

Neutrinos - unsichtbare Himmelsboten

Christian Spiering

DESY Zeuthen

Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen – die erstaunlichsten und befremdlichsten Vertreter des Teilchenzoos. Ihre bemerkenswerteste Eigenschaft besteht in der geringen Neigung, mit ihrer Umgebung in irgendeine Wechselwirkung zu treten. Aufgrund dieser Eigenschaft können sie riesige Materieschichten ohne einen Zusammenstoß durchdringen. Von den 60 Milliarden Sonnenneutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde etwa, die von der Sonne kommend auf die Erdoberfläche treffen und dann die Erde durchqueren, stoßen im Mittel kaum ein Dutzend mit einem Atom des Erdinnern zusammen.

Neutrinos wurden 1930 von Wolfgang Pauli zur Erklärung der „fehlenden“ Energie im radioaktiven Beta-Zerfall ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$) postuliert. Dabei steht n für Neutron, p für Proton, e^- für Elektron und $\bar{\nu}_e$ für „Anti-Elektronneutrino“. Bald gelang es, die Eigenschaften der hypothetischen Teilchen zu berechnen. Es stellte sich heraus, daß das Neutrino eher einem Geisterteilchen als einer realen Existenz gleicht, und Pauli bekannte in einem Brief: „Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann.“

Zum Glück irrte er. In den vierziger Jahren entstanden die ersten Kernreaktoren, und sie erzeugten einen so großen Neutrinofluß, daß ein Nachweis in den Bereich der Möglichkeit rückte. 1956 gelang es Frederick Reines und Clyde Cowan, am Savannah River Reaktor in den USA Neutrinos nachzuweisen. Aus dem Fluß von Milliarden und Abermilliarden Neutrinos löste ein knappes Dutzend dieser Teilchen, über die Reaktion $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$, in ihrem Nachweisgerät ein Signal aus.

Frederick Reines erhielt dafür den Nobelpreis für Physik. „Mit dieser Großtat, die ans Unmögliche zu grenzen schien“, heißt es in der Nobelpreis-Begründung, sei es Reines und seinem inzwischen verstorbenen Mitforscher Cowan gelungen, das Neutrino „aus einem Zustand als Phantasie-Gebilde zu befreien und seine Existenz als real existierendes Teilchen zu beweisen“.

Inzwischen wissen wir, daß es drei Neutrino-Sorten gibt: Elektron-Neutrino (ν_e), Myon-Neutrino (ν_μ) und Tau-Neutrino (ν_τ), die den geladenen Schwesterteilchen Elektron, Myon bzw. Tau zugeordnet sind. Neutrinos sind „Fermionen“, d.h. Teilchen mit ungeradzahligem Eigendrehimpuls (Spin). Ihr Spin beträgt $\frac{1}{2}$. Neutrinos spüren weder die starke Kraft, die Protonen und Neutronen in Atomkernen zusammenschweißt, noch die elektromagnetische Kraft. Wenn man einmal von der Schwerkraft absieht, unterliegen sie nur der sog. schwachen Kraft, die u.a. für den radioaktiven Beta-Zerfall zuständig ist, und genau deshalb reagieren sie auch so selten. In direkten Messungen der Neutrino-Massen zeigte sich bisher kein Hinweis auf eine Ruhemasse. Die entsprechenden experimentellen oberen Grenzen sind $M(\nu_e) < 3$ eV, $M(\nu_\mu) < 170$ keV und $M(\nu_\tau) < 24$ MeV (Massen und Energien von Elementarteilchen werden meist in

Elektronenvolt, abgekürzt eV, oder in Vielfachen davon - keV, MeV, GeV - angegeben. Zum Vergleich: die Masse des Elektrons beträgt 511 keV). Allerdings verdichten sich in den letzten Jahren die Hinweise darauf, daß die verschiedenen Neutrinentypen sich ineinander umwandeln können. Solche „Neutrino-Oszillationen“ aber sind nur für massive Neutrinos möglich, deren Massen sich zudem voneinander unterscheiden. Die Experimente legen Massendifferenzen von weit unter einem Zehntel Elektronenvolt nahe.

Was macht das Neutrino so interessant für die Astronomie? Was soll uns ein Teilchen nützen, das nur sporadisch mit irgend etwas in Wechselwirkung tritt? Paradoxerweise ist es gerade die zuletzt erwähnte Eigenschaft, mit der sich das Neutrino als kosmischer Bote empfiehlt. Teilchen, die kaum aufspürbar sind, können nämlich fast ungehindert auch die dicksten Materieschichten durchdringen. Sie erreichen uns von Regionen des Kosmos, aus denen nie ein Lichtstrahl zu uns dringen kann. Sie können uns Kunde vom Innern der Sonne geben, von dort, wo die Kernreaktionen ablaufen, aus denen unser Zentralgestirn seine Energie bezieht. Sie fliegen tausende Lichtjahre durch das kompakte Zentrum unserer Galaxis hindurch. Und sie entweichen sogar aus dem Innern von sogenannten aktiven Galaxien, denjenigen Orten im Universum, an denen es zu den gewaltigsten Energieausbrüchen kommt, die es überhaupt geben mag. Neutrinos sind also ideale kosmische Boten aus Regionen, die uns mittels Licht nicht zugänglich sind.

SN-1987A: Neutrinos von einer Supernova

Vor etwa 180000 Jahren explodierte ein Stern in der großen Magellanschen Wolke, einer Begleitgalaxis unseres eigenen Milchstraßensystems. Der nukleare Brennstoff in seinem Inneren hatte sich erschöpft, und das erkaltende Sterninnere konnte der Eigengravitation des Sterns keinen Widerstand mehr entgegensetzen. Der Stern begann schnell zu kontrahieren, bis schließlich sein Kern schlagartig in sich zusammenstürzte. Bei diesem Kollaps wurden gewaltige Energiemengen freigesetzt und die Schalenregionen des Sterns in einer gigantischen Explosion in den interstellaren Raum geschleudert.

