

Filipe Ramalho | Jonathan Vogt

NeutrinoForschung

anhand des Icecube-Projekt

Besondere Lernleistung
Sprendlingen, Juni 2019

IGS Gerhard Ertl
Physik-Leistungskurs bei Mathias Wenzel



Credit: Martin Wolf, IceCube/NSF

Kernthesen

- Das IceCube ermöglicht es Supernovae schneller zu finden, wodurch man mehr Daten über die Supernovae sammeln kann.
- Nachweis von magnetischen Monopolen wird durch IceCube ermöglicht
- Im Vergleich zu Antares stellt IceCube die wesentlich effektivere Nachweismethode dar
- Mit PINGU hätte man innerhalb einiger Jahre die Masse von Neutrinos bestimmen können.
- Ausgehend von den Resultaten von IceCube sollte man ähnlich Projekte mit Fördergelder subventionieren
- Wasser im gefrorenen Zustand stellt ein besseres Material zur Wechselwirkung dar als im flüssigen Zustand (bezogen auf IceCube und Antares)
- Das Super-Kamionkande ist aufwendiger zu bauen, dafür ist es auch eher in anderen Bereichen tätig.
- Das DUNE-Experiment ist deutlich aufwendiger und teurer als das IceCube, doch es wird vermutlich auch mehr wissenschaftlichen Output haben.
- Das IceCube-Projekt ist besonders durch seine Kollaboration erfolgreich, welche so groß geworden ist.
- In der Neutrino-Physik stehen noch viele offene Fragen, es könnte das interessanteste Fachbereich der Physik sein in den nächsten Jahren.

Arbeitprozess

Unser Physik-Fachlehrer empfahl uns den Besuch einer IceCube-Masterclass an der Johannes-Gutenberg-Universität im letzten Jahr. Dort wurden wir in die Neutrinophysik eingeführt, zudem wurde uns das IceCube-Projekt vorgestellt. Zum Ende des Tages durften wir selber auch tätig werden, wir analysierten Events aus dem Detektor und durften auch selber nachforschen was dort gemacht wird. Dies faszte uns so sehr, dass wir uns dazu entschieden gemeinsam eine Arbeit über das Projekt zu schreiben. Wir wollten unser Wissen erweitern. Mit den nächsten Erweiterungen des Neutrino-Detektors glauben wir, dass eine Erweiterungen des momentanen Verständnis der Physik durch diese Detektoren möglich ist.

Zunächst informierten wir uns grob über das Projekt und fingen an mehr über die Neutrinophysik zu lernen. Daraufhin haben wir eine Übersicht formuliert über die Themen, über welche wir etwas schreiben wollten und schreiben mussten. Da dies in Zusammenarbeit geschah teilten wir uns die Themen auf und jeder informierte sich genauer. Während unserer Arbeit stellten wir fest, dass einige Institute nicht viele Spezifikationen veröffentlichten, dies erschwerte ein Vergleich an manchen Stellen. In unseren Gesprächen haben wir gelernt wie man fachlich und wissenschaftlich korrekt zitiert und Arbeiten schreibt.

Inhaltsverzeichnis

Kernthesen	2
Arbeitsprozess	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 IceCube South Pole Observatory	6
1.1 Das IceCube-Projekt	6
1.1.1 Was ist das IceCube-Projekt?	6
1.1.2 Ziele des IceCube-Projekts	6
1.1.3 Aufenthalt am Observatorium	8
1.2 Geschichte	8
1.2.1 Bau des IceCube	8
1.2.2 Erfolge	9
1.3 Konstruktion und Technik	11
1.3.1 Aufbau des Detektors	11
1.3.2 Funktionsweise der Bestandteile	12
1.3.3 Instandhaltung der Sensoren	13
1.4 Funktionsweise und Messungen	14
1.5 Warum befindet sich das Projekt am Südpol ?	16
1.6 Wie wichtig ist das IceCube-Projekt und hat es einen Nutzen?	17
1.7 Verbesserungsmöglichkeiten des IceCube-Projekts	18
1.8 Gescheiterte PINGU-Erweiterung	19
1.9 Zukunft des IceCube-Projekts	21
2 Neutrinoforschung	24
2.1 Das Neutrino	24
2.1.1 Symmetrie	25
2.1.2 Geschwindigkeit und Masse	26
2.2 Geschichte	27
2.2.1 β^- Zerfall	27
2.2.2 Reines-Cowan-Experiment	28
2.2.3 Homestake-Experiment	29
2.2.4 Neutrino-Oszillation	30
2.3 Forschung	31
2.3.1 Astrophysik	31
2.3.2 Kosmologie	31

2.3.3	Zukünftige Forschung	32
2.4	Forschung am IceCube	33
2.4.1	Astrophysikalische Forschung	33
2.4.2	Glaziologie	35
2.5	Interpretation von Neutrino-Ereignissen	36
2.5.1	Spursignatur / μ -Signatur	36
2.5.2	Kaskadensignatur / e -Signatur	37
2.5.3	Double-Bang-Signatur / τ -Signatur	38
3	Inwiefern hat das IceCube-Projekt seine Ziele erreicht	39
4	Rolle des IceCube-Projekts in der Wissenschaftsdiplomatie	40
4.1	Finanzierung und Kooperationen	40
4.2	IceCube-Kollaboration	41
4.3	Wissenschaftliche Bedeutung	41
5	Vergleich zu anderen Forschungsstätten	43
5.1	Super-Kamiokande	43
5.1.1	Geschichte	43
5.1.2	Hyper-Kamiokande	45
5.1.3	Vergleich	46
5.2	DUNE	47
5.2.1	Untersuchungsthemen	48
5.2.2	Vergleich	51
5.3	Antares (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research)	52
5.4	Double-Chooz-Experiment	53
5.5	Gallex (Gallium-Experiment)	54
5.6	Ergebnisse des Vergleichs	56
Literaturverzeichnis		58
A Anhänge		64
A.1	Beta-Zerfall Spektrum	64
A.2	Brief: Paulis Vorschlag von Neutrinos	64
A.3	Cowan-Reines Experiment	66
A.4	DUNE	66

1 | IceCube South Pole Observatory

1.1 Das IceCube-Projekt

1.1.1 Was ist das IceCube-Projekt?

Beim IceCube-Projekt handelt es sich um eine Art Teleskop beziehungsweise um einen (Teilchen-)Detektor. In der folgenden Ausarbeitung werden die Begriffe Teleskop und Detektor synonym verwendet. Dieser Detektor dient dazu hochenergetische Neutrinos zu entdecken, zu erfassen und zu erforschen. IceCube befindet sich am Südpol in der Antarktis und gehört zu der Amundsen-Scott-Südpolstation. Das Volumen des IceCube beträgt etwa 1 km^3 . Es befindet sich im Eis in 3000 Meter Tiefe. Das Projekt und die Forschung werden seit 2010 betrieben. Das Neutrino wird nachgewiesen, wenn es mit dem Eis reagiert und wechselwirkt. Daraus entstehen Elektronen, Myonen und/oder Tauonen, welche im Eis für Lichtstrahlung sorgen. Im IceCube befinden sich Fotomultipler (dabei handelt sich um extrem empfindliche Sensoren), welche die Tscherenkow-Strahlung nachweisen [Col].

1.1.2 Ziele des IceCube-Projekts

Das Hauptziel des Projekts besteht darin herauszufinden wo der Ursprung der kosmischen Strahlung liegt, wozu auch das Neutrino zählt. Es gibt auch Neutrinoquellen, welche von der Erde stammen, diese sind jedoch energetisch niedrig und sind weniger relevant für die Forschung. Man konnte bisher feststellen, dass es keine dominierenden Quellen gibt und die Neutrinos von überall aus dem Weltraum kommen. Mit bestimmten Messungen des Projekts werden Rechnungen durch-

geführt mit dem Ziel die Quelle zu ermitteln, was jedoch nicht bei jeder Messung möglich ist, da hauptsächlich Messungen von atmosphärischen Prozessen gemacht werden. Diese müssen dann von den gewünschten Ergebnissen getrennt werden. Außerdem versucht man die sogenannten Grundlagen zu erforschen. In diesem Forschungsgebiet der Physik gibt es noch viele teils grundlegende ungeklärte Fragen, wie die Frage weshalb Neutrinos elektromagnetische Kräfte ignorieren und Materie nahezu ungehindert passieren können, was in der Umgebung eines schwarzen Lochs passiert, wie eine Supernova explodiert, woher Neutrinos stammen und viele weitere Fragen. Durch das Projekt sollen solche grundlegenden Fragen beantwortet werden, damit man auf Grundlage dieser Erkenntnisse weiter und tiefgreifender forschen kann [Col]. Ein weiteres Ziel besteht darin sogenannte GZK-Neutrinos zu beweisen. Das sind hypothetische Neutrinos mit einer Energie, die die Energie kosmischer Neutrinos um den Faktor 1000 übersteigen. Man geht davon aus, dass diese GZK-Neutrinos durch eine Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung zustande kommen. Unter der kosmischen Hintergrundstrahlung versteht man eine Mikrowellenstrahlung, welche seit Beginn des Urknalls existiert. Allerdings ist dies erst die Theorie, die durch Messdaten begründet werden soll. Das sind die eigentlichen Ziele des Projekts, das IceCube-Projekt hat neben diesen Hauptzielen auch untergeordnete Aufgaben, die auch nicht zwangsläufig im direkten Zusammenhang mit der Neutrinoforschung stehen müssen. Beispielsweise lassen sich Anisotropiestudien durchführen. Darunter versteht man, dass ein Prozess, der von der Bewegungsrichtung abhängig ist und das Gegenteil der Isotropie ist, bei der ein Prozess nicht von der Bewegungsrichtung abhängig ist. Darunter sind beispielsweise Versuche mit akustischen Wellen zu verstehen. Die Anisotropiestudien finden auch bei der Neutriountersuchung statt, aber nicht ausschließlich [Col].

1.1.3 Aufenthalt am Observatorium

Zur Zeit des australischen Sommers befinden sich etwa 150 Wissenschaftler und Hilfskräfte am Observatorium. Über die Winterzeit halten sich rund 40 Wissenschaftler und Hilfskräfte am Observatorium auf. Einige Wissenschaftler entschließen sich auch für ein komplettes Jahr an der Amundsen-Scott-Südpolstation zu bleiben und zu forschen. Dabei handelt es sich auch in der Regel um zwei Physiker die ihr Physikstudium abgeschlossen haben und somit schon einige theoretische als auch praktische Kenntnisse erlangt haben. Diese zwei Wissenschaftler sind damit beauftragt die Computer, die zur Datenanalyse dienen, zu warten und auch weitere Daten zu sammeln. Dies stellt aber nicht die einzige Aufgabe dar, denn an der Südpolstation gibt es auch wesentlich mehr Aufgaben, wie zum Beispiel die Tätigkeit in der Feuerwehr. Wie man also sehen kann nicht ausschließlich wissenschaftliche sondern auch allgemeine Tätigkeiten. Während den Bauarbeiten des Detektors waren etwa 48 Personen dabei, die zum IceCube-Team gehören, um die sicherzustellen, dass die Arbeiten nach Plan verlaufen [Col].

1.2 Geschichte

1.2.1 Bau des IceCube

Das angewandte Prinzip (in 1.1 beschrieben) wurde auch in einem anderen Projekt, das ebenfalls dazu diente kosmische Höhenstrahlung zu untersuchen, angewendet. Dabei handelt es sich um das Projekt AMANDA (Antartic Muon And Neutrino Detector Array). Dieses Teleskop wurde 2009 deaktiviert, da IceCube mehr Relevanz hatte. Jedoch wurden die Gelder für das IceCube-Projekt bereitgestellt, da AMANDA große Erfolge erzielte und da IceCube im Wesentlichen eine Größere Version von AMANDA ist. Die Planung für das IceCube-Projekt nahm 10 Jahre in Anspruch, die Bauzeit dann 6 Jahre und nach dieser Zeit am 18. Dezember 2010 wurden die Bauarbeiten beendet.

Der Leiter des Projekts ist Francis Halzen, welcher auch bei der Entwicklung des Projekts tätig war. Francis Halzen ist ein Elementarteilchen- und Astrophysiker.

Noch während des Baus des Projekts wurden die ersten wissenschaftlichen Beobachtungen gemacht, welche jedoch, im Vergleich zu den anderen Beobachtungen, unwichtiger sind. Die digitalen optischen Module wurden nach und nach ins Eis eingelassen und mit der Südpolstation vernetzt, weshalb während der Bauzeit schon Messungen durchgeführt wurden, diese waren aber aus dem Grund irrelevant, da ihre Energien zu niedrig waren und eher Neutrinos atmosphärischer Wechselwirkungen waren.

2013 hat man die zu diesem Zeitpunkt fundamentalste Entdeckung von hochenergetischen kosmischen Neutrinos gemacht. Also nach etwas mehr als zwei Jahren, was zeitlich gesehen, kein langer Zeitraum ist, wenn man bedenkt, dass die Wechselwirkung zwischen Materie und Neutrinos selten ist [Col].

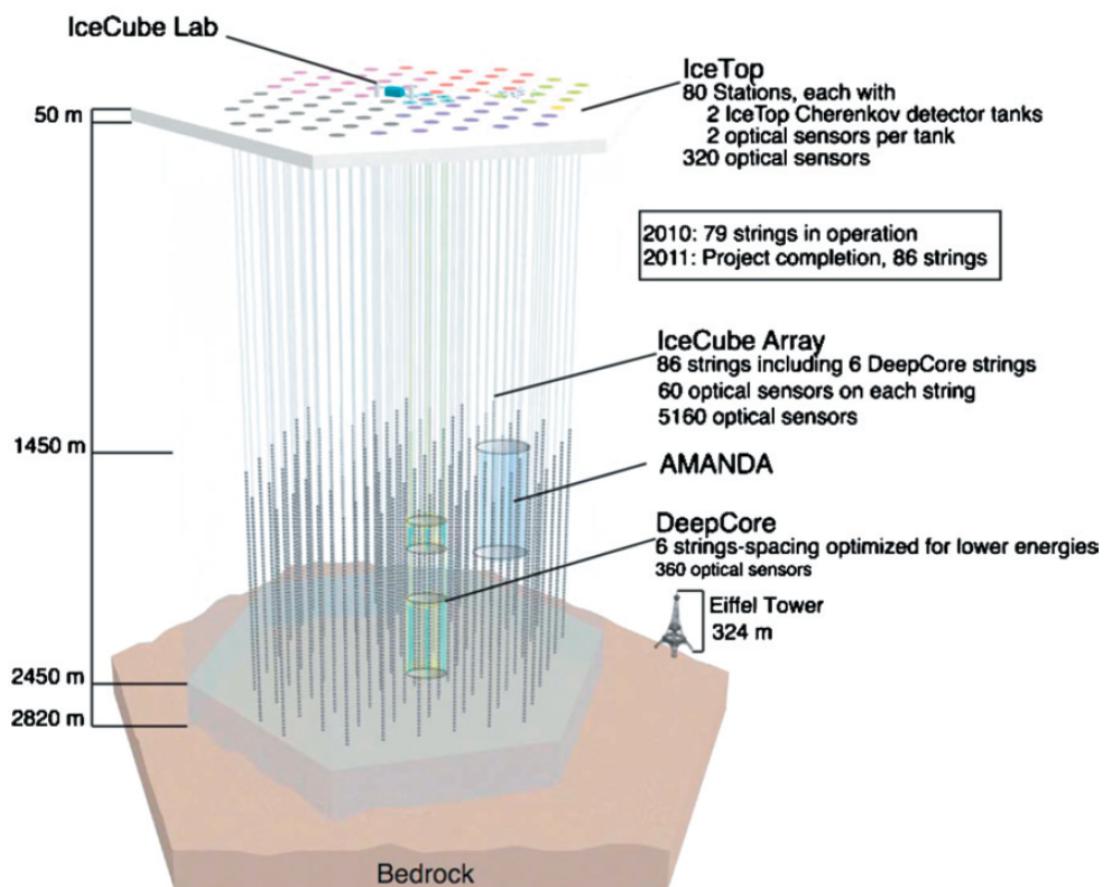
1.2.2 Erfolge

Durch das IceCube-Projekt gab es viele wissenschaftliche Erfolge im Bereich der Astro- und Teilchenphysik. Zum einen hat die IceCube-Kollaboration im Juni 2013 erste Hinweise darauf veröffentlicht, dass einige Messungen darauf hindeuten, dass es einen Fluss von Neutrinos gibt, der auf eine unbekannte Strahlungsquelle hindeutet, wie einer möglichen Supernova. Jedoch gab es nur wenige Messwerte, weshalb man noch keine empirisch belegte Aussage treffen konnte. Diese Hinweise, die zu dieser Hypothese geführt haben, wurden im November 2013 bestätigt. Am IceCube-Projekt wurden weitere Messungen durchgeführt, die die Hypothese bestätigt haben und gezeigt haben, dass das Neutrino nicht terrestrisch ist, das bedeutet, dass es nicht von der Erde ausgeht. Für diese Erkenntnis verlieh das Magazin "Physics World" den Preis "Breakthrough of the year 2013". Man konnte außerdem den Nachweis für die Existenz von kosmischen Myonneutrinos erbringen.

