

Moderne Methoden der beobachtenden Astronomie (Teil 4)

Die **Neutrinoastronomie** als relativ junger Zweig der Astronomie hat sich mittlerweile zu einem etablierten und wertvollen Beobachtungsfenster der Astronomen entwickelt. Bei Neutrinos¹ handelt es sich um Elementarteilchen, die elektrisch neutral sind und eine sehr geringe Masse haben. Es gibt drei Arten (oder Generationen) von Neutrinos (Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos) sowie die entsprechenden Antimaterieteilchen (s.a.^{2,3}). Im Gegensatz zu vielen anderen Elementarteilchen reagieren Neutrinos nur über die schwache Wechselwirkung (z.B. mit äußerst geringer Reichweite bei radioaktiven Zerfallsprozessen) und extrem selten über die Gravitation mit anderer Materie. Dadurch können Neutrinos nahezu alles durchdringen, z.B. die Erdkugel oder ganze Sterne, wobei es nur selten zu Wechselwirkungen kommt und ein Nachweis dementsprechend sehr schwierig ist. Neutrinos entstehen in großer Zahl bei Kernreaktionen, u.a. bei Supernovae, im Sonneninneren, im Erdkern, in Kernreaktoren oder in der Erdatmosphäre (Reaktionen mit der kosmischen Strahlung).

Die vorstehenden Aussagen lassen die Nutzung von Neutrinos als Informationsträger in der beobachtenden Astronomie als nicht sehr erfolgreich erscheinen. Dennoch kann man sich die extrem selten auftretenden Wechselwirkungen genau für diesen Zweck nutzbar machen und dank der speziellen Eigenschaften der Neutrinos zu neuen Erkenntnissen kommen, die auf anderen Wegen nicht erreichbar sind⁴. Falls ein Neutrino mal auf ein anderes Teilchen trifft, wird dabei ein neues Elementarteilchen, ein Myon, erzeugt, das in derselben Richtung weiterfliegt wie das Neutrino. Seine Flugbahn kann man vermessen, weil es sich in Medien (nicht im Vakuum) im allgemeinen schneller als das Licht bewegt. Das ist kein Widerspruch zur Relativitätstheorie, weil entsprechende Messanlagen kein Vakuum enthalten, sondern z.B. mit Wasser oder Eis gefüllt sind. Darin breitet sich das Licht langsamer als im Vakuum aus (z.B. Lichtgeschwindigkeit im Wasser 225.000 km/s), während extrem leichte Teilchen nahezu Vakuumlichtgeschwindigkeit (höchst mögliche Geschwindigkeit → 300.000 km/s) erreichen können. Mit Überlichtgeschwindigkeit fliegende Myonen verhalten sich ähnlich Düsenjägern mit Überschallgeschwindigkeit, nur, dass anstelle des Überschallknalls ein Überlichtblitz auftritt. Nach dieser sogenannten Tscherenkow-Strahlung, die dem Myon als Tscherenkow-Lichtkegel (in Analogie zum Überschallkegel) folgt, halten die Neutrino-Detektoren Ausschau. Um die Flugrichtung der Myonen bzw. Neutrinos zu bestimmen, wird eine Vielzahl von Detektoren in dreidimensionaler Anordnung zur Erfassung der Tscherenkow-Strahlung eingesetzt. Wegen der nur selten auftretenden Wechselwirkungen müssen die Messanlagen ein sehr großes Volumen aufweisen, um zu statistisch verwertbaren Ergebnissen zu kommen. Da in der Neutrinoastronomie vor allem die Strahlung aus dem All von Interesse ist und aus der Atmosphäre stammende Teilchen im Allgemeinen nur stören würden, werden in den meisten Fällen nur Myonen berücksichtigt, die von unten kommen, d.h. die gesamte Erde wird als eine Art Filter benutzt. Die Differenz der Geschwindigkeit von Neutrinos gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit ist so gering, dass sie nur äußerst schwer mit der erforderlichen Genauigkeit zu bestimmen ist. Je geringer diese Differenz ist, umso stärker wirken relativistische Effekte und umso energiereicher sind die Neutrinos. In den letzten Jahren wurden wiederholt extrem energiereiche Neutrinos nachgewiesen, die bei kosmischen Prozessen entstehen wie sie auf der Erde und im Sonnensystem nicht vorkommen. So wurde z.B. 1987 bei einem von einer 160.000 Lichtjahre entfernten Supernova stammendem Neutrino eine Abweichung der Geschwindigkeit von der Vakuumlichtgeschwindigkeit erst in der neunten Stelle nach dem Komma (in m/sec) ermittelt. Die genaue Zuordnung des Ereignisortes konnte durch parallele optische Beobachtungen erfolgen.