Das Licht dieser Explosion breitete sich in den Raum aus. Als es seinen Weg begann, sollten noch einige zehntausend Jahre bis zum Erscheinen der Neandertaler auf unserer Erde vergehen. Rund 180 000 Jahre benötigte die Lichtwelle, um den intergalaktischen Raum zwischen der großen Magellanschen Wolke und unserer Milchstraße zu durchmessen. Die Ägypter bauten an ihren Pyramiden, als der auf uns gerichtete Teil der Lichtfront in die Milchstraße eindrang. Am 23. Februar 1987, vermutlich gegen 9:30 Greenwichzeit, erreichte sie schließlich die Erde. Einen Tag später bemerkte ein Astronom das immer noch ansteigende Leuchten aus der Magellanschen Wolke: er hatte eine *Supernova* entdeckt!

Supernova-Ausbrüche sind extrem seltene Ereignisse. Nur fünfmal im Verlauf des letzten Jahrtausends konnte ein solcher Vorgang in unserer eigenen Galaxis beobachtet werden – in den Jahren 1006, 1054, 1181, 1572 und 1604. Fast alle anderen Supernova-Explosionen ereigneten sich in Galaxien, von denen uns Dutzende Millionen von Lichtjahren trennen. Erstmals interessierten sich darum nicht nur Astronomen für dieses Naturereignis. Auf Grund der geringen Entfernung der Explosion und mit Hilfe

neuartiger Nachweisgeräte ergab sich nämlich erstmals die Chance, *Neutrinos* als Boten aus dem eigentlichen Kern des kollabierten Sterns zu registrieren.

Kaum daß die Nachricht von der Explosion bekannt geworden war, begannen mehrere Forschergruppen ein intensives Suchprogramm. Diese Gruppen betrieben in tiefen Erzminen oder in Seitenstollen von Autobahntunneln Nachweisgeräte für Neutrinos. Will man nämlich kosmische Neutrinos nachweisen, dann muß sich das Gerät (der *Detektor*) tief unter der Erde befinden, damit die „gewöhnliche“ kosmische Strahlung weitgehend abgeschirmt wird. An der Erdoberfläche, unter dem permanenten Bombardement durch die normale kosmische Strahlung, würde der Nachweis der seltenen Neutrinoereaktionen der Suche nach der Nadel im Heuhaufen gleichen.

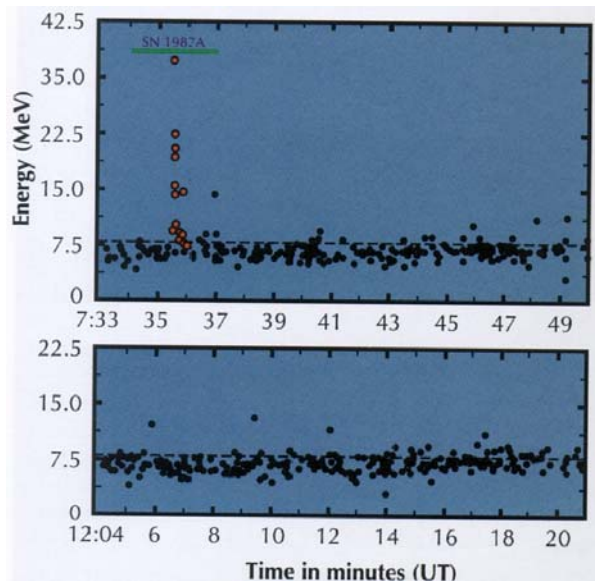


Abb1: Die Supernova 1987A

Links: Das Gebiet der Supernova in der großen Magellanschen Wolke 1984 (oben) und im März 1987, einen Monat nach der Entdeckung (unten). Foto David Marlin/Ray Sharples.

Oben: Reaktionen im Kamioka-Detektor. Jeder Punkt entspricht einer einzelnen Reaktion, die Y-Achse gibt die Energie an, die X-Achse die Zeit. Kurz nach 7:35 sieht man eine hochsignifikante Anhäufung von Reaktionen.

Die Physiker durchforsteten ihre Magnetbänder mit den von Computer erfaßten Meßdaten des 23. Februar nach irgend etwas Ungewöhnlichem. Tatsächlich meldeten zwei Gruppen eindeutige Signale: in einem unterirdischen Wassertank in Japan, dem KAMIOKANDE-Detektor, waren zwölf winzige Lichtblitze registriert worden, die mit

fast hundertprozentiger Wahrscheinlichkeit auf zwölf Reaktionen von Neutrinos aus der Supernova zurückzuführen waren. Das Resultat wurde durch die Beobachtung von acht Reaktionen in einem ähnlichen Wassertank nahe Cleveland, USA, erhärtet. Beide Signale waren am 23. Februar um 7.35 Uhr registriert worden, also etwa zwei Stunden vor Eintreffen des Lichtsignals. Aus Anzahl und Energie der Neutrinos konnte man auf die Temperatur des kollabierten Sternkernes sowie auf die durch Neutrinos freigesetzte Energie schließen. Erstmals konnte man auf diese Weise die Vorstellungen über den Gravitationskollaps bestätigen, die man aus dem Studium von Supernovahüllen und Modellrechnungen gewonnen hatte. Demnach herrschten in SN1987A Temperaturen von 35-45 Milliarden Grad (knapp dreitausend mal soviel wie im Zentrum der Sonne), und die gesamte durch Neutrinos freigesetzte Energie belief sich auf das Billionenfache dessen, was unsere Sonne in einem Jahr ausstrahlt.

1987 darf mit Fug und Recht als das Geburtsjahr der Neutrinoastronomie bezeichnet werden.

Sonnen-Neutrinos

In Innern der Sonne verschmelzen - über eine komplizierte Reaktionskette - Protonen zu Heliumkernen. Bei einigen der Reaktionsschritte werden Elektron-Neutrinos emittiert. Zwischen der bekannten Lichtintensität der Sonne und dem zu erwartenden Fluß solarer Neutrinos besteht ein fester Zusammenhang.