Zwischen dem Mai 2010 und dem Mai 2012 hat man 28 Ergebnisse gemessen mit hochenergetischen Neutrinos. Darunter 1000; 1100 und 2200 Tesla-Elektronenvolt. Außerdem hat man ein Neutrinoereignis mit einer Energie von 2600 TeV (Elektronenvolt) messen können, was die bisher größte gemessene Energie bei den Neutrinos darstellte. Die Messung mit 2200 Tesla-Elektronenvolt wird als Big Bird deklariert. Ein möglicher Ursprung der Strahlung Big Bird konnte ermittelt werden durch einen Vergleich der Versuchsdaten vom IceCube-Projekt mit den Daten des Gammastrahlen-Weltraumteleskop Fermi und mit dem Radioteleskop Tanami. Die Wissenschaftler, die mit diesen Teleskopen beauftragt sind, wurden nach der Entdeckung diese Ereignis konsultiert und richteten mithilfe der IceCube-Daten die Teleskope neu aus. Dabei handelt es sich um einen Blazar-Ausbruch in der Galaxie PKS B 1424-418, welcher für kosmische Höhenstrahlung sorgt. Dies stellt jedoch nicht die einzige gefundene Quelle von Neutrinos dar. Bei einem weiteren Vergleich mit anderen Teleskopen konnte man einen aktiven Galaxiekern identifizieren, welcher ein möglicher Ursprung von hochenergetischen Protonen ist, was zumindest vermutet wird. Ein noch aktuelleres Ergebnis konnte man 2018 registrieren als man Daten von IceCube mit den Daten von anderen Teleskopen verglichen hat und den Blazar TXS 0506+056 als potentielle Quelle ausmachte und nicht nur für Neutrinos sondern auch für hochenergetische Protonen [Col] [MK18].

1.3 Konstruktion und Technik

1.3.1 Aufbau des Detektors



Quelle: IceCube Science Team – Francis Halzen, Department of Physics, University of Wisconsin

1.3.2 Funktionsweise der Bestandteile

Im oberen Bild kann man den Aufbau des Detektors erkennen. Im Eiswürfel befinden sich 5160 der digitalen optischen Module (Akronym: DOMs/Bild auf der rechten Seite) mit jeweils einem Photomultiplier und der notwendigen Elektronik. Der Photomultiplier (oder auch Photoelektronenvervielfacher) dient dazu die schwachen Lichtsignale (beispielsweise der Photonen oder Myonen) zu verstärken durch die Erzeugung eines elektrischen Signals, welcher nun die Messung verstärkt. Damit möglichst viele Ergebnisse gesammelt werden können liegt der Empfangsbereich zwischen 300 und 650 nm. Die Funktion der DOMs besteht darin die Tscherenkov-Strahlung zu registrieren, sie zu verstärken, zu digitalisieren und sie an die Station weiterzuleiten. Die DOMs sind an vertikal positionierten "Saiten" befestigt. Die Anordnung ist regelmäßig. Der Abstand zwischen den einzelnen Saiten und DOMs ist immer gleich außer im DeepCore Unterdetektor, denn dort gibt es eine dichtere Anordnung der Saiten und DOMs, um Neutrinooszillationen messen zu können, da so die Energieschwelle der Neutrinos heruntergesetzt wird auf etwa 10 GeV. Die DOMs sind zusätzlich noch mit einem eigenen Mini-Computer sowie einer Präzisionsuhr ausgestattet. Die Präzisionsuhr misst auf etwa 5 Nanosekunden genau, wann das Tscherenkov-Licht registriert wird, um bessere Berechnungen und Datenanalysen durchführen zu können. Diese Daten werden dann über kilometerlange Kabel zu dem Datenerfassungssystem in der Südpolstation weitergeleitet.

Über dem Detektor befindet sich das sogenannte IceTop mit 81 Stationen. Die Stationen befinden sich hauptsächlich über den Saiten und sind mit jeweils zwei Tanks ausgestattet, die ebenfalls zwei DOMs haben, die nach unten ausgerichtet sind. IceTop dient ebenfalls dazu Höhenstrahlung zu messen, aber IceTop wird vorwiegend dazu verwendet, um die Zusammensetzung der Höhen-



Quelle: Taavi Adamberg

strahlung zu identifizieren und IceTop hilft dabei die Richtung des Elementarteilchenflusses zu bestimmen. Des Weiteren kann man auch Messungen erfassen von Primärstrahlung über "Luftduschen", das heißt, dass auch oberhalb des Eises kosmische Höhenstrahlung gemessen werden kann. Die ist ein kleiner Forschungsaspekt, der vor allem als Vergleich und Abgleich dient. Myonen können auch durch Wechselwirkungen von Höhenstrahlung mit der irdischen Atmosphäre entstehen. Man möchte mit IceCube Daten aussortieren, die aus atmosphärischen Prozessen entstehen. Wenn nun also IceCube ein Ergebnis registriert und dieses zusammenfällt mit IceTop, dann kann man davon ausgehen, dass diese Daten eine atmosphärische Quelle haben und man muss sich nicht weiter damit auseinandersetzen, was die Datenanalyse erleichtert. [?] Oftmals erfassen die optischen Module sogenanntes Hintergrundrauschen, von beispielsweise Photonen. Diese Daten müssen dann aussortiert werden. Oftmals kann man solche Daten schon aussortieren, wenn man erkennt, dass ihre Energien in einem niedrigen Bereich liegen. [?]

1.3.3 Instandhaltung der Sensoren

Wie bereits angesprochen besteht der Detektor zu einem großen Anteil aus Sensoren, die die Tscherenkow-Strahlung identifizieren. Sobald sich die Sensoren im Eis befinden kann man sie physisch nicht mehr erreichen, deshalb werden sie sorgfältig geprüft und getestet werden, bevor sie eingesetzt werden. Denn nachdem die Module ins Eis eingelassen wurden, wurden diese Stellen wieder zugefroren und IceTop wurde oberhalb des Detektors errichtet. Es ist jedoch möglich auf die Software des Sensors zuzugreifen und ein Software Remote zu starten, wenn es beispielsweise elektronische Probleme gibt, denn alle Sensoren sind mit dem IceCube Lap am Südpol verbunden. IceCube Lap meint die Computer, die mit den DOMs verbunden sind. [Col]

1.4 Funktionsweise und Messungen

Mit dem Teilchendetektor werden an sich keine Neutrinos registriert sondern sogenannte Sekundärteilchen. Wenn ein Neutrino auf das Eis trifft, kommt es selten zu Wechselwirkungen, in Form von einem Neutrino, das auf ein Proton oder Elektron eines Atoms stößt und eine Kernreaktion in Gang setzt. Aber wenn diese sogenannte schwache Wechselwirkung zustande kommt, dann entstehen daraus Sekundärteilchen wie Elektronen, Myonen oder Tauonen, welche dann vom Detektor gemessen werden. Im Fall, dass man die gewünschten Ergebnisse erzielt gilt es vor allem die Richtung dieser zu bestimmen. Ideal für diese Bestimmung ist es, wenn ein Myon-Neutrino mit einem Eismolekül wechseltwirkt. Aus dieser Wechselwirkung entstehen dann Myonen. Ein Myon behält idealer Weise die Bewegungsrichtung des Neutrinos bei auch nach der Wechselwirkung mit Eis. Dieses Myon durchquert die Sensoren und hinterlässt dabei blaues Licht, die Tscherenkow-Strahlung. Unter Tscherenkow-Strahlung versteht man im weitesten Sinne eine bläuliche Lichterscheinung, die entsteht, wenn relativistische und geladene Teilchen wie beispielsweise Myonen oder Tauonen durch ein Dielektrikum gehen. Die entstehenden Lichtblitze werden durch Photomultipler verstärkt und die Lichtstrahlung wird dann in elektrische Impulse umgewandelt. Diese Messdaten kann man dann im Hinblick auf die Bewegungsrichtung auswerten und anhand der Ankunftszeiten der Teilchen bei den Sensoren oder den Eintrittswinkeln, lässt sich dann die Bewegungsrichtung berechnen. Diese Berechnungen sind äußerst präzise mit einer Ungenauigkeit des Eintrittswinkels von $0,5^\circ$. Es wird sich zu Nutze gemacht, dass sich die Neutrinos ungehindert und geradlinig durch das Weltall bewegen, da sie elektrisch neutral sind und somit nicht durch Magnetfelder abgelenkt werden können. Des Weiteren findet eine Wechselwirkung mit Materie eher selten statt, somit behalten sie auch ihre Flugbahn auf der Erde bei und auch nach der Wechselwirkung mit dem Eis bleibt die Bewegungsrichtung dieselbe, zumindest bei den Myonneutrinos. Dies war ein ausschlaggebender Grund weshalb sich das IceCube-Team vorwiegend auf Myonneutrinos fokussierte. Auch

deshalb, weil die Lichtblitze, die sie erzeugen, sich über Kilometer erstrecken können und somit trotzdem den Detektor durchlaufen. So können auch Wechselwirkungen registriert werden, welche eine größere Distanz zum Detektor haben. Somit kann man beim Eintreffen auf der Erde leichter Rückschlüsse ziehen und Berechnungen zu ihrem Ursprung durchführen. Allerdings werden auch die anderen Neutrinoarten untersucht, da man einige Daten gesammelt hat, welche nicht durch die Wechselwirkung eines Myons mit Eis zustande kamen.

Die kosmische Höhenstrahlung besteht aus vielen geladenen Teilchen wie Protonen und erstmal keinen Neutrinos. Diese Höhenstrahlung würde durch das Magnetfeld abgelenkt werden und man könnte so keinen Rückschlüsse ziehen, aber man geht davon aus, dass die kosmische Höhenstrahlung an ihrem Ursprungsort mit Photonen wechselwirkt und daraus Neutrinos entstehen.

Damit die Neutrinos Licht erzeugen können, gilt folgende Gleichung:

$$\text{Geschwindigkeit} > \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit}}{\text{Brechungsindex}} = v > \frac{c}{n}$$

Nach dieser Formel muss also die Geschwindigkeit der Neutrinos, nach der stattgefundenen Wechselwirkung mit dem Medium, größer sein als der Quotient aus Lichtgeschwindigkeit und des Brechungsindex des Mediums (beispielsweise Eis). Dies lässt sich auch in einer Rechnung verdeutlichen:

$$228850050 \frac{m}{s} > \frac{299792458 \frac{m}{s}}{1,31} = 228849204,58 \frac{m}{s}$$

Der Quotient ist kleiner als die Geschwindigkeit des Neutrinos, was nun die Registrierung des Lichts mit dem Detektor ermöglicht. Damit man diese Rechnung überhaupt anwenden kann gilt, dass die Neutrinos nicht nur das Medium durchqueren sondern auch mit ihnen wechselwirken.

Es entsteht ein sogenannter "Überlichtknall", dieser ist an der Tscherenkow-Strahlung bemerkbar. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist ebenfalls, dass man Neutrinos nie direkt nachweisen kann, da sie elektrisch neutral sind, weshalb man sie lediglich über die Sekundärteilchen nachweisen kann, die

sie durch Wechselwirkung hinterlassen. [Wilc] [Hal16] [Deua]

Die Reaktion im Eis läuft nach folgender Gleichung ab:



1.5 Warum befindet sich das Projekt am Südpol ?

Elementar zu beantworten ist, weshalb sich das Projekt am Südpol und nicht beispielsweise am Nordpol oder in Amerika in Wisconsin befindet. Dafür gibt es viele Gründe. Ein wichtiger Grund, warum sich das Projekt an einem der beiden Pole befinden muss ist, dass wie bereits angesprochen die Neutrinos mit dem Eis wechselwirken und die dadurch entstehenden Teilchen (im Folgenden als Sekundärteilchen bezeichnet), Licht abgeben und die Detektoren des IceCube registrieren dies als Tscherenkov-Strahlung bezeichnete Licht. Das Licht wird teilweise bis zu einem Kilometer erstreckt, somit werden viele Eisatome gebraucht, damit IceCube es registrieren kann. Damit dieser Prozess effektiv ablaufen kann benötigt man große Mengen an einem transparenten Material, wie in diesem Fall Eis, da die Wechselwirkung zwischen dem Eis und den Neutrinos eher selten ist. Ein Vorteil am Südpol im Gegensatz zum Nordpol ist, dass der Südpol viel Eis enthält mit den Eigenschaften, dass es klar, rein sowie stabil ist was eine optimalere Wechselwirkung der Höhenstrahlung mit dem Eis ermöglicht.

Des Weiteren enthält Eis Luftblasen, welche die Messungen von IceCube verfälschen würden, da das Medium ein anderes wäre, in welchem sich das Licht ausbreiten würde beziehungsweise würden weniger Wechselwirkungen stattfinden, nicht zu vergessen ist, dass die Detektoren auch somit viel mehr uninteressante Messungen registrieren würden und das Licht seine Geschwindigkeit und Richtung verändern würde. Jedoch ist dies am Südpol nicht so stark ausgeprägt, da sich am Südpol mit der Zeit Eis und vorwiegend Schnee auftürmten, und zwar sehr dick und dicht, so wurden die darunterliegen Eisschichten nach unten gedrängt, zusammengedrückt und komprimiert. Der Druck

verdrängte die Luftblasen. Man spricht davon, dass das tiefe Eis am Südpol ultra-transparent ist. IceCube muss abgeschirmt werden, um es vor Strahlung an der Erdoberfläche zu schützen, da diese die Messwerte verfälschen würden. Die Sensoren von IceCube beginnen erst ab einer Tiefe von 1500 Metern und liegen somit geschützt vor der natürlichen Einstrahlung an der Erdoberfläche. Man muss auch bedenken, dass die IceCube-Kollaboration trotzdem noch Messungen von Strahlungen atmosphärischer Herkunft macht. Wenn nicht, dann gäbe es eine Überflutung mit irrelevanten Daten. Außerdem bietet sich H₂O (ob flüssig oder gefroren) an, da es ein transparentes Element ist. Dieses Element bietet den Vorteil, dass es dieses Element zur Genüge gibt. Ein anderes Experiment zum Neutrino nachweis benötigte Gallium, was seltener und teurer ist. Dies sind alles Anforderungen, die für Durchführung des IceCube-Projekts erfüllt sein müssen. Die Südpolstation, wo sich das IceCube befindet, befindet sich an einem Ort in der Antarktis, an der alle diese Bedingungen und Anforderungen zum Großteil gegeben sind [Col].

1.6 Wie wichtig ist das IceCube-Projekt und hat es einen Nutzen?

Wie bereits angesprochen handelt es beim IceCube-Projekt um Grundlagenforschung durch welche man sich erhofft noch mehr Informationen zu sammeln mit denen man sich vieles erklären kann. In diesem Fall geht es um unser Universum. Wenn die Grundlagen verstanden werden, kann man mit diesen viele übergeordnete Dinge erklären und diese helfen dabei das Universum zu studieren. Die Neutrinos werden mit Fingerabdrücken verglichen, welche ein Hinweis auf etwas Größeres sind. Im Hinblick darauf hat das Projekt eine große Relevanz. Zum einen da man mit dem IceCube-Projekt schon erste Erfolge erzielte und diese Erfolge stellen einen Schritt in die Beantwortung der Fragen dar. Beispielsweise besteht unser Universum zu etwa 4% aus Materie, dazu gehören Atome und

die dazugehörigen Elektronen aber auch Protonen. Dann gibt es auch die dunkle Materie, die etwa 23% unseres Universums ausmacht und die dunkle Energie (etwa 73%). Über dunkle Materie und dunkle Energie ist nur sehr wenig bekannt und die Forschung über Neutrinos hilft dabei die dunkle Materie und Energie zu erforschen und zu erklären. Dies ist nur ein Beispiel, es gibt noch weitere Bereiche und Phänomene, die man mit den Ergebnissen der Neutrino-Forschung erklären möchte beziehungsweise versuchen wird. Ein anderer Forschungsaspekt ist die allgemeine Relativitätstheorie.

