

3. APRIL 2025

PLATZHALTERSEITE

DIESE SEITE IST NICHT TEIL DER ARBEIT, SIE DIENT NUR
DER PLANUNG DER SEITENANZAHLEN. SIE STELLT EIN
DECKBLATT DAR.

NICO SCHNEIDER

VOM GEISTESBLITZ ZUM „GEISTERTEILCHEN“

Über Neutrinos und deren Nutzen für die Wissenschaft am
Beispiel des IceCube Neutrino-Detektors

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	2
2. GRUNDLAGEN DER NEUTRINO-PHYSIK	3
2.1 Über ein Teilchen, das es nicht gibt.....	3
2.2 Die geheimen Facetten der Neutrinos	5
2.3 Bedeutung der Neutrinos in der Astrophysik	7
2.4 Das Unsichtbare sichtbar machen	7
2.5 Mit der Nebelkammer zum Neutrino-Nachweis	9
2.5.1 Ziel und physikalische Grundlagen.....	10
2.5.2 Versuchsaufbau.....	10
2.5.3 Beobachtungen	14
2.5.4 Auswertung	17
3. DER ICECUBE NEUTRINO-DETEKTOR	18
3.1 Aufbau, Lage und Funktionsweise	18
3.2 Wissenschaftliche Erfolge	19
3.3 Zukunft des IceCube Neutrino-Detektors	20
4. FAZIT	21
5. LITERATURVERZEICHNIS	22
6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	26

1. EINLEITUNG

Wie kann man in das Innere der Sonne blicken? Was passiert bei einer Supernova? Und wie blickt man in weite Galaxien, von denen kein Licht mehr zu uns scheint?

Das Weltall fasziniert die Menschheit seit jeher. Sei es in der Steinzeit [1, p. 39], im alten China [1, p. 43], im antiken Griechenland [1, pp. 45-48] oder in der frühen Neuzeit mit Kepler, Galilei und co. [1, pp. 53, 55-56] – um es mit Aristoteles‘ Worten zu sagen: „Alle Menschen streben von Natur aus nach Wissen. [2]“ Die Erfindung des Teleskopes im Jahre 1608 [1, p. 55] war ein großer Fortschritt, wenngleich Teleskope ihre Grenzen haben [1, p. 117]. Seither sinnt man sich danach, die naturgegebenen Grenzen auszudehnen und aus immer größeren Entfernungen Informationen zu sammeln. 1930 wurde erstmals Radiostrahlung der Milchstraße entdeckt und damit auch die erste Art von nicht-optischen Teleskopen [1, p. 138]. Röntgenteleskope entdeckten 1949 als erste Röntgenstrahlungsquelle die Korona der Sonne [1, p. 143], und in den 1950ern folgte dann eine weitere Methode, in unseren Himmel zu blicken, diesmal ganz ohne Photonen.

Teilchen vermitteln Informationen, und so benötigte man andere Botenteilchen anstelle der Photonen. Diese wurden erstmals 1930 postuliert [3] und 26 Jahre später auch nachgewiesen [4]. Es geht um Neutrinos. Sie sind elektrisch neutral, fast masselos und damit nicht durch elektromagnetische Wechselwirkungen und nur geringfügig durch Gravitation beeinflussbar. Im Gegensatz zu Photonen können Neutrinos viel mehr Materie ungehindert durchdringen und uns deshalb auch auf großen Distanzen immer noch erreichen. Seit deren Entdeckung spielen Neutrinos in der Astroteilchenphysik eine große Rolle. Ihr Nachweis erfordert den Bau von massiven Detektoren wie den IceCube Neutrino-Detektor, von dem man sich Informationen aus weit entfernten Galaxien und Einblicke in Supernovae erhofft [5].

Diese Arbeit soll einen Überblick über die historische Entwicklung der Neutrino-Physik geben und diese „Geisterteilchen“ dabei in gängige Modelle der Physik einordnen (Kapitel 2). Deren Relevanz für die Forschung soll anhand des IceCube Neutrino-Detektors nähergebracht werden (Kapitel 3). Hauptsächlich wird sich hierbei einer Literaturrecherche bedient, wobei in Kapitel 2.5 experimentell mithilfe einer Nebelkammer das Prinzip von Teilchendetektoren erläutert werden soll.

2. GRUNDLAGEN DER NEUTRINO-PHYSIK

2.1 Über ein Teilchen, das es nicht gibt

Heute werden im Physikunterricht der Jahrgangsstufe 10 in Bayern die radioaktiven Zerfälle behandelt, die namentlich α -, β - und γ -Zerfall heißen [6]. In den 1910er Jahren erforschten die Physiker:innen der Zeit erstmals diese Zerfälle, nachdem Albert Einstein seine spezielle Relativitätstheorie veröffentlichte. Die weltberühmte Formel $E = mc^2$ ermöglichte hierfür nämlich neue quantitative Ergebnisse [7, p. 15]. Im Jahre 1914 entdeckte James Chadwick, dass der bis dahin bekannte β^- -Zerfall, also der Zerfall eines Neutrons in ein Proton und Elektron, dem wohl wichtigsten Grundsatz der Physik widersprach: der Energieerhaltung [8, p. 4]. Während Alpha- und Gammastrahlung im Einklang mit der Energieerhaltung sind, maß Chadwick beim β^- -Zerfall (hier beispielsweise von RaE) ein kontinuierliches Energiespektrum [8, p. 4] (vgl. Abbildung 1). Da alle anderen Teilchen im Zerfall eine konkrete Energie hatten, das Elektron aber nicht, fragte man sich, wie

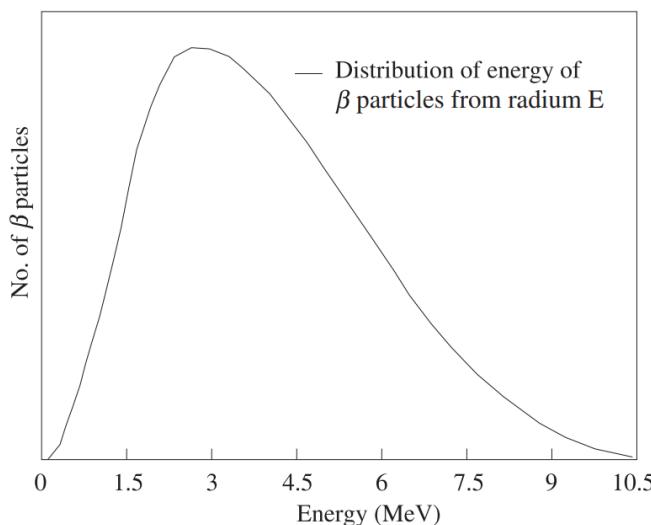


Abbildung 1: Kontinuierliches Energiespektrum beim β^- -Zerfall von RaE.

diese variierende Energie zustandekommt. Für den anerkannten Physiker Niels Bohr gab es nur eine Möglichkeit, die Frank Close in seinem Buch „Neutrinos“ so radikal beschreibt, wie der Vorschlag auch gewesen ist: „Beim Betazerfall bleibt die Energie nicht erhalten.“ [7, p. 16]. Der theoretische Physiker Wolfgang Pauli schlug einen anderen, aber ebenfalls radikalen Weg ein. Er postulierte ein Teilchen, das neben dem Elektron beim β^- -Zerfall emittieren würde: Wörtlich schrieb Pauli am 04. Dezember 1930: „Das kontinuierliche beta-Spektrum [sic!] wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall [sic!] mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert würde derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.“ [3, p. 2] Anfangs dachte Pauli, dass es sich beim Neutron und Neutrino um dasselbe Teilchen handelte [3]. Der Nachweis dieses Teilchens war sehr schwer, weshalb er selbst an seiner Theorie zweifelte. Weiterhin schrieb er nämlich: „Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein

wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie emittieren, wohl schon längst gesehen hätte.“ [3, p. 2] Nach einigen Messungen stellte sich heraus, dass Bohrs Theorie nicht funktionierte. Enrico Fermi, der auch maßgebend an der Erforschung der Neutrinos beteiligt war, schlug später vor, Paulis „Neutron“ in ein „Neutrino“

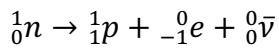


Abbildung 2: β^- –Zerfall eines Neutrons n in Proton p , Elektron e^- und Anti-Neutrino $\bar{\nu}_e$.

umzubenennen, da schließlich feststand, dass es sich hierbei um zwei unterschiedliche Teilchen handelte [9] (vgl. Abbildung 2). Ein großer Unterschied

liegt in der unterschiedlichen Massenzahl, auf andere Unterschiede von Neutron und Neutrino wird an dieser Stelle verzichtet. Zwar war nun die Theorie da, mit der man das Neutrino erforschen kann, doch stellte sich schnell heraus, dass eine Messung der Neutrinos quasi unmöglich ist. Doch 1956, also ein Viertel Jahrhundert nach Paulis Postulierung der Teilchen, gelang es Frederick Reines und Clyde Cowan trotzdem, das Neutrino nachzuweisen [4]. Während Pauli [10], Fermi [11] und Reines [12] einen Nobelpreis für ihre Arbeit bekamen, möchte ich auch noch Bruno Pontecorvo erwähnen, der ebenfalls maßgeblich (vgl. z.B. Kapitel 2.2) an der Neutrino-Forschung beteiligt war, aber keinen Nobelpreis erhielt.