Die solaren Neutrinos lassen sich vereinfacht in drei Gruppen einteilen: Mit etwa 90% dominieren Neutrinos mit Energien unterhalb 422 keV, die sogenannten pp-Neutrinos, die bei der Fusion zweier Protonen entstehen. Der mittlere Energiebereich wird durch den im Vergleich zu pp-Neutrinos etwa zehnmal schwächeren Fluß der ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos beherrscht. Sie werden bei der Umwandlung von Beryllium in Lithium freigesetzt. Mit nur einem Zehntausendstel des Gesamtflusses tragen schließlich die beim Zerfall von Bor entstehenden ${}^8\text{B}$ -Neutrinos bei, deren maximale Energie bei 14 MeV liegt.

Das erste Experiment, dem Ende der sechziger Jahre in den USA der Nachweis solarer Neutrinos gelang, war nur auf die hochenergetischen ${}^8\text{B}$ -Neutrinos sensitiv. Überraschenderweise ergab sich ein etwa dreimal geringerer Neutrinofluß als erwartet. Da jedoch der Fluß der ${}^8\text{B}$ -Neutrinos sehr empfindlich von der Temperatur im Sonneninnern abhängt, lag es nahe, das beobachtete Neutrino Defizit auf eine geringere Temperatur im Sonneninnern zu schieben. Auch das im Zusammenhang mit den Supernova-Neutrinos erwähnte KAMIOKANDE-Experiment ist nur auf ${}^8\text{B}$ -Neutrinos sensitiv und maß knapp die Hälfte des erwarteten Flusses.

Es blieb Experimenten mit einer weit niedrigeren Energieschwelle vorbehalten zu zeigen, daß einfaches „Drehen“ an der Sonnentemperatur nicht die Lösung des Rätsels sein kann. Bei diesen Experimenten wird die verschwindend geringe Rate gemessen, mit der solare Neutrinos Galliumatome (die in riesigen unterirdischen Tanks aufbewahrt werden) in Germaniumatome umwandeln. Die Energieschwelle für diesen Prozeß liegt bei 233 keV, so daß also auch die oben erwähnten dominanten pp-Neutrinos erfaßt werden. Deren Fluß hängt weit schwächer von der Kerntemperatur der Sonne ab als jener der ${}^8\text{B}$ -Neutrinos. Das deutsch-italienische GALLEX-Experiment und das russisch-amerikanische SAGE Experiment – das eine tief unter dem italienischen Gran-

Sasso-Massiv, das andere in einem Bergstollen im Kaukasus – maßen jeweils etwa zwei Drittel des vorhergesagten Flusses. Damit war klar: das Neutrino-Defizit war nicht allein auf eine inkorrekte Beschreibung der Temperatur im Sonneninnern zurückzuführen. Aller Wahrscheinlichkeit liegt des Rätsels Lösung nicht beim Sonnenmodell, sondern bei den Neutrinos selbst. Man nimmt an, daß sich die ursprünglich als Elektron-Neutrino erzeugten Teilchen auf ihrem Weg zur Erde in eine andere Neutrinosorte umwandeln, auf welche die erwähnten Experimente nicht sensitiv sind. Solche „Neutrino-Oszillationen“ sind nur für massive Neutrinos möglich. Darüber hinaus müssen die Neutrinos verschiedener Sorte unterschiedlich schwer sein. Aus den Meßresultaten kann man zwar nicht die Massen selbst, wohl aber die *Massendifferenzen* und die Stärke der „Verwandtschaft“ zwischen den Sorten bestimmen.

