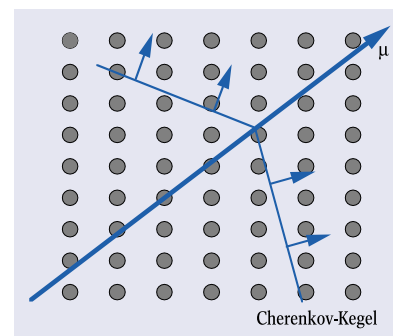


Abb. 4: Funktionsweise eines Unterwasser-Neutrinooteleskops: Gitterförmig aufgehängte Photomultiplier registrieren den 42°-Konus des Cherenkov-Lichts, den geladene relativistische Teilchen in Eis oder Wasser hinter sich herziehen.

Abb. 3: Nachweisprinzip für hochenergetische kosmische Neutrinos. Neutrinos sind durch rot gestrichelte Linien, Myonen durch grüne durchgezogene Linien gekennzeichnet. „1“ – Neutrinos extraterrestrischen Ursprungs; „2“ – Atmosphären-Neutrinos, die bei Wechselwirkungen geladener kosmischer Teilchen (etwa Protonen, „p“) in der Erdatmosphäre (blauer Streifen) entstehen. In den Detektor dringen auch Myonen von oben ein „3“, die durch die Zerfälle von Pionen in der Erdatmosphäre oberhalb des Detektors erzeugt worden sind.



Chance, den Detektor zu eichen. Und schließlich ist die geographische Position komplementär zu allen anderen Projekten: AMANDA beobachtet durch die Erde hindurch den Nordhimmel, die Projekte auf der Nordhalbkugel haben bevorzugt den Südhimmel im Blickfeld. In Bezug auf die optischen Eigenschaften scheinen sich die Vor- und Nachteile von Wasser und Eis in etwa die Waage zu halten (siehe Infokasten „Optische Eigenschaften von Eis und Wasser“).

Der gegenwärtige AMANDA-Detektor wurde in mehreren Etappen aufgebaut. Einem ersten Versuch

mit einem nicht sehr tiefen Detektor (800 – 1000 m, siehe Infokasten) folgte eine Anordnung von 86 Photomultipliern an vier Trossen zwischen 1550 und 2000 m Tiefe. Die Löcher zum Versenken der Trossen werden mit einem 80 °C heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen. Diesen 86 Photomultipliern wurden 1997 weitere 216 an sechs Trossen hinzugefügt. Die im Folgenden gezeigten Resultate stammen von diesem AMANDA-B10 genannten Detektor (zehn Trossen). 1998 folgten drei weitere Trossen, die zwischen 1,15 und 2,3 km Tiefe mit Photomultipliern bestückt sind und mit denen die Eigenschaften des flachen und tiefen Eises in Bezug auf den zukünftigen Kubikkilometer-Detektor untersucht werden. Und schließlich wurden im antarktischen Sommer 1999/2000 sechs weitere Trossen mit jeweils 42 Photomultipliern versenkt.

Abbildung 5 zeigt die gegenwärtige (Januar 2000) Konfiguration des Detektors. Die Acht-Zoll-Photomultiplier vom Typ Hamamatsu 5912-A sind in druckfesten Glaskugeln untergebracht. Sie werden über ein elektrisches und ein optisches Kabel ausgelesen. Die 1998 und 1999/2000 montierten Trossen formen einen Ring um den inneren B10-Detektor. Dass auch bei AMANDAs ausgefeilter Bohr- und Montagetechnologie noch Pannen passieren können, beweist der einzelne String bei 1000 – 1500 m Tiefe. Er sollte eigentlich einen Teil des Ringes um B10 ausmachen. Durch einen Fehler beim Bohren war jedoch das Loch in einer Tiefe von etwa 1500 m um einige Zentimeter zu dünn, und genau hier blieb eine der untersten Glaskugeln der Trosse beim Herunterlassen hängen. Da der String sich weder weiter nach unten bewegen noch wieder heraufziehen ließ, fror er in dieser Tiefe ein. Er ist damit allerdings nicht völlig „verloren“, sondern für begrenzte Aufgaben nutzbar.