Des Weiteren führen neue Erkenntnisse zu weiteren Erkenntnissen was zu einer Kausalitätskette führt und je mehr Erkenntnisse die Menschen erlangen desto mehr Fortschritt kann es geben von dem alle Menschen profitieren können [Col].

1.7 Verbesserungsmöglichkeiten des IceCube-Projekts

Da sich das Konzept des IceCube-Projekts schon als funktionierend herausgestellt hat muss man dort keine Veränderungen vornehmen. Um die Messungen zu verbessern müsste man den gesamten Detektor vergrößern, da dies die Wahrscheinlichkeit erhöht eine Messung einer Wechselwirkung zu machen, denn auch an Stellen ohne Detektor finden logischerweise Wechselwirkungen zwischen Neutrinos und dem Eis statt. Natürlich ist es nahezu unmöglich dies durchzuführen, da dies Unsummen an Geldern beanspruchen würde, die einfach nicht zur Verfügung stehen, da finanzielle Mittel auch an anderen Stellen der Forschung, sei es Astrophysik oder Kernphysik, benötigt werden. Ansonsten ist es schwierig das IceCube-Projekt zu verbessern. Bei der Analyse der Daten sollte darauf geachtet werden, dass man die Daten mit den Daten anderer Teleskope miteinander vergleicht und die Daten nach ausgewählten Analyseaspekten auswertet. Des Weiteren sollte man stets auf Anomalien achten, die einen möglichen Hinweis auf eine neue Entdeckung darstellen. Dies wurde auch beispielsweise bei IceCube angewandt. Durch einen Vergleich mit dem Teleskop

“Fermi” und einer neuen Ausrichtung dieses konnte man den wahrscheinlichen Ursprung einer Neutrinoquelle lokalisieren. IceCube sollte also auch auf Zusammenarbeit setzen. Diese Analyse-methode wird vermutlich schon effektiv durchgeführt, da sich viele erfahrene Wissenschaftler mit den Daten auseinandersetzen und die Erfolge für eine effektive Forschung sprechen.

An den Photomultiplern wird auch derzeit gearbeitet, um die Messungen genauer zu gestalten, dafür gibt es auch konkrete Pläne (Näheres bei 1.9). Dadurch sollen unter anderem mehr Daten gesammelt werden. Eine weitere Möglichkeit den Detektor zu verbessern besteht darin mehr Forschungsaspekte zu entwickeln, die man alle mit dem IceCube-Projekt abdecken kann. Dabei muss es nicht nur um Neutrino-forschung gehen, sondern kann das Spektrum an Forschungsgebieten auch auf andere Gebiete der Naturwissenschaft erweitern. Beispielsweise kann man das IceCube-Projekt auch für den Nachweis magnetischer Monopole verwenden, beziehungsweise lässt sich der Detektor bei der Forschung anwenden. Des Weiteren lassen sich eventuell akustische Sensoren entwickeln, denn bisher wurden ausschließlich optische Sensoren eingesetzt. Mit zusätzlichen akustischen Mo-dulen wird eine gewisse Menge an Vergleichsmaterial geboten und eventuell bietet diese Module eine höhere Empfindlichkeit. Dies müsste sich aber erst praktisch zeigen [Ham18].

1.8 Gescheiterte PINGU-Erweiterung

Diese Erweiterung war bereits Ende 2013 geplant, wurde jedoch abgelehnt, da die Erweiterung eine sehr hohe Geldsumme in Anspruch genommen hätte. Das Akronym PINGU steht für “Precision IceCube Next Generation Upgrade” und stellt, wie der Name vermuten lässt, eine Erweiterung des IceCubes dar. Wie bereits widerlegt wurde, besitzen Neutrinos, entgegen der ursprünglichen Annahme, eine Masse. Jedoch weiß man nicht, welche Masse genau ein Neutrino hat. Bisher ist man lediglich im Stande zu sagen, dass die Masse eines Neutrinos kleiner als $< 4 \cdot 10^{-36}$ kg ist. Mit PINGU soll die genaue Masse bestimmt werden beziehungsweise die sogenannte Neu-

trinomassenhierarchie, wodurch man die Neutrinos nach ihrer Masse ordnen kann. Dies soll über die Messungen von Neutrinooszillationen geschehen. Die Konstruktion dieser Erweiterung war vergleichbar mit dem DeepCore-Bereich des IceCubes. Es sollte ebenfalls einen Energieschwellenwert von etwa 10 GeV haben, um möglichst viele Oszillationen messen zu können. PINGU sollte jedoch größer werden als der DeepCore-Bereich des IceCubes. Auch die optischen Module sollen nahezu den gleichen Aufbau haben wie die Module im IceCube-Projekt. Dazu gehört der Behälter, die Photomultipler als auch die restliche Technik, bis auf die Modulelektronik. Diese muss verändert werden, da einige Bestandteile veraltet sind. Die Software müsste ebenfalls leicht verändert und an die Forschung angepasst werden, jedoch nicht zu stark, da sich die Forschungen ähneln und PINGU im Prinzip ein verbesserter DeepCore-Detektor ist. Neben der Bestimmung der Neutrinomassenhierarchie, gab es wesentlich mehr Ziele, die nicht unbedingt mit Astrophysik zu tun haben, aber durch die Forschungsergebnisse zu den Neutrinos zu erklären sind. Diese Ziele sind jedoch erst dann zu erreichen, wenn die Massen der einzelnen Neutrinos geklärt sind, doch als erstes gilt es zu bestimmen wie sich die atmosphärische Höhenstrahlung zusammensetzt. Mit der Konstruktion eines solchen Detektors erhöht sich die Empfindlichkeit und man kann mehr Rückschlüsse über die Neutrinooszillationen ziehen und zu welchem Anteil die kosmische Höhenstrahlung aus Neutrinos besteht. Trotzdem gilt PINGU als eine Erweiterung von IceCube, die sich vor allem auf niedrige Energien konzentriert. Dies sind dann vor allem Messungen von beispielsweise solaren oder atmosphärischen Neutrinos, aber auch von Neutrinos, die einen komplett anderen Ursprung haben. PINGU stellt ein Langzeitprojekt dar. Vermutungen der Kollaboration besagen, dass etwa nach einem Jahr die Mischparameter der atmosphärischen Höhenstrahlung ermittelt werden könnte. Nach zwei weiteren Jahren solle man dann in der Lage sein den drei Neutrinoarten ihre definierte Masse zuordnen zu können. Innerhalb von 10 Jahren geht man davon aus, dass man die Zusammensetzung des Erdkerns ermitteln könne. Man würde Rückschlüsse ziehen über die verschiedenen Quellen und von woher sie stammen. Neutrinooszillationen, die zuerst den Erdkern passieren, werden eventuell

von den Elektronen abgehalten, wenn es zu einer schwachen Wechselwirkung kommt. Diese Daten kann man dann abgleichen mit den erhobenen Daten, deren Teilchen nicht vorher den Erdkern passierten. Dafür muss eine Versuchsreihe angesetzt werden, da man empirisch belegte Aussagen nur treffen kann, wenn man genügend Daten gesammelt hat. Außerdem findet eine Wechselwirkung mit dem Erdkern selten statt, denn dort tritt wieder das Problem auf, dass Neutrinos nur selten wechselwirken. Dadurch kann man die Elektronendichte im Erdkern bestimmen und darüber lassen sich Aussagen über die chemische Zusammensetzung treffen. Genauer gesagt welche Elemente sich zu welchem Anteil im Erdkern befinden.

Vermutlich stellt diese lange Zeitspanne einen weiteren Grund dar, weshalb der Bau nicht mit Fördergeldern subventioniert wurde. Zu dieser langen Forschungszeit muss noch ein Zeitraum der genauen Konstruktion und des Baus hinzu gerechnet werden.

In diesem Zeitraum wird es eventuell auch andere Forschungsteams geben, die sich mit der Ermittlung der Masse beschäftigen oder auch mit der Zusammensetzung des Erdkernes. Außerdem ist es wahrscheinlich schwierig die genaue Zusammensetzung des Erdkerns zu bestimmen, da man wahrscheinlich viel mehr Daten benötigte als man in dieser Zeit sammeln könnte. Darüber hinaus ist es schwierig dadurch die genaue Zusammensetzung zu erfahren, da unterschiedliche Elemente ähnliche Eigenschaften aufweisen wie sie mit Neutrinos interagieren und man nicht genau sagen kann um welche Elemente es sich handelt. Die Pläne für PINGU stehen jedoch immer noch und sind nicht verworfen und es wird geplant IceCube damit zu erweitern, denn möglicherweise werden die Forschungsgelder noch genehmigt [Ham18] [Que] [SB13].

1.9 Zukunft des IceCube-Projekts

Zum jetzigen Zeitpunkt befindet sich das Projekt nun etwa 8 Jahre in Betrieb und es gab viele Messungen und Beobachtungen, die für die Astroteilchenphysik wichtig waren. Marek Kowalski

gab im Interview mit Deutschlandfunk bekannt, dass aufgrund der jüngsten Ereignisse in 2018, die Aufregung in der Welt der Astrophysik sehr groß sei aufgrund der Tatsache, dass man einen Fluss von Neutrinos einem aktiven Galaxiekern zuordnen kann. Dieses Ereignis stellt einen Durchbruch da, weshalb neue Fördergelder zum Ausbau des IceCube beantragt wurden. Es gibt bereits Pläne wie man das Projekt ausbauen kann mit dem Ziel noch mehr Messergebnisse zu bekommen, um noch mehr Forschung betreiben zu können. Die erfolgsgekrönte Forschung spricht für die Erweiterung des Projekts und wird wahrscheinlich auch ein Hauptargument darstellen. Selbst ohne Fördergelder wird das Projekt nicht eingestellt werden und die Forschung soll nach wie vor weiter betrieben werden [MK18]. Aktuell sind einige Erweiterungen in der Entwicklung und Produktion. Zum einen werden jetzt neue DOMs gebaut, damit man einen größeren und breiteren Messbereich hat. Es sollen sieben neue Stränge im Eis angebracht werden, die mit den dazugehörigen DOMs ausgestattet werden. Die neuen DOMs sollen auch effektiver sein als die DOMs, welche vorher verwendet wurden. Es sollen nun mehr Photomultipler verwendet werden in einem DOM. Zum anderen gibt es nun auch eine Neuerung, nämlich "Wellenlängenveränderer". Wie der Name bereits darauf schließen lässt handelt es sich um ein Gerät, welches die Wellenlänge des Lichtes zu einer anderen Wellenlänge abändert. Das Tscherenkowlicht welches emittiert wird, wird so besser registriert. Diese Module sind noch nicht im Einsatz und werden aktuell in der Universität Mainz entwickelt und getestet. Man muss jedoch auch bedenken, dass es viele weitere gibt, die dazu dienen Neutrinos zu erforschen und die auch moderner sind. Wissenschaftliche Fördergelder werden dann auch eher verwendet, um neuerer Projekte zu unterstützen von denen man sich noch bessere Forschungsergebnisse erhofft. Aber trotzdem wird mit dem IceCube-Projekt weiter Forschung betrieben, da man viele wichtige Entdeckungen gemacht hat, welche uns helfen den Antworten der noch ungeklärten Fragen jener kosmischen Teilchen zu nähern, welche wir bisher kaum verstehen. Deshalb wurde das IceCube-Projekt nun auch mit weiteren Fördergeldern unterstützt, die aber eher gering sind, da das IceCube-Projekt schon viel Geld gekostet hat. Eigentlich wurden Fördergel-

der beantragt, die in einem ähnlich hohen Bereich lagen wie die Fördergelder, die zum Bau des IceCube-Projekts gedacht waren, nämlich für die PINGU-Erweiterung. Diese Erweiterung scheiterte (wie in 1.8 beschrieben). Zukünftig wird das IceCube Projekt auch irgendwann durch einen effizienteren Teilchendetektor ersetzt, allerdings ist noch keiner in Aussicht, der IceCube ablösen wird oder könnte. Ein Teilchendetektor, der das IceCube-Projekt in den Schatten stellen könnte, ist möglicherweise Antares. Jedoch befindet sich dieser Detektor noch in der Planung und in den Anfängen des Baus. Es wird sich zeigen wer die besseren Ergebnisse erzielt (mehr dazu in 5.3), aber aktuell forscht Antares nicht und die IceCube-Kollaboration ist bereits an weiteren Entwicklungen am Arbeiten und hat schon nennenswerte Erfolge erzielt.

Deshalb ist auch sinnvoll in das Projekt noch Geld zu investieren, da die Möglichkeiten von IceCube noch nicht vollständig ausgeschöpft sind. Die Ziele von IceCube wurden noch nicht vollständig erreicht und um GZK-Neutrinos zu beweisen ist das IceCube-Projekt geeignet, da es diese hohen Energien wahrscheinlich registrieren könnte und mitunter zu den größten Teilchendetektoren gehört, was die Chance eine Wechselwirkung zu datieren, erhöht. Die Entdeckung solcher Neutrinos würde neue Möglichkeiten bieten [MK18].

2 | Neutrinofoorschung

2.1 Das Neutrino

Das Neutrino ist ein subatomares Teilchen der Leptonenklasse. Das Neutrino hat keine elektrische Ladung und unterliegt somit nur der schwachen Wechselwirkung und der Massenanziehungskraft. Nach dem Standardmodell ist das Neutrino ein punktförmiges Teilchen. Es gibt 3 Generationen von Neutrinos mit jeweils anderer Masse. Da Neutrinos ein Spin von $\frac{1}{2}$ haben, sind sie Fermionen. [Stö00]

Bezeichnung	Masse (MeV)
Elektron-Neutrino	$>7,3 \cdot 10^{-6}$
Muon-Neutrino	$<0,27$
Tau-Neutrino	<31

Die Masse wurde bis dato nicht genau bestimmt, aber es wurden bisher Obergrenzen bestimmt. Kosmische, solare, atmosphärische oder Geoneutrinos entstammen aus natürlichen Quellen bzw. natürlichen Reaktionen. Reaktorneutrinos und Beschleunigerneutrinos entstammen aus künstlichen Quellen bzw. künstlichen Reaktionen.

Neutrinos können bei der Überprüfung der Plutoniumproduktion von Kernkraftwerken eingesetzt werden, indem man die Antineutrinoemissionen misst. [Kra06]

Insbesonders in der Astrophysik sind Neutrinos von hoher Bedeutung. Da sie nur schwach wechselwirken durchdringen sie fast jede Materie und so kann man durch Neutrinos Weltraumregionen untersuchen, die sonst aufgrund von Strahlungseinflüssen nicht untersucht werden könnten. Zudem ist die Masse von Neutrinos bedeutend für viele astrophysikalische Theorien.

2.1.1 Symmetrie

Händigkeit

Es ist wichtig zwischen Chiralität und Helizität zu unterscheiden. Die beiden Konzepte werden gerne vertauscht, da beide oft durch rechts und links ausgedrückt werden. Die Helizität ist abhängig von der Drehrichtung eines Teilchens und des Spins eines Teilchen. [GGS58] Die Helizität ist bei massereichen Teilchen vom Bezugssystem abhängig und bei masselosen Teilchen fest definiert. Die Chiralität ist immer unabhängig vom Bezugssystem, ist also eine Lorentz-Invariante. Bei masselosen Teilchen ist die Chiralität gleich der Helizität.

Nach bisherigen Versuchen haben Neutrinos eine negative Helizität (linkshändig) und seine Antiteilchen eine positive Helizität (rechtshändig). Auch wurde festgestellt, dass deren Helizität und Chiralität sich gleichen. Also könnte man davon ausgehen, dass das Neutrinos masselos ist.

Dies steht natürlich im Widerspruch mit der Tatsache, dass Neutrinos eine Masse haben. Dies ist auch im Moment noch ein offene Frage. Auch das IceCube-Projekt beschäftigt sich mit dieser Frage. Eine mögliche Lösung wäre, dass das Neutrino wie andere Teilchen eine rechtshändige und linkshändige Version hat. Ein rechtshändiger Neutrino würde nicht schwach wechselwirken, diese Neutrinos bezeichnet man als steriles Neutrino. Man hofft, dass ein bestimmtes Mechanismus zwischen dem aktiven und sterilen Neutrino sowohl deren Masse als auch die Symmetrien erklärt.

