

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 49 (1991)
Heft: 244

Artikel: Ein neues Fenster ins Universum : Hochenergie-Neutrino-Astronomie
Autor: Grieder, Peter K.F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-898935>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ein neues Fenster ins Universum:

Hochenergie-Neutrino-Astronomie

PETER K. F. GRIEDER

Neutrino-Astronomie unterscheidet sich von der herkömmlichen Astronomie im wesentlichen dadurch, dass an Stelle der elektromagnetischen Strahlung (Licht, Radiowellen, etc.), die zu Beobachtungs- und Messzwecken benützt wird, eine andere Strahlungsart aus dem Weltall zur Anwendung gelangt, eben die Neutrinostrahlung. Dieser Schritt von der optischen oder allgemein der elektromagnetischen Strahlung zur Neutrinostrahlung ist von ganz besonderer Bedeutung, da Neutrinos grundlegend anderer Natur sind. Dadurch öffnet Neutrino-Astronomie dem Astrophysiker sozusagen eine neue Welt.

Die vier fundamentalen Kräfte.

Sämtliche Prozesse, die sich in unserer Welt abspielen, werden durch die Gesetzmässigkeiten der vier fundamentalen Kräfte beherrscht. Die Physik klassifiziert sie wie folgt: Die starke Kraft (1), die elektromagnetische Kraft (10^{-2}), die schwache Kraft (10^{-15}) und die Gravitationskraft (10^{-40}); die Zahlen in Klammern sind ein Mass für die relative Stärke ihrer Wirkung. Nur eine sehr beschränkte Zahl aller Vorgänge ist dem Beobachter direkt zugänglich.

Unsere heutigen Kenntnisse in der Astronomie und Astrophysik stammen weitgehend aus optischen und anderen Beobachtungen, die als Informationsträger elektromagnetische Wellen benützen. Mit Ausnahme gewisser Angaben, die uns die KOSMISCHE STRAHLUNG liefert, sind bisher Signaturen der andern Kräfte aus dem All nur indirekt oder gar nicht nachweisbar¹

Es ist somit evident, welches Potential einer mit einer andern Kraft gekoppelten Strahlung aus dem All, beispielsweise der oben erwähnten Neutrinostrahlung, zukommen würde, wenn ihre Existenz nachgewiesen und sie zur Erforschung des Universums verwendet werden könnte.

Das neue Fenster: NEUTRINOS.

Es gibt drei verschiedene Arten von Neutrinos: Uns interessieren in erster Linie die Müon-Neutrinos (ν_μ) und ihre Antiteilchen ($\bar{\nu}_\mu$). Diese entstehen hauptsächlich beim Zerfall der nur kurzlebenden, geladenen Pionen (Pi-Mesonen, π^+ , π^-), die ihrerseits in energiereichen hadronischen Kollisionen produziert werden.

Solche Kollisionen ereignen sich beispielsweise beim Eintritt der kosmischen Strahlung in die Erdatmosphäre und mit Sicherheit viel häufiger in den uns weitgehend unbekanntesten Regionen des Universums, wo die kosmische Strahlung auf ihre gigantischen Energien beschleunigt wird. Energiereiche EXTRATERRESTRISCHE Müon-Neutrinos und -Antineutrinos sind deshalb über ihre "Eltern", die geladenen Pionen, eindeutige Zeugen für die Existenz hochenergetischer hadronischer Prozesse im Universum und lokalisieren diese richtungsmässig. Man könnte so z.B. die Quellen der kosmischen Strahlung orten und Aufschluss über die darin ablaufenden Prozesse erhalten.

Eine ganz besondere Eigenschaft der Neutrinos ist ihr enormes Durchdringungsvermögen. So können beispielsweise Neutrinos einen Bleipanzer von der Dicke der Distanz Erde - Mond fast ungehindert durchlaufen. Demzufolge können wir mit einem Neutrinoteleskop nicht nur bekannte Objekte in einem "andern Licht" studieren, sondern neue, bisher unbekannt aktive Objekte in unserer eigenen wie auch in fernen Galaxien, die, hinter dichten Staub- und Gaswolken versteckt, über keine andern Informationsträger zugänglich sind, entdecken und untersuchen.

