

- die Stoßfronten, die von den abgestoßenen Hüllen explodierender Supernovae in dem interstellaren Medium gebildet werden;
- Akkretionsscheiben binärer Sternsysteme;
- Aktive Galaktische Kerne (AGN), die Energie in Form von Jets ausstoßen;
- eventuell auch Gammastrahlungsausbrüche (Gamma Ray Bursts).

Ein kompakter Überblick über die Astroteilchenphysik mit hochenergetischen Neutrinos ist in einem Artikel von F. Halzen zu finden<sup>5</sup>

## 4.5.2 Neutrinooteleskope

### Nachweis

Zum Nachweis von Myon-Neutrinos nutzt man die CC-Wechselwirkung mit den Kernen der den Detektor umgebenden Materie (Gestein, Wasser, Eis, ...):

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X \quad (4.56)$$

und weist die Myonen aus diesen Reaktionen nach. Um die Produkte der von der kosmischen Strahlung ausgelösten Luftschauber zu unterdrücken, betrachtet man Myonen, die von unten kommen, bei denen also die Neutrinos durch die Erde gegangen sind. Außerdem versucht man, auch möglichst viel Abschirmung nach oben zu erreichen. Nach 1 km Wassertiefe ist das Verhältnis der von oben kommenden Myonen zu den von unten kommenden noch etwa  $10^6$ .

Der differentielle Wirkungsquerschnitt für Reaktion (4.56) ist:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{2G_F^2 E_\nu}{\pi} \left( \frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2} \right)^2 (xq(x, Q^2) + x\bar{q}(x, Q^2)(1-y)^2). \quad (4.57)$$

Die Variablen  $(x, y, Q^2)$  sind wie in der Lepton-Nukleon-Streuung üblich definiert;  $q, \bar{q}$  sind Quark- und Antiquarkverteilungen im Nukleon. Die Integration ergibt den totalen Wirkungsquerschnitt in Abb. 4.9. Der Wirkungsquerschnitt wächst linear mit der Energie für  $E_\nu < O(1 \text{ TeV})$  und steigt dann etwa wie  $\sigma \sim E^{0.36}$  für  $E_\nu > O(10 \text{ TeV})$  an. Das Abknicken setzt dort ein, wo das maximale  $Q^2$ , das proportional zu  $s$  ist, in die Größenordnung der  $W$ -Masse kommt, weil sich dann die  $Q^2$ -Abhängigkeit des Propagatorterms in (4.57) bemerkbar macht.

In Tabelle 4.2 ist die Wechselwirkungslänge für einige Neutrinoenergien angegeben. Man sieht, dass ab  $1 \text{ EeV} = 10^9 \text{ GeV}$  die Erde für Neutrinos undurchsichtig wird. Bei diesen Energien wird aber auch der Untergrund an atmosphärischen Myonen so klein, dass man die hochenergetischen Myonen auch ohne Erdabschirmung messen kann. Allerdings sind dann die zu erwartenden Flüsse zu gering für die Größe existierender und geplanter Detektoren, so dass man zur Zeit über neue Technologien (zum Beispiel akustische und Radio-Sensoren, Beobachtung der Atmosphäre von Satelliten) zur Instrumentierung größerer Volumina nachdenkt.

Für die Nachweiswahrscheinlichkeit von Neutrinos über die erzeugten Myonen, ist die Reichweite der Myonen, wie in Abb. 4.10 dargestellt, wesentlich (siehe dazu auch die Diskussion der Myon-Reichweite in Abschnitt 3.6 und Abb. 3.17).