Leptonenladung

Das Neutrino hat ein positive Leptonenladung, während das Antineutrino eine negative Leptonenladung hat. Also kann man zwischen Teilchen und Antiteilchen differenzieren, da sie verschiedene Quantenzahlen haben. [Stö00] Diese Unterscheidung gibt es aktuell aber nur nach dem Standardmodell. Das zuvor erwähnte Mechanismus wird als See-Saw-Mechanismus bezeichnet, dieses erfordert sogenannte Majorana-Spinoren, also im Grunde müsste die Leptonenladung von Neutrino

und Antineutrino gleich sein. Bis dato konnte man nicht experimentell bestimmen ob Neutrino und Antineutrino sich wirklich unterscheiden.

2.1.2 Geschwindigkeit und Masse

Neutrinos haben nach momentanen Verständnis eine Masse. Nach dieser Annahme dürften Neutrinos nicht mit Lichtgeschwindigkeit sich fortbewegen können. Nach der speziellen Relativitätstheorie gilt folgende Formel:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ [Stö00]}$$

Würde ein Teilchen sowohl eine Ruhemasse $m_0 > 0$, als auch sich mit einer Geschwindigkeit $v = c$ fortbewegen, dann würde sich eine Definitionslücke ergeben, da $x/0$ nicht definierbar ist.

$$E = \frac{m_0 c^2}{0}$$

Da die Annahme $m_0 > 0$ und $v = c$ nach der speziellen Relativitätstheorie keine Definition über die Energie des Teilchen bei Bewegung zu lässt geht man davon aus die Annahme sei falsch. Also bleiben nach der Theorie 2 mögliche Lösungen übrig. Entweder hat das Neutrino doch keine Ruhemasse, also es gibt irgendein bisher nicht bekannten Masseeffekt oder das Neutrino bewegt sich nur subluminar.

Erste Untersuchungen

Eine erste Untersuchung der Geschwindigkeit von Neutrinos war ein Versuch von FermiLab in den 70ern. Man konnte mit hoher Konfidenz feststellen, dass sich Neutrinos mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Bei der Supernova SN1987A hat man diese Feststellung nochmal bestätigt. Die Geschwindigkeit von $\bar{\nu}_e$ hat maximal ein Abweichung von 2×10^{-9} zur Lichtgeschwindigkeit. [Lon87]

OPERA-Experiment

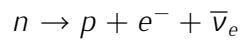
Andere Messungen haben dies weiter bestätigt. Das OPERA-Experiment hat im Zeitraum von 2009–2011 Messungen bezüglich der Geschwindigkeit von Neutrinos durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass Neutrinos sich superluminal bewegen. Auf einem Weg von 743km kamen die Neutrinos $60,7 \pm 14,3\text{ns}$ früher an als wenn sie sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen würden. Mit einer 6σ -Sicherheit konnte man von einen sehr signifikaten Ergebnis reden. Diese Messungen wurden am 22.September 2011 in einem Vordruckserver veröffentlicht. [Col11b]

Im nächsten Jahr wurde dies aber korrigiert. Man hatte festgestellt, dass eine Kabelverbindung die gemessenen Geschwindigkeiten verändert hat. Es ergab sich nur eine Abweichung von $6.5^{+15.7}_{-15.4}\text{ ns}$. In der weiteren Analyse kam man zum Schluss, dass die Ergebnisse die Tatsache bestätigen, dass Neutrinos sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Eine letzte Annahme könnte sein, dass zwar nach bisherigen Messungen Neutrinos sich mit großer Sicherheit mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, aber dies nur der Fall ist, weil deren Masse so gering ist, dass die Abweichung zur Lichtgeschwindigkeit zu gering ist um sie messen zu können. Sie müsste kleiner als 2×10^{-9} sein.

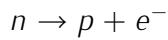
2.2 Geschichte

2.2.1 β^- Zerfall

Beim β^- -Zerfall gibt es folgende Reaktion:



Vor der Entdeckung des Neutrino, hat man beim β^- -Zerfall nur die folgende Reaktion beobachtet:



Nimmt man diese Beobachtung kommt man auf den Energiehaltungssatz:

$$E_e = E_n - E_p$$

Man geht davon aus, dass das Neutron kein Impuls hat aufgrund der Laborbedingungen, also folgt $p_n = 0$.

Aufgrund der Impulserhaltung ergibt sich folgendes:

$$-p_e = p_{He}$$

So kommt man zur Formel zur Berechnung der Energie des Elektrons:

$$E_e = c^2 \frac{m_H^2 - m_{He}^2 + m_e^2}{2m_H}$$

E_e beträgt somit $18,7\text{keV}$.

Die gesamte Herleitung ist in der Quelle [Hor15] zu finden.

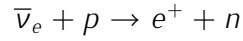
Der entsprechende Versuch lieferte jedoch nicht ein Linienspektrum für die Elektronenenergie, man schlussfolgert also, dass die Elektronenenergie nicht konstant ist. Man stellte jedoch fest, dass die höchste Elektronenenergie des Spektrum der Berechneten gleicht. Aufgrund des Energieerhaltungssatz muss die restliche Energie irgendwie umgewandelt werden. [Hor15] (siehe Anhang A.1)

Die erste mit dem Energieerhaltungssatz konforme Erklärung für dieses Phänomen kam mit einem Brief von Pauli an die Teilnehmer der Gauverein-Tagung in Tübingen. Im Brief postulierte er, dass dieses Energiespektrum aufgrund eines weiteren Teilchen entsteht. [Pau30]

Für Jahre konnte man keine Messung durchführen, welche dieses Teilchen beweisen würde. Das postulierte Teilchen sollte aber elektrisch neutral sein und nur schwach wechselwirken.

2.2.2 Reines-Cowan-Experiment

Das postulierte Neutrino sollte in einem umgekehrten β^- -Zerfall mit einem Proton interagieren und einen Elektron und Positron erzeugen.



Diese Reaktion hat ein Wirkungsquerschnitt $6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$, dieser ist 20 Magnituden kleiner als die entsprechende Standardeinheit Barn (10^{-24} cm^2). Durch den sehr kleinen Wirkungsquerschnitt ist die Reaktion sehr selten, also musste sie einfach identifizierbar sein, da man nicht die wenigen Ereignisse verpassen wollte. Die zwei Zerfallsprodukte sind Positronen und Neutronen. Die Positronen lässt man mit Elektronen interagieren und so werden 2 Cadmiumen emittiert. Diese 2 γ -Strahlen würden nicht reichen um die Reaktion leicht zu identifizieren. Also lässt man noch das Neutron mit Cd^{108} interagieren. Trifft ein Neutron auf Cd^{108} , regt es dieses an. Diese angeregte Zustand ist instabil und das Cadmium gibt die Energie als γ -Strahlung frei. Dieser Prozess passiert nicht sofort, also hat es eine Zeitsignatur. Durch diese Kombination aus 2 γ -Strahlen und einem zeitverzögerten γ -Strahl kann man die Reaktion einfach identifizieren und ist klar zu erkennen trotz Hintergrundstöreinflüssen.

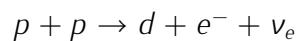
Man benötigte dennoch ein hohen Neutrino Flux um die seltene Reaktion beobachten zu können. Dies konnte man mit einem Atomreaktor erreichen, dieser sollte ein Neutrino-Flux von $10^{12} - 10^{13}$ Neutrinos pro Sekunde pro Quadratzentimeter haben. [Nav17] (Anhang A.3)

Der entsprechende Versuch wurde in Hanford und schließlich in Savannah River durchgeführt, es wurden durchschnittlich 3 Neutrinos pro Stunde gemessen. Die Ereignissanzahl war größer mit eingeschaltetem Reaktor.

Die Ergebnisse aus dem Versuch legten nahe, dass Pauli mit seiner Neutrino-Theorie korrekt lag.

2.2.3 Homestake-Experiment

In der Sonne gibt es Reaktionen, welche Neutrinos produzieren. 86% dieser Neutrinos stammen aus der Proton-Proton-Reaktion.



1968 konnten man den Neutrino-Flux der Sonne messen mit dem Homestake-Experiment. [CDRD⁺98]

Es wurde jedoch ein Defizit zwischen den berechneten Flux und den gemessen Flux festgestellt. Es ist wichtig zu vermerken, das Homestake-Experiment konnte nur Elektron-Neutrinos messen . Diese Problematik wurde bekannt als das Solarneutrino-Problem. Es wurde zum Beispiel vermutet, dass die Fusionprozesse temporär ausgesetzt sind oder die Sonne ist kälter als man vermutet hatte. Das passte aber nicht zu den helioseismologischen Daten, welchen mit dem Standard-Sonnenmodell übereinstimmten.

2.2.4 Neutrino-Oszillation

In den 70ern wurde vermutet, sollten Neutrinos eine Masse haben, dann würden sie zwischen den einzelnen Flavours wechseln können. [GP69] Bei den Proton-Proton-Reaktionen, welche in der Sonne stattfinden zerfallen Elektronen-Neutrinos. Also könnten die fehlenden Neutrinos auf den Weg zur Erde den Flavour gewechselt haben und wären so nicht bei dem Homestake-Experiment messbar. 2001 wurde das Problem dann endgültig gelöst. Das SNO konnte die Neutrino-Oszillation, also der Wechsel zwischen einzelnen Neutrino-Flavours, nachweisen. Das Experiment bewies auch, dass die Oszillation das Defizit von Elektron-Neutrinos erklärt. [AC01] Bei der Neutrinooszillation wechselt das Neutrino nach zurückgelegten Weg seinen Flavour. Das Neutrino hat im Grunde 3 Massen-Eigenzustände ν_1, ν_2, ν_3 . Jedes der Flavours ist eine bestimmte Überlagerung dieser 3 Massen-Eigenzuständen. Das Neutrino kann in entweder einem festen Flavour-Zustand sein, also ν_e, ν_μ, ν_τ oder ein festen Massezustand. Mithilfe der Quantemechanik kann man die Eigenzustände als Wellen betrachten. Also kann mithilfe der Schrödinger-Gleichung betrachten wie sich das Neutrino wandelt über ein bestimmten Zeitraum.

2.3 Forschung

2.3.1 Astrophysik

Das GZK-Cutoff limiert wie stark energetisch komische Strahlung sein kann. Der Cutoff wurde bei $6 \times 10^{19} \text{ eV}$ festgestellt und berechnet.

Dies limitiert die Beobachtung von komischer Strahlung bei Objekten die weiter als 100 Megaparsec sind. Elektromagnetische Strahlung interagiert mit Staub- und Gaswolken, weshalb diese Signale abschirmen können. Neutrinos jedoch haben kein GZK-Cutoff und interagieren nicht mit Staub- und Gaswolken, weshalb einige komische Objekte nur mit Neutrinomessungen untersucht werden können. Supernovae setzen ein hohen Anteil an Neutrinos und somit eignet sich die Beobachtung von Neutrinos für Supernovaeforschung. Das IceCube-Projekt ist einer der wichtigsten Neutrinodetektoren für kosmische Neutrinos.

2.3.2 Kosmologie

In der Kosmologie ist kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung (3K-Strahlung) sehr wichtig gewesen um viele Theorien, wie die Urknalltheorie, zu bestätigen. Die 3K-Strahlung entstand ungefähr 380 Tausend Jahre nach dem Urknall. Es gibt einen entsprechenden Counterpart mit Neutrinos. Der kosmische Neutrinohintergrund ist wie die 3K-Strahlung durch den Urknall entstanden. Im frühen Beginn des Universums gab es viele Interaktionen zwischen Teilchen. Bei vielen Reaktionen entstehen Lichtquanten und Neutrinos. Da Neutrinos kaum interagieren, können wir diese noch heute messen. Die Neutrinos die dort entstanden interagierten nur mit anderen Teilchen in der ersten Sekunde in der das Universum existierte. So ergibt sich eine Temperatur dieser von nur 1,95K. Umgerechnet liegen die Neutrinos im Energiebereich von ungefähr $100 - 200 \mu\text{eV}$. Neutrinodetektoren können aber meisten nur ab den MeV-Bereich messen. Also konnte man dies nicht direkt

beweisen. Mit dem Planck-Weltraumteleskop konnte man aber die 3K-Strahlung so genau messen und untersuchen, dass man über diese indirekt den kosmischen NeutrinoHintergrund nachweisen konnte. Die Messungen von Planck-Satellit war so genau, dass man darüber hinaus beweisen konnten, dass der Hintergrund eine Temperatur von 1,96K hatte und das es nur 3 Neutrino-Flavours gibt (e, μ, τ). Die erwähnten Temperaturen gelten nur unter der Bedingung, dass Neutrinos masselos sind. [Sie16] Dies widerspricht aber der Tatsache, dass nach aktuellen Messungen Neutrinos eine Masse haben. Also ist die Untersuchung des kosmischen NeutrinoHintergrund noch nicht vollendet.

2.3.3 Zukünftige Forschung

Das Neutrino hat durchaus die Teilchenphysik revolutioniert und es dürfte auch in der Zukunft neue wichtige Erkenntnisse in der Teilchenphysik liefern.

ARIANNA und das Giant Radio Array for Neutrino Detection sollen auch wie das IceCube hochenergetische Neutrinoquellen finden. Es gibt schon weitere Experimente in diesen Bereich, welche für ein Interesse der wissenschaftliche Gemeinde sprechen.

Ein kleiner Forschungszweig untersucht inwiefern man Neutrinos für Kommunikation durch solides Gestein nutzen könnte. Es wurden auch schon entsprechende Versuche gemacht und man konnte erfolgreich Informationen mithilfe von Neutrinos durch Gestein senden.

DUNE

Eines der großen NeutrinoExperimente die geplant werden ist das DUNE. Damit sollen Neutrinos produziert und dann durch eine große Entfernung gesendet werden und dann an ein anderen Standort empfangen und gemessen werden. (Anhang A.4).

Das DUNE Experiment hat sich hohe Ziele gesetzt und will die Entstehung von Materie, die Verbindung aller fundamentalen Kräfte und die Entstehung von schwarzen Löcher näher erklären. Diese

hohen Ziele haben unter anderem damit zutun, dass die Neutrinos möglicherweise das Standardmodell durcheinanderbringen könnten. Im Moment hat das Standardmodell nur Dirac-Fermionen, also solche mit unterscheidbaren Antiteilchen. Möglicherweise existieren jedoch Majorana-Fermionen, welche Antiteilchen haben mit gleichen Eigenschaften, also kann man die nicht unterscheiden. Es gibt bereits Erweiterungen des Standardmodells mit Majorana-Fermionen, bisher wurde keine dieser Erweiterungen experimentell bestätigt.

Das DUNE-Projekt könnte auch die Materie–Antimaterie–Diskrepanz des frühen Universums erklären, welche zum heutigen Universum voller Materie und mit kaum Antimaterie führte.

