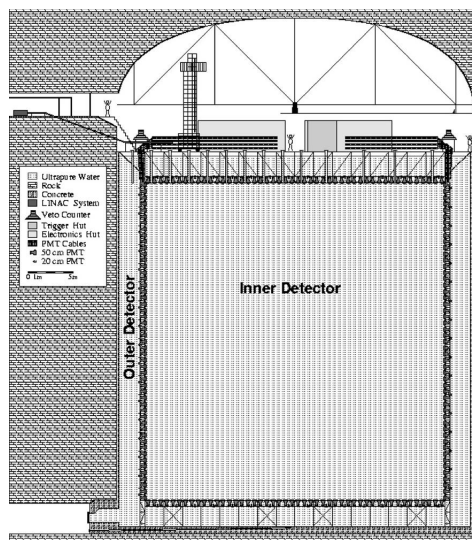


1 Detektorbeschreibung

Der Super-Kamiokande Detektor ist ein Wasser-Cherenkov Detektor (22.5kt aktives Volumen), gelegen in 1000m Tiefe (2700m Wasser Äquivalent) in der Mozumi Mine (Japan). Nach einer fünf-jährigen Bauzeit ging er 1996 als Nachfolger von Kamiokande (1983-1995) in Betrieb. Er besteht aus einem 42 Meter hohen (Durchmesser 39m) Stahlzylinder mit einem Fassungsvermögen von 50.000t Wasser. Der Zylinder ist durch ein Gerüst in zwei Volumina getrennt (innerer Detektor 32.000t, äußerer Detektor 18.000t). Das Gerüst dient zur Befestigung der Photomultiplier (PMTs). An der Innenseite (Oberfläche des ID) sind 11.146 PMTs, welche einen Durchmesser von 50cm haben, angebracht. Damit ist die Fläche des ID zu 40% mit Sensoren abgedeckt. An der Außenseite des Traggerüsts sind 1.885PMTs mit einem Durchmesser von 20cm angebracht, welche das Volumen des äußeren Detektors beobachten. Der äußere Detektor hat zwei Aufgaben. Zum einen dient er als passive Abschirmung gegen den Strahlungshintergrund bestehend aus Neutronen und Gammastrahlen, der vornehmlich aus dem umliegenden Fels stammt. Zum anderen fungiert er als aktiver Vetozähler besonders gegen von außen eindringende Myonen, die, wenn sie direkt von oben eintreffen, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aus der Atmosphäre stammen. Im Betrieb registrierte Super-K solche Myonen mit einer Frequenz von 1.8Hz, wodurch die meisten anfallenden Daten auf diese Prozesse zurückzuführen sind. Aus der Winkelverteilung dieser atmosphärischen Myonen ließ sich unter Annahme einer homogenen Dichte des Gesteins die Topographie des über der Mine liegende Berges mit hoher Präzision rekonstruieren. Im inneren Detektor werden nur solche Ereignisse ausgewertet, die in 2 Metern Entfernung zu den PMTs stattfinden (fiducial volume, 22.5kt). Dieses Verfahren liegt darin begründet, dass Spuren, die nahe an den PMTs verlaufen, nur schlecht konstruiert werden können und dass weiterhin eine noch bessere Abschirmung erreicht werden soll.



2 Ziele des Detektors

Wie der Name schon anklingen lässt (Kamioka Nuclear Decay Experiment), ist es ein Ziel die Baryonenzahl erhalten zu testen, indem man nach dem Zerfall eines Protons über verschiedene Zerfallskanäle sucht. Darüber hinaus detektiert Super-K Neutrinos aus verschiedenen Quellen, die einen Energiebereich zwischen wenigen MeV oder einigen TeV überdecken. Dazu zählen in aufsteigender Energie Neutrinos aus der Sonne, aus Supernovae, aus dem Erdinneren, aus der Atmosphäre sowie aus kosmologischen Prozessen (höchstenergetische Neutrinos). Zu jedem dieser Neutrinoquellen lassen sich mit den gewonnen Daten verschiedene Fragestellungen beantworten.

Hier wird es nur um die Frage gehen, ob Neutrinos aus der Atmosphäre periodische Oszillationen in andere Neutrino Flavours (Elektron-, Myon-, Tauonneutrino) zeigen.