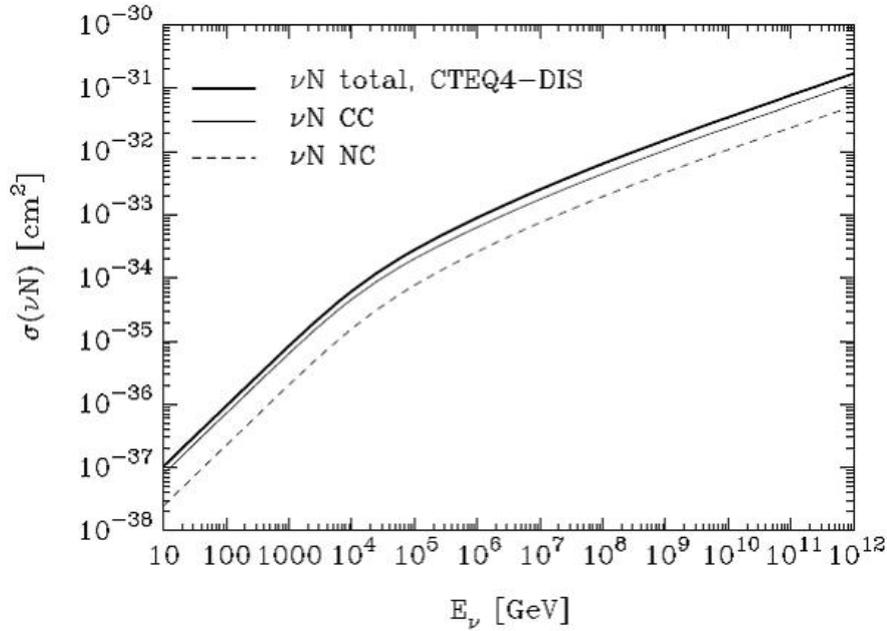


Abbildung 4.9: Totaler Neutrino-Nukleon Wirkungsquerschnitt als Funktion der Neutrinoenergie.

Tabelle 4.2: Neutrino-Nukleon-Wirkungsquerschnitte für einige Neutrinoenergien und die Absorptionslänge in Wasser (für die Erde ist die Absorptionslänge im Mittel um etwa einen Faktor 5.5 kleiner).

$E_\nu$ [GeV]	$10^3$	$10^6$	$10^9$
$\sigma_{tot}(\nu N)$ [ $\text{cm}^2$ ]	$8.4 \cdot 10^{-36}$	$8.9 \cdot 10^{-34}$	$1.5 \cdot 10^{-32}$
$\rho\Lambda$ [km w.e.]	$2.0 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^4$	$1.1 \cdot 10^3$

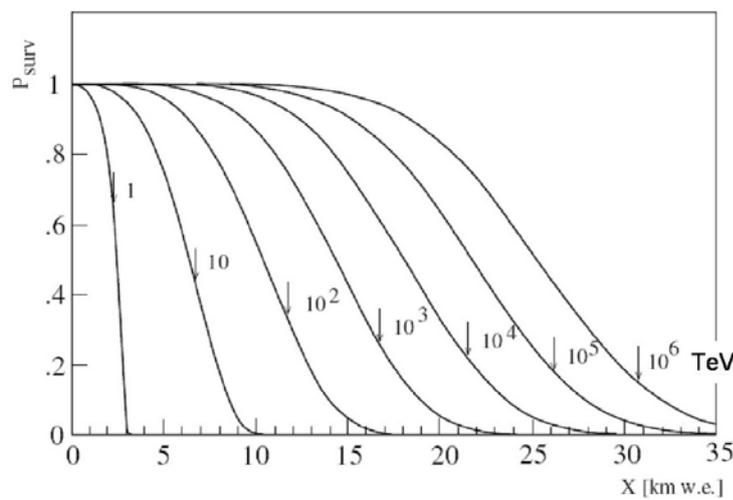


Abbildung 4.10: Überlebenswahrscheinlichkeit von Myonen als Funktion der Eindringtiefe in Wasser. Die Kurve in Abb.3.17 zeigt die entsprechenden mittleren Reichweiten als Funktion der Energie.