Die „AMANDA-II“ genannte Ausbaustufe mit 19 Trossen (insgesamt 676 Photomultiplier) soll eine effek-

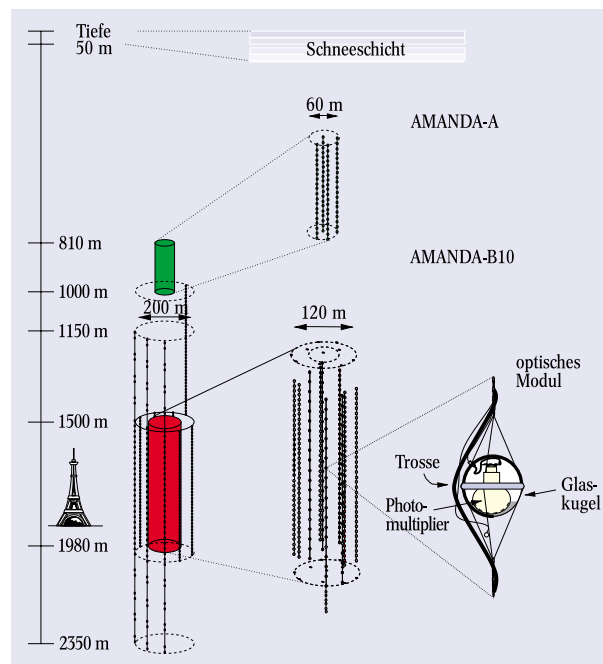


Abb. 5: Die gegenwärtige Konfiguration von AMANDA: In 0,8–1,0 km Tiefe der erste Versuchsdetektor in blasigem Eis, darunter AMANDA-II mit seinem „Kern“, dem B10-Detektor. Ganz rechts das optische Modul – ein druckfestes Glasgehäuse, das den Photomultiplier enthält. Zum Größenvergleich links der Eiffelturm.

tive Fläche von 25 000 – 30 000 m² für 1-TeV-Myonen haben; sie wird damit etwa dreißigmal so sensitiv sein wie die beiden größten unterirdischen Neutrino-Detektoren. Allerdings gibt es die große Fläche bei hohen Energien nicht umsonst: Sie wird erkaufte mit „Blindheit“ bei niedrigen Energien, wie Tabelle 1 zeigt, die verschiedene Kenngrößen von Superkamiokande, dem NT-200-Teleskop im Baikalsee und AMANDA gegenüberstellt.

Optische Eigenschaften von Eis und Wasser

Das Eis an den Polen entsteht aus Schnee und langsam verdichtetem Firneis. Die eingeschlossenen Luftbläschen streuen das Licht und zerstören damit die klare Front des Cherenkov-Kegels. Allerdings diffundiert das Gas der Luftbläschen unter großem Druck langsam aber sicher in die angrenzenden Kristallstrukturen, wobei sich so genannte Klathrate bilden – Kristalle mit einem Brechungsindex, der sich nur um etwa ein Prozent von dem normalen Eises unterscheidet. Damit fällt die Hauptursache für Lichtstreuung fort.

Ursprünglich sagten einige Glaziologen vorher, dass dieser Umwandlungsprozess bei 500 m Tiefe abgeschlossen ist. Darum wurden 1994, damals noch ohne deutsche Beteiligung, achtzig Photomultiplier in 800 bis 1000 m Tiefe eingefroren. Entgegen den Erwartungen war das Eis in diesen Tiefen aber noch nicht blasenfrei; für Distanzen von zwanzig Metern maß man Lichtlaufzeiten von 0,3 – 1,5 μ s anstatt 100 ns ($v_{\text{Licht}} = c/n$, mit $n = 1,33$ für Eis). Die Extrapolation der von 800 m auf 1000 m aber in der Tat langsam abfallenden Streuung sowie der Vergleich mit Bohrkerndaten, die russische Glaziologen zweitausend Kilometer ent-