Da sich aber Neutrinos kaum manifestieren, ist ihr Nachweis entsprechend schwierig. Eine Möglichkeit, Müon-Neutrinos (und -Antineutrinos) nachzuweisen, besteht über eine ihrer seltenen Reaktionen mit einem Nukleon in einem Atomkern. Dabei verschwindet das Neutrino, und ein Müon entsteht. Bei hoher Neutrinoenergie fliegt das Müon in derselben Richtung weiter wie das einlaufende Neutrino. Da Müonen direkt messbar sind, kann ein Detektor, der in der Lage ist, die Bahn und Bewegungsrichtung der Müonen zu bestimmen, im Prinzip als Neutrinoteleskop verwendet werden. Wegen den genannten Eigenschaften der Neutrinos muss aber ein riesiges Detektorvolumen zur Verfügung stehen, damit eine sinnvolle Zählrate erreicht werden kann.

Im Verlauf der letzten fünfundzwanzig Jahre wurden viele Versuche unternommen, extraterrestrische Neutrinoquellen zu finden. Die Detektoren wurden alle in tiefgelegenen Minen und Tunnels installiert, um eine gute Abschirmung gegen Störstrahlung, vorwiegend gegen die sehr zahlreich durch die kosmische Strahlung in der Atmosphäre erzeugten Müonen, zu erreichen.

Zur Gewährleistung, dass es sich bei einem Müon auch um ein Produkt aus einer Neutrinoreaktion handelt, und nicht um ein atmosphärisches Müon, wird als zusätzliches Selektionskriterium verlangt, dass sich das Müon von unten nach oben bewegt, also sozusagen aus der Erde herauskommt. Da nur Neutrinos die Erde durchdringen können, ist dies eine eindeutige Signatur. Dieses Kriterium unterscheidet aber nicht zwischen extraterrestrischen Neutrinos und den in der Atmosphäre unserer Antipoden erzeugten terrestrischen Neutrinos; letztere bilden den nicht eliminierbaren Untergrund. Nur die Winkelverteilung der Ankunftsrichtung zusammen mit einer statistischen Analyse kann diese Frage beantworten.

Mit Ausnahme der Suche nach den sehr niederenergetischen solaren Elektron-Neutrinos und der Registrierung des zufälligen, extrem intensiven "Neutrinoexplosions" der Supernova SN-1987a verliefen bisher alle Experimente negativ. Die Versuche scheiterten an der ungenügenden Grösse der Detektoren und der zu hohen Untergrundzählrate. Die Suche nach extraterrestrischen Neutrinoquellen schien aussichtslos, denn der Grösse unterirdischer Detektoren sind praktische Grenzen gesetzt. Doch bereits in den frühen sechziger Jahren wurde der Vorschlag gemacht, die Wassermassen des Ozeans selbst als Müon-, beziehungsweise als Neutrinoedetektor, zu verwenden. Man muss dazu lediglich empfindliche optische Sensoren mit hoher Zeitaufösung in grosser Tiefe installieren, denn Teilchen, die elektrische Ladung haben und sich im

¹ Das Einzelereignis der Supernova SN-1987a sowie solare Neutrinos sind im Rahmen unserer Betrachtungen irrelevant.

Wasser (oder in irgend einem refraktiven Medium) schneller als Licht fortbewegen², wie z.B. energiereiche Müonen, erzeugen entlang ihrer Bahn eine nachweisbare Lichtspur (Cherenkov-Strahlung).

Diese Lichtspur wird beim Durchgang durch ein definiertes Detektorvolumen, in dem Sensoren in Form einer dreidimensionalen Matrix angeordnet sind, von diesen als sequenzielle Folge von Lichtimpulsen registriert. Aus der zeitlichen Folge der Impulse und der bekannten Matrixkonfiguration lässt sich die Bahn eines Teilchens rekonstruieren. Unter Einbezug der Impulshöhen lassen sich zusätzliche physikalische Eigenschaften bestimmen und eventuelle Ambiguitäten eliminieren. Der Abstand zwischen den relativ kleinen Sensoren kann von der Grössenordnung der Abschwächungslänge des Lichtes in der Tiefsee sein (bis ca. 50 m). Damit kann mit einer verhältnismässig kleinen Zahl von Sensoren ein riesiges Volumen erfasst werden.