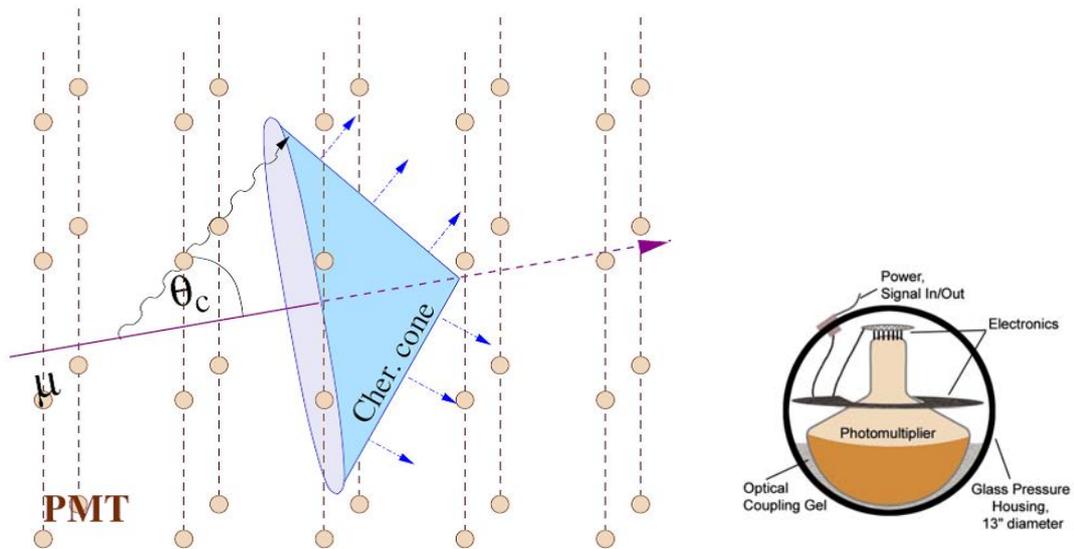


Abbildung 4.11: Typische Anordnung eines Neutrinoskops: ein Muon erzeugt Cherenkov-Licht in Wasser oder Eis, das von Photomultipliern (PMT) registriert wird. Die Ankunftszeiten des Lichtes an den verschiedenen PMT erlaubt die Berechnung der Myonrichtung. Die PMT sind in druckfesten Gehäusen einschließlich der Detektor- und Übertragungselektronik in sogenannten 'Optischen Modulen' (OM) integriert (rechts).

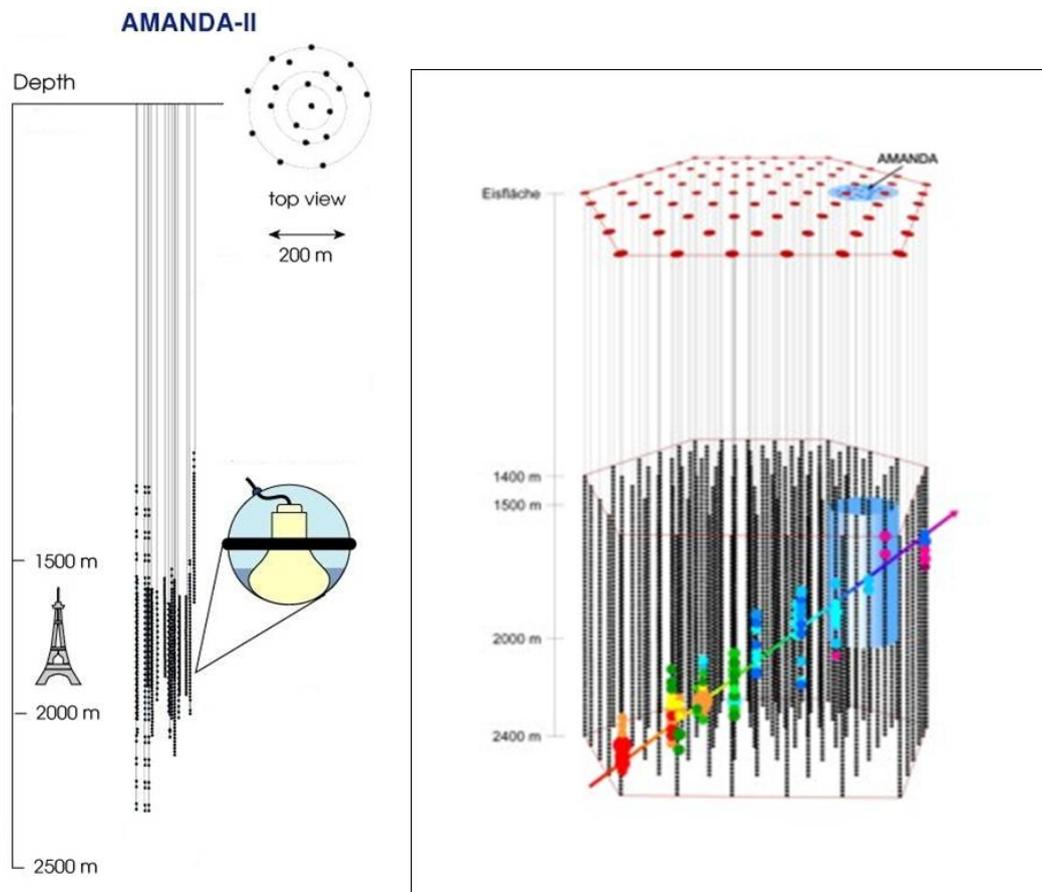


Abbildung 4.12: Der AMANDA-Detektor (links) und der IceCube-Detektor (rechts) mit Größenvergleichen.