2.4 Forschung am IceCube

2.4.1 Astrophysikalische Forschung

Das größte Erfolg des IceCube ist bewiesen zu haben, dass mithilfe von Neutrinos man Bereiche des Universums untersuchen kann, welche zuvor nicht untersuchbar ware, wie in 2.3.2 näher erklärt. Dazu gehört, dass man 2017 durch die Kollaboration mit anderen Instituten zum ersten Mal außergalaktische Neutrinos messen konnte. Diese stammten vom Blazar TXS 0506+056 aus der Orion-Konstellation. Am Detektor wurde ein Alarm ausgelöst, weil man ein hochenergetisches (~ 300 TeV) Muon-Neutrino maß. Anschließen haben andere Institute mit deren Instrumenten nach der Quelle gesucht und diese als TXS 0506+056 identifiziert. Dieses Ereignis wird insbesondere als Erfolg gewertet, weil damit zum ersten mal das Warnsystem erfolgreich erprobt wurde. Mittlerweile wurde das Warnsystem erweitert, es gibt ein offenes System für Einzelereignisse und Mehrfachereignisse werden durch Einzelvereinbarungen verschiedenen Instituten verteilt. Über die Jahre wurden über 100 hochenergetische Neutrinos gemessen. Die gemessenen Energien ging von 100 TeV bis 10 PeV. Die hochenergetischen Neutrinos scheinen zudem ein hohen Neutrino-Flux

mit sich zu bringen. [WiM18]

Gammastrahlenausbrüche

Es wird vermutet, dass Gammastrahlenausbrüche die bisher gemessene hochenergetische kosmische Strahlung erklärt. Zudem wird auch vermutet, dass Gammastrahlenausbrüche auch die hochenergetischen Neutrino-Events auslösen. Das IceCube untersucht auch dies, da es in der Lage ist in den benötigten Energiebereich Neutrinos zu messen. Bei diesen Gammastrahlenausbrüchen kollidieren hochenergetische Protonen miteinander, also entstehen Pionen. [Col11a]

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \pi^0 &\rightarrow 2\gamma \end{aligned}$$

Geladene Pionen zerfallen unter anderem in Myon-Neutrinos und die neutralen Pionen in γ -Strahlen. Es ist naheliegend, dass hochenergetische Neutrinos und hochenergetische γ -Strahlen aus den selben Quellen stammen [Mü14]

Supernovae

Das IceCube-Projekt war zunächst nicht dafür gedacht Supernovae zu beobachten, da die Neutrinos, die bei einer Supernovae ausgestoßen werden zu niederenergetisch sind damit das IceCube-Detektor sie messen kann. Doch die Photomultiplier müssten bei niederenergetischen Neutrinos aus einem Supernovae-Ereignis kollektiv eine höhere Hintergrundrate aufweisen. Bei einer Supernova wird 99% der Gravitationsenergie als Neutrinos freigegeben, also entsteht ein hoher Neutrino-Flux. Sollte ein Erhöhung der Hintergrundrate festgestellt werden wird das direkt an das Supernova Early Warning System weitergegeben, damit andere Institute nach der Supernova suchen und möglicherweise mehr Daten sammeln. [Ebe17]

Dunkle Materie

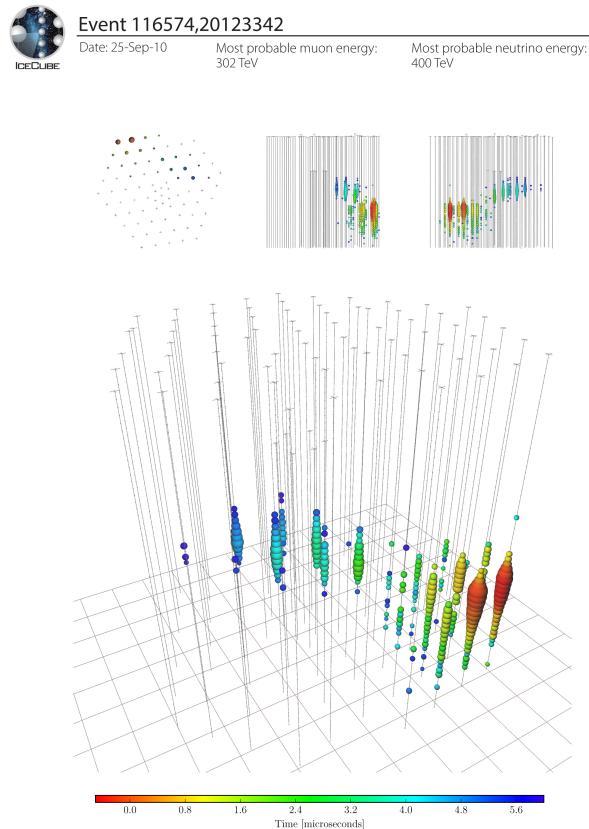
Eines der größten Fragen der Astrophysik ist was ist Dunkle Materie. Auch hier gibt es entsprechende Versuche mit dem IceCube. Eine möglicher Kandidat für dunkle Materie sind WIMP-Teilchen. WIMP's interagieren nur durch die schwache Wechselwirkung und der Gravitation. Anders als Neutrinos sind sie jedoch sehr massereich. [Gä08] Da WIMP's nur schwach wechselwirken sind sie auch schwer nachzuweisen. Eine möglicher WIMP-Kandidat das Kaluza-Klein-Teilchen würde sich in Gestirnen ansammeln und wenn die Dichte hoch genug ist würde sich selber annihilieren. Eines der Zerfallsprodukte wären Neutrinos im GeV/TeV Bereich. Also würde eine erhöhte Anzahl an Neutrinos aus der Sonne nahelegen, dass das Kaluza-Klein-Teilchen möglicherweise existiert. [Col10]

2.4.2 Glaziologie

Das IceCube-Projekt fokussiert sich hauptsächlich auf Physik, durch seine besondere Lage im Eis des Südpol wurde es auch für glaziologische Untersuchungen benutzt. Das Eis, welches die optischen Sensoren des IceCube-Detektor umgibt, ist nicht 100% durchsichtig, da es Impuritäten hat wie zum Beispiel Staub. Die Daten von den optischen Sensoren müssen entsprechend korrigiert werden. Dieser Staub bietet eine Einsicht in die Vergangenheit des Erdklimas. Als die Sensoren ins Eis gebohrt wurden konnten man glaziologische Untersuchungen machen. Man konnte vulkanische Asche finden. Man fand sogar Asche aus der Toba-Vulkaneruption, diese wird in Anthropologischen Kreisen als mögliche Beeinflussung der menschlichen Ausbreitung diskutiert. Es wird in Zukunft auch noch mehr Bohrungen geben, da die Daten aus dem IceCube ein entsprechendes Interess weckten. [Col13b]

2.5 Interpretation von Neutrino-Ereignissen

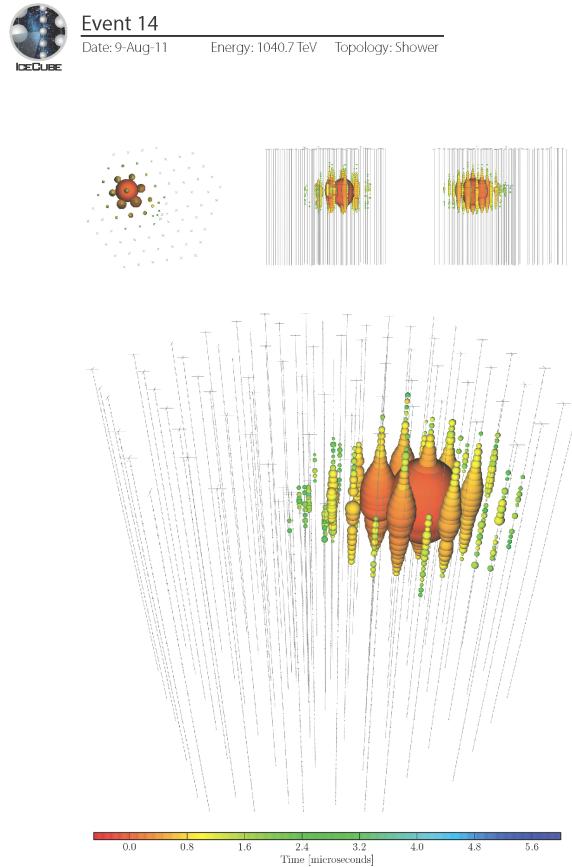
2.5.1 Spursignatur / μ -Signatur



[Fig. 1]

Das $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ hinterlässt Myonen. Wenn die Myonen durch den Detektor passieren hinterlassen sie Cherenkov-Licht, da sie in Relation zur Lichtgeschwindigkeit im Eis sich schneller fortbewegen. Da wie in [Fig 1] ersichtlich wird das eine Spursignatur hinterlässt ist es einfach zu bestimmen aus welcher Richtung das Myon kommt. Es wird eine Lineare Regression angefertigt. Das von den optischen Sensoren aufgenomme Licht steht in Korrelation zur Myonenenergie. [FH12] [AM16]

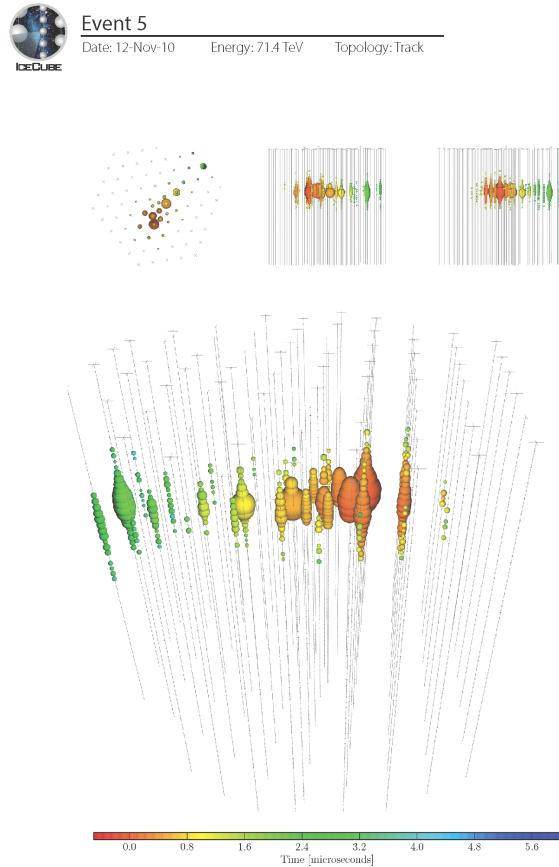
2.5.2 Kaskadensignatur / e-Signatur



[Fig. 2]

Das ν_e / $\bar{\nu}_e$ hinterlässt eine Kaskade. Wenn es im Detektor wechselwirkt hinterlässt es einen Teilchenschauer. Die Teilchen hinterlassen Cherenkov-Licht, da sie in Relation zur Lichtgeschwindigkeit im Eis sich schneller fortbewegen. Wie man in [Fig. 2] entsteht dadurch eine kugelförmige Signatur. Das von den optischen Sensoren aufgenomme Licht steht in Korrelation zum der freigegebenen Energie durch die Wechselwirkung mit dem Detektor. [FH12]

2.5.3 Double-Bang-Signatur / τ -Signatur



[Fig. 3]

Bei der Double-Bang-Signatur hat ein $\nu_\tau / \bar{\nu}_\tau$ mit einer Energie über 1 PeV eine erste Kaskade verursacht. Bei dieser Kaskade entsteht ein τ , welches dann zerfällt und eine zweite Kaskade verursacht. Wie man in [Fig. 3] entstehen dann 2 Kaskaden. Einmal gibt es eine rote Kaskade und dann eine grüne Kaskade. Die rote Kaskade ist die erste Kaskade und ist dann mit der grünen zweiten Kaskade verbunden. Diese Signatur ähnelt sehr der Spur-Signatur, man kann sie aber an der ungleichmäßigen Größe der Signale unterscheiden. [FH12]

3 | Inwiefern hat das IceCube-Projekt seine Ziele erreicht

Das IceCube hat hoffensichtlich nicht so hohe Ziele wie andere Detektoren, dennoch erweist sich das IceCube als durchaus wichtig für die Astroteilchenphysik. Zudem ist das IceCube erst seit 2014 voll in Betrieb, also könnten durchaus noch wissenschaftliche Erfolge in Zukunft noch erreicht werden.

Beim IceCube ist das größte Erfolg so eine große Kollaboration aufzubauen, die sich nur der Neutrinosphysik widmet. Dies führte auch zu neuen Projekten. Auch hat erst diese Kooperation Projekte wie das DUNE-Experiment erlaubt. Die bereits jetzt errungenen wissenschaftlichen Erfolge sollte dennoch nicht kleinreden, zum einen wurde das Konzept des IceCube als erfolgreich bewiesen, zum anderen konnte es den Neutrinoeflux einer Supernova wahrnehmen. Das IceCube bietet somit die Grundlage für die nächste Generation an Neutrino-Detektoren, wie den Hyper-Kamionkande, den DUNE.

Auch hat das IceCube einige hochenergetische Neutrinos gefunden, welche natürlich auch analysiert wurden. Insbesondere wurden kosmische ν_μ entdeckt. Zwar ist das IceCube nicht auf den gleichen Bekanntheitsniveau wie zum Beispiel das LHC in der Schweiz, hat es dennoch wichtige Leistungen erbracht. Diese Leistungen sollen die Astroteilchenphysik stärken. In der wissenschaftlichen Gemeinde hat sich auch wieder ein "Hype" um Neutrinos entwickelt. In den nächsten Jahren wird sich nun zeigen müssen ob dieser "Hype" gerechtfertigt ist oder ob Neutrinos nur ganz gewöhnliche Elementarteilchen sind. Sie haben definitiv das Potenzial das Standardmodell zu erweitern ohne, dass man ganz neue Teilchen einführen muss.

4 | Rolle des IceCube-Projekts in der Wissenschaftsdiplomatie

4.1 Finanzierung und Kooperationen

Die Kosten des Projekts beliefen sich auf etwa 279 Millionen US-Dollar. Die Kosten für das Projekt wurden hauptsächlich von der "National Science Foundation" getragen. Das sind etwa 242 Millionen US-Dollar, die von der "National Science Foundation" übernommen wurden. Die weitere Finanzierung erfolgte durch Universitäten und Institute aus vielen verschiedenen Ländern und einigen Forschern, neben den USA waren auch Länder wie Deutschland, die Niederlande und Belgien bei der Finanzierung vertreten. Das Bundesministerium für "Bildung und Forschung" und die "Deutsche Forschungsgemeinschaft" (DFG) subventionierten die Konstruktion des Observatoriums. Aber auch beispielsweise das "Institut zur Förderung von Innovation durch Wissenschaft und Technologie in Flandern", welches sich in Belgien befindet, leistete finanzielle Unterstützung. Deutschland nimmt eine wichtige Rolle beim IceCube-Projekt ein. Des Weiteren ist DESY für die Prüfung von 1250 optischen Modulen tätig gewesen oder auch für die Datenanalyse lieferten sie wichtige Beiträge. Beispielsweise waren sie dafür zuständig die Software zu schreiben und elektrische Komponenten zu entwickeln. Nicht zu vergessen ist, dass DESY stets an neuen Methoden für den Nachweis von Teilchen arbeitet. Die "National Science Foundation" hielt es für angebracht der Universität von Wisconsin-Madison die Führung zu übertragen, da diese Universität bereits mit dem Projekt AMANDA beauftragt gewesen ist und die Ergebnisse zufriedenstellend waren. Sie hatten somit Erfahrung im Bereich der Forschung von (kosmischer) Höhenstrahlung [Col].

4.2 IceCube-Kollaboration

Etwa 300 Physiker bilden die IceCube-Kollaboration, darunter befinden sich Physiker, Informatiker, Ingenieure etc. Seit November 2017 besteht sie aus 50 Einrichtungen in 12 Ländern, welche an dem Detektor arbeiten, in dem sie ihn beispielsweise auf Funktionalität der Sensoren überprüfen und die Messdaten auswerten, aber viele Mitglieder waren auch der Konstruktion des Detektors beteiligt. Die Aufgabenbereiche sind unzählig, einige werden direkt an der Südpolstation ausgeführt und andere forschen von ihren Universitäten aus, da IceCube nicht die einzige Aufgabe der IceCube-Kollaboration darstellt. Ein Beispiel für ein deutsches Forschungsinstitut ist das "Deutsche Elektronensynchrotron" (DESY), aber auch viele deutsche Universitäten wie die Technische Universität München, die Ruhr-Universität Bochum oder auch die Johannes Gutenberg Universität sind an diesem Projekt beteiligt und ebenso ist auch die Humboldt-Universität zu Berlin eine maßgeblich beteiligte Universität [DES] [Col].

4.3 Wissenschaftliche Bedeutung

Dieses Projekt ermöglicht eine Zusammenarbeit von vielen Universitäten und Instituten, die eng miteinander agieren, um eine intensive und effiziente Forschung zu gewährleisten. Es ist sinnvoll, dass möglichst viele Wissenschaftler zusammenarbeiten, da sich so viele Menschen mit unterschiedlichen Arbeitsmethoden und Denkweisen aufeinandertreffen. Es ist möglich, dass diese voneinander lernen können und zusammen den idealsten Weg finden, um Probleme zu lösen und die Forschung zu verbessern. Außerdem stellt eine wissenschaftliche Zusammenarbeit auch eine Brücke zwischen zwei Gesellschaften dar, um gemeinsame Strategien zur Überwindung globaler Differenzen und Problematiken zu konstruieren. Nicht unerwähnt sollte die Tatsache bleiben, dass einige Forschungsstationen auch zusammenarbeiten und nicht ausschließlich Konkurrenzden-

ken betreiben. Ein Beispiel dafür ist die Kooperation von IceCube mit HAWC (ebenfalls ein auf Tscherenkov-Strahlung basierendes Neutrino-Teleskop). Die verschiedenen Kollaborationen haben Einfallsrichtungen der kosmischen Strahlung bei gleicher Energie in unterschiedlichen Himmelsrichtungen abgeglichen. Das Ziel bestand darin die Ausbreitung der kosmischen Strahlung, mit einer geringeren Energie von etwa 10TeV, zu untersuchen, um die Anisotropie besser zu verstehen. Das findet natürlich nicht ausschließlich bei IceCube statt, aber IceCube ist ein passendes Beispiel dafür, dass internationale Zusammenarbeit, bei IceCube sind Wissenschaftler aus zwölf Ländern vertreten, einige Erfolge bringt. Dies lässt sich vor allem durch die wissenschaftlichen Leistungen festmachen, die durch IceCube geleistet wurden [DES] [Bra18b].