2.2 Die geheimen Facetten der Neutrinos

Standardmodell der Elementarteilchen

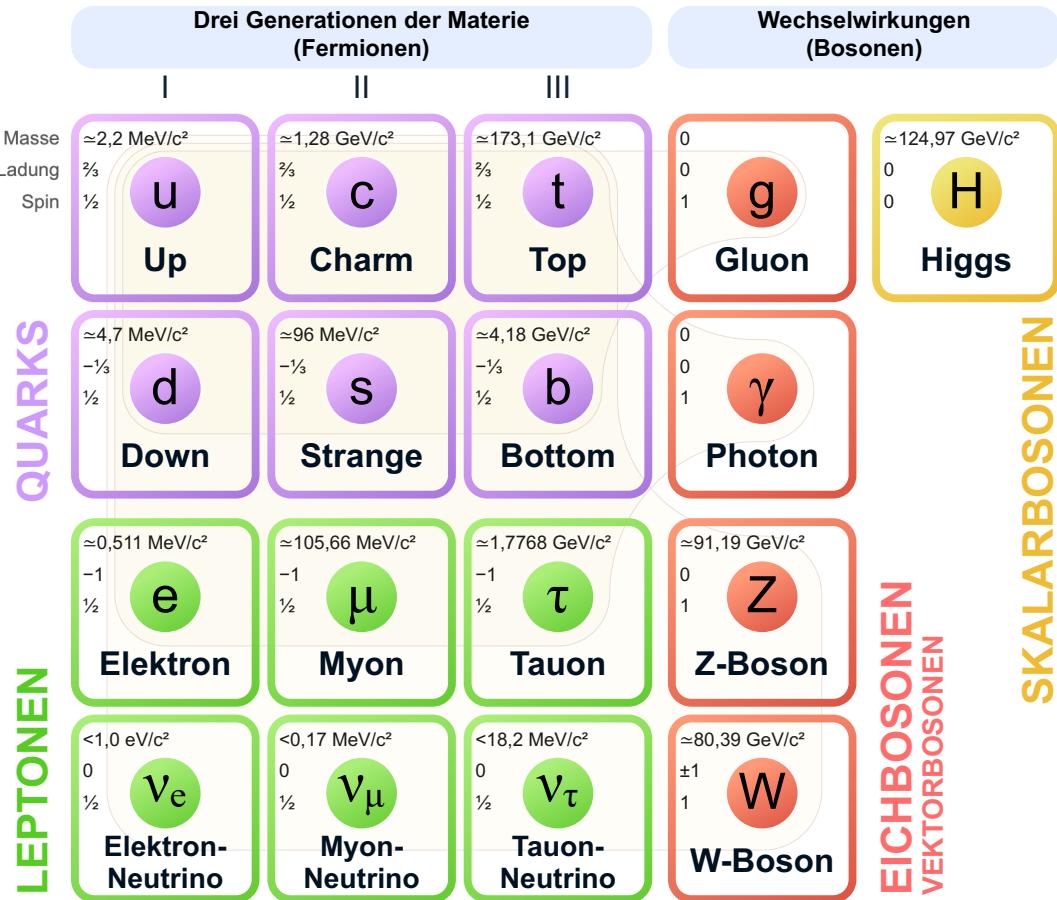


Abbildung 3: Standardmodell der Elementarteilchen (SM)

Nachdem in den 1960ern eine zweite Art von Neutrinos – namentlich das Myon-Neutrino (ν_μ) – von Lederman, Schwartz und Steinberger entdeckt wurde [13], folgte im Jahr 2000 schließlich das Dritte im Bunde: Das Tau-Neutrino ν_τ [14] [15, pp. 1-2]. Diese drei Neutrino-Generationen gliedern sich heute in das Standardmodell der Elementarteilchen (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die linke Spalte ist bereits aus dem Schulunterricht bekannt. Ein Atomkern setzt sich aus Up- und Down-Quarks zu Protonen oder Neutronen zusammen, und die Elektronen bewegen sich in Orbitalen um den Kern. Hinzu kommt nun noch das Neutrino. Man kann sich die zweite und dritte Spalte vereinfacht als I. Spalte vorstellen, jedoch mit zunehmender Masse. Der Charm-Quark ist also eine schwere Version des Up-Quarks, der Top-Quark wiederum ist schwerer als der Charm-Quark. Das Myon und das Tauon sind schwerere Versionen der Elektronen, und so ist es auch bei den Neutrinos. Bei genauerer Betrachtung des SM fällt

aber die Ungewissheit der Neutrinomassen auf. Während bei den Quarks und den geladenen Leptonen (namentlich: e^- , μ^- und τ^-) konkrete Massen stehen, sind bei den Neutrino-Generationen nur Obergrenzen angegeben. Doch wie kommt das?

Lange Zeit dachte man, Neutrinos seien masselos [16, p. 26], obwohl Wolfgang Pauli 1930 bereits annahm: „Die Masse der Neutronen [gemeint: Neutrinos] müsste von der selben Größenordnung [sic!] wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser [sic!] als 0,01 Protonenmasse.“ [3]. Er erwartete also eine Masse, womit er auch recht behalten sollte. Dennoch ist es schwer, eine konkrete Zahl anzugeben, da Neutrinos durch ihre extrem kleine Masse und die neutrale Ladung sehr schwer nachzuweisen sind [17]. Jeden Menschen durchqueren etwa 100 Billionen Neutrinos pro Sekunde, und trotzdem liegt die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung von Neutrinos mit dem Menschen im gesamten Leben bei etwa 25 % [17]. Nur jeder vierte Mensch erfährt also eine Wechselwirkung mit einem Neutrino im gesamten Leben! Dementsprechend schwer lassen sich diese Teilchen also einfangen.

Wie zu den geladenen Leptonen auch, existieren zu den Neutrino-Generationen Antiteilchen, die sich im Spin (und der Ladung) jeweils kontrastieren. Der Spin kann als eine Art innerer Drehimpuls von Teilchen angesehen werden. Frank Close erklärt in seinem Buch „Neutrinos“ weiter: „Die Quantentheorie zeigt, dass [der Spin] nur bestimmte Werte annehmen kann, die entweder ungeradzahlige oder geradzahlige Vielfache einer gewissen Grundeinheit sind. Aus historischen Gründen ist diese Grundeinheit des Spins $\frac{1}{2} [\hbar]$.“ [7, p. 29]. Die Quarks und Leptonen, die allesamt den Spin $\frac{1}{2} \hbar$ haben - wobei \hbar die reduzierte Planck-Konstante ist - bilden die Gruppe der Fermionen (benannt nach Enrico Fermi). Sie sind die Grundbausteine von Materie.

Teilchen	Name	Ladung in e	Spin in \hbar
ν_e, ν_μ, ν_τ	Neutrino (der jeweiligen Generation)	0	$+\frac{1}{2}$
$\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$	Anti-Neutrino (der jeweiligen Generation)	0	$-\frac{1}{2}$
e^-, μ^-, τ^-	Elektron, Myon, Tauon	-1	$+\frac{1}{2}$
e^+, μ^+, τ^+	Positron („Antielektron“), Antimyon, Antitauon	+1	$-\frac{1}{2}$

Abbildung 4: Teilchen-Antiteilchen-Beziehung der Leptonen.

Nachdem die zweite Generation von Neutrinos entdeckt wurde, verfasste der bereits in Kapitel 2.1 erwähnte Bruno Pontecorvo mit Wladimir Gibrow 1969 einen Aufsatz über die Theorie, dass Neutrinos ihre Generation ändern können [18]. Ein Übergang $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ wurde von ihnen genauso beschrieben wie der Übergang der jeweiligen Anti-Neutrinos. Diese sogenannte Oszillation der Neutrinos – also der Übergang der Generation – lässt sich problemlos auf die dritte Generation erweitern und ist heute allgemein anerkannt [16, p. 708] [19, p. 10]. Die Beobachtung der Neutrinooszillation lieferte den endgültigen Beweis dafür, dass Neutrinos eine von null verschiedene Masse besitzen [16, p. 35]. Heute gibt es laufend Experimente zur Neutrinomasse, die jüngst auch die Grenze aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verringern konnten: Die KATRIN Collaboration drückte die Obergrenze für ein Elektron-Antineutrino $\bar{\nu}_e$ im April 2025 von $< 0,8\text{eV}$ auf $< 0,45\text{eV}$ [20, p. 180].

2.3 Bedeutung der Neutrinos in der Astrophysik

Neutrinos spielen für die Astrophysik eine große Rolle. Anfänglich wurden Neutrinos vor allem zur Erforschung der Sonne genutzt, was auch zum sogenannten „Solar Neutrino Problem“ führte. Raymond Davis Jr. et al. hatten Neutrinos von der Sonne messen wollen, jedoch lag die Neutrino-Rate deutlich unter dem erwarteten Wert [21]. Dieses Rätsel wurde dann mithilfe der Neutrinooszillation gelöst.