Die über den Sensoren liegenden Wassermassen dienen der Abschirmung gegen die unerwünschten Komponenten der kosmischen Strahlung und absorbieren das störende Tageslicht vollkommen. Die Atomkerne des Sauerstoffs und Wasserstoffs des Wassers sind die Reaktionspartner der Neutrinos, auf die gelegentlich ein Neutrino beim Durchschneiden des Ozeans auftrifft und eine Reaktion auslöst, aus der ein Müon herausgeschossen wird. Letzteres dient dem Nachweis der Reaktion und der Energie- und Richtungsbestimmung des einlaufenden Neutrinos oder Antineutrinos.

Das DUMAND Projekt.

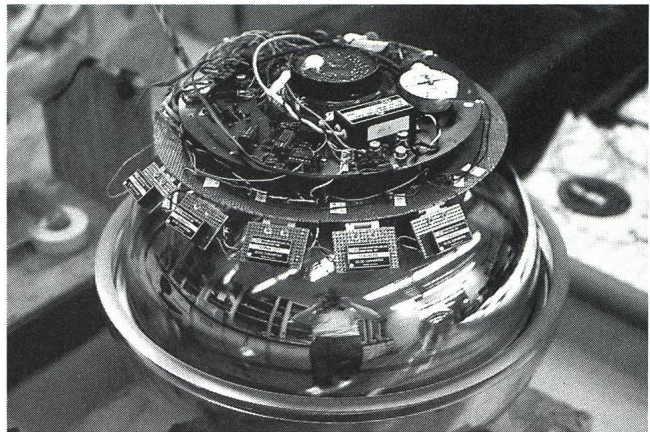
Vor mehr als zehn Jahren haben sich auf Initiative des Entdeckers des Neutrinos (Prof. Fred Reines, University of California, Irvine) eine Gruppe von Physikern aus verschiedenen Ländern, die sich seit langem intensiv mit dem Problem der hochenergetischen kosmischen Strahlung befassten, unter ihnen auch der Autor, zu einer internationalen Kollaboration³ zusammengeschlossen, um den für Astronomie und Astrophysik so potentiellen Informationsträger Neutrino mit Hilfe eines gigantischen "Tiefsee Müon- und Neutrino-Detektors" ("Deep Underwater Muon And Neutrino Detector" - abgekürzt DUMAND) zur Erforschung des Universums einzusetzen.

Nach jahrelangen Vorarbeiten konnte im November 1987 ein internationales Team von Wissenschaftlern der Universitäten von Hawaii, Tokyo und Bern und der Vanderbilt Universität ein erstes Prototypensystem mit sieben optischen Sensormodulen und den notwendigen Hilfsgeräten von einem Spezialschiff in Meerestiefen bis 4000 m absenken und auf seine Funktionstüchtigkeit prüfen.

Das wissenschaftliche Ziel dieses Unternehmens war, die Trajektorien der aus der Atmosphäre stammenden und ins Meer einschliessenden energiereichen Müonen der kosmischen Strahlung (und nicht die der sehr seltenen Müonen aus Neutrino-Reaktionen) in der genannten Tiefe zu rekonstruieren.

² Die Lichtgeschwindigkeit im Wasser beträgt nur rund 3/4 der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

³ Die Kollaboration umfasst heute die folgenden Universitäten: Bern, Boston, Hawaii, Kiel, Kinki, Okayama, Tohoku, Tokyo, Vanderbilt, Washington (Seattle), Wisconsin; ferner RWTH Aachen, California Institute of Technology, Japanisches Kernforschungszentrum KEK, Scripps Institute of Oceanography, sowie als assoziierte Mitglieder verschiedene amerikanische Institutionen.



Figur 1:
Optisches Sensormodul mit der oberen Glashalbkugel entfernt. Auf dem kugelförmigen Photomultiplier liegt die Betriebs- und Steuerelektronik. Die optische Kopplungsmasse zwischen Glaskugel und Multiplier ist erkennbar.

Die Erfüllung dieses Kriteriums liefert den vollumfänglichen Beweis für die Realisierbarkeit des DUMAND Prinzips als Neutrino-Teleskop.