5 | Vergleich zu anderen Forschungsstätten

5.1 Super-Kamiokande

Der Super-Kamiokande steht in der japanischen Stadt Hida, es handelt sich bei diesen um einen Cherenkov-Detektor. Er ist der Nachfolger des Kamiokande, welches in seiner letzten Ausführung, des Kamiokande-III, 1995 endgültig außer Betrieb ging. Einer der Hauptmotivationen des Kamiokande-Projekts war es den Protonzerfall näher zu untersuchen. Da das originale Kamiokande in diesen Bereich keine Erfolge lieferte entschied man sich für den Bau des Super-Kamiokande. [?]

5.1.1 Geschichte

Die Datenaufnahme wurde beim Super-Kamiokande im April 1996 begonnen. Es durchging immer wieder Reparaturen und wurde schon mehrmals nachgerüstet. [?] Im November 2001 geschah ein Unfall, ungefähr 7000 PMTs (optische Sensoren) implodierten. Es wurde vermutet, dass die Implosion einer PMT eine Schockwelle im Wasser verursachte, welche die andere PMT's implodieren ließ. Der Super-Kamiokande musste schnell wiederaufgebaut werden, weshalb man sich entschied nicht alle PMTs zu reparieren, sondern man beließ es bei der Hälfte, so konnte der Betrieb schnell wieder aufgenommen werden. [Car01]

Neutrinooszillationen

Neutrinooszillationen sind ein interessantes theoretisches Konzept, experimentell wurden sie aber 1998 zum ersten Mal vom Super-Kamiokande nachgewiesen. Bei der Wechselwirkung zwischen kosmischer Strahlung und Atomkernen in der Atmosphäre entstehen atmosphärische Neutrinos als

Zerfallprodukt. Dort dominieren zwei Reaktionen:

$$\begin{aligned}\tau &\rightarrow \mu + \nu_\mu \\ \mu &\rightarrow e + \bar{\nu}_\mu + \nu_e\end{aligned}$$

Also müsste sich logischerweise ein Verhältnis von $2\nu_m u / \bar{\nu} \mu : 1\nu_e / \bar{\nu}_e$ ergeben. Beim Super-Kamiokande wurde diese Annahme überprüft, man kann aber auf ein Verhältnis von 1:1. Dieser Unterschied konnte nicht durch statische Unsicherheiten oder experimentelle Unsicherheiten erklärt werden. Wenn man aber eine Neutrinooszillation von $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau au / \nu_\tau$ mitbedenkt, dann würde sich dieses Verhältnis erklären lassen. Also könnte dieser Effekt durch Neutrinooszillationen erklärt werden. [Fea03] MacDonald und Takaaki Kajita haben 2015 ein Nobelpreis bekommen für den deren Arbeit an Neutrinooszillation, wobei Kajita hauptsächlich am Super-Kamiokande gearbeitet hat und MacDonald an der SNO-Kollaboration.

Weitere Experimente

Um diese Entdeckung zu untermauern wurde anschließend das K2K-Experiment durchgeführt. Bei diesem Experiment wurden ν_μ vom KEK über eine 250km lange Strecke gesendet, das Endziel war der Super-Kamiokande. Das Super-Kamiokande konnte weiterhin kein $\nu u / \bar{\nu} \tau$ registrieren. [CA02] Wenn die $\nu u / \bar{\nu} \mu$ nicht oszillieren dann würde man $158, 1^{+9,2}_{-8,6}$ gemessene Ereignisse am Super-Kamiokande erwarten. Tatsächlich wurden aber 112 gemessen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die ohne Neutrinooszillation passiert ist liegt bei 0,0015%. Man kann also mit hoher Sicherheit annehmen, dass die Resultate durch Neutrinooszillationen erklärt werden. [Col06]

Mit dem Super-Kamiokande wurde mit K2K und der Untersuchung von atmosphärischen Neutrinos nur die Oszillation zwischen $\nu_\mu - \nu_\tau$. Wenn auch seltener gibt es auch eine Oszillation zwischen ν_μ und ν_e . Das T2K sollte das untersuchen. Beim J-PARC wurden wie beim vorherigen Experiment ν_μ über eine 295km lange Strecke gesendet. Die Intensität wurde beim T2K-Experiment erhöht um

2 Magnituden. [Oya06] Aktuell läuft das T2K-Experiment immer noch, also gibt es noch kein entsprechendes Abschlussbericht, doch es wurden zwei Haupterfolge gemeldet.

Zum einen war der eine Erfolg der Beweis, dass ν_μ sich tatsächlich in ν_e wandeln können. Mit diesem Erfolg hat sich auch der Fokus des T2K-Experiment auf eine Untersuchung von CP-Verletzungen. [Col17] Es wurde auch eine mögliche CP-Verletzung gefunden, da man ein Unterschied zwischen der Oszillation von Neutrinos und Antineutrinos entdeckt. Die Ereignisanzahl ist zu gering, weshalb man noch bis 2026 weiter Daten sammeln muss um dies mit einer höheren Konfidenz zu bestätigen. [Col13a]

5.1.2 Hyper-Kamiokande

Die PINGU-Erweiterung beim IceCube-Projekt scheiterte, währenddessen wurde die Erweiterung für das Kamiokande genehmigt. Diese Erweiterung wird ein deutlich größeren Cherenkov-Detektor benutzen, auch die PMTs wurden verbessert. Das Tankvolumen steigert sich um das 20fache im Vergleich zum Super-Kamiokande. Es sollen auch 2 Tänke gebaut werden, wobei der erste Tank in Betrieb gehen soll bevor der zweite Tank fertig gebaut wird. Auch hier sollen ν mithilfe des J-PARC über eine lange Strecke gesendet. Also handelt es sich um die nächste Generation des T2K-Experiments. Mit dem neuen Detektor wird man auch wieder atmosphärische Neutrinos und astrophysikalische Neutrinos untersuchen. Mit dem neuen Detektor bietet sich eine erneute Untersuchung, da durch die erhöhte Sensivität mehr Ereignisse messen kann und man kann Parameter genauer bestimmen. Der zweite Tank des Hyper-Kamiokande soll nach Plan in Südkorea gebaut werden. Es hat sich herausgestellt, dass der von J-Parc ausgesendete Neutrinostrahl in Südkorea auftrifft und somit wäre es möglich ein Detektor dort zu bauen, welches Neutrinos, welche eine noch größere Strecke hinter sich haben, messen würde. Damit kann man Neutrinooszillationen noch besser untersuchen. Es dürfte ungefähr 10 Jahre brauchen bis der erste Tank in Hida fertig gebaut

wird, nachdem dieser läuft soll der Bau des zweiten Tanks in Südkorea nur noch 6 Jahre brauchen. Ob es tatsächlich in Korea gebaut werden soll wird momentan untersucht. [Lod17] Der Bau des Hyper-Kamiokande soll 2020 beginnen. [HCK18]

5.1.3 Vergleich

Konstruktion

Sowohl der IceCube-Detektor als auch der Kamiokande benutzen Cherenkov-Strahlung um Neutrinos zu messen. Beim Kamiokande ist der Bau deutlich aufwendiger wie man am Hyper-Kamiokande sehen kann, man muss geologische Untersuchungen machen, man muss eine entsprechende Stelle aushöhlen und einen Tunnel zu der Stelle graben, dann noch ein Tank bauen, Wasser purifizieren und es in den Tank füllen. [Lod17] Beim IceCube-Detektor musste man stattdessen tiefe Löcher ins Eis schmelzen. Man braucht 2 Tage um das Loch zu schmelzen und 11 Stunden um den optischen Sensor anzubringen. Problematisch ist der Transport von Materialien von den entsprechenden Produktionsstätten zum Südpol.

2001 begann die Planung für den IceCube-Detektor. Innerhalb von 2 Monaten nach Baubeginn im Jahre 2004, war der IceCube-Detektor betriebsbereits, aber es hat 6 Jahre gebraucht, damit es tatsächlich in seiner vollen Größe fertig war. Das Super-Kamiokande begann mit der Planung 1991 und wurde 1996 vollendet. Zwar war die gesamte Bauperiode beim IceCube gering, da man es aber über die Jahre verteilte, also man hat diesen in Phasen gebaut, dauerte es länger als beim Super-Kamiokande.

Auch waren die Baukosten entsprechend höher. Beim Super-Kamiokande wurden 100M\$ vorgesehen und der IceCube hat tatsächlich 279M\$ gekostet. Die Konstruktion des IceCube-Detektors war zwar einfacher, aber auch teurer.

Wissenschaftlicher Fokus

Die größten Erfolge des Super-Kamiokande liegen im Bereich der Neutrinooszillation, beim IceCube war es hingegen die Etablierung eines Supernovae-Frühwarnsystems und die erfolgreiche Erprobung am Blazar TXS 0506+056, die bisher größte astrophysikalische Neutrino-Quelle die gefunden wurde, einer deren großen Erfolge.

Man erkennt ein klaren Unterschied an den thematischen Fokus der beiden Detektoren. Während das Super-Kamiokande sich der Untersuchung der Eigenschaften von Neutrinos widmet, ist der IceCube-Detektor mehr auf die astrophysikalische Herkunft von Neutrinos fokussiert und die Untersuchung der Eigenschaften von Neutrinos im astrophysikalischen Zusammenhang. Durch die besondere Lage macht das IceCube-Projekt auch glaziologische Untersuchungen, das Super-Kamiokande hat keiner interdisziplinäre Untersuchungen.

Das Super-Kamiokande hat deutliche Fortschritte in der Teilchenphysik geleistet, das IceCube konnte in der Astrophysik aber bereits beweisen, dass es in seinem Fachbereich was leisten kann. Auch die wichtigen Leistungen des Super-Kamiokande kamen nicht über Nacht sondern aber auch viele Jahre Forschung gebraucht. Das IceCube musste bevor es anfangen kann wichtige Beiträge zur Astrophysik zu leisten noch beweisen, dass sein eigentliches Konzept auch viabel ist.

Es hat dennoch bereits viele Daten über Neutrinos gesammelt und in Kooperation mit anderen Instituten auch kleinere Fortschritte in der Neutrino-Physik geleistet.

5.2 DUNE

Das DUNE ist ein in Planung befindendes Neutrinoexperiment. Es besteht aus 2 Neutrinodetektoren und einen Protonenbeschleuniger für die Produktion von Neutrinos. Hinter dem DUNE-Experiment steht eine große Kollaboration, die drei wichtigsten Institute sind das CERN in der

Schweiz, das Fermilab in Illinois und das Sanford Lab in South Dakota.

Aufbau

Das DUNE-Experiment ist in Near-Site-Facilities(NSFs) und Far-Site-Facilities(FSFs) unterteilt, wobei die NSFs in der Nähe des Protonenbeschleunigers sind und die FSFs 1300 Kilometer vom Protonenbeschleuniger entfernt. Zu den NSFs gehören der Fermilab mit seine Protonenbeschleuniger und der anschließenden Neutrinoproduktion, auch gibt es eine Neutrinoendetektor direkt am Fermilab. Zu den FSFs gehört ein weiterer Detektor in der Sanford Underground Research Facility (Siehe A.4)

Vorgeschichte

Zunächst sollte das DUNE-Experiment in us-amerikanischer Einzelarbeit gebaut werden. Es hieß damals auch noch LBNE. [MBC⁺¹⁵] LBNE wurde dann aufgelöst und durch das DUNE-Experiment abgelöst, man wollte mit anderen Instituten zusammenarbeiten. Das LBNE sollte näher an der Oberfläche sein als das DUNE-Experiment. 2015 wurde das LBNE durch das ELBNF abgelöst und später auch in das Dune-Experiment umbenannt. Der Bau begann 2017, 2018 konnten schon erste Messungen geführt werden. 2026 soll der Bau abgeschlossen werden. [Str15]

5.2.1 Untersuchungsthemen

Dieses Experiment soll in vielen Bereichen der Physik agieren. Man will astrophysikalische Untersuchungen machen zu Supernovae, Untersuchungen in der Teilchenphysik zu der Grand Unified Theory (Vereinigung aller Grundkräfte inkl. Gravitation) und zu CP-Verletzungen. Auch soll die Masse des Neutrinos weiter untersucht werden. [Bra18a]

Supernovae

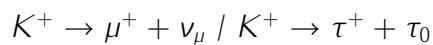
Das DUNE-Experiment soll im Vergleich zu anderen Neutrino-Detektoren viel besser niederenergetische Teilchen messen. Damit kann man die in einem Event freigesetzte Energie deutlich genauer bestimmen. Bei Supernovae werden zu deren Beginn eher ν_e emittiert und in der späteren Phase $\bar{\nu}_e$. Das DUNE-Experiment kann besser ν_e messen als $\bar{\nu}_e$ und wird sich deshalb dafür eignen eher die frühe Phase von Supernovae zu untersuchen. Insbesondere erhofft man sich, dass mithilfe von Daten über die Neutrinoefluxe von anderen Detektoren, wie den Hyper-Kamiokande, man die Emission von Neutrinos bei der Supernovae besser versteht. [?]

Grand Unified Theory

Nach einigen GUTs sollten Protonen zerfallen. Wie zum Beispiel nach dieser Reaktion:



Einer der Zerfallsprodukte wäre ein Antineutrino. Das kann vom DUNE-Experiment gemessen werden. Das K-Meson würde nach 12,8ns weitere zerfallen:



Nach theoretischen Überlegungen lässt sich auch bestimmen wie das entsprechende Spektrum aussieht. So müsste man zwei Peaks bei 257 MeV und 459 MeV sehen. Beim LENA-Projekt könnte man dann im Laufe von 10 Jahren ungefähr 10 solcher Ereignisse sehen, sollten Protonen zerfallen, beim DUNE gibt es noch keine genaue Angaben wie sensibel ist bei Protonenzerfällen. Da sie, die Messung eines solchen deren Ziel ist, sollten das DUNE-Experiment entsprechend sensible Detektoren bauen. [Ter]

CP-Verletzungen

Wie beim Super-Kamiokande will man beim DUNE-Experiment CP-Verletzungen anhand von Neutrinooszillation nachweisen. Auch hier soll die Antineutrinooszillation mit der Neutrinooszillation verglichen werden. Das DUNE hat aber den Vorteil, dass es eine wesentlich längere Streck zwischen den Detektor und der Neutrinoproduktion hat im Vergleich zum Super-Kamionkande. Nach 14 Jahre Laufzeit werden die vom DUNE gemessenen oder nicht gemessenen Unterschied mit einer $3-\sigma$ -Signifikanz stimmen. Sollte keine Effekt gemessen werden, dann wird das DUNE-Experiment aussagen können wie groß die CP-Verletzung noch sein darf. [Col16]

Weitere Themen

Das sind die vom Projekt selbst vorgenommenen Ziele, doch der große Umfang des Projekts und der Kollaboration führen dazu, dass es noch weitere Überlegungen gibt das DUNE-Experiment in noch mehr Bereichen zu nutzen. Eine dieser Überlegungen ist mit dem DUNE nach sterilen Neutrinos zu suchen. Diese, wie zuvor erklärt, interagieren nur durch Gravitation, das macht deren Messung besonders schwer. Beim DUNE sollen auch die Parameter der Neutrinooszillation genauer gemessen werden, sollte diese nicht den theoretisch prognostizierten Werten, deutet das darauf hin, dass das theoretische Verständnis des Neutrinos möglicherweise überarbeitet werden muss, dazu könnte eine Erweiterung des Standardmodell um sterile Neutrinos gehören. [BdGKK15] Eine Erweiterung der Neutrinophysik könnten auch nicht standardmäßige Neutrinodetektoren bieten. Die Sensitivität des DUNE sollte ausreichen um zu bestimmen, ob es diese nicht standardmäßige Neutrinointeraktionen überhaupt gibt, es könnte sogar reichen um die neuen Parameter zu bestimmen. Wenn die Datenlage gut ist, könnte man auch die Interaktion näher bestimmen und gegebenenfalls von sterilen Neutrinos unterschieden werden. Es wird erwartet, dass man dennoch mehr Daten brauchen wird, als das DUNE liefern wird. [dGK16]

5.2.2 Vergleich

Konstruktion

Wie auch schon beim Super-Kamiokande ist der Bau deutlich aufwendiger. Zudem wird das DUNE-Experiment deutlich teurer werden, als das IceCube-Projekt. Es wird nach jetzigen Schätzungen alleine der us-amerikanischen DOE 1,3-1,9 Billionen Dollar kosten. Die Planungsphase für das DUNE-Experiment begann 2015 und der Bau soll 2026 fertig sein, das liegt ungefähr im gleichen Rahmen wie beim IceCube, wobei das IceCube innerhalb von 3 Jahren in Betrieb ging, doch das DUNE-Experiment kann seinen Betrieb erst nach Bauende beginnen. Hier zeigte sich auch wieder, dass die phasenweise Bauart des IceCubes den Vorteil hat, dass durch diese es möglich ist relativ schnell mit Messungen zu beginnen.