Später wurde die erste von Messinstrumenten aufgezeichnete Supernova, die Supernova 1987A, mit Neutrino-Teleskopen untersucht. Gleich drei Teleskope konnten Neutrinos von dieser Supernova nachweisen [22] [23] [24]. So konnte man unter anderem herausfinden, dass Supernovae die stärksten Quellen für Neutrinos sind [25, p. 23].

Wie auch in Kapitel 3.2 noch ersichtlich wird, liegt die Stärke der Neutrinos in der großen Reichweite, die sie zurücklegen können, ohne ihre Informationen zu verlieren. Geladene Teilchen können magnetisch abgelenkt werden, auch Photonen fallen dieser Wechselwirkung zum Opfer. Auf langen Distanzen sind Neutrinos also bessere Boten als Photonen, was sie für die Erforschung von weit entfernten Galaxien obligat macht.

2.4 Das Unsichtbare sichtbar machen

Wie wir bereits in Kapitel 2.1 gesehen haben, dauerte es lange, bis man von der Existenz von Neutrinos überzeugt war. Die Kombination aus neutraler Ladung und sehr geringer Masse machen eine Wechselwirkung mit anderen Teilchen, und damit den Nachweis von

Neutrinos, nämlich sehr kompliziert. Es war zuallererst Bruno Pontecorvo, der einen Vorschlag zum Nachweis der Neutrinos machte. Er schlug 1946 vor, einen großen Tank voll Chlor zu nehmen und dort Umwandlungsprozesse, angestoßen durch von Uran emittierte Neutrinos, zu detektieren. Das Chlor würde sich bei der Neutrino-Wechselwirkung in Argon der Art



verwandeln und dabei Beta-Minus-Strahlung emittieren [27, pp. 1-5].

Nun brauchte es noch einen Wissenschaftler, der dieses Experiment auch umsetzen würde. Raymond Davis wurde 1914 in Washington D.C. geboren und war von klein auf für Chemie begeistert [28, p. 22]. 1942 erwarb er den Doktortitel in Chemie und ging 1948 schließlich zum neuen Brookhaven National Laboratory, das für den friedlichen Einsatz von Kernenergie forscht [29]. Er forschte an Neutrino-Nachweisen und führte das von Pontecorvo vorgeschlagene Experiment durch (vgl. Abbildung 5).

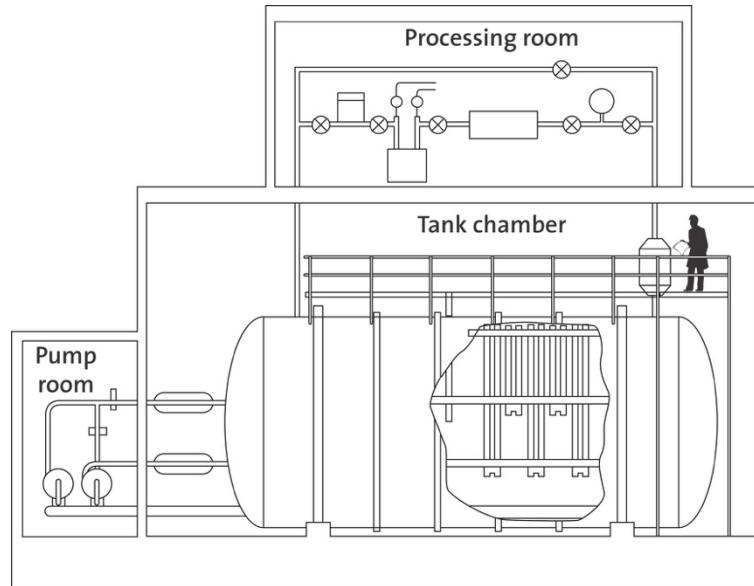


Abbildung 5: Aufbau des Experiments von Davis

Zu seiner Überraschung konnte er aber in diesem Experiment keine signifikanten Ergebnisse erzielen [29]. Was er, und auch Pontecorvo, nämlich nicht wussten, ist dass es nicht Neutrinos waren, die das Uran erzeugte, sondern Antineutrinos.

1956 gelang C. L. Cowan und Fred Reines der Nachweis der Neutrinos, der Reines 1995 schließlich den Nobelpreis einbrachte [4] [12]. Zwar bauten sie auch einen großen Detektor, jedoch wiesen sie keine Element-Umwandlungen nach, sondern Gamma-Strahlungen, die von inversen Beta-Plus-Zerfällen ($\bar{\nu} + p \rightarrow n + \beta^+$) erzeugt wurden [4].

Seither gibt es viele verschiedene Arten, Neutrinos zu detektieren, und eine Art ist die Nutzung des Cherenkov-Effekts [benannt nach Pavel A. Cherenkov]: „Durchquert ein geladenes Teilchen mit einer Geschwindigkeit v ein Medium mit dem Brechungsindex n und ist die Geschwindigkeit größer als die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium [...] [c_n mit $c_n = \frac{c_0}{n}$, c_0 : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum], so wird elektromagnetische Strahlung emittiert.“ [26, p. 437]. Wie bei einem Überschallflugzeug, an dem sich Kondensstreifen bilden, bildet sich hier ein Schwall an blauem Licht, das hinter den geladenen Teilchen entsteht (vgl. Abbildung 6).

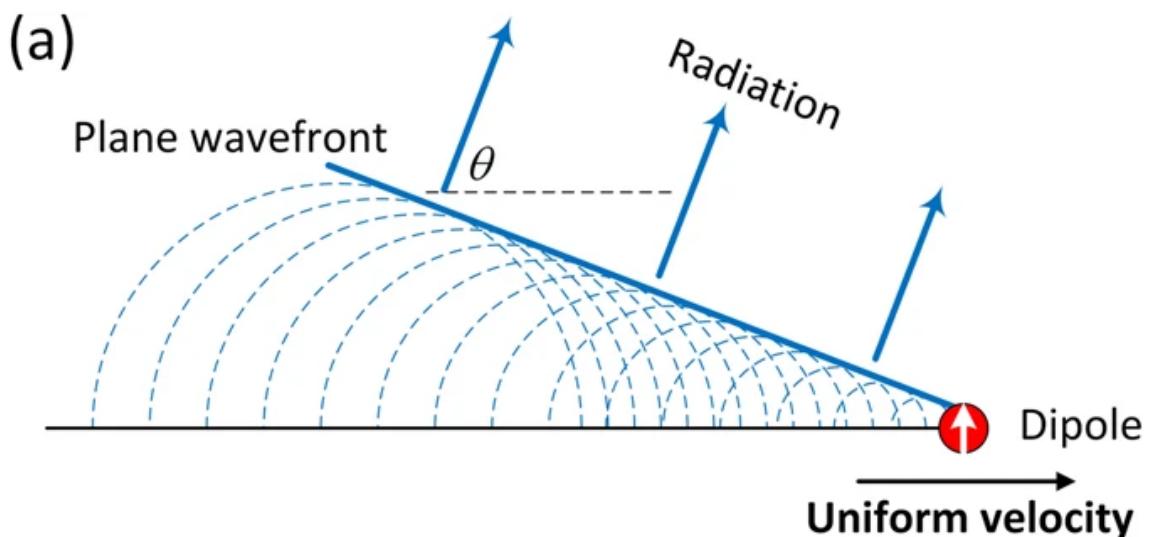


Abbildung 6: Cherenkov-Effekt: Der Dipol löst einen Schwall an blauer Strahlung aus.

Cherenkov-Strahlung, die Methode von Cowan et al. als auch alle anderen Nachweismethoden von Neutrinos haben eines gemeinsam: Sie weisen nie direkt Neutrinos nach. Durch ihre Eigenschaften lassen sich Neutrinos nur indirekt, also durch Wechselwirkung mit anderen Teilchen, nachweisen.

2.5 Mit der Nebelkammer zum Neutrino-Nachweis

Um die theoretischen Ideen in der Praxis sehen zu können, wurde eigens für diese W-Seminararbeit ein Experiment durchgeführt. In der sog. Nebelkammer wurde 1932 das Positron [30] und 1937 das Myon nachgewiesen [31].

Teilchennachweise in einer Nebelkammer

Nico Schneider (Q12), Yannik Stecher (11c), Tudor Coldea, Hans Wirsching, Lena Pfeifer

04. Juli 2025

Helene-Lange Gymnasium Fürth, n010

2.5.1 Ziel und physikalische Grundlagen

Um genauer zu verstehen, wie Teilchendetektoren funktionieren, soll dieses Experiment als Veranschaulichung dienen. Wir wollen, auch unter Zunahme von radioaktiven Präparaten, Teilchenspuren von α - und β -Strahlung sichtbar machen und auch kosmische Hintergrundstrahlung untersuchen. Neben den beiden Strahlungsarten wollen wir auch Myonen als kosmische Hintergrundstrahlung beobachten.

