

Entdeckung der Neutrinomasse

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Richard Teske

Heidelberg, 22.01.2016

Gliederung

- I. Neutrino im Standardmodell
- II. Modell der Neutrinooszillation
- III. Sudbury Neutrino Observatory (SNO)
- IV. Zusammenfassung

I. Neutrino im Standardmodell

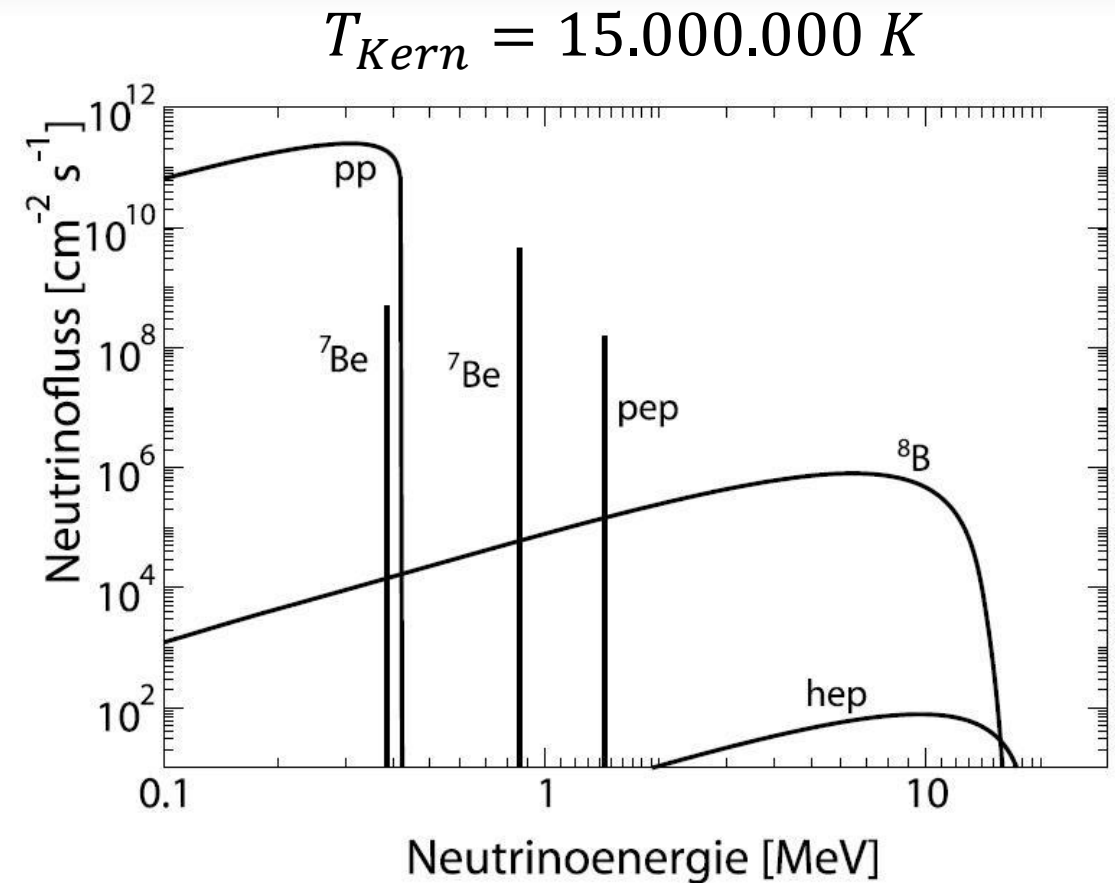
- Geschichte des Neutrinos
- Solare Neutrinos
- Homestake-Experiment

Geschichte des Neutrinos

- 1930: Wolfgang Pauli postuliert ein Spin $\frac{1}{2}$ -Teilchen zur Beschreibung des kontinuierlichen Spektrums des β -Zerfall
- 1956: Das Elektron-Antineutrino wird beim Savannah River Experiment von Cowan und Reines detektiert
- 1957: Die Neutrino-Oszillation wird von Pontecorvo theoretisch vorausgesagt
- 1957: Die Helizität des Elektron-Neutrinos wird beim Goldhaber-Experiment bestimmt
- 1968: Die Messungen des Homestake-Experiments weisen auf ein solares Elektron-Neutrino-Defizit hin