Die Myonen werden über ihre Abstrahlung von Cherenkovstrahlung in Wasser oder Eis nachgewiesen (Abb. 4.11). Das Licht wird über Photovervielfacher (PMT) nachgewiesen. Die Messung der Ankunftszeiten des Lichtes mit einer Genauigkeit von wenigen Nanosekunden erlaubt eine Rekonstruktion der Myonrichtung, woraus annähernd die Neutrino-richtung bestimmt werden kann. Der mittlere Winkel des Myons zu dem primären Neutrino in (4.56) wird mit wachsender Energie kleiner entsprechend:

$$\langle \theta_{\nu\mu} \rangle \approx \frac{1^\circ}{\sqrt{E_\nu/\text{TeV}}} \quad (4.58)$$

Dieser Winkel liegt in einer ähnlicher Größenordnung wie die erreichbare Winkelauflösung der Detektoren.

## Experimente

Das DUMAND-Projekt war der erste Versuch, ein großvolumiges Neutrino-Teleskop nach dem eben beschriebenen Prinzip in Wasser (Pazifik vor Hawaii) zu realisieren. Dieses Projekt hat die (vor allem mit dem Salzwasser zusammenhängenden) Probleme nicht meistern können und wurde offiziell nach etwa 20 Jahren 1996 eingestellt. Das erste funktionsfähige Teleskop wurde dann auch in Süßwasser realisiert: im Baikalsee wurden 1993 erstmalig Daten genommen.

Der Durchbruch gelang mit dem AMANDA-Experiment, das eine Tiefe zwischen etwa 1500 m und 2000 m im antarktischen Kompakteis installiert wurde (Abb. 4.12 links). Mit der letzten Ausbaustufe AMANDA II werden seit 2000 Daten genommen. Das AMANDA-Teleskop war als Prototyp sehr erfolgreich. Allerdings war schon von Anfang an klar, dass erst ein mindestens 1 km<sup>3</sup> großer Detektor genügend Sensitivität auf die zu erwartenden Flüsse, insbesondere von Punktquellen, haben wird. IceCube ist ein solcher Detektor, der zur Zeit in der Antarktis realisiert wird (Abb. 4.12 rechts).

Es gibt drei Projekte (ANTARES, NEMO und NESTOR) für Neutrino-Teleskope im Mittelmeer von ähnlicher Größe wie AMANDA, die dann auch die südliche Hemisphäre (mit dem galaktischen Zentrum) beobachten könnten. Leider sind die Projekte etwas verzögert. Insgesamt wirkt eine Meeresumgebung mit Biolumineszenz, Wellenbewegung und aggressivem Salzwasser offensichtlich viel größere Probleme auf, als Detektorinstallation und -betrieb im Eis. ANTARES plant, ab 2007 Daten zu nehmen. Allerdings ist in der Zwischenzeit eigentlich bereits klar, dass die nächste Stufe, ein km<sup>3</sup>-Detektor notwendig ist. Eine europäische Studie dazu hat unter dem Namen KM3NET begonnen<sup>6</sup>.

## Ergebnisse

**Atmosphärische Neutrinos:** Für Beobachtung von HE-Neutrinos, die durch die Erde gehen, stellen die atmosphärischen Neutrinos den wesentlichen Untergrund dar. Allerdings werden für die Flüsse von Neutrinos mit kosmischem Ursprung, sowohl diffuse Flüsse als auch Flüsse von Punktquellen, weniger steile Energiespektren

<sup>5</sup>F. Halzen, 'Astroparticle physics with high energy neutrinos: from AMANDA to IceCube', Eur. Phys. J. C 46, 669687 (2006)