fernt in der Ostantarktis genommen hatten, ergaben, dass das Eis von 1400 m abwärts praktisch blasenfrei sein musste. Ein neuerlicher Versuch mit 86 Photomultipliern, die im Januar 1996 auf 1,5 bis 2,0 km Tiefe herabgelassen wurden, bestätigte diese Prognose. Die Streueffekte waren etwa fünfzigmal geringer als in dem ersten Detektor. Die verbleibenden Staubpartikel führen allerdings immer noch zu Streueffekten, die jene in Wasser um das Fünf- bis Zehnfache übertreffen – ein klarer Nachteil! Diese Tatsache wird möglicherweise dadurch aufgewogen, dass die Lichtabsorption im Tiefeneis geringer als in Wasser ist. Die Absorptionslänge beträgt etwa 100 m, verglichen mit 40 – 50 m in Ozeanen und 22 m im Baikalsee. Darüber hinaus bleibt das Tiefeneis bis herab zu Wellenlängen von 330 nm gleichbleibend durchsichtig, anders als Wasser, dessen Absorption bereits ab 400 nm stark zunimmt. Das ist insbesondere deshalb wichtig, weil die Intensität von Cherenkov-Licht proportional zu $1/\lambda^2$ ist. Man kann also im Eis einen weit höheren Anteil des ursprünglich erzeugten Cherenkov-Lichts sammeln als in Wasser.

Erste Ergebnisse von AMANDA

Atmosphären-Neutrinos

Das *experimentum crucis* für ein Neutrino-Teleskop ist die klare Separation von aufwärts laufenden Myonen aus Ereignissen mit Atmosphären-Neutrinos. Aus den 10⁹ Ereignissen, die der B10-Detektor 1997 im Laufe von hundertsechzig Tagen registriert hat, sind mit harten Akzeptanzkriterien inzwischen 116 Neutrino-Kandidaten herausgefiltert worden. Abbildung 6 zeigt eine Darstellung eines dieser Ereignisse sowie die um den Nordpol zentrierte Himmelskarte aller 116 Kandidaten. Die Winkelverteilung ist kompatibel mit der Erwartung für Atmosphären-Neutrinos. Da der B10-Detektor relativ „dünn“ ist (Höhe 400 m, Durchmesser aber nur 120 m), ist die Rekonstruktion nahe des Horizonts problematisch. Die rigorosen Akzeptanzkriterien schneiden daher Neutrinoereignisse oberhalb 70° weitestgehend weg. Das wird sich durch den zukünftigen Ausbau in die Breite verbessern.

Quellen extraterrestrischer Neutrinos

In Bezug auf extraterrestrische Neutrinos aus punktförmigen Einzelquellen sind Atmosphären-Neutrinos der Untergrund, über dem man nach örtlichen Anhäufungen sucht. Dabei stört es nicht, wenn diesem auch durch beste Richtungsrekonstruktion nicht zu beseitigenden Untergrund einige falsch zugeordnete Auf-

wärts-Myonen beigemischt sind, solange deren Anzahl die Anzahl der Atmosphären-Neutrinos nicht übersteigt. Darum lassen sich für die Suche nach Punktquellen die Akzeptanzkriterien lockern und damit auch die Akzeptanz für Neutrinoereignisse selbst, d. h. die Empfindlichkeit des Teleskops, steigern.

Unter diesem Gesichtspunkt wurde bei AMANDA eine Suche nach punktförmigen Neutrinoquellen durchgeführt. Signifikante Überschüsse wurden nicht

Magnetische Monopole

Magnetische Einzelladungen – Monopole – wurden 1930 von P. A. Dirac postuliert. In den meisten Varianten der großen vereinheitlichenden Theorien der Teilchenphysik sind sie zwingend [6]. Monopole dürften in großer Zahl in den ersten Sekundenbruchteilen des Urknalls entstanden sein. Ebenso schnell könnten sie aber auch wieder zerfallen sein. Die Frage, ob noch heute magnetische Monopole durch das Universum

fliegen, ist sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Kosmologie von größtem Interesse.