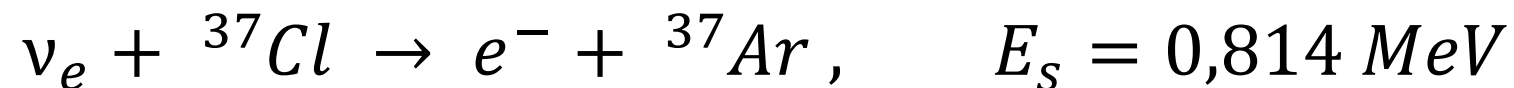
Solare Neutrinos

- $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ (pp)
- $p + e^- + p \rightarrow d + \nu_e$ (pep)
- $^3\text{He} + p \rightarrow ^4\text{He} + \nu_e + e^+$ (hep)
- $^7\text{Be} + e^- \rightarrow ^7\text{Li} + \nu_e$ (^7Be)
- $^8\text{B} \rightarrow ^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ (^8B)



Homestake-Experiment

- Das Homestake-Experiment wurde von 1970 bis 1994 in der Homestake-Goldmine von South Dakota durchgeführt
- Messung der ν_e erfolgt über die Reaktion:



- Hierbei wurde das Neutrino über den Zerfall des ${}^{37}\text{Ar}$ detektiert

Homestake-Experiment

- Ergebnis:

$$\frac{R_{exp}}{R_{SSM}} \approx \frac{1}{3}$$

- → Ergebnis zeigt ein solares Neutrino-Defizit auf
- 2002 erhielten Davis, Koshiba und Giacconi den Nobelpreis für ihre Beiträge zur Astrophysik

II. Modell der Neutrino-Oszillation

- Bedingungen der Neutrino-Oszillation
- Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit zwischen zwei Generationen als Beispiel
- Allgemeiner Fall (Drei-Generationen-Fall)

Bedingungen der Neutrino-Oszillation

- Die Mischungsmatrix U stellt den Zusammenhang zwischen schwachen Wechselwirkungseigenzuständen (ν_α) und Masseeigenzuständen (ν_i) her
- Die Massen m_i dürfen nicht gleich sein und eine Masse m_j muss ungleich null sein.

$$m_i \neq m_j ; m_j \neq 0$$

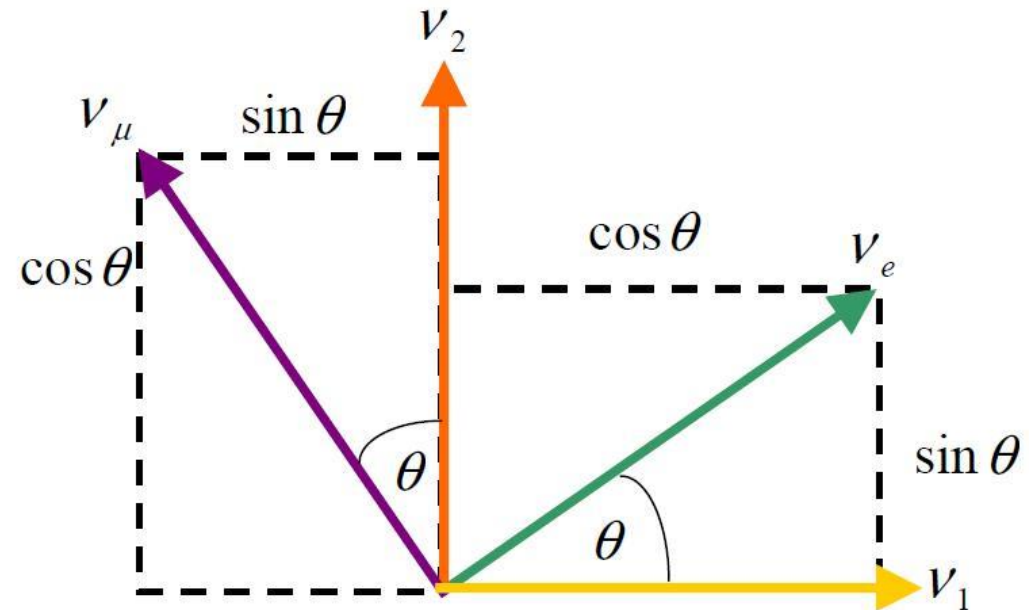
Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit zwischen zwei Generationen als Beispiel

