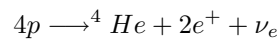


Sudbury Neutrino Observatory

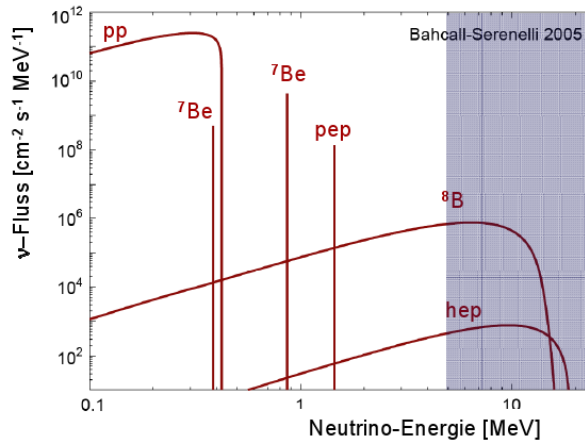
Das **Sudbury Neutrino Observatory** war ein Experiment, welches in der Sudbury-Mine in Kanada 2070m unter der Erde installiert war. Mit seiner Hilfe wurde das Problem der solaren Neutrinos gelöst.

1 Solare Neutrinos

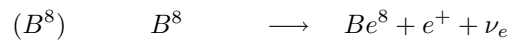
Unsere Sonne emittiert neben Photonen auch Elektron-Neutrinos, wie die Zusammenfassung



der solaren Fusionsreaktion (welche über verschiedene Zwischenschritten abläuft) zeigt. Das Energiespektrum der solaren ν_e ergibt sich dabei wie folgt, wobei die Kürzel auf die verschiedenen Zwischenreaktionen hinweisen:



Die Graufärbung stellt hierbei den bei SNO betrachteten Energiebereich dar, wobei die Neutrinos aus den folgenden Reaktionen stammen:



Die Ergebnisse verschiedener Experimente zur Bestimmung des ν_e -Flusses auf der Erde stimmen dahingehend überein, dass der Fluss auf der Erde kleiner als der vom **Standard-Sonnenmodell** vorhergesagte war.

Zwei mögliche Erklärungen für diesen - als Solares Neutrino Problem bezeichneten Sachverhalt - waren:

- Die Annahmen des SSM für Temperatur, Druck,.. im Innern der Sonne sind großen Unsicherheiten unterworfen bzw. falsch, wodurch sich ein anderer Neutrinofluss ergibt.
- Die Neutrinos ändern auf dem Weg zur Erde ihren Flavour (Flavouroszillationen).

2 Flavouroszillationen

Physikalisch bedeutet dies, dass die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung nicht mehr den Masseeigenzuständen entsprechen, was sich für zwei Flavours wie folgt darstellen lässt:

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Der Winkel θ wird als Mischungswinkel bezeichnet. Damit lässt sich nun die Wahrscheinlichkeit bestimmen, dass ein Neutrino seinen Flavour ändert:

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{1,27 \cdot \Delta m^2 [eV^2] L [m]}{E [MeV]} \right)$$

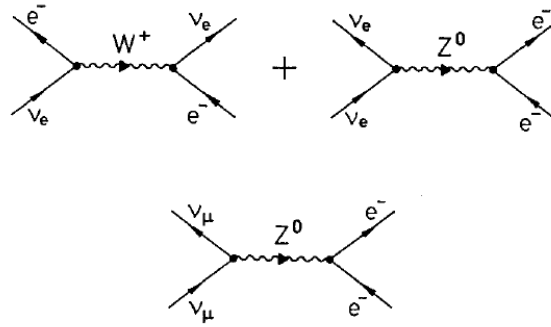
L ist hierbei die Entfernung zwischen Quelle und Detektor während $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ die Differenz der Massenquadrate der beiden Masseeigenzustände bezeichnet und mit E die Neutrinoenergie gemeint ist.

Für den letzten Schritt wurde Δm^2 durch $\Delta m^2 c^4$, L durch $\frac{L}{c}$ und E durch $\frac{E}{\hbar}$ ersetzt.