3 Bedeutende wissenschaftliche Leistungen

- erster Beweis der Existenz von Neutrino-Oszillationen anhand von atmosphärischen Neutrinos (1998)
- Beweis des Ursprungs von solaren Neutrinos durch Echtzeitbeobachtungen
- Bestätigung des solaren Neutrino Defizits
- beste untere Grenze für partielle Lebensdauern des Protons (z.B. Proton in Positron und ungeladenes Pion, Proton in Neutrino und positives Kaon)

4 Photomultiplier

Die PMTs des inneren Detektors (Durchmesser 50cm) wurden speziell für Super-K von der Firma Hamamatsu Photonics entwickelt (PMTs des OD stammen aus dem IMB Experiment). Sie zeichnen sich vor allem durch eine hohe Sammeleffizienz der Photoelektronen aus, d.h. selbst bei einer Lichtintensität, bei der nur ein Photoelektron aus der Kathode ausgelöst wird, lässt sich ein deutliches Signal (vom Dunkelstrom unterscheidbar) messen. Die Quantenausbeute der Kathode ist auf das Spektrum der zu erwartenden Cherenkov-Strahlung abgestimmt und beträgt ungefähr 20%, d.h. nur 2 von 10 einfallenden Photonen führen zu einem austretenden Photoelektron. Um eine präzise Rekonstruktion der Teilchenspuren zu ermöglichen muss die Standardabweichung der Durchlaufzeit (transit time) eines Elektrons durch ein PMT möglichst klein sein. Das Erdmagnetfeld verhindert dies jedoch, weil es zu abweichenden Elektronentrajektorien führt. Aus diesem Grund wurden Helmholtz Kompensationsspulen außerhalb des Tanks angebracht um das Magnetfeld auf einen akzeptablen Wert zu reduzieren.

5 Untergrundreduzierung und Wassereinigung

Die Lage des Detektors in einer Mine geht unweigerlich mit einer hohen Konzentration an Radon in der Luft einher. Aus diesem Grund wurden Maßnahmen ergriffen um die Radonbelastung der Luft zu reduzieren, da es sich sonst im Wasser lösen und zu einer erhöhten Aktivität führen würde. Der Raum oberhalb des Detektors steht unter ständigem leichten Überdruck um das Nachströmen von stark kontaminierter Luft zu verhindern. Der Überdruck wird erzeugt, indem frische Luft von außerhalb der Mine angesaugt wird. Des Weiteren wurden alle freiliegenden Felswände mit einer Polyurethanbeschichtung überzogen um ein Eindiffundieren von Radon zu verhindern.

Um die Radioaktivität des Wassers auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig eine maximale Transparenz des Wassers für Cherenkov-Licht zu gewährleisten, wurde ein ausgeklügeltes Wasseraufbereitungsverfahren entwickelt. Unablässig wird das Wasser in einem geschlossenen Kreislauf mit einem Durchsatz von 30t/h gereinigt. Dabei durchläuft es mehrere Reinigungsstufen, in denen alle möglichen Quellen von Radioaktivität systematisch entfernt werden. Gleichzeitig werden mittels ultravioletter Strahlung alle Bakterien und Algen abgetötet um die Transparenz zu steigern. Um Algen- und Bakterienwachstum auch im Zylinder zu verlangsamen wird das Wasser auf knapp unter 15° C gekühlt. Die geringe Temperatur hat auch den Vorteil, dass der Dunkelstrom in den PMTs abnimmt.

6 Atmosphärische Neutrinos

Trifft kosmische Strahlung (hauptsächlich Protonen, auch He-Kerne) in 10-20 km auf die Atmosphäre, so entstehen beim Aufprall auf die Atomkerne (vornehmlich Sauerstoff- und Stickstoffkerne)