Die Nebelkammer funktioniert nach einem einfachen Prinzip: In einem durchsichtigen Gehäuse ist eine mit Alkohol gesättigte Atmosphäre vorliegend. Am oberen Ende des Gehäuses wird Alkohol verdampft und an der gekühlten Bodenplatte kondensiert der Alkohol. Durch die Kühlung entsteht ein Temperaturgefälle, was zur Folge hat, dass bis zu wenigen Centimetern über der Bodenplatte der Alkohol überkritisch ist. Daraus folgt, dass ionisierende Strahlen Tröpfchen des Alkohols auskondensieren und eine Nebelspur sichtbar wird. Aus Länge, Dicke und Form lassen sich Rückschlüsse auf Teilchenart und kinetische Energie ziehen [26, pp. 166-167].

2.5.2 Versuchsaufbau

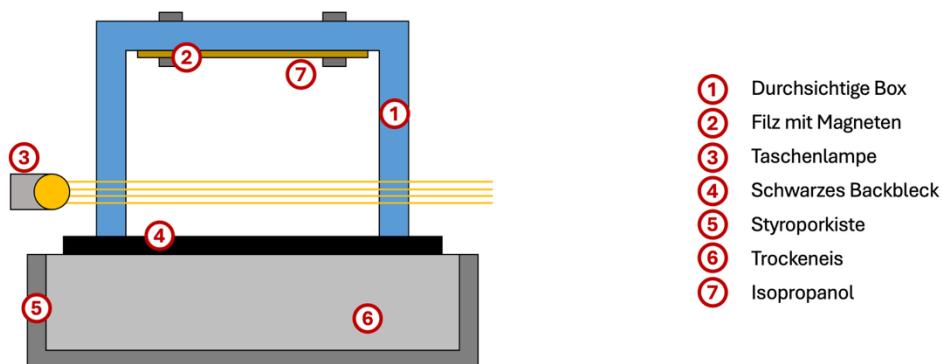


Abbildung 7: Versuchsaufbau, nicht maßstabsgetreu

Der Aufbau ist analog zu 2.5.1: Im durchgeführten Versuch wird als Alkohol Isopropanol (Propan-2-ol) verwendet. Als durchsichtige Box wird eine „Box, transparent“ der Bauart „SAMLA“ verwendet [32]. Auf ihren Boden wird mit Magneten ein in Isopropanol getränkter Filz befestigt, der der Verdampfung des Alkohols dient (vgl. Abbildung 8). Es wird ein großenverstellbares Backblech gewählt, das bereits in Ruhestand ist und seinen Lebensabend nun der Forschung widmet. Die Kühlung erfolgt mittels Trockeneis, das uns Frau Pfeifer beschafft. Um eine großflächige Auflage des Bleches mit dem Trockeneis zu gewährleisten, wird das Styroporgefäß, in dem das Trockeneis geliefert wurde, an zwei Seiten aufgeschnitten (vgl. Abbildung 10). Die Seiten der SAMLA-Box werden mit Plastilin abgedichtet, um einem geschlossenen System nahezukommen (vgl. Abbildung 9). Die Durchführung erfolgt in einem abgedunkelten Raum, um die Spuren durch das Licht einer Taschenlampe sichtbar zu machen, da bei Tageslicht keine Spuren sichtbar werden. Im späteren Verlauf werden erst radioaktive β -Strahler an die Box gehalten, anschließend wird ein Loch gebohrt, um einen α -Strahler auf den Versuch strahlen zu lassen. Auf Schutz- und Vorsichtsmaßnahmen wird hinreichend wertgelegt (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 8: Box SAMLA mit Filz und Magneten



Abbildung 9: Abdichtung mit Plastilin, im Hintergrund das Backblech auf Trockeneis

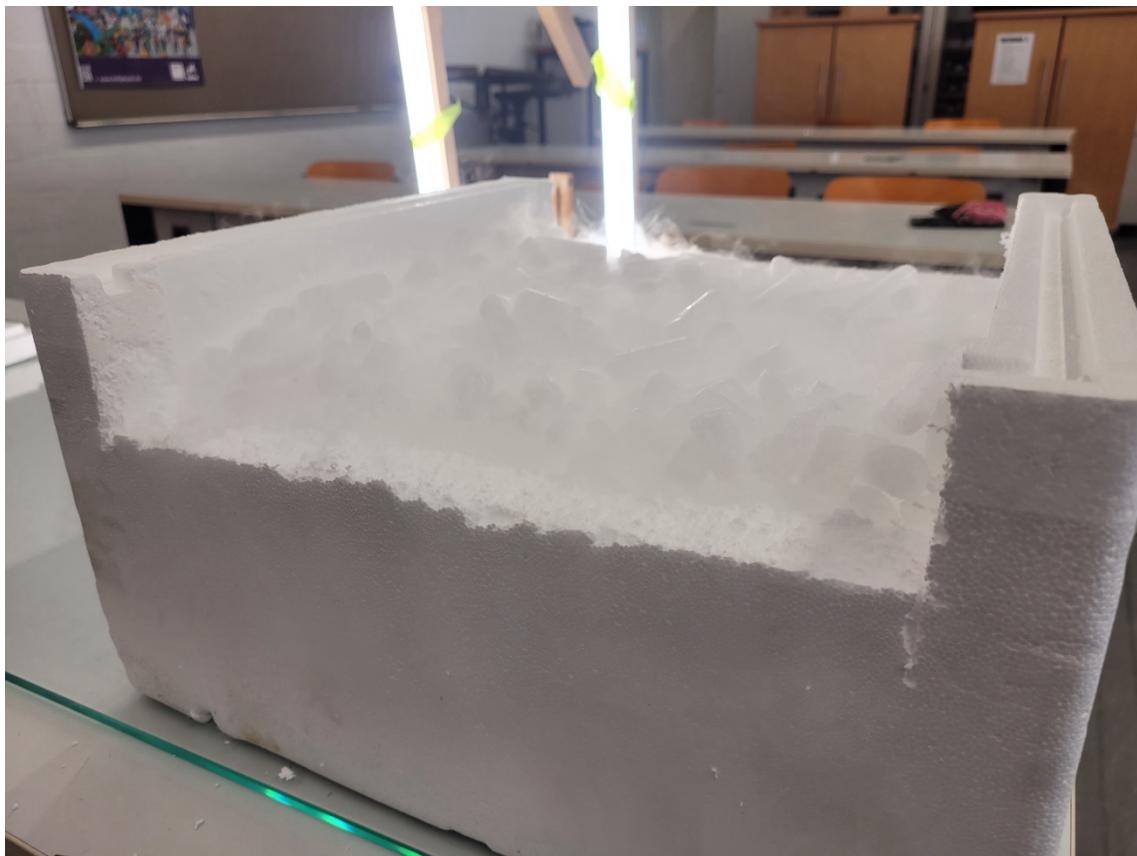


Abbildung 10: Präparierte Styroporkiste mit Trockeneis



Abbildung 11: Radioaktive Präparate mit Warnschild und Geigerzähler

2.5.3 Beobachtungen

Ohne radioaktive Präparate lässt sich ein gewisses Grundrauschen an kondensiertem Isopropanol beobachten. Keine signifikante Häufung an Spuren ist vorzufinden (vgl. Abbildung 12).

Mit Zuhilfenahme von radioaktiven Präparaten lassen sich erste erkennbare Spuren beobachten. Mittels einer mit Uran bestückten Armbanduhr, die seinerseits als β -Strahler wirkt, können Elektron-Spuren aufgenommen werden, die sich durch dünne, gekrümmte Spuren identifizieren lassen (vgl. Abbildung 13). Schwerere Myonen sind ebenfalls sichtbar, sie zeichnen sich durch lange, geradlinige und deutlichere Spuren aus (vgl. Abbildung 14). Bei Verwendung eines anderen β -Strahlers (Sr-90) ist der Spurenteppeich ähnlich dem der Armbanduhr.

Unter Verwendung des α -Strahlers (Aufbau vgl. Abbildung 15) können außerdem α -Teilchen nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 16). Ihre Merkmale sind kurze, dicke Spuren.

Eine ungewöhnliche Entdeckung ist ein Knick in einer Spur eines Leptons. Nach einer geraden Strecke „knickt“ die Spur um ca. 90° und strekt sich dann weiter geradlinig durch den Nebel, wenngleich die Spur nach diesem Knick dünner wirkt (vgl. Abbildung 17).

Die Spuren entstehen allesamt langsam genug, dass das menschliche Auge den Entstehungsprozess nachverfolgen kann.

