IceCube South Pole Observatory

Das IceCube-Projekt

Was ist das IceCube-Projekt?

Beim IceCube-Projekt handelt es sich um ein 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 1km³. 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 Tscherenkov-Strahlung nachweisen. \cite {icecube/faq13}

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 durchgeführt 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. [icecube/faq]. 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 von der Bewegungsrichtung abhängig ist und ist das Gegenteil der Isotropie, 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. \cite {icecube/faq13}

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. \cite {icecube/faq13}

Geschichte

Bau des IceCube

Das angewandte Prinzip (in 1.1 beschrieben) wurde auch in einem anderen Projekt, das ebenfalls dazu diente kosmische Höhenstrahlung zu untersuchen diente, angewendet. Dabei handelt es sich um das Projekt AMANDA (Antartic Muon And Neutrino Detector Array). Dieses Teleskop wurde 2009 deaktiviert, da das 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. \cite {icecube/faq13}

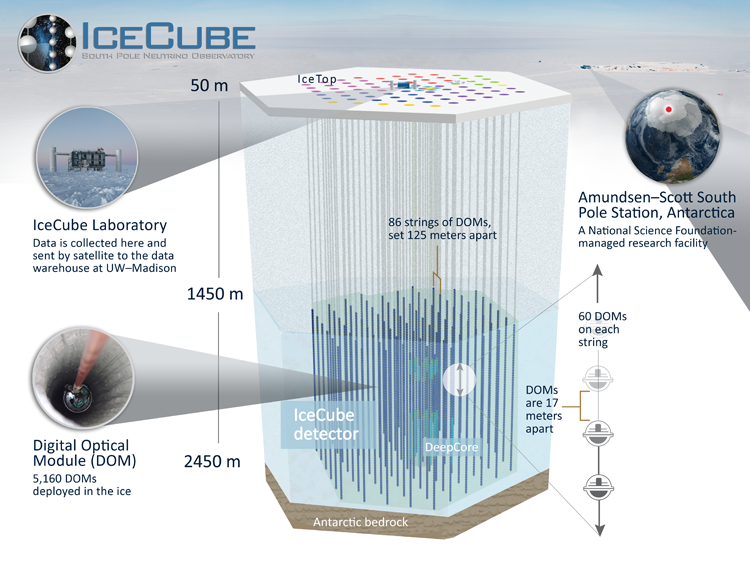
Erfolge

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 es sich beim Neutrinos, um einen ,,Fluss`` handelt, welcher nicht von der Erde ausgeht. 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 Erkennt nis verlieh das Magazin ,,Physics World`` den Preis ,,Breakthrough of the year 2013``.

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 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. \cite {icecube/faq13} \cite {DeFu/Int18}

Konstruktion und Technik

Aufbau des Detektors



Bildverweis 2

Ein DOM

Bildverweis 1

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 Photomultipler und der notwendigen Elektronik. Der Photomultiplier (oder auch Photoelktronenvervielfacher) 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 Höhenstrahlung 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. [Quelle:BachJoHa]

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. \cite {DESY/16}

Instandhaltung der Sensoren

Wie bereits angesprochen besteht der Detektor zu einem großen Anteil aus Sensoren, die die Tscherenkov-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. \cite {icecube/faq13}

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 Tscherenkov-Strahlung. Unter Tscherenkov-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 Fotomultipler 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 Eintrittwinkels von 0,5°. 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 Myonneutrions fokussierte. Auch deshalb, weil die Lichtblitzte, 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:

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:

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.

Man bezeichnet die Entstehung des Tscherenkovlichts auch als Überschallknall.

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.

Die Reaktion im Eis läuft nach folgender Gleichung ab:

\cite {IcePhyCos/13} \cite {SdW/Mai16} \cite {WdP/13}

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 Neutrinonachweis 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. \cite {icecube/faq13}

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 Erkenntnisse was zu einer Kausalitätskette führt und je mehr Erkenntnisse die Menschen erlangen desto mehr Fortschritt kann es geben von dem alle Menschen profitieren können.

\cite {icecube/faq13}

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 beispielswiese 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 Analysemethode 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 Foschungsaspekte zu entwickeln, die man alle mit dem IceCube-Projekt abdecken kann. Dabei muss es nicht nur um Neutrinoforschung 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 Modulen wird eine gewisse Menge an Vergleichsmaterial geboten und eventuell bietet diese Module eine höhere Empfindlichkeit. Dies müsste sich aber erst praktisch zeigen. \cite {DaAn/18}

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 < 4·10-36 kg ist. Mit PINGU soll die genaue Masse bestimmt werden beziehungsweise die sogenannte Neutrinomassenhierarchie, 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 Moduleltronik. 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.