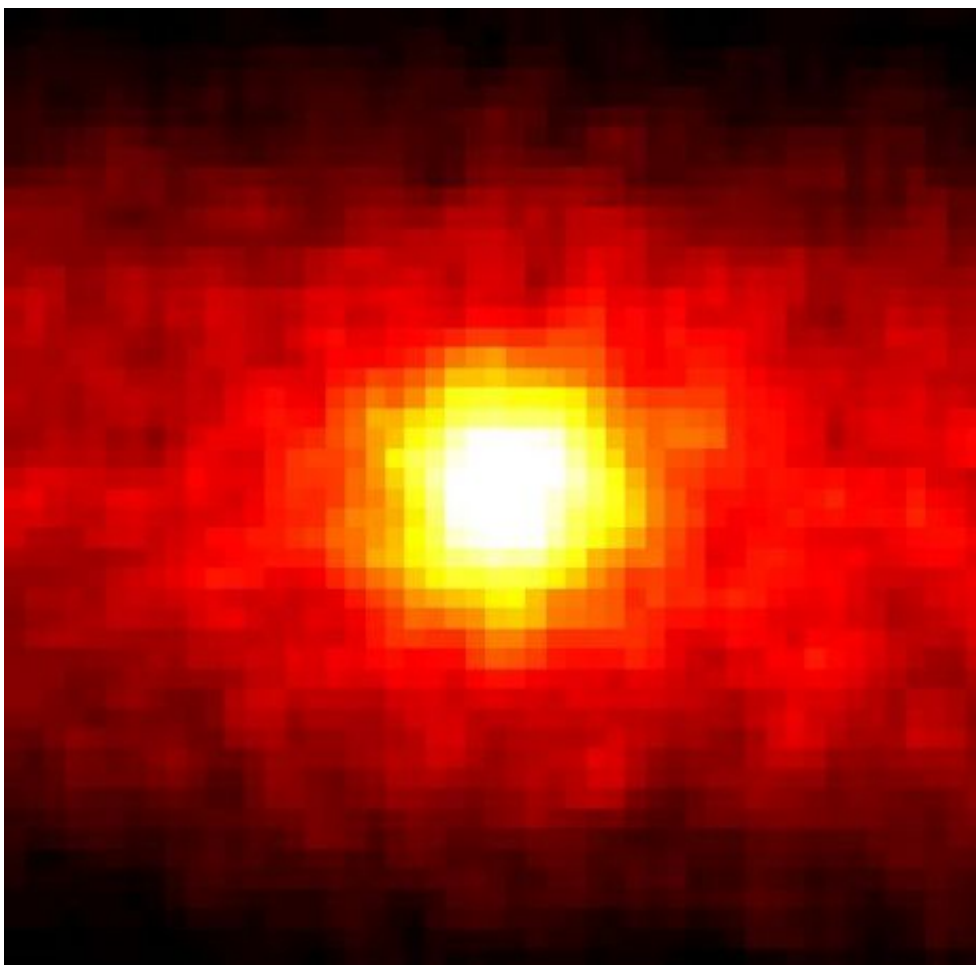


Abb.2: Neutrino-Bild der Sonne, rekonstruiert aus mehreren tausend Sonnenneutrinos, die der japanische Super-KAMIKOANDE-Detektor registriert hat. Dieses Bild der Sonne (deren wahre Ausdehnung von der Erde aus gesehen etwa ein halbes Grad beträgt) ist wegen der begrenzten Winkelauflösung des Detektors über 40-50 Grad verschmiert. Wichtiger als die genaue Richtung sind jedoch Anzahl und Energie der Neutrinos, aus denen sich weitreichende Schlußfolgerungen über Sonne und Neutrinos selbst ziehen lassen.

Unversehens haben sich die Sonnenneutrino-Experimente, die ursprünglich ein vermeintlich bekanntes Teilchen, das Neutrino, zur Untersuchung der Sonne benutzen wollten, zu Experimenten gewandelt, deren Ziel das bessere Verständnis der Neutrinos selbst ist. Um die Details der Oszillations-Hypothese festzulegen, sind allerdings noch weitere Experimente vonnöten. Eines davon, das nicht nur auf Elektron-Neutrinos, sondern auch auf Myon- und Tau-Neutrinos sensitiv ist, hat 1999 in einer kanadischen Nickelmine zu messen begonnen. Das andere, BOREXINO genannt, ist im wesentlichen auf die Neutrinos mittlerer Energie, die ^7Be -Neutrinos, sensitiv. Es wird, unter deutscher Beteiligung, im Gran-Sasso-Tunnel aufgebaut.

Neutrinos aus kosmischen Beschleunigern

Zu den spannendsten Fragen der Astrophysik gehört der Ursprung der kosmischen Strahlung. Seit der Entdeckung, daß die Erde einem ständigen Regen geladener Teilchen ausgesetzt ist, sind 88 Jahre vergangen. Wir wissen inzwischen, daß die kosmische Strahlung vorwiegend aus Protonen, leichten und schweren Kernen besteht. Bemerkenswert ist die schier unglaubliche Energie von einigen dieser Geschosse. Sie liegt etwa zehn Millionen mal höher als die höchste Energie, die Menschen in ihren ringförmigen Teilchenbeschleunigern, wie etwa dem in DESY, erreicht haben! Irgendwo im Kosmos laufen offenbar Prozesse ab, bei denen phantastische Energiemengen freigesetzt werden, und diese natürlichen Beschleuniger, die das Universum in seiner Milliarden Jahre währenden Geschichte hervorgebracht hat, stellen ihre irdischen Verwandten auf schwindelerregende Weise in den Schatten.

Die Frage ist: *Wo* laufen diese Prozesse ab? Und *wie* laufen sie ab, d.h., wie sind die Objekte beschaffen, in denen die Teilchen auf derart hohe Energien gejagt werden? Die Antwort auf diese Frage steht noch aus. Die geladenen kosmischen Teilchen werden nämlich beim Durchfliegen kosmischer Magnetfelder abgelenkt und verlieren damit die Information über ihre ursprüngliche Richtung. Darum wissen zwar, daß es sie gibt, aber wir wissen nicht, woher sie kommen. Eine Ortung der kosmischen Beschleuniger ist nur mit elektrisch neutralen Informationsträgern wie Photonen (Lichtteilchen) oder Neutrinos möglich, die sich geradlinig ausbreiten.

Natürlich gibt es wohlbegründete Vermutungen über die gesuchten Objekte. Wahrscheinlich zählt das Innere sogenannter aktiver Galaxien dazu, deren Zentralbereiche irgendwann einmal zu schwarzen Löchern kollabiert sind. Man geht inzwischen davon aus, daß im Kernbereich jeder Galaxie ein schwarzes Loch sitzt, also auch im Zentrum unserer Milchstraße. Der Unterschied zu den *aktiven* Galaxien, die zumeist aus einer früheren Phase des Universums stammen, liegt in der Masse des schwarzen Lochs. Die Kerne der aktiven Galaxien sind hundert- oder tausendmal schwerer als der Kern unserer eigenen, vergleichsweise ruhigen Galaxis. Wie ein Mahlstrom saugen sie in einem riesigen Strudel Sterne und kosmischen Staub auf. Unvorstellbare Materiemengen „fallen“ auf einer Spiralbahn auf das schwarze Loch zu, um schließlich auf immer darin zu verschwinden. Dabei heizt sich die Materie auf. Die Überhitzung treibt gewaltige Stoßwellen an, die sich durch das heiße Inferno nach

außen fortpflanzen. An den Fronten dieser Wellen werden Teilchen in unzähligen Stößen auf immer höhere Energien beschleunigt, bis sie schließlich irgendwann einmal in die Leere des intergalaktischen Raumes entweichen.

Wir wissen nicht hundertprozentig, ob aktive Galaxien tatsächlich die dominante Quelle der höchstenergetischen kosmischen Strahlung sind. Falls sie es aber sein sollten, dann sind die Neutrinoflüsse von dort wegen der gewaltigen Entfernung sehr gering. Wenn man die Jagd bei den höchsten Energien mit Aussicht auf Erfolg führen will, muß man darum die Neutrinoteleskope hundert- oder tausendmal größer bauen als die Detektoren in Schächten oder Tunnels. Man geht dazu in offenes Wasser oder antarktisches Eis.

Wie fängt man Hochenergie-Neutrinos?