Um nun aber Oszillationen nachweisen zu können, sollte die Bedingung $\frac{L}{E} \approx \frac{1}{\Delta m^2}$ erfüllt sein. Diese Bedingung ist zwar für die beobachteten Neutrinos erfüllt, diese Tatsache mutet aber höchst zufällig an, so dass nach anderen Erklärungen gesucht wurde.

3 MSW-Effekt

Dieser, nach Mikheyev, Smirnow und Wolfenstein benannte, Effekt, beschreibt die Wechselwirkungen der Neutrinos mit den Elektronen im Innern der Sonne (sog. kohärente Vorwärtsstreuung), wobei sich die Feynmann-Diagrammen wie folgt ergeben:



Es ist zu erkennen, dass für die ν_e zusätzlich zum Z^0 -Austausch auch noch die Wechselwirkung über W^+ -Austausch möglich ist, was für $\nu_{\mu,\tau}$ wegen fehlender Partner (μ, τ) nicht der Fall ist. Diese zusätzliche Wechselwirkung für die ν_e kann nun auch als äußeres Potential aufgefasst werden. Dies sorgt nun aber dafür, dass der Hamiltonoperator in der $\nu_{1,2}$ -Darstellung (wir beschränken uns auf den 2-Flavour-Fall) nicht mehr diagonalisiert, wir also neue Masseneigenwerte $m_{1,2m}$ erhalten. Neben neuen Masseneigenzuständen $\nu_{1,2m}$ erhalten wir nun auch einen neuen Mischungswinkel θ_m für den gilt:

$$\sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{\left(\frac{A}{\Delta m^2} - \cos 2\theta \right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$A \sim N_e \cdot E_\nu$$

Wir erkennen, dass die Mischungsamplitude $\sin^2 2\theta_m$ für bestimmte Werte von θ_m den Wert 1 annehmen kann, ein Zustand, der auch als Resonanz bezeichnet wird. Und genau diese Resonanz durchlaufen die Neutrinos auf dem Weg vom Innern der Sonne nach außen:

- Am Erzeugungsort der Sonne herrscht eine hohe Elektronendichte N_e vor, d.h. es gilt $\theta_m \approx 90^\circ$. Für die erzeugten ν_e gilt deshalb $\nu_e \approx \nu_{2,m}$
- Auf dem Weg nach außen nimmt die Elektronendichte langsam ab und zwar so langsam, dass die Adiabazitätsbedingung erfüllt ist, d.h. der Masseneigenzustand ändern sich nicht. Durchläuft nun das Neutrino eine Schicht, in der die Resonanzbedingung $A = \delta m^2 \cos \theta_m$ erfüllt ist, so erreicht die Oszillationsamplitude den Wert 1 und es liegt maximale Mischung vor.
- Am Rand der Sonne beträgt nun die Elektronendichte Null, d.h. es gilt $\theta_m = \theta$ und unser Neutrino verlässt im Zustand

$$\nu_{2,m} = \nu_2 = \nu_e \sin \theta + \nu_\mu \cos \theta$$

die Sonne und macht sich auf den Weg zur Erde.

Der MSW-Effekt sorgt nun also dafür, dass sich die ν_e mit der Wahrscheinlichkeit $P \approx \cos^2 \theta$ in ein $\nu_{\mu,\tau}$ umgewandelt haben.

4 Der Detektor

Kernstück von SNO war der große Wasser-Cherenkov-Detektor, welcher in einer Kaverne 2070m unter dem Boden (was knapp 6000m Wasseräquivalent entspricht) installiert war, wodurch die atmosphärische Hintergrundstrahlung praktisch vernachlässigt werden kann.