Ein wichtiges Einsatzgebiet der Neutrinoastronomie ist die Suche nach sogenannten WIMPs („**W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles“, also „schwach wechselwirkende, massereiche Teilchen“), die zu den heißen Kandidaten für die bislang hypothetische Dunkle Materie zählen, welche der Wissenschaft noch immer so viele Rätsel aufgibt. Weitere Forschungsfelder sind z.B. die Untersuchung von Prozessen im Sonneninneren, die Aufspürung solcher Urknall-Exoten wie magnetischer Monopole oder die Verbesserung unseres Verständnisses zum Ablauf von Supernovae und Gamma Ray Bursts (gigantische

Strahlenexplosionen in den Zentren von Galaxien). Dabei wird der in dieser Hinsicht große Vorteil der Durchdringungsfähigkeit der Neutrinos für Staub- und Gaswolken sowie größerer Objekte genutzt.

Nachfolgend sind einige Beispiele derzeit betriebener, im Bau befindlicher bzw. geplanter Neutrino-Teleskope aufgeführt.

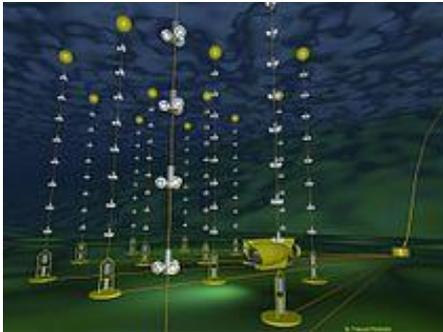


Bild 1 Antares Neutrino-Teleskop (schematisch)⁵

Die von einem Konsortium europäischer Staaten errichtete und betriebene Anlage **Antares**⁵ („Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch“, „Neutrinoastronomie und Meeresforschung“) ist seit 2008 vollständig in Betrieb. Sie befindet sich im Mittelmeer vor der südfranzösischen Küste. Der Antares-Detektor bedeckt auf dem Meeresgrund eine Fläche von 10 ha und umfasst ein Volumen von rund 1 km³. Die optischen Detektorelemente sind an 450 m langen senkrechten Ketten am Meeresboden verankert, der dort rund 2.400 m tief ist. Bisherige Ergebnisse betreffen u.a. neue Erkenntnisse zur Neutrino-Oszillation (Umwandlungsverhalten der o.g. drei Neutrino-Generationen untereinander), die Entstehung und Eigenschaften atmosphärischer Neutrinos

und die Paarvernichtung (gegenseitige Vernichtung von Teilchen und Antiteilchen bei ihrem Aufeinandertreffen unter Abgabe von Energie) von WIMPs in der Sonne.



Bild 2 IceCube Neutrino-Observatorium⁶

Das Hochenergie-Neutrino-Observatorium **IceCube**⁶ („Eis-Würfel“) ist Teil der US-amerikanischen Amundsen-Scott-Südpolstation in der Antarktis. Die Anlage ist seit 2010 in Betrieb und Nachfolger der Vorgängerversion AMANDA, die von 1996 bis 2009 an gleicher Stelle betrieben wurde. IceCube ist das derzeit größte Neutrino-Observatorium der Welt. Es verfügt über ein Nachweisvolumen von 1 km³ Eis und 5.160 Sensoren in Tiefen zwischen 1.450 und 2.450 m. Auswertungen erfolgen in Zusammenarbeit mit Weltraumteleskopen zur eindeutigen Zuordnung gemessener Ereignisse. Pro Jahr gibt es rund 100.000 Neutrino-Detektionen. Gravierende wissenschaftliche Beobachtungen in den letzten Jahren waren z.B.

Blazare (Ausbrüche von aktiven galaktischen Kernen) und TDEs („Tidal Disruption Events“). Unter letzteren versteht man das Zerreißen eines Sterns unter dem Gezeiteneinfluss eines Schwarzen Lochs. Die nahe Begegnung eines Sterns mit einem supermassereichen Schwarzen Loch im Kern einer Galaxie führt dazu, dass ein Teil der Materie des Sterns sein Gravitationsfeld verlässt und eine Akkretionsscheibe um das Schwarze Loch bildet, wodurch sich ein ruhiger galaktischer Kern wieder in einen aktiven Kern umwandelt.