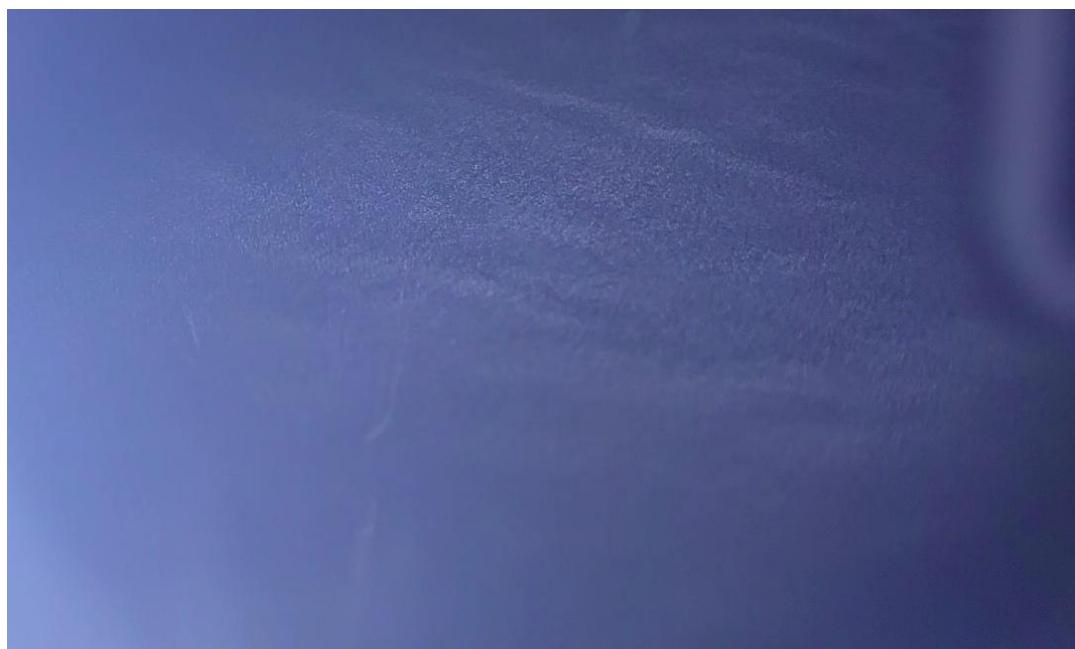


Abbildung 12: Grundrauschen

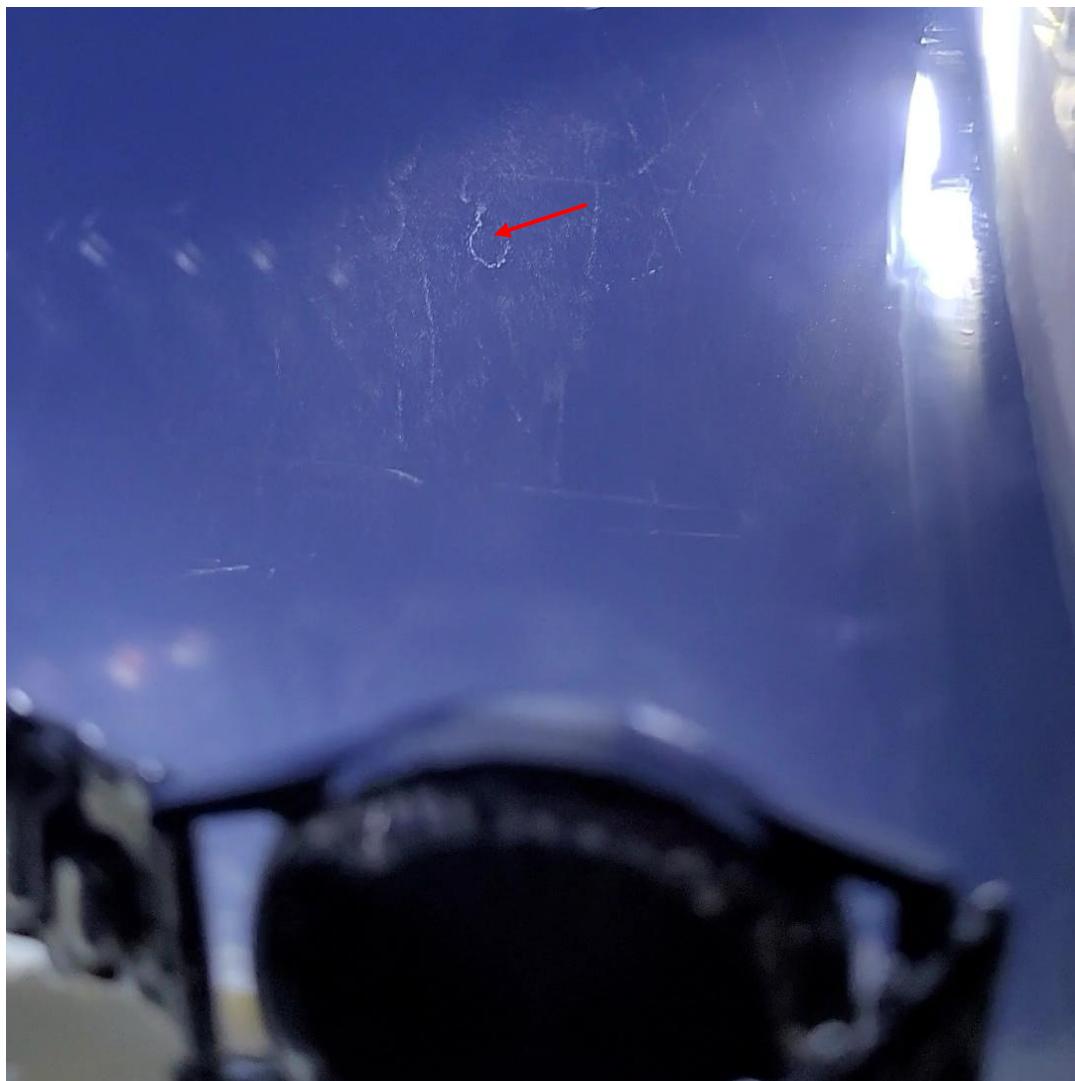


Abbildung 13: Armbanduhr mit Uran, markiert ist eine Spur eines β -Teilchens



Abbildung 14: Geradlinige und deutliche Spur eines Myons

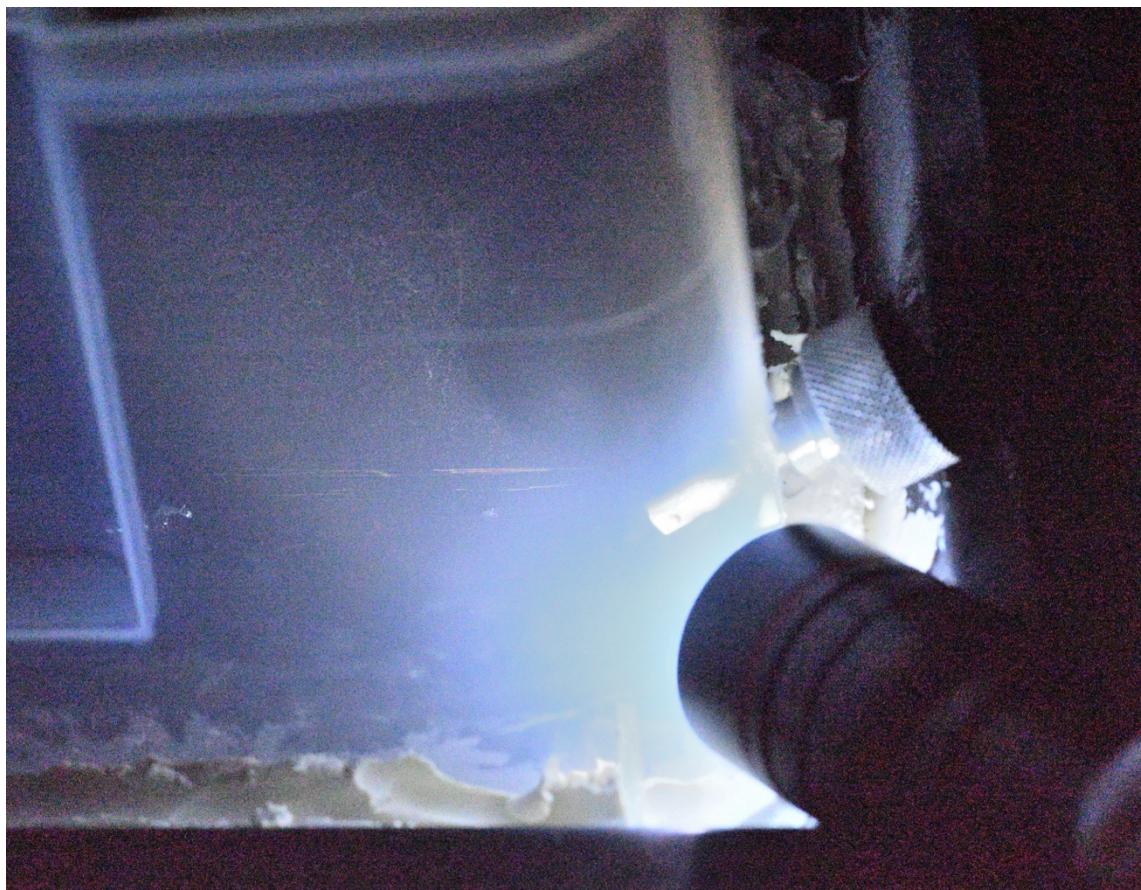


Abbildung 15: Taschenlampe (rechts), radioaktives Präparat darüber. Im Hintergrund Teilchenspuren



Abbildung 16: Spur eines α -Teilchens



Abbildung 17: Teilchenspur mit „Knick“

2.5.4 Auswertung

Ohne radioaktive Präparate können nur kosmische Strahlen, also Strahlung aus dem Welt-
raum, in die Nebelkammer eindringen. Diese kosmische Strahlung ist aber sehr gering,
weshalb man dort nur wenige Spuren finden kann.