- Der Übergang zwischen zwei Generationen lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$\begin{pmatrix} | \nu_e \rangle \\ | \nu_\mu \rangle \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}}_{=U} \begin{pmatrix} | \nu_1 \rangle \\ | \nu_2 \rangle \end{pmatrix}$$

Schwachen WW-
Eigenzustände

Masseneigenzustände



Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}$

- Zunächst bestimmen wir die Elektron-Neutrino-Wellenfunktion

$$|\nu_e(t)\rangle = \cos \theta e^{-iE_{\nu_1}t/\hbar} |\nu_1\rangle + \sin \theta e^{-iE_{\nu_2}t/\hbar} |\nu_2\rangle$$

- Folgende Näherung für die Energie der Masseneigenzustände

$$E_{\nu_i} = \sqrt{p^2 c^2 + m_{\nu_i}^2 c^4} \approx pc \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_{\nu_i}^2 c^4}{p^2 c^2} \right)$$

Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit $P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}$

- Somit folgt für die Übergangswahrscheinlichkeit

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = |\langle \nu_e(t) | \nu_e \rangle|^2 = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta m_{21}^2 c^4}{\hbar c} \frac{L}{pc} \right)$$

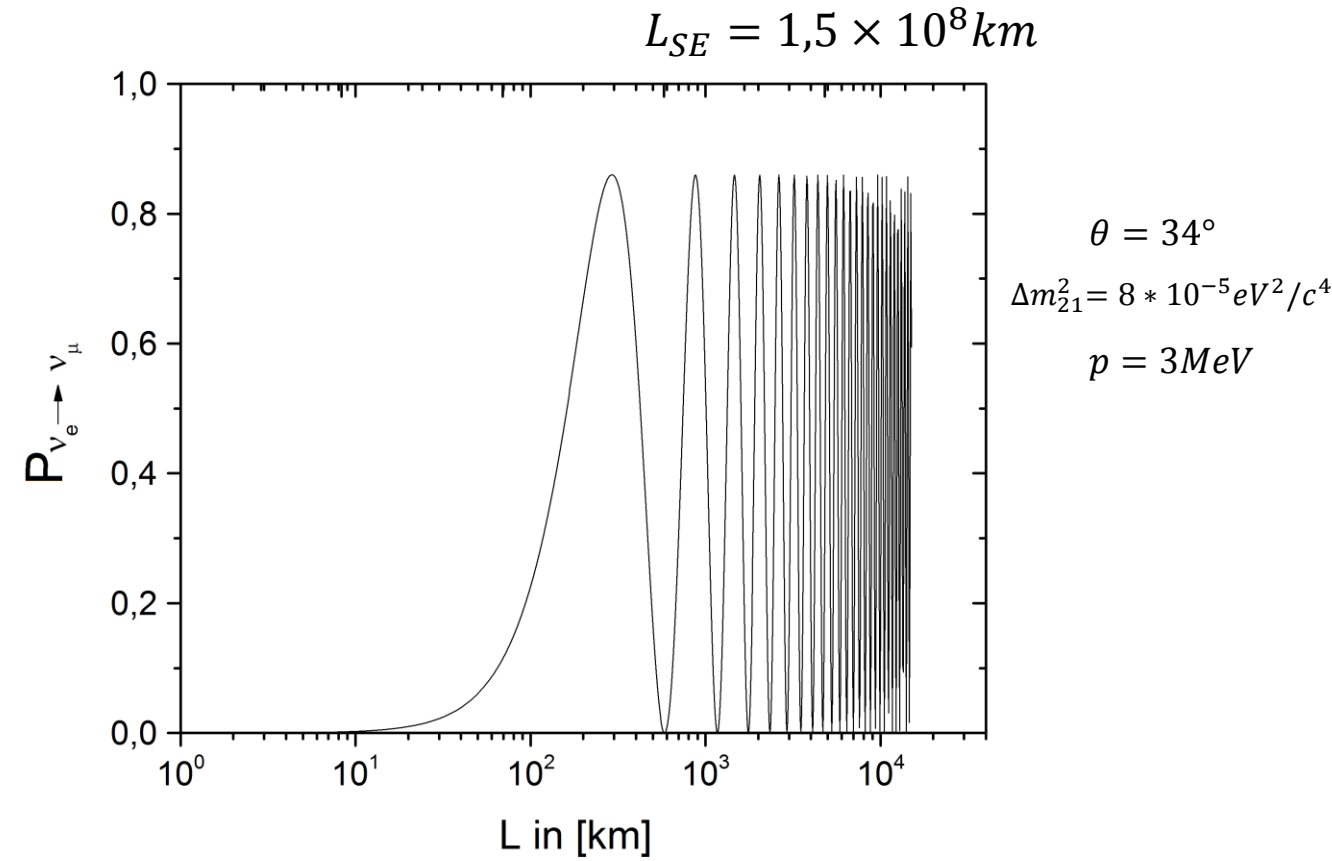
$$L = ct, \Delta m_{21}^2 = m_{\nu_2}^2 - m_{\nu_1}^2$$

Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}$

- Übergangswahrscheinlichkeit

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1}{4} \frac{\Delta m_{21}^2 c^4}{\hbar c} \frac{L}{pc} \right)$$



Allgemeiner Fall leptonische Mischungsmatrix (PMNS-Matrix)

- Die leptonische Mischungsmatrix U

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}}^{=U} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

- Separation der Mischungsmatrix

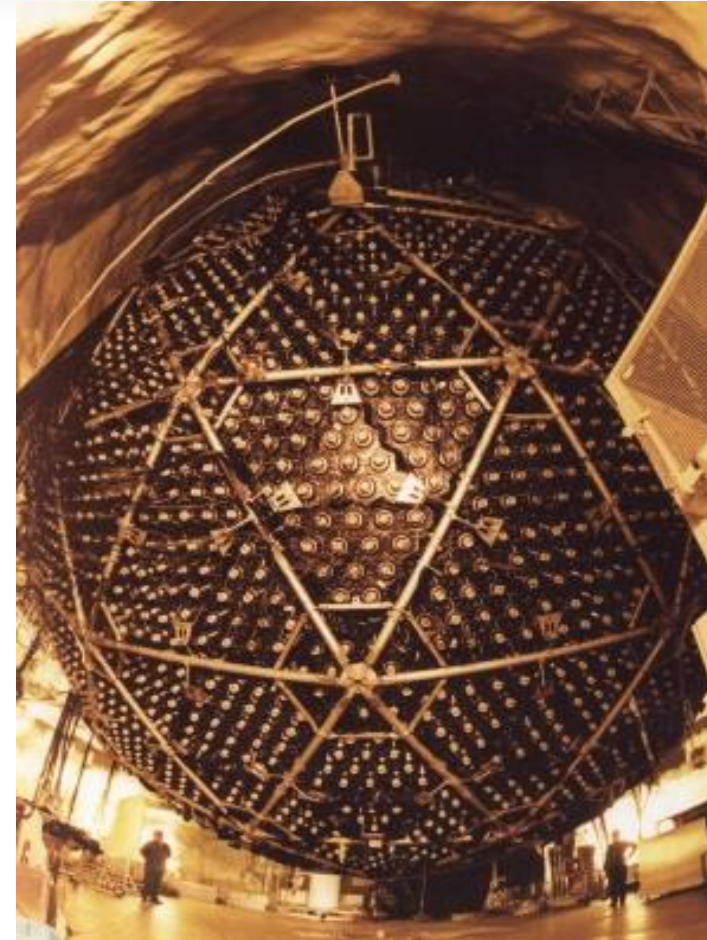
$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ 0 & -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 e^{i\delta_3} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_3 e^{i\delta_3} & 0 & \cos \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