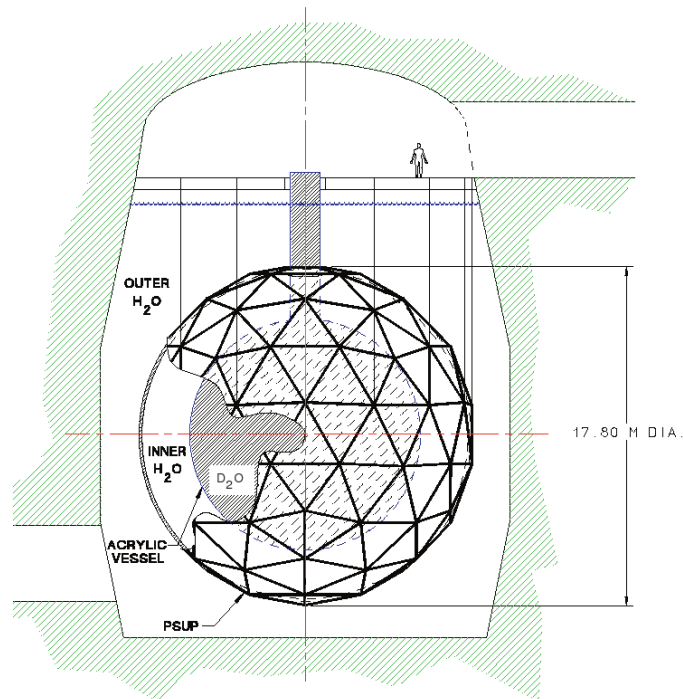


Abbildung 1: schematischer Aufbau des Detektors

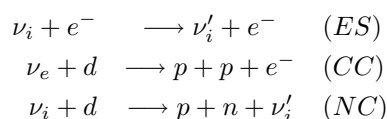
Im Zentrum des Detektors befindet sich eine - mit 1000t schweren Wassers (D_2O) gefüllte - Acrylkugel, umgeben von insgesamt 7300t leichten Wassers H_2O . Knapp 9600 rings um die Acrylkugel angeordnete **PhotoMultiplierTubes** fangen das emittierte Cherenkov-Licht auf. Diese sind auf der sog. **PMT SUPport Structure** angebracht.

Während das leichte Wasser vor allem der Abschirmung von Untergrundstrahlung dient (welche beispielsweise vom Umgebungsgestein verursacht wird), wird das schwere Wasser zum eigentlichen Neutrino nachweis genutzt.

Schauen wir uns nun die Nachweisreaktionen im Einzelnen an:

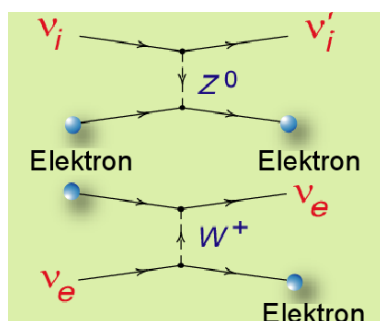
5 Nachweisreaktionen

Für die Bestimmung des Neutrino flusses wurden bei SNO die folgenden 3 Reaktionen genutzt:



Mit Hilfe dieser drei Reaktionen ist das Ermitteln folgender Größen möglich:

- *elastische Elektron-Neutrino-Streuung (ES)*



Da bei der Elektron-Neutrino-Streuung (ES) die Richtung des gestreuten Elektrons - welches das Cherenkov-Licht erzeugt - nahezu parallel zur Flugrichtung des einfallenden Neutrinos ist, lässt sich die Richtung der einfallenden ν_e ermitteln.

Diese Reaktion ist flavourblind, da für ν_e aber - im Gegensatz zu $\nu_{\tau,\mu}$ - mehr Wechselwirkungskanäle offenstehen (auch über geladene Ströme, also W^+ -Austausch), ist der Wirkungsquerschnitt für $\nu_{\tau,\mu}$ um den Faktor $\epsilon = 15,4\%$ reduziert.

Der gemessene Fluss setzt sich also wie folgt zusammen:

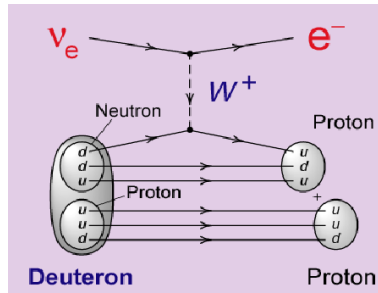
$$\phi_{ES} = \phi(\nu_e) + \epsilon\phi(\nu_{\tau,\mu})$$