Hält man einen β -Strahler an die Wand der Nebelkammer, so dringen β -Teilchen, also Elektronen (oder Positronen), in die Nebelkammer ein. Die β -Teilchen mit Ladung ± 1 polarisieren das Isopropanol, und es kommt zur Kondensation der Isopropanol-Teilchen (vgl. Kapitel 2.5.1). Myonen sind ebenfalls Leptonen mit Ladung ± 1 , was ihnen und ihren Spuren ähnliche Eigenschaften wie den β -Teilchen zuschreibt. Durch die etwas größere Masse und damit den größeren Impuls sind sieträger als das leichte Pendant, was eine längere Spur ermöglicht.

Um jedoch α -Teilchen in die Nebelkammer eindringen zu lassen, genügt es nicht, die α -Quelle nur an die Wand zu halten. Denn α -Teilchen haben nur eine sehr geringe Durchdringungsfähigkeit [33, p. 80]. Durch die Bohrung eines Loches ermöglichen wir jedoch den Eintritt in die Nebelkammer. Die kurzen und dicken Spuren sind charakteristisch für α -Teilchen, da sie eine deutlich größere Masse im Vergleich zu β -Teilchen haben ($m_\alpha \approx 7300 \cdot m_\beta$ [34, p. 51]). Sie werden durch Reibung stark gebremst, wodurch die Spur nicht annähernd so lang wie bei anderen Teilchen ist.

Die Spur mit dem Teilchen könnte einen Myonen-Zerfall darstellen, bei dem ein Myon in ein β -Teilchen und unsichtbare Neutrinos zerfällt, jedoch stellt Prof. Dr. Anna Nelles in einer E-Mail fest: „Es gibt unglaublich viele Teilchenreaktionen, die ihr [sic!] Teilchen erklären könnten.“ [A. Nelles, persönliche Kommunikation, 21. August 2025] Somit ist die Spur durchaus außergewöhnlich, aber nicht eindeutig bestimmbar.

Unter Rückbezug auf die Ziele aus 2.5.1 lässt sich feststellen, dass die Funktionsweise eines Teilchendetektors erläutert wurde und wir durchaus Myonen sehen konnten.

3. DER ICECUBE NEUTRINO-DETEKTOR

3.1 Aufbau, Lage und Funktionsweise

Der IceCube Neutrino-Detektor ist ein 1 km^3 großer Detektor im antarktischen Eis nahe der Amundsen-Scott South Pole Station [5]. Dabei sind auf einem 1 km^2 großen hexagonalen Grundriss 86 sog. Strings ins Eis geschmolzen. Sie haben eine Länge von circa 2,5 km und beginnen an der Oberfläche des Eises. 1450 m unter der Eisoberfläche beginnt eine 1 km lange Strecke, an der im Abstand von 17 m 60 sog. DOMs (Digital Optical Module) befestigt sind, die für die Messung sorgen. Von diesen 5160 DOMs werden die Signale dann in das IceCube Laboratory geleitet, die die Daten verarbeiten und weitersenden [5].

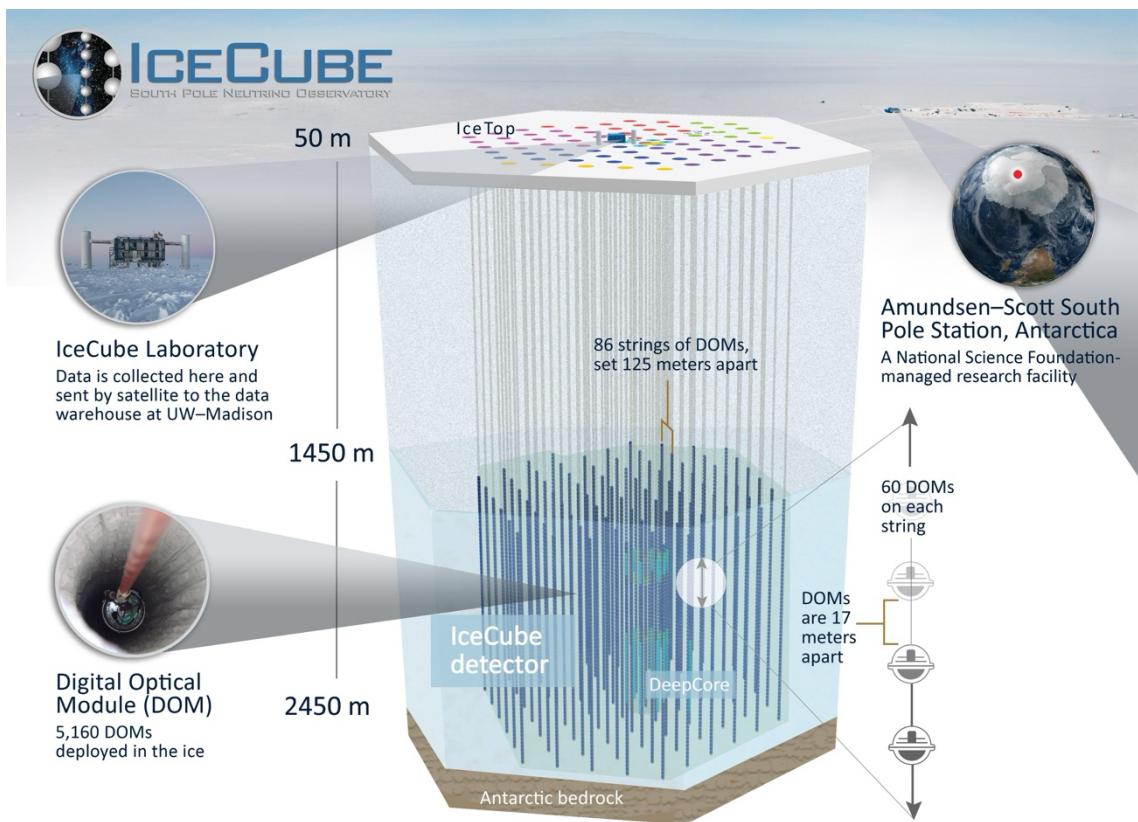


Abbildung 18: Aufbau des IceCube Neutrino-Detektors

Um die Funktionsweise des Detektors zu verstehen, greifen wir nochmals auf 2.4 zurück. Interagiert ein Neutrino mit Eis, so werden elektrisch geladene Sekundärteilchen produziert [5]. Diese Sekundärteilchen können sich mit sehr hohen Energien durch das Eis bewegen und sind dabei schneller als Licht im Eis, was zur Cherenkov-Strahlung führt [35, p. 14]. Dieser Lichtkegel wird von den DOMs detektiert und lässt Rückschlüsse auf Art,

Energie und Geschwindigkeit des Sekundärteilchens, und damit auch des Neutrinos, schließen [35, p. 15].