<sup>6</sup><http://www.km3net.org>

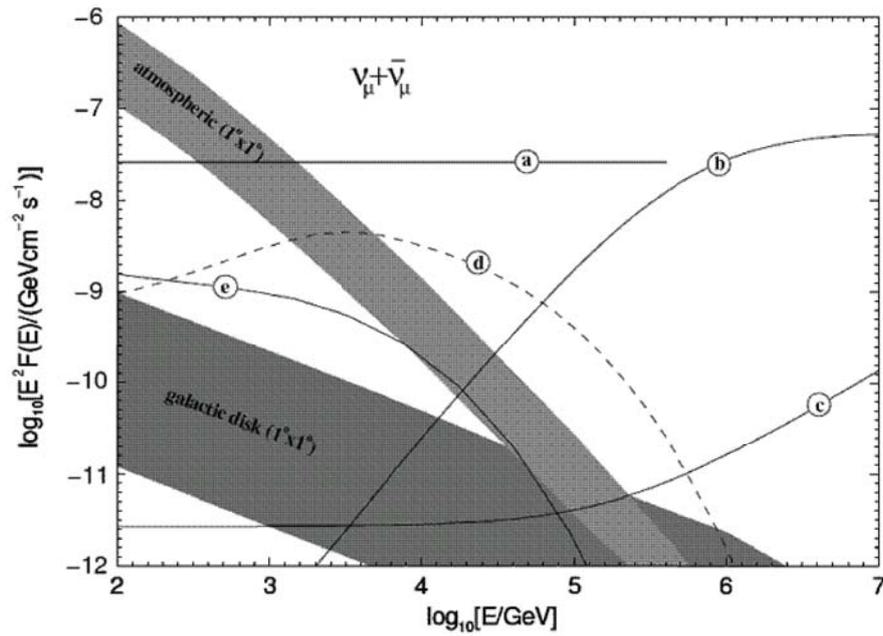


Abbildung 4.13: Vorhergesagte Neutrinoemissionen als Funktion der Energie verglichen mit dem Spektrum atmosphärischer Neutrinos (schattiertes Band): a)-c) Verschiedene Vorhersagen für AGN 3C273, d) Neutrinoemission vom Krebsnebel, e) Neutrinoemission vom SN-Rest Cassiopeia A. Das flachere der schattierten Bänder stellt die Vorhersage für Neutrinos aus Wechselwirkungen von Kosmischer Strahlung in der galaktischen Scheibe dar.

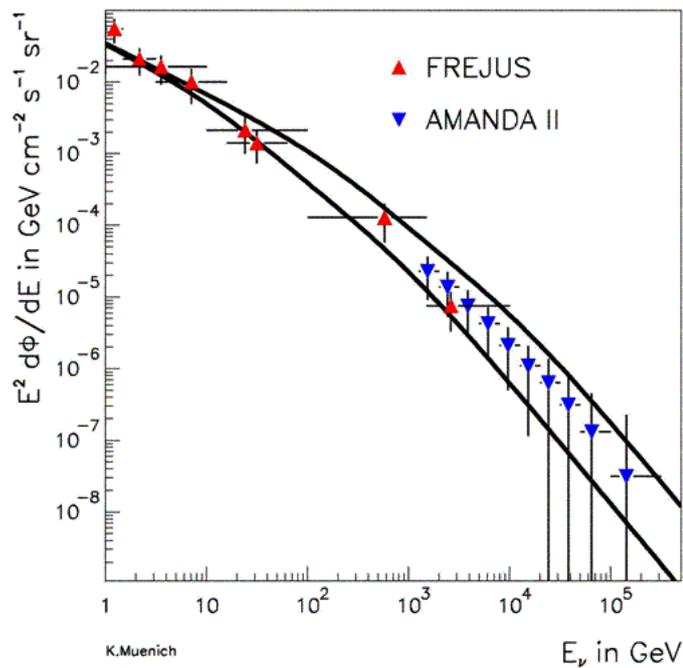


Abbildung 4.14: Gemessener Fluss atmosphärischer Neutrinos.