Die gesuchten Neutrinos haben hunderttausend mal höhere Energien, als jene von Sonne und Supernovae. Wenn ein energetisches Neutrino mit einem Atomkern zusammenprallt, verwandelt es sich häufig in ein Myon. Dieses Myon übernimmt den größten Teil der Energie des Neutrinos und rast in die annähernd gleiche Richtung weiter. Wenn man das Myon registriert und seine Richtung bestimmt, dann kennt man also auch die Richtung, aus der das Neutrino gekommen ist. Damit hat man ein Teleskop gebaut - in diesem Falle nicht für Licht sondern für Neutrinos.

Unterirdische Neutrinoteleskope, die nach diesem Prinzip funktionieren, sind schon seit vielen Jahren in Betrieb. Sie haben nach Myonen gesucht, die den Detektor *von unten* kommend durchlaufen. Solche Myonen können nur aus Neutrino-Reaktionen stammen, denn kein anderes Teilchen außer dem Neutrino könnte den ganzen Erdball durchqueren. Tatsächlich hat man auch viele hundert Myonen aus Neutrino-Reaktionen aufgezeichnet. Leider kommen sie nicht bevorzugt aus bestimmten Richtungen, wie man es erwarten würde, wenn sie von extraterrestrischen Quellen stammen, deren Bild am Himmel nur Bruchteile eines Grads überstreicht. Die bis jetzt nachgewiesenen Neutrinos kommen fast gleichmäßig verteilt aus allen Richtungen. Es sind zum größten Teil keine extraterrestrischen Neutrinos, sondern solche, die durch die normale kosmische Strahlung beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre erzeugt worden sind; in diesem Fall auf die Atmosphäre auf der anderen Seite der Erdkugel (denn man schaut ja nur auf Myonen, die von unten kommen). Man nennt diese Neutrinos *atmosphärische Neutrinos*.

Den Grund dafür, daß man „nichts“ sieht, sind, wie gesagt, die gewaltigen Abstände der Quellen. Viel zu selten verfängt sich in einem unterirdischen Detektor von einigen hundert Kubikmetern Volumen eines der seltenen hochenergetischen Neutrinos, als daß man in akzeptablen Zeiten einige Reaktionen sammeln könnte. Deshalb also muß man größere Detektoren bauen, Instrumente, die in keinen Tunnel passen würden. Man geht dazu tief ins Wasser oder ins Eis, dorthin, wo es keine begrenzenden Wände gibt. Wieder versucht man, die Myonen aus den Neutrino-Reaktionen nachzuweisen. Wenn ein Myon durch Wasser oder Eis fliegt, zieht es einen Lichtkegel hinter sich her, vergleichbar mit dem Überschallkegel eines Düsenflugzeugs. Dieses schwache bläuliche Leuchten, nach seinem Entdecker *Cherenkov-Licht* genannt, muß man aufzeichnen.

Unterwasser-Neutrinooteleskope bestehen aus einer Vielzahl von Lichtsensoren, die auch noch winzigste Lichtblitze in elektrische Signale umwandeln können. Man nennt solche Sensoren *Photomultiplier*, zu deutsch Fotoervielfacher. Die Photomultiplier sitzen in druckfesten Glaskugeln, die gitterförmig ein großes Volumen überspannen. Sie registrieren Stärke und Ankunftszeit des Lichtblitzes. Besonders die Zeitdaten, die auf wenige Milliardstel Sekunden genau gemessen werden, sind für die Richtungsbestimmung wichtig. Ein Computer vergleicht die Ankunftszeiten der Lichtblitze an den verschiedenen Photomultipliern und berechnet daraus die Lage des Lichtkegels im Raum. Aus der Lage des Lichtkegels erhält man die Bahn des Myons, und aus dieser die Richtung des Neutrinos.

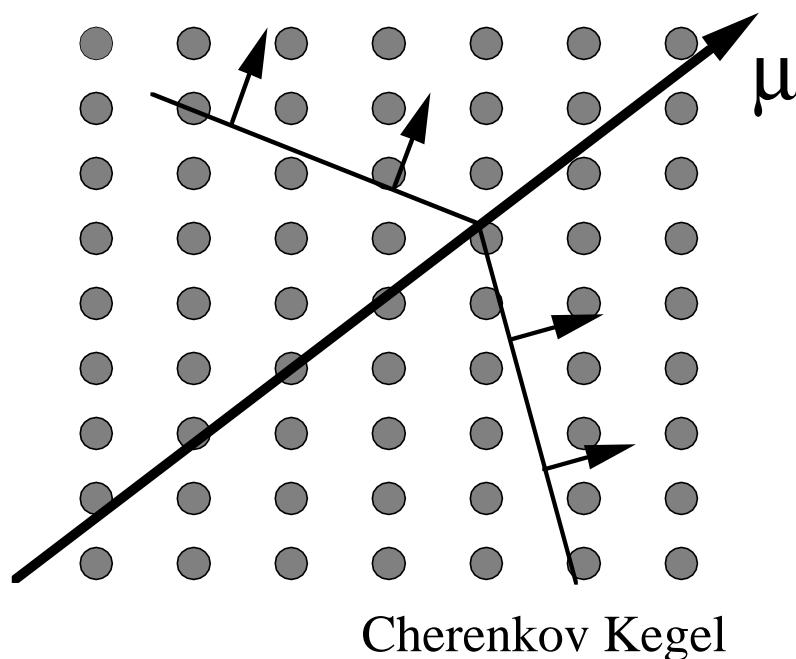


Abb.3: Funktionsweise eines Unterwasser-Neutrinooteleskops.

Gitterförmig aufgehängte Photomultiplier registrieren den Lichtkegel, den geladene Teilchen (hier ein Myon) in Eis oder Wasser hinter sich herziehen.

Nachdem ein vor über zwanzig Jahren begonnenes Projekt in der Südsee vor Hawaii gescheitert war, gelang 1996 einem russisch-deutschen Experiment im sibirischen Baikalsee der Nachweis einer Handvoll Neutrinos und damit der erstmalige Funktionsbeweis für Unterwasserteleskope. Eine große Zahl von Wissenschaftlern arbeitet gegenwärtig daran, ein zehnmal größeres Neutrinooteleskop im Mittelmeer zu installieren. Der bisher größte Detektor dieser Art jedoch ein Teleskop, das nicht Wasser sondern Eis als Nachweismedium benutzt.