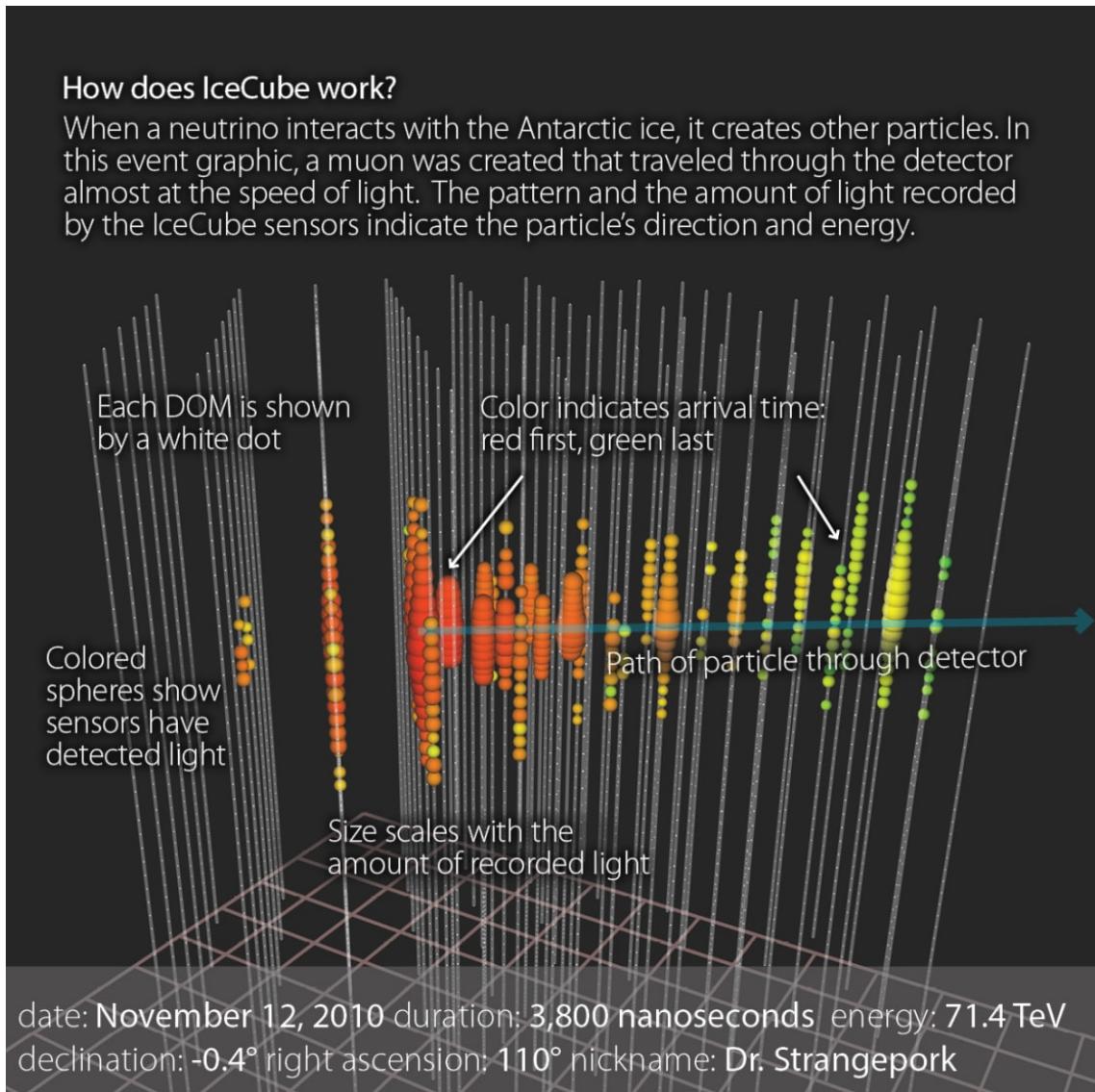


Abbildung 19: Funktionsweise des IceCube Detektors anhand der grafischen Darstellung eines Events

3.2 Wissenschaftliche Erfolge

Der Aufbau des Detektors kostete 279 Millionen US – Dollar [5], doch warum zahlt man so viel Geld? 2 Jahre nach Inbetriebnahme gab es einen ersten Erfolg: Der Detektor nahm in 662 Tagen Betriebszeit 28 Events von Neutrinos auf - deutlich mehr als die erwartete atmosphärische Hintergrundstrahlung von $10,6^{+5,0}_{-3,6}$ Events [36]. Es wurden also Neutrinos von außerhalb der Atmosphäre detektiert. Doch zu diesem Zeitpunkt konnte man die Richtung der Neutrino-Events noch nicht eindeutig zuordnen. Im Laufe der Jahre konnten allerdings durch den IceCube Detektor der Blazar TXS 0506+056 [37] und die aktive Galaxie NGC 1068 [38] als punktförmige Hochenergie-Neutrino-Quellen identifiziert

werden. Während auf dieser Strecke die meisten Teleskope versagen, sind Gamma-Teleskope zwar in der Lage, aus Distanzen im Bereich von $14,4 \text{ Mpc} \approx 47 \cdot 10^6 \text{ ly}$ bzw. $2,97 \cdot 10^{12} \text{ AU}$ (wie im Fall von NGC 1068) Daten zu empfangen. Jedoch interagieren Photonen, also auch Gamma-Strahlen, leichter mit anderen Teilchen, was Neutrinos zur zuverlässigeren Informationsquelle macht [38]. Die Neutrino-Astronomie ermöglicht es nicht zuletzt, Informationen aus Bereichen des Universums zu liefern, an denen Photonen keine brauchbaren Informationen mehr liefern [39].

3.3 Zukunft des IceCube Neutrino-Detektors

Nach mehr als zehn Jahren Betriebszeit sind Planungen vorangeschritten, wie man den IceCube Neutrino-Detektor noch effizienter und besser gestalten kann. Bis zum Jahre 2032 will man das Volumen des Detektors um den Faktor 8 erweitern und die pro Jahr detektierten Neutrino-Events sogar auf 1 Million erhöhen [39]. Es wird geplant, den Kern des Detektors mit mehr DOMs auszustatten und nahe der Eisoberfläche auf 500 Quadratkilometern Radiodetektoren zu errichten, um die Messgenauigkeit zu erhöhen [39]. Auf der Eisoberfläche selbst werden zusätzlich neue Messinstrumente angebracht. Schließlich soll auch Maschinelles Lernen zum Auswerten der vielen Events genutzt werden, um in unerreichter Geschwindigkeit und hoher Präzision Neutrino-Events aus den Messdaten herauszufiltern [39].

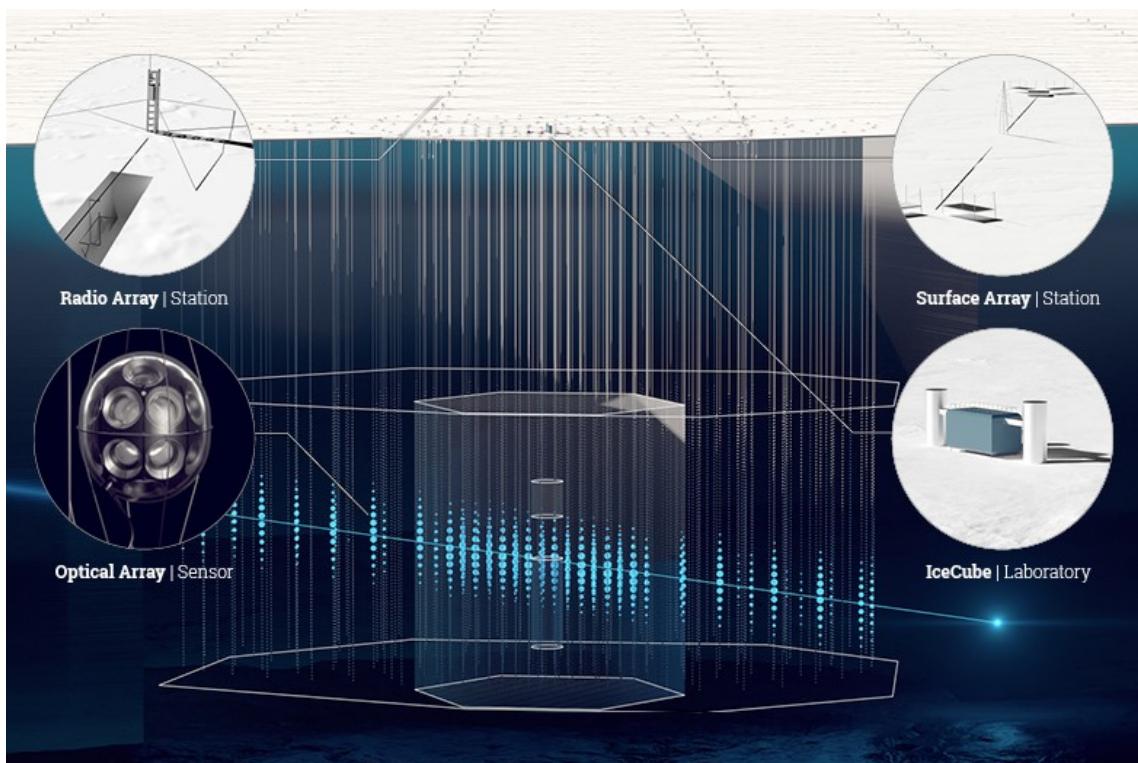


Abbildung 20: Visualisierung des Detektorausbaus zu IceCube-Gen2, © DESY, Science Communication Lab

4. FAZIT

Im Fazit möchte ich nochmal wichtige Aspekte rekapitulieren und zusammenfassen. Vor allem auf 3.3 möchte ich nochmals zurückkommen, um einen Ausblick zu geben. Aus der Einleitung will ich die Funktionsweise etwas aufgreifen, und die Nutzbarkeit der Informationen für die Wissenschaft betonen. Insgesamt möchte ich die Neutrinos als sehr wichtige Teilchen in der Astro-, Teilchen- und Astroteilchenphysik hervorheben.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. Hanslmeier, *Einführung in Astronomie und Astrophysik*, 4. Hrsg., Berlin: Springer Spektrum, 2020.
- [2] H. Tredennick, „Internet Archive,“ 26. Januar 2017. [Online]. Available: <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.185284/page/n35/mode/2up>. [Zugriff am 25 August 2025].
- [3] W. Pauli, „Cern Document Server,“ 04. Dezember 1930. [Online]. Available: <https://cds.cern.ch/record/83282?ln=de>. [Zugriff am 04 April 2025].
- [4] C. L. J. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse und A. D. McGuire, „Detection of the Free Neutrino: a Confirmation,“ *Science*, Bd. 124, Nr. 3212, pp. 103-104, 20. Juli 1956.
- [5] University of Wisconsin-Madison, „IceCube,“ [Online]. Available: <https://icecube.wisc.edu/science/icecube>. [Zugriff am 21 August 2025].
- [6] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung, „Physik 10 – Physikalische Erkenntnisse und Arbeitsweisen für technische Entwicklungen nutzen,“ [Online]. Available: <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/10/physik>. [Zugriff am 31 Mai 2025].
- [7] F. Close, *Neutrino*, Berlin [u.a.]: Springer Spektrum, 2012.
- [8] G. Ecker, „James Chadwick: ahead of his time,“ *arXiv*, 14. Juli 2020.
- [9] E. Fermi, „Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I,“ *Zeitschrift für Physik*, Nr. 88, pp. 161-177, 1934.
- [10] Nobel Prize Outreach, „The Nobel Prize in Physics 1945,“ [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1945/summary/>. [Zugriff am 29. Mai 2025].