Monopole, die sich schneller als das Licht in Wasser bewegen, senden wie alle anderen Teilchen Cherenkov-Licht aus – allerdings auf Grund ihrer magnetischen Ladung etwa 8300mal so viel wie Myonen! Sie sind darum über einige hundert Meter, bis weit außerhalb des eigentlichen Teleskop-Volumens, erkennbar. BAIKAL wie AMANDA haben nach solchen sehr hellen Spuren gesucht und in beiden Fällen aus der Nichtbeobachtung obere Grenzen für den Monopolfluss abgeleitet. Diese Grenzen sind in Abb. 7 als Funktion der relativen Geschwindigkeit $\beta = v/c$ gezeigt und mit den oberen Grenzen aus unterirdischen Detektoren verglichen. Man sieht, wie AMANDA auf Grund seiner schiefen Größe und der guten Transparenz des Eises bisherige Grenzen schon nach wenigen Monaten Messzeit unterbietet (wenn auch nur für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit).

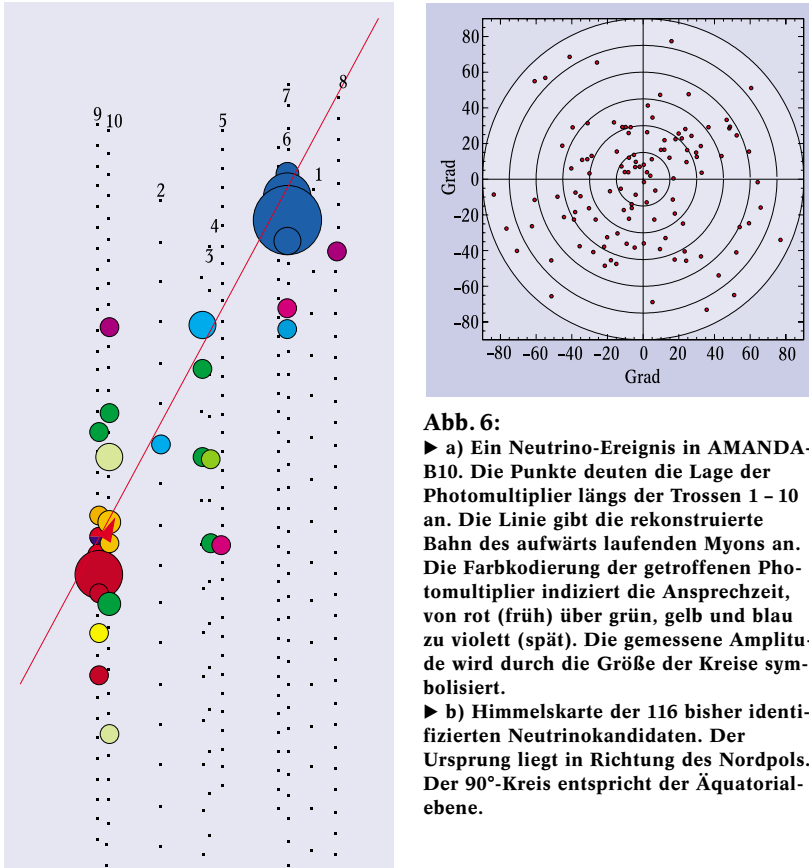


Abb. 6:
 ▶ a) Ein Neutrino-Ereignis in AMANDA-B10. Die Punkte deuten die Lage der Photomultiplier längs der Trossen 1 – 10 an. Die Linie gibt die rekonstruierte Bahn des aufwärts laufenden Myons an. Die Farbkodierung der getroffenen Photomultiplier indiziert die Ansprechzeit, von rot (früh) über grün, gelb und blau zu violett (spät). Die gemessene Amplitude wird durch die Größe der Kreise symbolisiert.
 ▶ b) Himmelskarte der 116 bisher identifizierten Neutrino-Kandidaten. Der Ursprung liegt in Richtung des Nordpols. Der 90°-Kreis entspricht der Äquatorialebene.