Jedes Sensormodul war mit seinem "elektronischen Auge", einem grossflächigen "Photomultiplier", und der erforderlichen Elektronik in einer bis 6000 m Tiefe druckresistenten, aus zwei Halbkugeln bestehenden, 13 mm dicken Glaskugel von knapp 50 cm Durchmesser untergebracht (Figur 1). Die Module konnten zur Einstellung der Betriebsart Befehlssignale von einem Computer in der auf dem Schiff installierten Messstation empfangen, die der Stromzufuhr überlagert wurden und in umgekehrter Richtung Angaben über ihre Betriebsverhältnisse zurückmelden. Die wissenschaftlichen Daten wurden ihrerseits in jedem Modul in unsichtbare, langwellige Lichtimpulse umgesetzt und über Glasfasern dem Steuersystem am Ende der Sensorenkette und von dort an die Messstation auf dem Schiff weitergeleitet.

Das Experiment erwies sich als voller Erfolg. Es bewies Kritikern des Vorhabens auf eindrückliche und unanfechtbare Weise die Realisierbarkeit der brillanten Idee, den Ozean selbst als aktives wie passives Medium (Neutrino-Reaktionspartner, Cherenkov-Strahler, Abschirmung für Licht und Strahlung) zur Messung hochenergetischer extraterrestrischer Neutrinos zu verwenden.

Mit dem Prototypenexperiment wurde das wissenschaftliche wie auch das instrumentelle Fundament für das Grossprojekt DUMAND gelegt.

Keine andere technisch durchführbare Lösung gestattet, ein System vergleichbarer Grösse zu realisieren, und nur ein Grosssystem kann die erforderlichen Daten liefern. DUMAND öffnet nicht nur ein neues Fenster ins Universum, sondern initialisiert damit für Astronomie und Astrophysik eine wichtige NEUE EPOCHE, die der HOCHENERGIE-NEUTRINO-ASTRONOMIE und -NEUTRINO-ASTROPHYSIK.

Die wissenschaftliche Ausbeute unseres Experiments hat neben der vollumfänglichen Beantwortung sämtlicher Fragen der ersten Priorität zusätzlich eine Vielzahl interdisziplinärer Messdaten, einschliesslich neuester Daten über die Tiefseemwelt, gebracht.

Das DUMAND Oktagon.

Es ist vorgesehen, in der nun folgenden Projektstufe 2 ein wie in Figur 2 dargestelltes Detektorsystem in Form eines riesigen Oktagon mit 216 Detektormodulen innerhalb von drei Jahren zu bauen und im extrem klaren Wasser des Pazifiks, 30 km westlich der Küste von Kona (Hawaii), im Ozean, in einer Tiefe von 4500 m zu verankern, und von Kona aus in Betrieb zu nehmen.

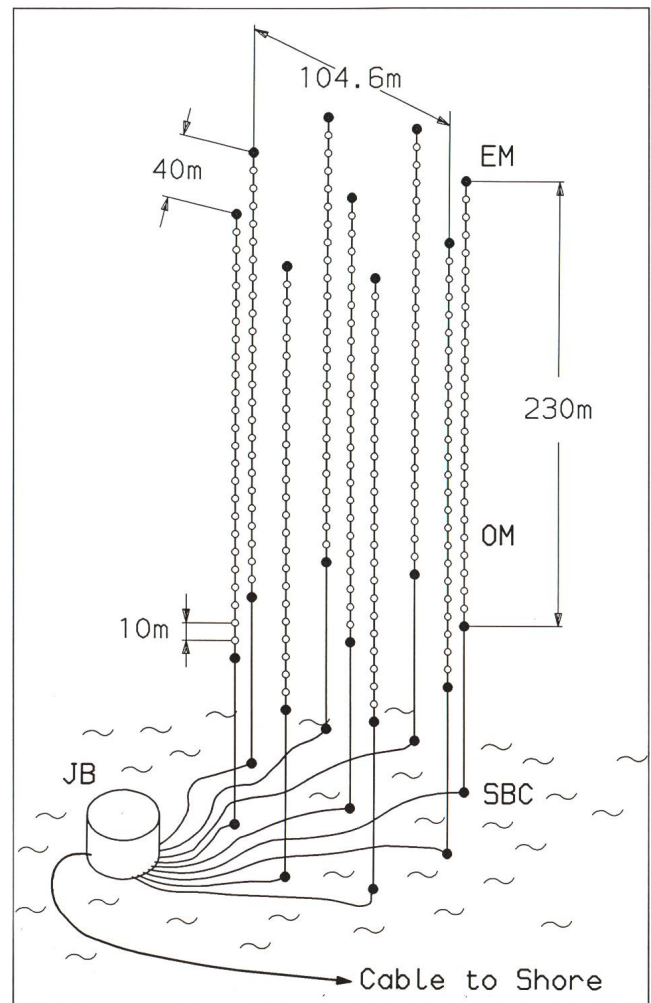
Der mit diesem Detektor nachweisbare minimale Neutrinofluss für Punktquellen beträgt ca. $5 \cdot 10^{-10}$ Neutrinos pro Quadratcentimeter und Sekunde für Müon-Neutrinos mit Energie ≥ 1 TeV. Das effektive Volumen des Oktagonensystems steigt mit zunehmender Neutrinoenergie, da die Energie und somit auch die Reichweite der in den Neutrinoereaktionen entstehenden Müonen ebenfalls zunimmt. Es beträgt für Neutrinos mit Energie 2 TeV 10^8 m³.