Wissenschaftlicher Fokus

Das DUNE-Experiment hat sich ganz offensichtlich höhere Ziele gesetzt als das IceCube-Projekt. Anders als beim Super-Kamionkande ist die Überscheidungen zwischen den beiden Detektoren größer. Sowohl das IceCube-Projekt als auch das DUNE betreiben astrophysikalische Forschung im Bereich der Supernovae. Auch untersuchen beide die Masse von Neutrinos, wobei fast alle Neutrino-Detektoren das untersuchen, dies eine sehr grundlegende Fragestellung ist, welche immer noch nicht genau beantwortet wurde.

Bei der Untersuchung von Supernovae könnten sich die beiden eine Rolle spielen, das IceCube hat bewiesen, dass es die Neutrinoefluxe aus Supernovae wahrnehmen kann und rechtzeitig andere Institute informiert über den Fund. So könnte das IceCube ein Neutrinoeflux einer Supernovae wahrnehmen und das DUNE-Experiment kann dann versuchen die niederenergetischen Neutrinos zu messen, wobei es sein kann, dass keine mehr gemessen werden können, da wie zuvor festgestellt werden die niederenergetischen Neutrinos zu Beginn der Supernova ausgestrahlt.

So eine Zusammenarbeit könnte, aber auch ohne Warnsystem funktionieren. Beide Detektoren sollten den Neutrino-Flux einer Supernova wahrnehmen, beim IceCube wurde das bereits gemacht, auch spricht beim Aufbau der DUNE-Detektoren nichts dagegen, dass sie wie das Super-Kamiokande Neutrino-Flux aus Supernovae wahrnehmen können. Man kann also nach dem ein solcher Flux gemessen wurden die Daten der beiden Institute zusammenbringen und gemeinsam analysieren. Das IceCube hat dann genaue Daten zu den hochenergetischen Neutrinos und das DUNE genaue Daten zu den niederenergetischen. Beide Projekte sind bereits durch deren Organisationen mit vielen Instituten verbunden, also würde sich eine projektübergreifende Kollaboration anbieten. Sehr bedauerlich ist es, dass beim DUNE-Experiment keine deutschen Institute mitmachen. Bei einem Experiment in einem solchen Umfang sollten sich die deutschen Institute überlegen, ob sie nicht was dazubringen wollen.

5.3 Antares (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental Research)

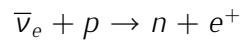
Bei Antares handelt es sich ebenfalls um ein Neutrino-Teleskop, welches Neutrinos kosmischer Herkunft untersucht. Die Ziele, die beide Teleskope verfolgen sind nahezu identisch, wie die Ermittlung der Strahlungsquellen kosmischer Höhenstrahlung. Ihre Funktionsweisen sind sich ebenfalls sehr identisch. Es wird sich bei Antares zu Nutze gemacht, dass in seltenen Fällen die Neutrinos mit transparentem Material wechselwirken. Antares befindet sich im Mittelmeer und man setzt darauf, dass die Neutrinos mit dem Wasser wechselwirken. Ähnlich wie bei IceCube entstehen daraus dann Sekundärteilchen wie Myonen, die dann mithilfe von Detektoren registriert werden. Beide Detektoren machen sich die seltene Wechselwirkung von H₂O mit Neutrinos zu nutze. Auch bei Antares entsteht Tscherenkow-Licht. Wie beim IceCube wurden auch hier einige Stränge mit optischen Mo-

dulen im Medium platziert. Im Gegensatz zu IceCube wird es hier ermöglicht die Detektoren wieder zu erreichen und zu warten für den Fall, dass sie ausfallen sollten. Antares stellt auch eher einen Prototyp für einen im Aufbau befindlichen Teilchendetektor dar, nämlich KM3NeT. Dieser Detektor wird Antares ablösen, da Antares nur Messungen im Bereich von 10 GeV bis 100 GeV wahrnehmen kann. Für höherenergetische Messungen ist das Teleskop zu ungenau, was eigentlich essentiell ist, da höherenergetische Neutrinos eher Aufschluss darüber geben woher Neutrinos stammen und welche Bedeutung sie haben. IceCube im Vergleich misst vor allem Daten im Bereich von ≥ 200 GeV, was einige irrelevante Messungen wie irdische Neutrinos vernachlässigt. KM3Net soll dann wesentlich größer werden mit 600 Strängen und 12000 Photomultiplern und ein größeres Spektrum an möglich zu messbaren Energien. Beide Detektoren richten den Fokus auf Myonneutrinos, da sie nach der Kernreaktion mit dem Medium ihre Bewegungsrichtung beibehalten. Sowohl IceCube als auch Antares werden für andere Forschungen außerhalb der Neutrinoforschung eingesetzt. Durch die Positionierung im Mittelmeer lässt es auch biologische Untersuchungsmöglichkeiten zu, wie die Erforschung der Tierwelt oder von Biolumineszenz. IceCube bittet keine solcher zusätzlichen biologischen Ergänzungen, da dies einfach nicht möglich ist durch die Positionierung im Eis. Jedoch findet IceCube auch Anwendung bei der Untersuchung magnetischer Monopole und dient eher bei physikalischen Untersuchungen. [Sto]

5.4 Double-Chooz-Experiment

Beim Double-Chooz-Experiment handelt es sich um ein Neutronoteleskop, welches sich durch seine "Eigenschaften" wesentlich mehr von IceCube unterscheidet als Antares. Dies beginnt schon bei der Ausrichtung der Forschung. Während bei IceCube nach den Quellen von Neutrinos geforscht wird, wird beim Double-Chooz-Experiment die Neutrinooszillation untersucht. Darunter versteht man die Eigenschaft des Neutrinos sich in eine andere Art des Neutrinos umzuwandeln, wie bei-

spielsweise von einem Antineutrino in ein Myonneutrino. Dieses Experiment wird im Kernkraftwerk Chooz betrieben. Das Ziel besteht darin herauszufinden wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass Neutrinooszillation stattfindet, dafür werden zwei Detektoren, in unterschiedlich weitem Abstand vom Reaktor, positioniert. Als Nebenprodukt des inversen radioaktiven β -Zerfalls entstehen Antineutrinos, die sich willkürlich in alle Richtungen ausbreiten:

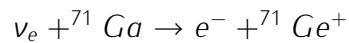


Man sieht, dass ein Antielektronneutrino und ein Proton in ein Neutron und in ein Positron umwandelt. Die beiden Detektoren registrieren lediglich Antineutrinos. Wenn also der weit entfernte Detektor weniger Messergebnisse hat, kann man daraus schließen, dass sich die Antineutrinos eher umgewandelt haben als im nahen Detektor. Dazu erzeugt das Neutron Szintillationslicht. Dies geschieht indem das Neutron auf ein Elektron des Elements Gadolinium trifft, welches sich in dem Detektor befindet. Das Elektron wird in einen energetisch höheren Zustand gehoben und fällt wieder in seine ursprüngliche Bahn, wodurch Energie in Form von Licht frei wird. Wenn man die Messdaten der beiden Detektoren miteinander vergleicht, lässt sich die Umwandlungswahrscheinlichkeit annäherungsweise bestimmen. Anhand dieser Forschungsart lässt sich erkennen, dass die Ziele der einzelnen Forschungsstätte sich stark unterscheiden, aber trotzdem alle Ergebnisse dazu beitragen die Neutrinos besser zu verstehen. [Wila]

5.5 Gallex (Gallium-Experiment)

Gallex beschäftigte sich überwiegend mit solaren Neutrinos (also von der Sonne emittierte Neutrinos). Anders als IceCube ist Gallex nicht mehr in Betrieb, da die Ziele der Forschung erreicht wurden. Mit diesem Detektor sollte der Beweis für die Existenz solarer Neutrinos erbracht werden. Mit dem Beweis sollten Theorien zur Energieerzeugung der Sonne bewiesen oder widerlegt werden. Wie der Name schon andeutet handelt es sich um einen Nachweis mit dem Element Gallium.

Der Detektor war gefüllt mit einer großen Menge Galliumtrichlorid-Lösung, die zu etwa 30% aus Gallium besteht. Beim Auftreffen eines Neutrinos gibt es einen sogenannten inversen β -Zerfall, also eine Kernreaktion. Dort entsteht kein Neutrino sondern der Zerfall wird durch ein Neutrino ausgelöst:



Aus dem Neutrino und dem Gallium entstehen ein Elektron und Germanium. Gallium wird verwendet, da es eine niedrige Schwellenenergie besitzt, was zur Folge hat, dass auch Neutrinos mit niedrigen Energien einen inversen β -Zerfall auslösen können. Dies ist sinnvoll, da die solaren Neutrinos eine eher geringe Energie haben. Einige solare Neutrinos erreichen nicht die Erde oder durchdringen deshalb nicht die Erde aufgrund ihrer geringen Energie. Bei Gallex beträgt diese Schwellenenergie etwa 233 keV und bei IceCube liegt diese bei ungefähr 200 GeV. Das ist in etwa ein Unterschied vom Faktor 10^6 . Dies zeigt, dass die solaren Neutrinos eine deutlich geringere Energie aufweisen. Das entstandene Germanium wurde dann extrahiert und in das Gas Monogerman umgewandelt. Dieses hat eine recht kurze Halbwertszeit (11,4 Tage), mit der man nach jedem Zerfall ein Neutrino "eingefangen" hatte. Durch diesen Detektor konnte man den ersten Nachweis dafür erbringen, dass Neutrinos oszillieren, denn mathematische Modelle sagten mehr Registrierungen von Neutrinos hervor. Allerdings registriert dieser Detektor lediglich Elektronenneutrinos, was bedeutet, dass die Neutrinos oszilliert haben. Durch die Oszillation wurden die Elektronenneutrinos in andere Neutrinos umgewandelt, die der Detektor nicht registriert. Eine Bedingung für die Oszillation ist, dass die Neutrinos Masse haben, was dadurch bewiesen wurde. Vorher nahm man an, dass Neutrinos masselos sind, was durch diese Experimente widerlegt wurde. IceCube weiß ebenfalls große Erfolge auf, wie die Entdeckung von Neutrinoquellen. Allerdings legen solche Entdeckungen den Grundbaustein für nachfolgende Projekte wie IceCube. [Wilb]

5.6 Ergebnisse des Vergleichs

Abschließend, nach einem ausführlichen Vergleich, stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist alle Detektoren weiter zu betreiben oder ob nur bestimmte weiter betrieben und mit weiteren Fördermitteln subventioniert werden sollen. Zuerst sollte man beachten, dass alle genannten Observatorien wichtige Daten gesammelt haben, die dazu beitragen die Neutrinos besser zu verstehen. Zum anderen ist es sinnvoll möglichst viele Daten zu sammeln, da die Wechselwirkung zwischen kosmischen Neutrino und Materie selten stattfindet. Deshalb ist es nützlich möglichst viele unterschiedliche Nachweismedien zu verwenden, um zu testen, welches das mit der häufigsten Interaktionsquote ist, um die zukünftig Forschung zu verbessern. Nicht zu vergessen ist, dass sich die Ziele, die man erreichen und die Grundlagen, die man versucht zu erklären unterschiedlich sind. Die Forschung richtet sich zwar nach den Neutrinos, aber spezifisch beschäftigen sich die Kollaborationen mit unterschiedlichen Schwerpunkten und Kollaborationen mit den selben Schwerpunkten haben die Möglichkeit einer engen Kooperation, um ihre Ergebnisse zu vergleichen und effizienter zu arbeiten und zu forschen. Außerdem muss man bedenken, dass viele Fragen in einem geringen Zeitraum beantwortet werden können und nicht alle in einem großen zeitlichen Abstand beantwortet werden müssen. Nicht zu vergessen ist außerdem, dass bestimmte Daten anderen Forschungseinrichtungen dabei helfen können ihre Forschung zu optimieren und anzupassen. Deshalb ist es logisch, dass mehrere Forschungsprojekte zur selben Zeit laufen. Selbstverständlich müssen diese Forschungseinrichtungen irgendwann außer Betrieb gesetzt werden, da diese sonst nur weitere Gelder beanspruchen würden, die an anderen Stellen sinnvoller sein könnten. Dies sieht man beispielsweise gut an Gallex. Gallex hat die aufgeworfenen Fragen beantwortet. Eine Fortführung wäre überflüssig, da sie keine weiteren Antworten mehr liefern könnte. Anders verhält es sich beispielsweise bei IceCube. Während man mit Gallex einige Theorien klären sollte, versucht man mit IceCube auch Quellen zu identifizieren, die uns weiter helfen könnten und es gibt sehr viele Quellen, die man noch lokali-

sieren könnte. Außerdem geht IceCube nun weit über seine eigentlichen Ziele hinaus. Mit IceCube gibt es noch viele Forschungsmöglichkeiten. Als Beispiel kann man anführen, dass jetzt nach den GZK-Neutrinos geforscht werden soll. Das Prinzip von IceCube ermöglicht theoretisch die Registrierung dieser Neutrinos. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Neutrinos mit dem Eis wechselwirken ist sehr gering. Man muss bedenken, wie viele Millionen Neutrinos uns pro Sekunde durchqueren. Der prozentuale Anteil davon wie viele davon mit Materie wechselwirken ist gering. Nun muss man bedenken, dass es vermutlich mehr normale kosmische Neutrinos gibt als GZK-Neutrinos, was es ebenfalls wieder unwahrscheinlicher macht, dass sie mit Materie wechselwirken. Deshalb ist es umso wichtiger mehr Daten zu sammeln, was vor allem mit IceCube möglich ist, da IceCube das größte Volumen der Neutrinoteilchendetektoren darstellt. Wenn sich nun die Frage stellt, ob man nun Antares oder IceCube neue Fördermittel zur Verfügung stellt, wäre es natürlich wünschenswert, das beide mit neuen Gelder ausgestattet werden, denn beide würden die Neutrinoforschung voranbringen. Wenn dies jedoch nicht möglich wäre und eine Entscheidung gefällt werden muss, dann würde ich es am sinnvollsten erachten, dass IceCube eher mit neunen Fördergeldern unterstützt wird. Dies halte ich zum einen für sinnvoll, da IceCube schon gebaut wurde und Antares müsste noch gebaut werden und ist dann in etwa vergleichbar mit IceCube, aber ohne die Erweiterung, denn im Prinzip sind es die selben Detektoren, welche sich lediglich beide in H_2O befinden, nur in einem anderen Aggregatzustand. Außerdem hat die IceCube-Kollaboration deutlich mehr Erfahrung in der Neutrinoforschung und weiß wie man am besten vorgeht und sind schon eher in dem Denken drin, wie man das Projekt noch optimieren könnte oder wie man die Daten am besten analysiert. Nicht zu vergessen ist, dass IceCube schon konkrete Pläne hat, wie man den Detektor am besten ausbaut um auch in anderen Gebieten der Neutrinos zu forschen, hier lässt sich auf die PINGU-Erweiterung verweisen, die zwar nicht gebaut wurde, aber immer noch geplant wird, wenn Fördergelder bereitgestellt werden. [Deub]

Literaturverzeichnis

- [AC01] Q. R. Ahmad and SNO Collaboration. Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p^-$ interactions produced by solar neutrinos at the sudbury neutrino observatory.
<https://arxiv.org/pdf/nucl-ex/0106015.pdf>, Juli 2001.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [AM16] Sebastian Adrián-Martínez. Letter of intent for KM3NeT 2.0.
<https://arxiv.org/pdf/1601.07459.pdf>, 2016.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [BdGKK15] Jeffrey M. Berryman, André de Gouvêa, Kevin J. Kelly, and Andrew Kobach. Sterile neutrino at the Deep Underground Neutrino Experiment.
<https://arxiv.org/pdf/1507.03986.pdf>, 2015.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Bra18a] D. Braillsford. DUNE: Status and Perspectives.
<https://arxiv.org/pdf/1804.04979.pdf>, 2018.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Bra18b] Silvia Bravo. IceCube and HAWC unite efforts to dissect the cosmic-ray anisotropy.
<https://icecube.wisc.edu/news/view/621>, Dezember 2018.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [CA02] K2K Collaboration and M. H. Ahn. Indications of Neutrino Oscillation in a 250 km Long-baseline Experiment.
<https://arxiv.org/pdf/hep-ex/0212007.pdf>, 2002.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Car01] Edwin Cartlidge. Accident grounds neutrino lab.
<https://physicsworld.com/a/accident-grounds-neutrino-lab/>, November 2001.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [CDRD⁺98] Bruce T. Cleveland, Timothy Daily, Jr. Raymond Davis, James R. Distel, Kenneth Lande, C. K. Lee, Paul S. Wildenhain, and Jack Ullman. Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector.
<https://iopscience.iop.org/Misc/10.1086/305343/pdf>, März 1998.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col] IceCube Collaboration. Frequently asked questions.
<https://icecube.wisc.edu/about/faq>.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).