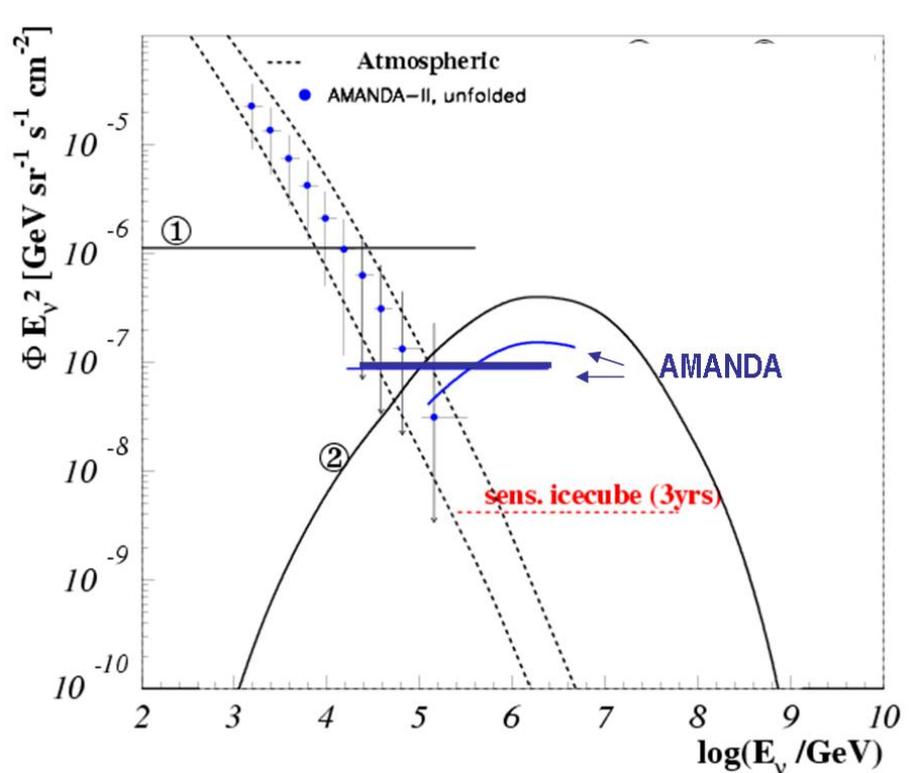


Abbildung 4.15: Grenzen für diffusen Neutrinofluss von AMANDA, verglichen mit dem gemessenen Fluss atmosphärischer Neutrinos und mit zwei speziellen Modellen, die durch die AMANDA-Messung ausgeschlossen werden.

vorausgesagt (Abb. 4.13). Das bedeutet, dass Signale mit wachsender Energie untergrundfreier werden. AMANDA hat als ein wichtiges Ergebnis das Spektrum der atmosphärischen Neutrinos bis 300 TeV vermessen und verifiziert, dass das Spektrum von den benutzten Simulationen reproduziert wird (Abb. 4.14).

**Diffuser Neutrinofluss:** Hochenergetische Neutrinos mit kosmischem Ursprung sind bisher nicht gemessen worden (bei niedrigen Energien Neutrinos von der Supernova-Explosion SN1987a). Grenzen wurden auf diffuse Flüsse gegeben, zum Beispiel für ein  $E^{-2}$ -Spektrum (Abb. 4.15):

$$E^2 \cdot \Phi < 0.8 \cdot 10^{-6} \text{ GeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (4.59)$$

**Punktquellen:** Die Punktquellensuche, der wichtigste Punkt im Forschungsprogramm der HE-Neutrinoexperimente, hat bisher auch nur zu oberen Flussgrenzen geführt. Abbildung 4.16 zeigt eine Karte des nördlichen Himmels mit eingezeichneten Kandidaten für Punktquellen. Eine Analyse mit Suchfenstern, die der apparativen Winkelauflösung entsprechen, hat keine signifikanten Anhäufungen ergeben. Alle Kandidaten sind statistisch mit atmosphärischen Neutrinos verträglich. Zudem wurde gezielt nach Quellen, die von TeV-Gammateleskopen gesehen wurden, gesucht. Auch dabei ist bei keiner Quelle eine signifikante Anhäufung festgestellt worden.

Eine Möglichkeit die statistische Signifikanz der Punktquellensuche zu erhöhen, ist die Analyse von zeitlichen Korrelationen von Neutrinoereignissen. Insbesondere

wäre die Anhäufung von Neutrinosignalen von einer Quelle in einem Zeitfenster, in dem mit anderen Methoden (zum Beispiel Gamma- oder Röntgenstrahlung) eine Überhöhung der Intensität von dieser Quelle beobachtet wurde (zum Beispiel als 'Gamma-Flare' wie in Abb. 4.17) eine mögliche Bestätigung für die Beobachtung kosmischer Neutrinos.

**Exotische Neutrinoquellen:** Weitere Ergebnisse betreffen zum Beispiel obere Grenzen für magnetische Monopole und Wimp-Annihilation.