- *Geladener Strom (CC)*

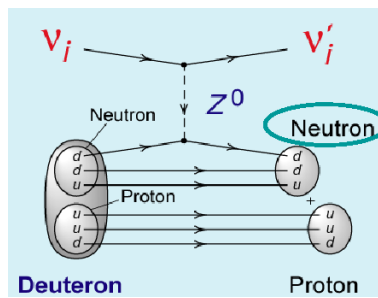
Die CC-Reaktion ist nur für ν_e im schweren Wasser möglich und besitzt eine Schwellenenergie von $E_S = 1,44MeV$. Aus dieser Reaktion erhalten wir den gesamten Fluss der solaren ν_e :

$$\phi_{CC} = \phi(\nu_e)$$

Die Richtung des emittierten Elektrons (welches wieder für das Cherenkov-Licht sorgt) ist nur schwach mit der Richtung des ν_e korreliert.



- *Neutrale Ströme (CC)*



Aus der - ebenfalls nur im D_2O möglichen - NC-Reaktion erhalten wir den Gesamtfluss der Neutrinos (da "flavourblinde" Reaktion)

$$\phi_{NC} = \phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\tau,\mu})$$

woraus sich mit Hilfe von ϕ_{ES} der Fluss der $\nu_{\tau,\mu}$ ergibt.

Eine Richtungsbestimmung ist hierbei nicht mehr möglich, da das emittierte Neutron von einem anderen Kern eingefangen wird, welcher daraufhin γ -Strahlung aussendet, die isotrop abgestrahlt wird und an Elektronen streut, welche wiederum dann dem Cherenkov-Effekt unterworfen sind.

6 Datenaufbereitung

Das Problem der oben erwähnten Reaktionen besteht darin, dass sie keine eindeutige Signatur besitzen, also nicht unmittelbar unterscheidbar sind. Abhilfe schafft hier die statistische Analyse der Messdaten, welche über einen längeren Zeitraum gewonnen werden. Die PMT registrieren die Intensität, den Ort und den zeitlichen Verlauf eines Signals (Cherenkov-Lichtkegel), woraus sich die Verteilung aller Ereignisse in Abhängigkeit von Energie, Radius und Winkel θ_{sun} zur Sonne ergibt.

Mithilfe von Simulationen ergaben sich nun Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (**pdf**) für die einzelnen Prozesse, welche nun möglichst gut an die ermittelten Messwerte gefittet werden müssen, um sie nach den einzelnen Reaktionen aufdröseln zu können.

Beispielsweise ergeben sich in Abhängigkeit vom Winkel θ_{sun} die pdfs gemäß Abb 2.

Diese lassen sich nun an die Messwerte fitten, wie in Abb. 3 zu sehen, wobei die Punkte mit den Fehlerbalken die Messwerte darstellen.

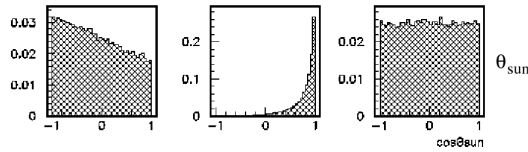


Abbildung 2: pdfs für die CC, ES und die NC-Reaktion in Abhängigkeit von θ_{sun}

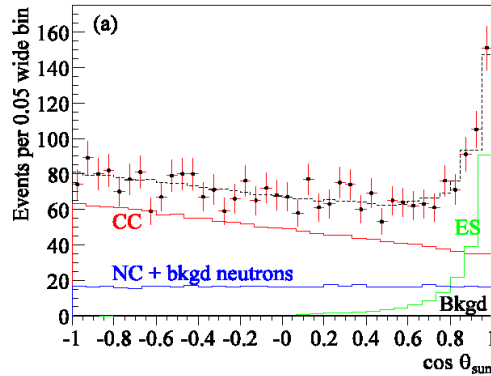


Abbildung 3: Fit der pdf's an die Messwerte

7 Die 3 Messphasen

Insgesamt war die gesamte Messzeit von SNO in drei Phasen eingeteilt, in denen der Detektor verschiedenen Modifikationen unterworfen war. Die Kollaboration war hierbei vom Gedanken beseelt, die Einfangrate der - bei der NC-Reaktion emittierten - Neutronen zu verbessern.