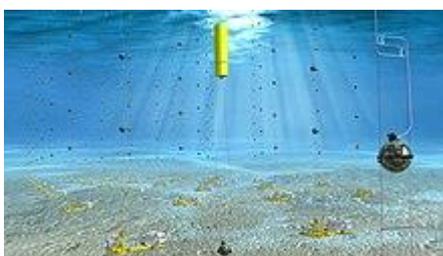


Bild 3 Am Meeresboden verankertes Neutrino-Teleskop KM3NeT (künstlerische Darstellung)⁷

KM3NeT⁷ (der Name leitet sich ab von „Kubikkilometer-Neutrino-Teleskop“) ist ein unterseeisches Großinstrument zur Detektion von Neutrinos kosmischer Herkunft. Das von einem europäischen Konsortium geführte Projekt befindet sich seit Ende 2015 im Bau. In der Endstufe soll es ein instrumentiertes Volumen von etwa 5 km³ haben, das über drei Orte im Mittelmeer verteilt ist (vor den Küsten von Frankreich, Italien und Griechenland). Die Detektoren werden in etwa 12.000 druckfesten Glaskugeln untergebracht, welche an etwa 600 am Meeresboden verankerten Strängen befestigt sind. Das Teleskop soll das Gegenstück auf der Nordhalbkugel zu IceCube am Südpol werden. Von seinem Standort im Mittelmeer aus

kann das neue Observatorium rund 87 Prozent des Himmels erfassen, darunter auch das galaktische Zentrum und den größten Teil der Milchstraße. Ein Hauptziel besteht in der Untersuchung

physikalischer Prozesse im Zentrum unserer Galaxie. Seit 2021 hat die Anlage den Teilbetrieb aufgenommen.

Trident⁸ („Tropical Deep-Sea Neutrino Telescope“, also „Tropisches Tiefsee-Neutrino-Teleskop“) soll der weltgrößte Neutrino-Detektor werden. Damit wird China ein eigenes Unterwasserteleskop auf den Weg bringen, das Icecube in Größe und Detektionserfolg um einiges übertreffen soll. Sein auswertbares Volumen soll rund 7,5 km³ umfassen. Gegenüber Icecube soll es eine 10.000 Mal höhere Leistungsfähigkeit haben. Trident wird in ca. 3,5 km Tiefe im südchinesischen Meer versenkt werden. Durch die Äquatornähe soll sich die Häufigkeit potenzieller Neutrino-Detektionen erhöhen. Das Teleskop soll u.a. Raum-Zeit-Symmetrien testen, nach Quantengravitation suchen und indirekt dunkle Materie aufspüren. Der Testbetrieb ist ab 2026 und die volle Funktionstüchtigkeit ab 2030 geplant.

Noch weitergehende Pläne betreffen **IceCube-Gen2**⁹, das von einem internationalen Team mit starker deutscher Beteiligung realisiert und genutzt werden soll. Das Projekt soll 2032 als zweite Generation des IceCube-Teleskops an den Start gehen. Das Detektionsvolumen wird 8 km³ betragen. Geplant ist der Einsatz neuer Sensoren und die Anwendung besserer Kalibrations-Methoden sowie künstlicher Intelligenz. Dadurch sollen kosmische Neutrinos besser von solchen aus der Erdatmosphäre unterschieden werden können. Bei der zweiten Icecube-Generation werden künftig eine Million Neutrino-Detektionen pro Jahr erwartet.

Quellen

1	https://de.wikipedia.org/wiki/Neutrino#Astrophysik
2	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2021_03.pdf
3	https://astrowis.de/wp-content/uploads/Newsletter_2021_04.pdf
4	http://kworkquark.desy.de/lexikon/lexikon.neutrino teleskope/2/index.html
5	https://de.wikipedia.org/wiki/Antares_(Neutrino teleskop)
6	https://de.wikipedia.org/wiki/IceCube
7	https://de.wikipedia.org/wiki/KM3NeT
8	https://t3n.de/news/unterwasserteleskop-neutrinos-kosmische-strahlung-1583800/
9	https://www.icecube-gen2.de/projekt/index_ger.html

Fortsetzung folgt ...