- [Col06] K2K Collaboration. Measurement of neutrino oscillation by the K2K experiment.
<https://arxiv.org/pdf/hep-ex/0606032.pdf>, Oktober 2006.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col10] IceCube Collaboration. Limits on a muon flux from Kaluza-Klein dark matter annihilations in the Sun from the IceCube 22-string detector.
<https://arxiv.org/pdf/0910.4480.pdf>, März 2010.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col11a] IceCube Collaboration. Limits on Neutrino Emission from Gamma-Ray Bursts with the 40 String IceCube Detector.
<https://arxiv.org/pdf/1101.1448.pdf>, April 2011.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col11b] OPERA Collaboration. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam v1.
<https://arxiv.org/abs/1109.1109v1>, September 2011.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col13a] T2K Collaboration. New results from T2K conclusively show muon neutrinos transform to electron neutrinos.
<http://t2k-experiment.org/2013/07/new-results-from-t2k-conclusively-show-muon-neutrinos-transform-to-electron-neutrinos/>, 2013.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col13b] The IceCube Collaboration. South pole glacial climate reconstruction from multi-borehole laser particulate stratigraphy.
https://www.academia.edu/33127212/South_Pole_glacial_climate_reconstruction_from_multi-borehole_laser_particulate_stratigraphy, 2013.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col16] DUNE Collaboration. Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Conceptual Design Report Volume 1: The LBNF and DUNE Projects.
<https://arxiv.org/pdf/1601.05471.pdf>, Januar 2016.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Col17] T2K Collaboration. T2K presents hint of CP violation by neutrinos.
<http://t2k-experiment.org/2017/08/t2k-2017-cpv/>, 2017.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).

- [DES] DESY. IceCube – Neutrino-Teleskop IceCube.
http://www.desy.de/forschung/anlagen_projekte/icecube/index_ger.html.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Deua] Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. Kosmische Strahlung und die energiereichen Himmelskörper.
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/>.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Deub] Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. Neutrinos.
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos/>.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [dGK16] André de Gouvêa and Kevin J. Kelly. Non-standard neutrino interactions at DUNE.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0550321316001036>, 2016.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Ebe17] Benjamin Eberhardt. *Supernovae with IceCube: Direction and Average Neutrino Energy Determination*. PhD thesis, Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 2017.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Fea03] S. Fukuda and Y. Fukuda et. al. The super-kamiokande detector.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S016890020300425X>, 2003.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [FH12] Uli Kat Francis Halzen. The era of kilometer-scale neutrino detectors.
<http://downloads.hindawi.com/journals/ahep/2013/680584.pdf>, Oktober 2012.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [GGS58] M. Goldhaber, L. Grodzins, and A. W. Sunyar. Helicity of neutrinos.
<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.109.1015>, Feb 1958.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [GP69] V. Gribov and B. Pontecorvo. Neutrino astronomy and lepton charge.
https://www.academia.edu/2203828/Neutrino_astronomy_and_lepton_charge, Januar 1969.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Gä08] Marc Gänslner. Interview mit Prof. Dr. Josef Jochum.
http://www.drillingsraum.de/dunklematerie/dunkle_materie_2.html,

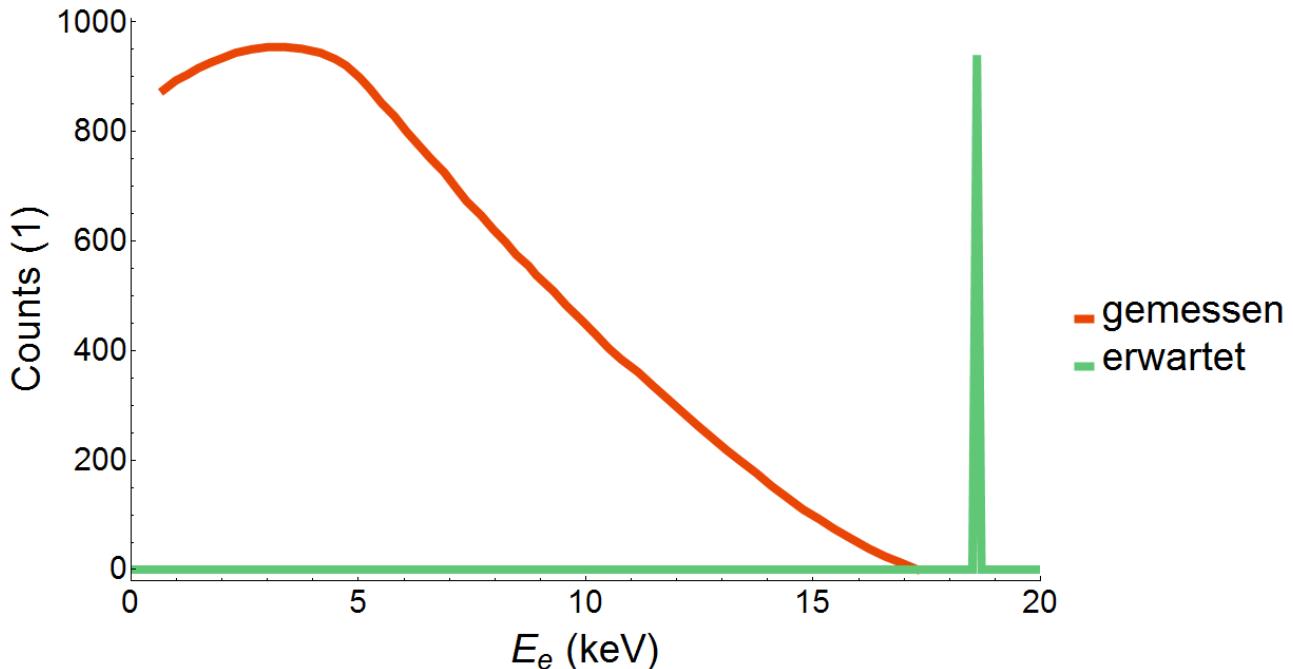
2008.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Hal16] Francis Halzen. Neutrinojagd am Ende der Welt.
[NeutrinojagdEndederWelt](http://neutrinojagd.endederwelt.de/), Mai 2016.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Ham18] Johannes Haman. Analyse von Daten des IceAct-2018 Luft-Cherenkov Teleskops am Südpol.
http://www.institut3b.physik.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabebghl, Dezember 2018.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [HKG18] Hyper-Kamiokande-Collaboration. Hyper-kamiokande experiment to begin construction in april 2020.
<http://www.hyperk.org/?p=387>, 2018.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Hor15] Johannes Horak. Eine kurze Geschichte des Neutrinos.
<https://www.timaios.org/2015/11/19/eine-kurze-geschichte-des-neutrinos/>, November 2015.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Kra06] Ralf Krauter. Elementarteilchen entlarven Langfinger.
https://www.deutschlandfunk.de/elementarteilchen-entlarven-langfinger.676.de.html?dram:MIsc_id=23372, 2006.
- [Lod17] Francesca Di Lodovico. The hyper-kamiokande experiment.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/888/1/012020/pdf>, September 2017.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Lon87] Michael J. Longo. Tests of relativity from SN1987a.
<https://isidore.co/misc/Physics%20papers%20and%20books/Recent%20Papers/OPERA%20FTL%20result/Longo%201987.pdf>, November 1987.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [MBC⁺15] Craig Damon Moore, Ken Bourkland, Cory Francis Crowley, Patrick Hurh, James Hylen, Byron Lundberg, Alberto Marchionni, Mike McGee, Nikolai V. Mokhov, Vaia Papadimitriou, Rob Plunkett, Sarah Diane Reitzner, Andrew M Stefanik, Gueorgui Velev, Karlton Williams, and Robert Miles Zwaska. Current status of the lbne neutrino beam.
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.02014.pdf>, 2015.
 (Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).

- [MK18] Christiane Knoll Marek Kowalski. Die Aufregung ist groß in der astronomischen Gemeinschaft.
https://www.deutschlandfunk.de/forscher-zu-icecube-projekt-am-suedpol-die-auf-676.de.html?dram:article_id=422915, Juli 2018.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Mü14] Andreas Müller. Pion.
<https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/pion/344>, 2014.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Nav17] Carl R. (Rod) Nave. Cowan and Reines Neutrino Experiment.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/PMIs/cs/cowan.html>, April 2017.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Oya06] Yuichi Oyama. Results from K2K and status of T2K.
<https://arxiv.org/pdf/hep-ex/0512041v2.pdf>, 2006.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Pau30] Wolfgang Pauli. Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauverein-Tagung zu Tübingen.
<http://www.dokspeicher.de/120295/>, Dezember 1930. Transkript in Anhang A.2
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Que] Queen Mary University of London . IceCube/PINGU.
<https://www.qmul.ac.uk/spa/pprc/research/icecubepingu/>.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [SB13] Laurel Norris Silvia Bravo. IceCube looks to the future with PINGU.
<https://icecube.wisc.edu/news/view/186>, Dezember 2013.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Sie16] Ethan Siegel. Cosmic Neutrinos Detected, Confirming The Big Bang's Last Great Prediction.
<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/09/09/cosmic-neutrinos-detected-confirming-the-big-bangs-last-great-prediction>, 2016.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Sto] Thierry Stolarczyk. Antares-overview.
<http://antares.in2p3.fr/Overview/index.html>.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).

- [Stö00] Horst Stöcker. *Taschenbuch der Physik. Formeln, Tabellen, Übersichten.* Deutsch (Harri), 2000.
- [Str15] Jim Strait. Elbnf and lbnf.
https://web.fnal.gov/organization/programplanning/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/organization/programplanning/SpecialReports/Strait-McCluskey_LBNF_AEM_2-9-2015.pdf&action=default, Februar 2015.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Ter] Teresa Marrodán Undagoitia. Proton decay and neutrino astrophysics with the future LENA detector.
http://www.e15.ph.tum.de/fileadmin/downloads/LENA/Talks/Marrodan_NNN08_Paris.pdf, September.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Wila] Hans-Peter Willig. Double-chooz-experiment.
<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Double-Chooz-Experiment>.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Wilb] Hans-Peter Willig. Gallex.
<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/GALLEX>.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [Wilc] Hans-Peter Willig. Icecube.
<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/IceCube>.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).
- [WiM18] Research highlights: Neutrino astronomy and multimessenger astrophysics.
https://icecube.wisc.edu/science/highlights/neutrino_astronomy, 2018.
(Aufgerufen zuletzt 27.Juni 2019).

A | Anhänge

A.1 Beta-Zerfall Spektrum



Credits: G. M. Lewis, Neutrinos (London: Wykeham, 1970) Seite 30.

A.2 Brief: Paulis Vorschlag von Neutrinos

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauverein-Tagung zu Tübingen.

Physikalisches Institut

der Eidg. Technischen Hochschule

Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930

Gloriastrasse

Liebe radioaktive Damen und Herren, Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von

Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Größenordnung wie die Elektronenmassen sein und jedenfalls nicht größer als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, das beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert würde derart, dass die Summe der Energien von Neutronen und Elektronen konstant ist.

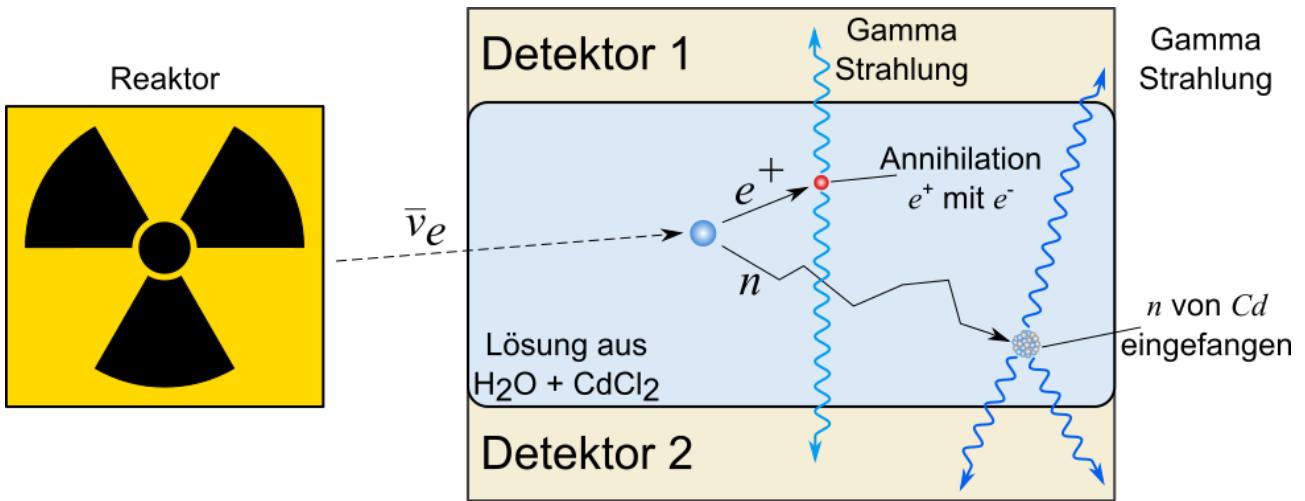
Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer diese Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e^*(10-13 \text{ cm})$.

Ich traue mich verläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wir durch den Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amte, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. Also liebe Radioaktive, prüfen, und richtet. – Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlig bin. – Mit vielen Grüßen an Euch, sowie auch an Herrn Back, Euer untertänigster Dienser

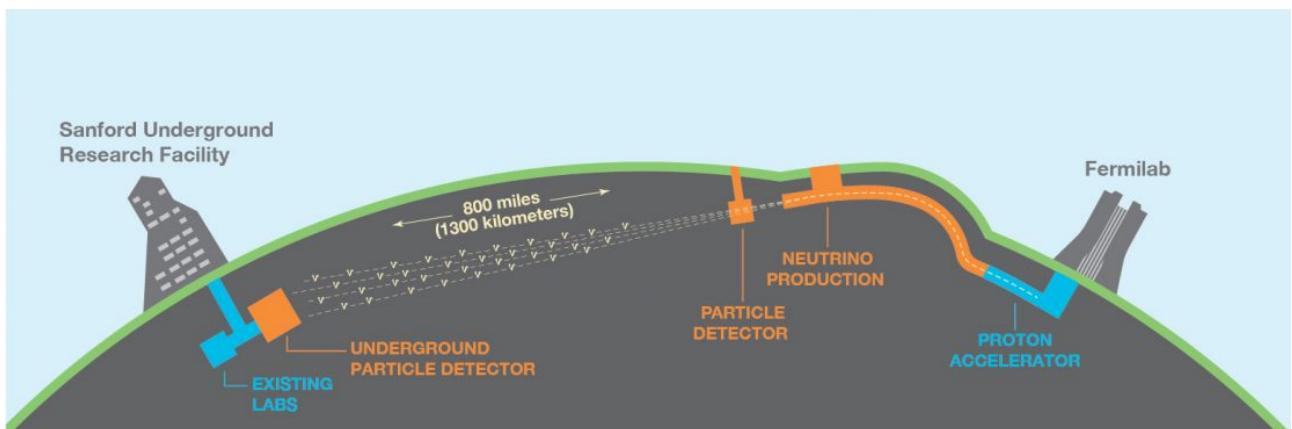
gez. W. Pauli

A.3 Cowan-Reines Experiment



Quelle: timaios.org

A.4 DUNE



Quelle: Dune-Kollaboration