- In der ersten Phase (November 1999 - Mai 2001) wurden die Neutronen nur von den Deuteriumkernen eingefangen, der Einfangswirkungsquerschnitt betrug hierbei kümmerliche 0,005 b.
- Die zweite Phase (Juli 01 – Sept. 01) war dadurch bestimmt, dass in dieser Zeit insgesamt 2t $NaCl$ dem schweren Wasser beigemischt wurden. Die nun gelösten ^{35}Cl -Kerne verfügten über einen deutlich verbesserten Wirkungsquerschnitt für den Neutroneneinfang.
- Der beste Neutroneneinfangswirkungsquerschnitt (5000b) wurde schließlich in der dritten Phase erreicht, welche sich vom Oktober 2004 bis zum Dezember 2006 hinzog. Hierbei wurden insgesamt 40 Proportionalzählrohre (Reaktion: $n + {}^3He \rightarrow p + {}^3H$) im D_2O installiert, um die Neutronen über die Ionisation nachzuweisen.

8 Ergebnisse

Mit Hilfe des SNO-Experimentes wurde im Jahr 2001 schließlich das - langezeit ungelöste - Problem der solaren Neutrinos geklärt.

8.1 Neutrinofluss

Die letzten - im Juni 2008 veröffentlichten - Ergebnisse waren (in Einheiten von $10^6 cm^{-2} s^{-1}$):

$$\phi_{CC}^{SNO} = 1,76 \pm 0,10$$

$$\phi_{ES}^{SNO} = 2,39 \pm 0,26$$

$$\phi_{NC}^{SNO} = 5,09 \pm 0,62$$

Damit lässt sich nun durch einfache Variablentransformation der Fluss der ν_e und der $\nu_{\mu,\tau}$ bestimmen:

$$\phi(\nu_e) = 1,76 \pm 0,10$$

$$\phi(\nu_{\mu,\tau}) = 3,41 \pm 0,65$$

Damit ergab sich ein Gesamtfluss von $5,17 \pm 0,66$, welcher mit dem - durch das SSM vorhergesagten Wert - von $5,05 \pm 1,03$ übereinstimmte.

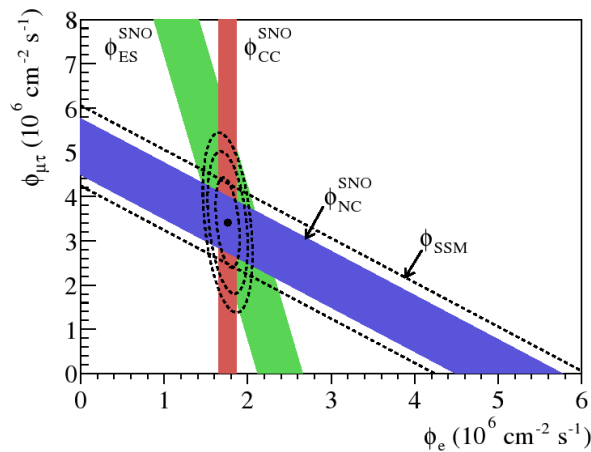


Abbildung 4: Graphische Darstellung der Messergebnisse

Damit war gezeigt, dass der Fluss der solaren Neutrinos nicht nur aus ν_e besteht, der Gesamtfluss aber im Einklang mit dem SSM steht, wodurch die These der Neutrinooszillation bestätigt wurde.

8.1.1 Mischungparameter

Aus den Daten der 3. Phase ließen sich - unter Zuhilfenahme anderer experimenteller Daten - auch die Mischungparameter δm^2 und θ für die solaren Neutrinos ermitteln.

$$\delta m^2 = 7,94 \pm 0,49 eV^2$$

$$\theta = 33,8 \pm 1,91^\circ$$

9 Quellen

- SNO-Homepage: <http://www.sno.phy.queensu.ca/>
- Dr. A. Denig: VL-Skript: „Teilchenphysik für Fortgeschrittene“
- Prof. G. Drexlin: VL-Skript „Astroteilchenphysik II“
- N. Schmitz: Buch „Neutrino-Physik“
- N. Schmitz: VL „Neutrino-Physik“
- S. Boelzle: Vortrag „Neutrino-Oszillationen und der MSW-Effekt“