gefunden, wodurch die oberen Grenzen für die Flüsse aus solchen Objekten unter jene gedrückt wurden, die mit den kleineren unterirdischen Detektoren über viele Jahre Messzeit erhalten wurden (einige 10^{-9} TeV-Neutrinos pro $\text{cm}^2 \text{s}$ für potenzielle Quellen in AMANDAs Gesichtsfeld). Dass keine Quellen gefunden wurden, verwundert nicht: Selbst optimistischen Modellen zufolge ist der B10-Detektor für den Nachweis dieser Quellen noch zu klein, und eine Entdeckung wäre ein ausgesprochener Glückstreffer!

Engt man die Suche auf kleine Zeitintervalle ein – zum Beispiel auf einige Sekunden vor und nach Gamma Ray Bursts (GRBs) –, so kann man die Kriterien nochmals lockern und die Sensitivität des Detektors weiter steigern. Diese Ausbrüche von keV- und MeV-Strahlung über einige Millisekunden bis hin zu einigen Sekunden gehören immer noch zu den ungeklärten Rätseln der Astrophysik. Nachdem erst seit etwa zwei Jahren auch Begleitsignale von GRBs im optischen und Radiobereich gemessen wurden, würde der Nachweis von Neutrinos die Palette der diskutierten Modelle für diese Ausbrüche erheblich einschränken. Vielleicht sind sogar GRBs für die höchsten Energien der kosmischen Strahlung verantwortlich. Auch in Bezug auf GRBs kann AMANDA allerdings bisher nur obere Grenzen ableiten.

Tabelle 1: Kenngrößen heutiger Neutrinodektoren im Vergleich (PM = Photomultiplier)

Detektor	Anzahl der PM	Energie – schwelle	effektive Fläche für Myonen mit 1 TeV	Anzahl der PM pro m^2
Superkamiokande	11 000	7 MeV	1000 m^2	10
Baikal NT-200	192	10 GeV	2000 m^2	0,1
Amada-B10	300	50 GeV	6000 m^2	0,05

Weitere Ziele von AMANDA

Unterwasser-Neutrinooteleskope sind Mehrzweckinstrumente. Sie werden ebenso für die Suche nach Zerfallsprodukten von Dunkler Materie wie für ozeanologische oder – im Falle von AMANDA – glaziologische Untersuchungen eingesetzt. Die von oben in den Detektor dringenden Myonen geben Aufschluss über unterschiedliche Aspekte der geladenen kosmischen Strahlen. AMANDA kann wegen des Fehlens optischer Störsignale im Eis auch kleine Änderungen der Photomultiplier-Rauschraten registrieren. Eine Supernova-Explosion in unserer Galaxis ginge mit zahlreichen Neutrinos niederer Energie einher, die zu einer mehrere Sekunden dauernden Erhöhung der Rauschraten führen könnte. Obwohl keines dieser MeV-Einzelereig-

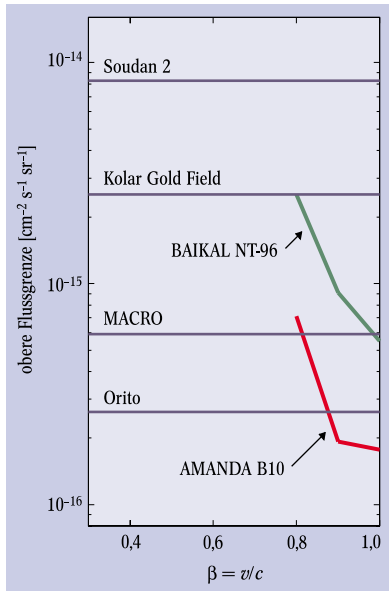


Abb. 7:
Die Grenzen verschiedener Untergrund- und Unterwasser-Detektoren für den kosmischen Fluss magnetischer Monopole.