AMANDA

AMANDA ist das Akronym für Antarctic Myon And Neutrino Detection Array. Hier werden die Photomultiplier nicht in Wasser herabgelassen, sondern in den 3 km dicken Eisschild, mit dem die Antarktis bedeckt ist. Die dazu notwendigen Löcher werden mit einem 80°C heißen Wasserstrahl in das Eis geschmolzen. AMANDA profitiert von der Amundsen-Scott-Station der USA am geographischen Südpol, die eine für antarktische Verhältnisse exzellente Infrastruktur bietet. Montagearbeiten können im antarktischen Sommer (November bis Februar) durchgeführt werden. Aber auch im Winter ist die Station besetzt, so daß das Teleskop ganzjährig betrieben werden kann. Die geographische Position ist komplementär zu allen anderen Projekten: AMANDA beobachtet durch die Erde hindurch den Nordhimmel, die Projekte auf der Nordhalbkugel haben bevorzugt den Südhimmel im Blickfeld.



Abb.4: 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 Glaskugeln mit einem Photomultiplier. Die Fahne zum „Jahr der Physik“ wird von vier deutschen Teilnehmern gehalten. Die AMANDA-Kollaboration umfaßt US-amerikanische, deutsche, schwedische und belgische Institute. Aus Deutschland sind gegenwärtig DESY-Zeuthen sowie die Universitäten in Mainz und Wuppertal beteiligt.

Die gegenwärtige Konfiguration des Detektors umfaßt 675 Photomultiplier, die an 19 Trossen befestigt und auf immer ins Eis gefroren sind. Diese Anordnung ist etwa 30 mal so sensitiv wie die beiden größten unterirdischen Neutrino-Detektoren. Allerdings gibt es die Sensitivität bei hohen Energien nicht umsonst: sie wird erkauft mit „Blindheit“ bei niedrigen Energien. Sonnenneutrinos etwa könnte AMANDA niemals nachweisen.

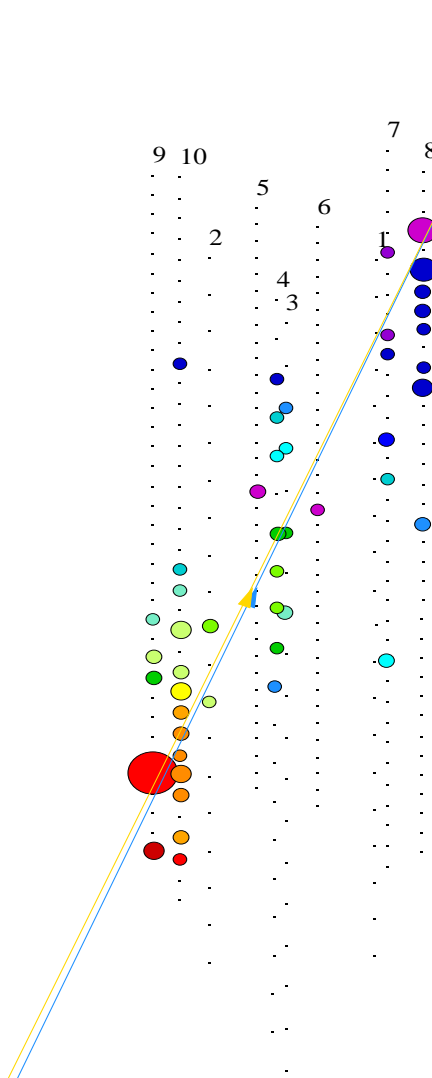
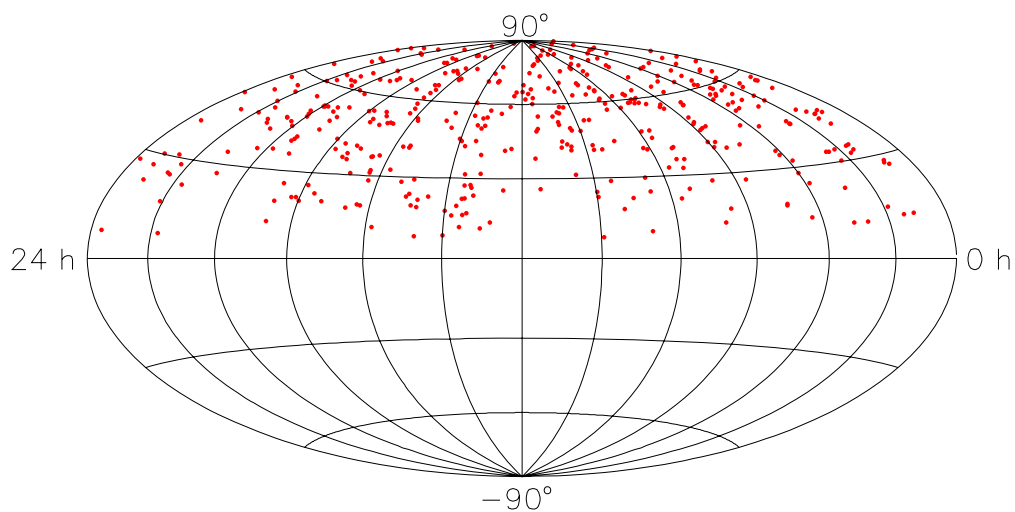


Abb.5: Neutrinos in AMANDA

Links: Ein durch ein Neutrino erzeugtes Myon in AMANDA. Die Punkte deuten die Photomultiplier an. Die diagonale Linie stellt die rekonstruierte Bahn des Myons dar. Die Farbkodierung der getroffenen Photomultiplier indiziert die Ansprechzeit, von rot (früh) über grün, gelb und blau zu violett (spät). Die gemessene Amplitude wird durch Größe der Kreise symbolisiert.