ne) elektromagnetische und hadronische Schauer. Der elektromagnetische Schauer entsteht, wenn beim Zusammenprall ungeladene Pionen produziert werden, welche wiederum durch den Zerfall in zwei Gammaquanten den elektromagnetischen Schauer in Gang setzen. Für die Entstehung von atmosphärischen Neutrinos sind dagegen die hadronischen Schauer von Bedeutung. In ihnen werden nämlich geladene Pionen (auch Kaonen) erzeugt, die beim Zerfall in Myonen die ersten Myonneutrinos freisetzen. Da das Myon wiederum in ein Elektron, ein Myon- und Elektronneutrino zerfällt, erwartet man grob ein Verhältnis von Myon- zu Elektronneutrinos von 2:1. Da es sich bei der Schauerbildung jedoch um einen statistischen Prozess handelt, werden zur Bestimmung dieses Verhältnisses Monte-Carlo Simulationen eingesetzt. Wie es sich herausstellt, ist das Verhältnis eine Funktion der Energie. Atmosphärische Neutrinos besitzen Energien im Bereich von GeV. Durch Wahl des Zenithwinkels kann die Flugstrecke der Neutrinos nach ihrer Entstehung festgelegt werden. Der Zenithwinkel ist der Winkel, den die Neutrinotrajektorie zur Vertikalen einschließt. Wählt man ihn zu 180° , so stammen die Neutrinos aus der Atmosphäre auf der anderen Seite der Erdkugel und legen bis zum Detektor mehr als 12500km zurück.

7 Messprinzip

Neutrinos reagieren im fiducial volume über geladene Ströme (im geringen Maß auch über ungeladene Ströme) mit Wasser. Der dominierende Prozess ist die Neutrino Nukleon Wechselwirkung. Hierbei wird das Elektronneutrino (Myonneutrino) in ein Elektron (Myon) umgewandelt. Damit einhergehend ist die Umwandlung eines Up-Quarks in ein Down-Quark bzw. umgekehrt. Das hängt davon ab, ob es sich beim Neutrino um ein Teilchen oder Antiteilchen gehandelt hat. Der Vorgang in den Kernen ist somit entweder ein induzierter oder inverser Betazerfall. Die nun entstandenen hochenergetischen geladenen Teilchen (Elektron bzw. Myon) senden nun, falls sie sich schneller als die Phasengeschwindigkeit von Licht in Wasser bewegen, das charakteristische Cherenkov-Licht in einem Kegel mit wohldefiniertem Öffnungswinkel aus. Dieses Licht wird durch die PMTs registriert. Mit Hilfe des Ansprechmusters der PMTs, der Stärke und dem Zeitpunkt des Signals lässt sich sowohl Energie und Flugrichtung als auch der Neutrino flavour bestimmen. Letzteres lässt sich dadurch bewerkstelligen, dass Elektronen im Gegensatz zu Myonen sehr diffuse Cherenkov-Lichtkegel aussenden, was an der geringen Masse und der damit einhergehenden stark mäandernden Flugbahn des Elektrons während Ionisations- und Bremsstrahlungsprozessen liegt.

8 Nachweis der Oszillation

Der Nachweis von Neutrino-Oszillationen wurde mit den oben angesprochenen atmosphärischen Neutrinos erbracht. Man maß die Anzahl von Elektron- zu Myonneutrinos als Funktion der Neutrinoenergie und des Zenithwinkels. Anschließend wurde das Verhältnis R zwischen der gemessenen Anzahl von Elektron- und Myonneutrinos zu der erwarteten aus MC-Simulationen gebildet. Gäbe es keine Oszillation, müsste dieses Verhältnis 1 sein. Ermittelt wurde jedoch ein bis zu weit unter 1 liegendes Ergebnis (bei einem festen Zenithwinkel). Die Anzahl der gemessenen Elektronneutrinos entsprach den theoretischen Erwartungen. Dagegen war der Fluss an Myonneutrinos zu klein. Postulierte man nun eine Oszillation der Myonneutrinos in Tauneutrinos, so ließen sie die gemessenen Werte gut beschreiben. Andere Szenarien (Neutrinozerfall, Dekohärenz der Massenzustände) konnten ebenso ausgeschlossen werden.

9 Nachfolgeexperiment

Ermutigt durch die ausgezeichneten Ergebnisse von Super-Kamiokande plant die Kollaboration für die Zukunft eine Ausweitung des Experiments namens Hyperkamiokande. Hierbei soll das aktive Volumen auf 1000kton (derzeit 22.5kton) erweitert werden, indem, vereinfacht gesprochen, mehrere Super-Kamiokande Detektoren nebeneinander gebaut werden sollen. Damit ließen sich vor allem die vorhergesagten theoretischen Werte für den Protonzerfall im SUSY-Modell überprüfen.