nungen, die in das neue „Fenster“ der Neutrinoastronomie gesetzt werden, rechtfertigen. Die meisten überraschenden Entdeckungen der Astrophysik – Quasare, Röntgensterne, die kosmische Hintergrundstrahlung, Pulsare oder Gamma Ray Bursts – wurden ja methodisch durch die Inbetriebnahme neuer empfindlicher Nachweisgeräte wie Radiodetektoren oder Röntgensatelliten eingeläutet, die in der Regel ein neues Beobachtungsfenster ins Universum öffneten.

nisse den Gesamtdetektor mit seiner Energieschwelle von 50 GeV triggern würde, bliebe der kurze Sprung in den Rauschraten nicht unbemerkt und würde zu einem Alarmsignal führen. AMANDA ist daher ein Supernova-Monitor, der mit der gegenwärtigen Sensitivität etwas mehr als die Hälfte unserer Galaxis beobachtet.

Ein kubikkilometer-großes Teleskop

Obwohl die Vorhersagen für den Fluss kosmischer Neutrinos stark variieren, sind sich doch die meisten Theoretiker einig, dass ein zukünftiges Neutrino-teleskop eine Fläche von etwa einem Quadratkilometer haben sollte [7]. Das wäre das Tausendfache der Fläche von Superkamiokande, des größten Untergrundteleskops. Ein Neutrino-teleskop dieser Größe könnte – unabhängig von den speziellen Vorhersagen über

schon bekannte Objekte – die Hoffnungen, die in das neue „Fenster“ der Neutrinoastronomie gesetzt werden, rechtfertigen. Die meisten überraschenden Entdeckungen der Astrophysik – Quasare, Röntgensterne, die kosmische Hintergrundstrahlung, Pulsare oder Gamma Ray Bursts – wurden ja methodisch durch die Inbetriebnahme neuer empfindlicher Nachweisgeräte wie Radiodetektoren oder Röntgensatelliten eingeläutet, die in der Regel ein neues Beobachtungsfenster ins Universum öffneten.

Darum soll AMANDA vom Jahre 2002 ab zu einem „ICECUBE“ getauften Teleskop ausgebaut werden, bei dem etwa ein Kubikkilometer Eis mit etwa 5000 Photomultipliern bestückt werden würde. Sowohl in den USA wie in Europa muss dieses 50-Millionen-Dollar-Projekt noch einige Genehmigungshürden nehmen, und vor allen Dingen muss gleichzeitig das Funktionieren von AMANDA-II demonstriert werden. Die USA sind am Ausbau der Südpol-Station zu einem Wissenschaftszentrum interessiert, sodass das Projekt von dieser Seite her durch einen klaren politischen Willen Rückenwind hat. Wenn alles gut geht, wird ICECUBE in seiner vollen Ausbaustufe ab 2008 für etwa zehn Jahre den Neutrinhimmel erforschen. Auch ANTARES hat als Langzeitziel einen Kubikkilometer-Detektor im Auge, wozu zunächst einmal, bis zum Jahr 2003, ein Detektor mit 10^5 m^2 Fläche gebaut werden soll. Im Falle eines weiteren Ausbaus könnten damit Ende des nächsten Jahrzehnts zwei wirklich große Neutrino-teleskope Daten nehmen. ICECUBE würde den Nordhimmel, ANTARES (oder sein Nachfolgeprojekt) den Südhimmel beobachten.

Literatur

- [1] K. Mannheim, *Science* **279**, 684 (1998)
- [2] Ch. Spiering, *Phys. Bl.*, Oktober 1993, S. 871
- [3] I. A. Belolapatikov et al., *Astropart. Phys.* **7**, 263 (1997), V. A. Balkanov et al., *Astropart. Phys.* **12**, 75 (1999)
- [4] Die Internetseite des DESY-Neutrino-gruppe, www.ifh.de/nuastro, stellt Amada und Baikal vor und enthält Links zu anderen Neutrinoexperimenten.
- [5] E. Andres et al., *Astropart. Phys.*, Februar 2000
- [6] H. V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber, *Teilchenastrophysik*, Teubner 1997
- [7] T. K. Gaisser, F. Halzen, T. Stanev, *Phys. Rep.* **258**, 173 (1995)