Untens: Himmelskarte der bisher gefundenen 263 Neutrिनोकandidaten. Da AMANDA nur Neutrinos von unten identifizieren kann, liegen alle Ereignisse in der nördlichen Hemisphäre.



Aus etwa einer Milliarde von Spuren, die mit der kaum halb so großen Ausbaustufe des Teleskops im Jahre 1997 registriert wurden, sind inzwischen etwa 263 Neutrino-Kandidaten herausgefiltert worden. Abb.5 zeigt eine Darstellung einer dieser Spuren sowie die Himmelskarte aller Neutrinos.

In bezug auf extraterrestrische Neutrinos aus punktförmigen Einzelquellen sind atmosphärische Neutrinos (und um solche dürfte es sich bei den 263 bisher identifizierten handeln) der Untergrund, über dem man nach örtlichen Anhäufungen sucht. Eine Suche nach punktförmigen Neutrinoquellen lieferte jedoch keinerlei signifikante Überschüsse. Daß keine Quellen gefunden wurden, verwundert nicht: selbst optimistischen Modellen zufolge ist der Detektor für den Nachweis dieser Quellen noch zu klein, und eine Entdeckung wäre ein ausgesprochener Glückstreffer! Darum ist sowohl für die Mittelmeer-Experimente wie auch für AMANDA ein Ausbau auf etwa einen Kubikkilometer Volumen geplant. Das wäre das Tausendfache der Fläche von Super-KAMIOKANDE, des größten unterirdischen Teleskops.

Dunkle Materie und magnetische Monopole

Wir glauben heute aufgrund vielfältiger Befunde, daß der größte Teil des kosmischen Inventars nicht aus jener Materie besteht, aus der auch wir selbst bestehen – also nicht aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Es scheint so, als wenn die leuchtenden Sterne und Galaxien in einem unsichtbaren See „dunkler“ Materie schwimmen. Die dunkle Materie tritt nur schwach mit der normalen Materie in Wechselwirkung. Genaugenommen ist sie darin den Neutrinos ähnlich. Der größte Teil dieses geheimnisvollen Stoffs scheint aber im Vergleich zu Neutrinos sehr schwer zu sein. Darum nennt man die dazugehörigen Teilchen auch WIMPs (Weak Interacting Massive Particles). WIMPs können aufgrund ihrer Masse von der Schwerkraft großer Himmelskörper eingefangen werden und bis in deren Mitte trudeln, dorthin wo die Netto-Schwerkraft praktisch gleich Null ist. Auf diese Weise könnte sich auch im Zentrum der Erde ein dichter Schwarm von WIMPs angesammelt haben, der dort nahezu unbeeinflusst durch die normale Materie als unsichtbare Wolke schwebt. Gelegentlich stoßen zwei WIMPs zusammen und tun das, was ihnen bei den seltenen Reaktionen mit normaler Materie verwehrt ist: sie zerfallen in zwei Bündel normaler Elementarteilchen, darunter auch Neutrinos. Wenn es WIMPs mit den vermuteten Eigenschaften gibt, dann müßte man darum gelegentlich eines der Zerfalls-Neutrinos aus der Richtung des Erdzentrums beobachten.

Bisher hat man trotz sorgfältiger Suche noch keinen Neutrino-Überschuß aus dem Erdzentrum beobachtet. Empfindlicheren Neutrino-Teskokopen als den bisherigen, die in Tunneln und Höhlen installiert waren, könnte der Nachweis vielleicht dennoch gelingen. Auch in der Antarktis suchen wir danach – allerdings bislang ebenso vergeblich wie die unterirdischen Experimente.

Ein anderes exotisches Teilchen, auf das Neutrino-Teleskope reagieren würden, erblickte 1931, ein Jahr nach dem Postulat des Neutrinos, als reine Kopfgeburt das Licht der Welt. Paul Dirac, ein englischer Physiker, hatte sich gefragt, warum die Natur magnetische Ladungen nur als Dipole vorkommen läßt und nicht, wie elektrische Ladungen, auch als Einzelladungen, als „Mono-Pole“. Er fand keinen überzeugenden

physikalischen Grund, der das Vorhandensein von magnetischen Monopolen verboten hätte. Dirac berechnete, wie sich diese Exoten bemerkbar machen müßten. Er stellte fest, daß ein magnetischer Monopol die Materie, die er durchfliegt, fast fünftausend mal stärker ionisieren würde als normale Teilchen. Der Cherenkov-Lichtkegel, den er hinter sich herzieht, wäre sogar achttausend mal stärker als der von Myonen. Das ist der Schlüssel zum Nachweis von Monopolen. Falls ein magnetischer Monopol mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ein Neutrino-Teleskop durchfliegen sollte, dann wäre es, als wenn man eine kleine Glühbirne durch den Detektor katapultiert. Alle Photomultiplier würden ansprechen und eine Signalkaskade auslösen, die jede Verwechslung mit einem weniger exotischen Teilchen ausschloße.

In den siebziger Jahren stellte sich heraus, daß Monopole in großer Zahl während des Urknalls entstanden sein müssen, und daß sie sich nicht nur durch ihre magnetische Einzelladung, sondern auch durch eine gigantische Masse auszeichnen. Ein Monopol dürfte demnach zwischen einer Milliarde und hundert Millionen Milliarden mal so schwer wie ein Proton sein. Die Existenz dieser Dinosaurier der Teilchenwelt hätte die tiefgreifendsten Rückwirkungen auf unser Bild vom Urknall und von den Grundkräften der Natur. Unnötig zu erwähnen, daß wir bisher noch keine Monopole gefunden haben. Immerhin ergeben aber die Meßdaten von AMANDA, daß selbst eine Fläche so groß wie ein Fußballfeld von weniger als einem Monopol pro Jahr getroffen wird. Diese Ausschlußgrenze ist etwa fünfmal schärfer als die aller vorherigen Suchprogramme.