- [11] Nobel Prize Outreach, „The Nobel Prize in Physics 1938,“ [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1938/summary/>. [Zugriff am 29 Mai 2025].
- [12] Nobel Prize Outreach, „The Nobel Prize in Physics 1995,“ [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1995/summary/>. [Zugriff am 29 Mai 2025].
- [13] Nobel Prize Outreach, „The Nobel Prize in Physics 1988,“ [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1988/summary/>. [Zugriff am 31 Mai 2025].
- [14] J. Jackson, K. Riessellmann, K. Niwa, S. Wright, C. May, D. Morrison, J. Fedele, B. Nickles, C. Pollard, E. Marselos und C. Yoon, „Physicists Find First Direct Evidence for Tau Neutrino at Fermilab,“ 20 Juli 2000. [Online]. Available: <https://news.fnal.gov/2000/07/physicists-find-first-direct-evidence-tau-neutrino-fermilab/>. [Zugriff am 31 Mai 2025].
- [15] DONUT Collaboration, „Observation of Tau Neutrino Interactions,“ *Physics Letters B*, Bd. 504, Nr. 3, pp. 218-224, 12 April 2001.
- [16] M. S. Athar und S. K. Singh, *The physics of neutrino interactions*, Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [17] S. Dolan, „Neutrino interactions,“ 13 Februar 2025. [Online]. Available: <https://neutrino.web.cern.ch/blog/nu-interactions/>. [Zugriff am 31 Mai 2025].
- [18] S. M. Bilenky, „Bruno Pontecorvo and the neutrino,“ *Physics-Uspekhi*, Bd. 57, Nr. 5, pp. 489-496, 31 Mai 2014.
- [19] M. S. Athar, A. Fatima und S. K. Singh, „Neutrinos and their interactions with matter,“ 2022.
- [20] KATRIN Collaboration, „Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data,“ *Science*, Bd. 388, Nr. 6743, pp. 180-185, 10 April 2025.
- [21] R. J. Davis, D. S. Harmer und K. C. Hoffman, „Search for Neutrinos from the Sun,“ *Physical Review Letters*, Bd. 20, Nr. 21, pp. 1205-1209, 1968.

- [22] K. Hirata, M. Kajita, M. Koshiba, M. Nakahata, Y. Oyama, N. Sato, A. Suzuki, M. Takita, Y. Totsuka, T. Kifune, T. Suda, K. Takahashi, T. Tanimori, K. Miyano, M. Yamada, E. W. Beier, L. R. Feldscher, S. B. Kim, A. K. Mann und F. M. Newcomer, „Observation of a neutrino burst from the supernova SN1987A,“ *Physical Review Letters*, Bd. 58, Nr. 14, pp. 1490-1493, 1987.
- [23] R. M. Bionta, G. Blewitt, C. B. Bratton, D. Casper, A. Ciocio, R. Claus, B. Cortez, M. Crouch und S. T. Dye, „Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud,“ *Physical Review Letters*, Bd. 58, Nr. 14, pp. 1494-1496, 1987.
- [24] M. Aglietta, G. Badino, G. Bologna, C. Castagnoli, A. Castellina, V. L. Dadykin, W. Fulgione, P. Galeotti, F. F. Kalkuchov, B. Kortchaguin, P. V. Kortchaguin, A. S. Malguin, V. G. Ryassny, O. G. Ryazhskaya, O. Saavedra, V. P. Talochkin und Tr, „On the Event Observed in the Mont Blanc Underground Neutrino Observatory during the Occurrence of Supernova 1987a,“ *EPL*, Bd. 3, Nr. 12, pp. 1315-1320, 1987.
- [25] H.-T. Janka, *Supernovae und kosmische Gammablitze : Ursachen und Folgen von Sternexplosionen*, Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl., 2011.
- [26] H. Kolanoski und N. Wermes, *Teilchendetektoren : Grundlagen und Anwendungen*, Berlin; Heidelberg: Springer Spektrum, 2016, pp. xvi, 921.
- [27] IN2P3, „National Institute of Nuclear and Particle Physics (IN2P3),“ [Online]. Available: https://neutrino-history.in2p3.fr/wp-content/uploads/2022/11/1946_Pontecorvo.pdf. [Zugriff am 18 August 2025].
- [28] K. Lande, „The Life of Raymond Davis, Jr. and the Beginning of Neutrino Astronomy,“ *Nature*, Bd. 59, Nr. 1, pp. 21-39, 2009.
- [29] Nobel Prize Outreach, „Raymond Davis Jr. - Biographical,“ [Online]. Available: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/davis/biographical>. [Zugriff am 18 August 2025].
- [30] C. D. Anderson, „The Positive Electron,“ *Physical Review*, Bd. 43, Nr. 6, pp. 491-494, 1933.

- [31] J. C. Street und E. C. Stevenson, „New Evidence for the Existence of a Particle of Mass Intermediate Between the Proton and Electron,“ *Physical Reports*, Bd. 52, Nr. 9, pp. 1003-1004, 1937.
- [32] IKEA Deutschland GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.ikea.com/de/de/p/samla-box-transparent-40102978>. [Zugriff am 19 August 2025].
- [33] W. Stolz, Radioaktivität : Grundlagen, Messung, Anwendungen, 5 Hrsg., Wiesbaden: Teubner, 2005.
- [34] C.C.Buchner, Mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung, 1 Hrsg., Bamberg: C.C.Buchner, 2024.
- [35] M. Ha Minh, „New ways to explore the neutrino sky through the eyes of the South Pole — Development of numerical methods for the IceCube Neutrino Observatory,“ München, 2025.
- [36] C. Kopper, N. Kurahashi und N. Whitehorn, „Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector,“ *Science*, Bd. 342, Nr. 6161, p. 947, 22. Nov. 2013.
- [37] IceCube Collaboration, „Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert,“ *Science*, Bd. 361, Nr. 6398, pp. 147-151, 2018.
- [38] IceCube Collaboration, „Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068,“ *Science*, Bd. 378, Nr. 6619, pp. 538-543, 2022.
- [39] Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, „IceCube Gen2,“ [Online]. Available: https://www.icecube-gen2.de/projekt/index_ger.html. [Zugriff am 21 August 2025].
- [40] „Cherenkov Radiation Control via Self-accelerating Wave-packets,“ *Scientific Reports*, Bd. 7, Nr. 8695, pp. 1-8, 2017.

6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: KONTINUIERLICHES ENERGIESPEKTRUM BEIM B ⁻ -ZERFALL VON RAE.....	3
ABBILDUNG 2: B ⁻ -ZERFALL EINES NEUTRONS N IN PROTON P, ELEKTRON E- UND ANTI-	
NEUTRINO N _E	4
ABBILDUNG 3: STANDARDMODELL DER ELEMENTARTEILCHEN (SM).....	FEHLER!
TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.	
ABBILDUNG 4: TEILCHEN-ANTITEILCHEN-BEZIEHUNG DER LEPTONEN.	6
ABBILDUNG 5: AUFBAU DES EXPERIMENTS VON DAVIS	8
ABBILDUNG 6: CHERENKOV-EFFEKT.....	9

ABBILDUNG 1: KONTINUIERLICHES ENERGIESPEKTRUM BEIM B⁻-ZERFALL VON RAE.

QUELLE: ATHAR, ET AL., 2020, S. 2. **FEHLER!** TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

ABBILDUNG 2: B⁻-ZERFALL EINES NEUTRONS N IN PROTON P, ELEKTRON N_E UND ANTI-
NEUTRINO N_E. QUELLE: AUTOR..... **FEHLER!** TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

ABBILDUNG 3: STANDARDMODELL DER ELEMENTARTEILCHEN (SM). QUELLE: CUSH, VIA
WIKIMEDIA COMMONS:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg, 31. MAI 2025. **FEHLER!** TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

ABBILDUNG 4: TEILCHEN-ANTITEILCHEN-BEZIEHUNG DER LEPTONEN. QUELLE: AUTOR.
..... **FEHLER!** TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.

QUELLE 5: [HTTPS://WWW.NOBELPRIZE.ORG/PRIZES/PHYSICS/2002/POPULAR-INFORMATION](https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/popular-information), 19. AUGUST 2025

QUELLE 6 [40, p. 2]

QUELLE 7: EIGENE ABB

Abbildung 18: Aufbau des IceCube Neutrino-Detektors: [5]