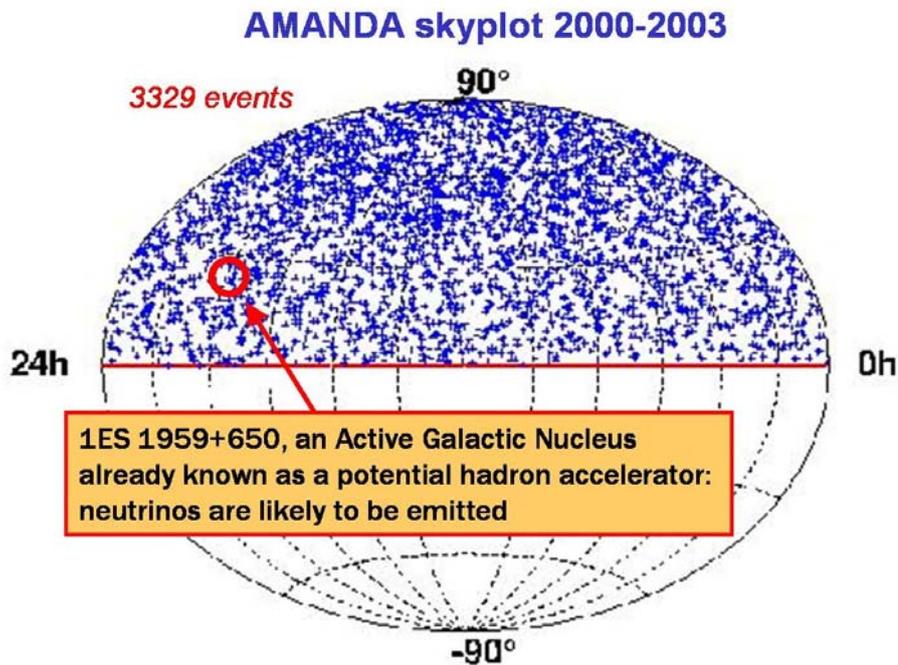


Abbildung 4.16: ‘Skyplot’ von Kandidaten für kosmische Neutrinosignale (AMANDA 2000-2003)

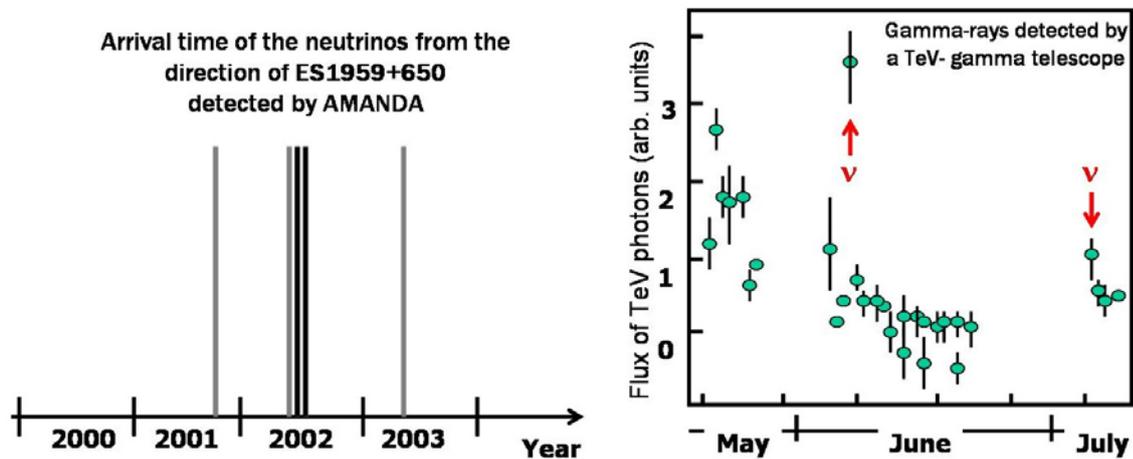


Abbildung 4.17: Links ist die zeitliche Verteilung von Neutrinosignalen in einem räumlichen Fenster um die variable Gamma-Quelle 1ES 1959+650 gezeigt. Zwei Ereignisse (dunkle Striche) fallen in ein enges Intervall um den Zeitpunkt, zu dem ein Aufleuchten dieser Quelle (Flare) in TeV-Gammas beobachtet wurde (rechts).