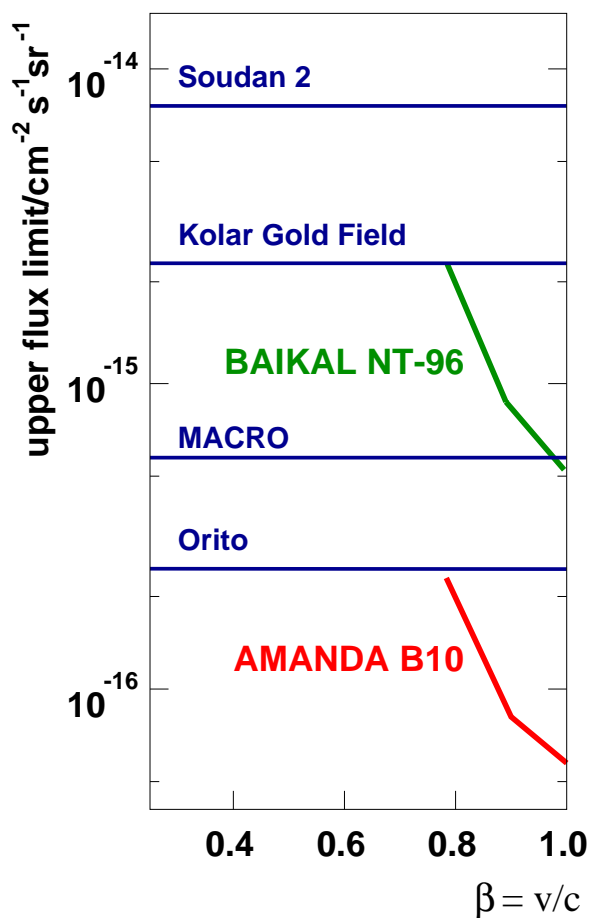


Abb.6: Die Grenzen für den Fluß magnetischer Monopole, aufgetragen gegen deren Geschwindigkeit (relativ zur Lichtgeschwindigkeit). Die flachen Grenzen stammen von unterirdischen Experimenten. BAIKAL und AMANDA sind nur auf Monopole sensitiv, die sich schneller als $\frac{3}{4}$ der Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Das Echo des Urknalls

Neutrinos aus Kernfusionen im Sternenninnern, Neutrinos aus Supernova-Explosionen, Neutrinos aus kosmische Beschleunigern – sie alle können es an Zahl und Alter nicht aufnehmen mit jenen Neutrinos, die im Urknall erzeugt wurden. Diese Neutrinos waren Ingredienzien des heißen Feuerballs, aus dem sich das Universum entwickelte. Etwa eine Sekunde nach dem hypothetischen Zeitpunkt Null hatte sich das Urplasma auf knapp 10 Milliarden Grad abgekühlt hatte und war dabei durch die stetige Expansion soweit ausgedünnt, daß die schwach reagierenden Neutrinos kaum noch mit anderen Teilchen auf Tuchfühlung kamen. Sie hörten daher auf, mit dem Rest der Materie in merklicher Wechselwirkung zu stehen. Man nennt einen solchen Vorgang „Entkopplung“. Jedes einzelne dieser Neutrinos führt von nun an ein Eigenleben und durchweilt, wie das gesamte Universum allmählich immer kälter werdend, den Kosmos. Ganz gleich, was der Rest der Materie vollführt – ob er sich örtlich zu Galaxien oder Sternen verdichtet, ob er Planeten formt oder gar Lebewesen hervorruft – , die Urknall-Neutrinos gehen ungestört durch all das hindurch und tragen nur eine Information mit sich: die Information über den Zustand der Welt bei $t \approx 1s$. Mehrere hundert davon bevölkern jeden Kubikzentimeter des Weltalls. Mit knapp 2 Kelvin liegt ihre Temperatur noch unter den 2.7 Kelvin der kosmischen Mikrowellenstrahlung, die sich etwa 300 000 Jahren nach dem Urknall vom Rest der Materie entkoppelt hat. Leider sinkt die an und für sich schon geringe Reaktionsfreudigkeit der Neutrinos proportional zu ihrer Energie. Für 2-Kelvin-Neutrinos ist sie entmutigend gering. Niemand weiß darum zur Zeit, wie man diese frühesten Zeugen des Kosmos nachweisen kann. Wird das neue Jahrhundert eine Lösung bringen?

Wie immer die Antwort lauten mag: die Neutrino-Physik wird mit großer Wahrscheinlichkeit auch weiterhin eines der spannendsten Kapitel der Wissenschaft bleiben und die nächste Generation von Physikern vor neue Herausforderungen stellen.

Literaturhinweise

Physikalische Blätter 3 (2000), S.37: Schwerpunktartikel zum Thema Astroteilchenphysik

Christian Spiering, Das Neutrino-Teleskop im ewigen Eis. In: Physik in unserer Zeit 2 (2000), S.56.

Christian Spiering, Neutrinojagd im tiefsten See der Erde. In: Humboldts Erben (Hrsg. Gisela Graichen), S.130, Lübbe Verlag 2000.

Christine Sutton, Raumschiff Neutrino – Die Geschichte eines Elementarteilchens. Birkhäuser-Verlag 1994.

Homepage der DESY-Neutrino-Gruppe: www.ifh.de/nuastro/



Christian Spiering, geboren 1948 in Perleberg, studierte Physik an der Humboldt-Universität in Berlin. Von 1974 bis 1978 arbeitete er am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna (UdSSR), danach am Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen bei Berlin (jetzt DESY Zeuthen). Seine Forschungsgebiete sind die Teilchenphysik an Beschleunigern, von 1988 an Neutrino-Astrophysik. Er leitet die Zeuthener AMANDA/BAIKAL-Gruppe und ist gegenwärtig europäischer Sprecher der AMANDA-Kollaboration. Seit 1990 ist er stellvertretender Leiter für Forschung von DESY-Zeuthen. Er ist Autor zahlreicher wissenschaftlicher Veröffentlichungen und des populärwissenschaftlichen Buches „Auf der Suche nach der Urkraft“ .