\cite {DaAn/18} \cite {PinMar/14} \cite {PINGU/13}

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. [DeFu/Int]

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 Tscherenkovlicht 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 Fördergelder 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.\cite {DeFu/Int18}

4. Rolle des IceCube-Projekts in der Wissenschaftsdiplomatie

4.1 Finanzierung und Kooperation

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 Fuondation´´ 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. \cite {icecube/faq13}

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 Südpolststion 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. \cite {icecube/faq13} \cite {DeFor/13}

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 Konkurrenzdenken betreiben. Ein Beispiel dafür ist die Kooperation von IceCube mit HAWC (ebenfalls ein auf Tscherenkov-Strahlung basierendes Neutrinoteleskop). Die verschiedenen Kollaborationen haben Einfallsrichtungen der kosmischen Strahlung bei gleicher Energie in unterschiedlichen Himmelrichtungen 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. \cite {DeFor/13} \cite {IceHa/18}

5 Vergleich mit anderen Forschungsstätten

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

Bei Antares handelt es sich ebenfalls um ein Neutrinoteleskop, 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 Tscherenkovlicht. Wie beim IceCube wurden auch hier einige Stränge mit optischen Modulen 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. \cite {AntOV/13}

5.4 Double-Chooz-Experiment

Beim Double-Chooz-Experiment handelt es sich um ein Neutrionoteleskop, 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 beispielsweise 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 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. \cite {DCCos/12}

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 106. 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 weißt ebenfalls große Erfolge auf, wie die Entdeckung von Neutrinoquellen. Allerdings legen solche Entdeckungen den Grundbaustein für nachfolgende Projekte wie IceCube. \cite {PhyGA/13}

5.6 Ergebnisse des Vergleichs

Abschließend, nach einem ausführlichen Vergleich, stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist alle Detektoren weiter zu betrieben 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 ich 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 lokalisieren 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 H2O 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. \cite {Neutrino/14}

Quellen:

<https://astro.desy.de/neutrino_astronomie/icecube/index_ger.html> (zuletzt besucht 12. Oktober 2018 14:00 Uhr) Herausgeber: Deutsches Elektronen-Synchrotron {DESY/16}

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Icecube-architecture-diagram2009.PNG> Bild (Verweis 1)

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Neutriino_detektor.jpg> Bild (Verweis 2)

<https://icecube.wisc.edu/about/faq> (zuletzt besucht 13. Oktober 2018 14:30) Herausgeber: IceCube-Kollaboration [icecube/faq13]

<https://www.deutschlandfunk.de/forscher-zu-icecube-projekt-am-suedpol-die-aufregung-ist.676.de.html?dram:article_id=422915> (zuletzt besucht 20.Januar 2019) Herausgeber: Deutschlandfunk [DeFu/Int18]

Spektrum der Wissenschaft ,,Super-Neutrinos erklären die hochenergetischen Partikel extreme kosmische Ereignisse?´´ Mai 2016 Ausgabe 5/16 S.34-41 Artikel: ,,Neutrinojagd am Ende der Welt´´ Autor des Artikels: Francis Halzen [SdW/Mai16]

<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/GALLEX> (zuletzt besucht 23.Juni 2019 19:27 Uhr) Herausgeber: Hans-Peter Willig im Auftrag [PhyGA/13]

<http://antares.in2p3.fr/Overview/index.html> (zuletzt besucht 20.Juni 2019 14:37 Uhr) Herausgeber: Thierry Stolarczyk [AntOV/13]

<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Double-Chooz-Experiment> (zuletzt besucht 21.Juli 2019 14:34) Herausgeber: Hans-Peter Willig [DCCos/12]

<https://icecube.wisc.edu/news/view/186> [zuletzt besucht 27.06.2019 2:34 Uhr) Herausgeber: Silvia Bravo und Laurel Norris [PINGU/13]

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos/> [zuletzt besucht am 26.06.2019] Herausgeber: Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. [Neutrino/14]

<http://www.desy.de/forschung/anlagen__projekte/icecube/index_ger.html> [zuletzt besucht am 26.06.2019 um 1:25 Uhr] Herausgeber: DESY [DeFor/13]

<https://icecube.wisc.edu/news/view/621> [zuletzt besucht 26.06.2019 um 22:39 Uhr] Herausgeber: Silvia Bravo [IceHa/18]

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/universum/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/> [zuletzt besucht 24.06.2019 um 17:45 Uhr] Herausgeber: Deutsche physikalische Gesellschaft e.V [WdP/13]

<http://www.institut3b.physik.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabebghl> 2.Grundlagen [zuletzt besucht 26.06.2019 um 16:35 Uhr] Herausgeber: Johannes Haman [DaAn/18]

<https://www.qmul.ac.uk/spa/pprc/research/icecubepingu/> [zuletzt besucht 27.06.2019 um 14:52 Uhr] Herausgeber: Queen Mary University of London [PinMar/14]

<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/IceCube> [zuletzt besucht 27.06.2019 um 15:46 Uhr] Herausgeber: Hans Peter Willig [IcePhyCos/13]