Die Kosten dieses Projekts belaufen sich auf rund 10 Millionen US\$. Die Finanzierung ist weitgehend gesichert. Voraussichtlich wird das Oktagon später als Teil eines DUMAND Grosssystems in dieses integriert werden. Als optimale Detektorengrosse erachten wir ein Matrixvolumen von 1 km³.

PETER K. F. GRIEDER

Physikalisches Institut Universität Bern, Schweiz

Figur 2:
DUMAND Projektstufe 2. Jede der 9 vertikalen Sensorketten hat 24 optische Detektormodule (DM). Die untersten Module sind ca. 100 m über dem Meeresboden angeordnet. Spezielle Module (EM) erfassen Umweltparameter und dienen der genauen Ortung der Oktagon-Matrix. Unten auf dem Meeresgrund liegen die Steuer- und Datenübertragungseinheiten (SBC), sowie der Verbindungskasten (JB) für Kabel und Glasfasern.



Enthauptung eines kahlen Berges

NOËL CRAMER

Eine Zweideutigkeit der deutschen Sprache hat ein Kind zur folgenden Auslegung des Wortes "Sternwarte" veranlasst, die von Markus Griesser zu Beginn seines Artikels in der Orion Nr. 242 zitiert wurde: "Eine Sternwarte heisst Sternwarte, weil die Leute dort auf die Sterne warten". Diese Definition greift ungewollt ein grundlegendes Problem der beobachtenden Astronomie auf: der ideale Standort für ein Observatorium muss so gewählt werden, dass der Astronom möglichst wenig auf gute Wetterbedingungen "warten" muss.

Für die Astronomie sind diejenigen Standorte geeignet, die sich in Wüstengebieten befinden, welche seit Jahrhunderten oder gar Jahrtausenden extrem niederschlagsarm waren und deshalb auf längere Sicht Regenfreiheit versprechen. Als nächstes bietet ausgeprägte Höhenlage den Vorteil, Aerosolen zu entkommen, die je nach Saison das untere Drittel der

Décapiter une montagne chauve

La définition du mot «observatoire» imaginée par un enfant au début de l'article de Markus Griesser dans ORION 242 - «Eine Sternwarte heisst Sternwarte, weil die Leute dort auf die Sterne warten» - résume par le biais d'une ambiguïté de la langue allemande le problème fondamental de l'astronomie observationnelle faite à partir du sol: un bon observatoire doit être placé en un lieu où il faudra le moins possible «attendre» que les conditions atmosphériques deviennent bonnes.

Les meilleurs sites astronomiques se trouvent nécessairement dans des régions désertiques, où l'eau a manqué depuis des siècles, voire même des millénaires, et qui promettent une persistance de la sécheresse à long terme. Ces sites doivent encore être suffisamment élevés pour échapper aux aérosols qui chargent, en fonction des saisons, le tiers inférieur de l'atmosphère et nuisent à sa transparence. A ces contraintes