III. Sudbury Neutrino Observatory

- Aufbau des SNO
- Detektierung der Neutrinos
- Datenanalyse
- Messergebnis

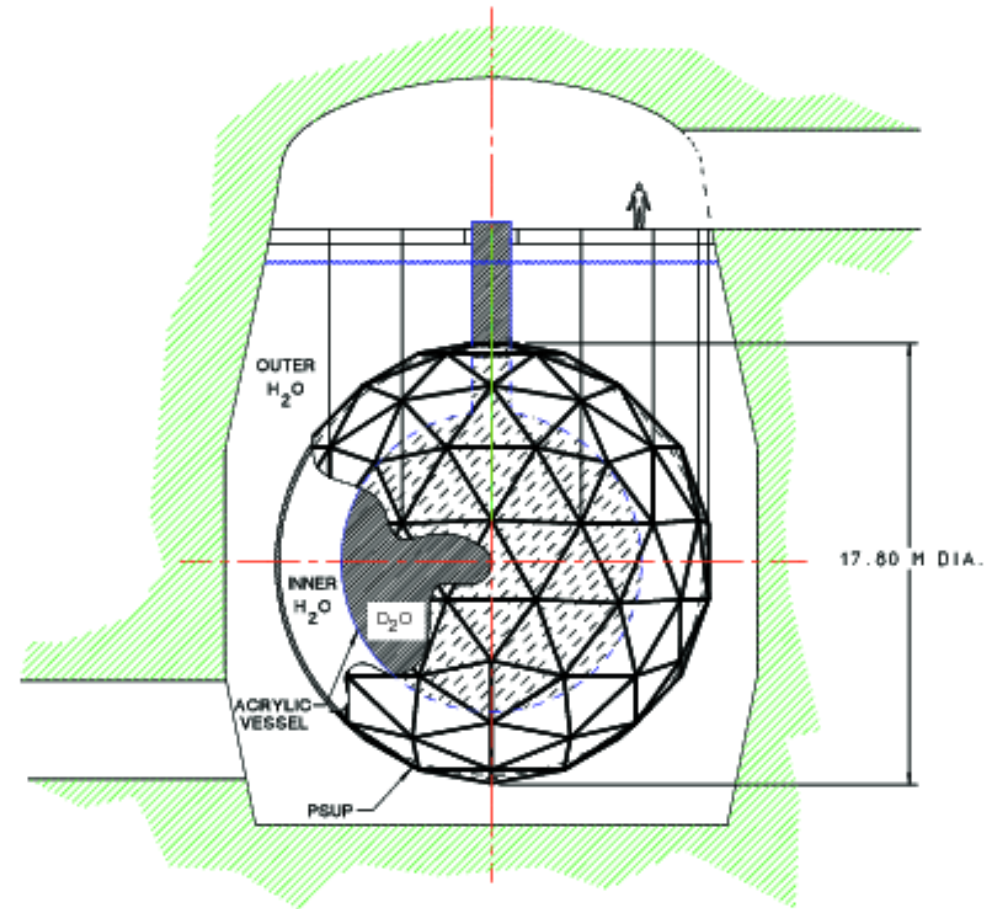
III. Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

- Das Sudbury Neutrino Observatory (SNO) liegt in Sudbury, Ontario, Kanada
- Der Detektor befindet sich ca. 2100m unter der Erdoberfläche in einer alten Nickelmine



Aufbau des SNO

- Der Detektor ist ein Cherenkov-Detektor
- Der Detektor besteht aus:
 - 1000t schwerem Wasser (D_2O) in einer Acryl-Hohlkugel
 - 9456 PMT auf einer Edelstahlkonstruktion um die Hohlkugel
 - Umgeben von H_2O



Detektierung der Neutrinos

- Die Neutrios ν_x werden über folgende Reaktionen bestimmt:

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (CC)$$

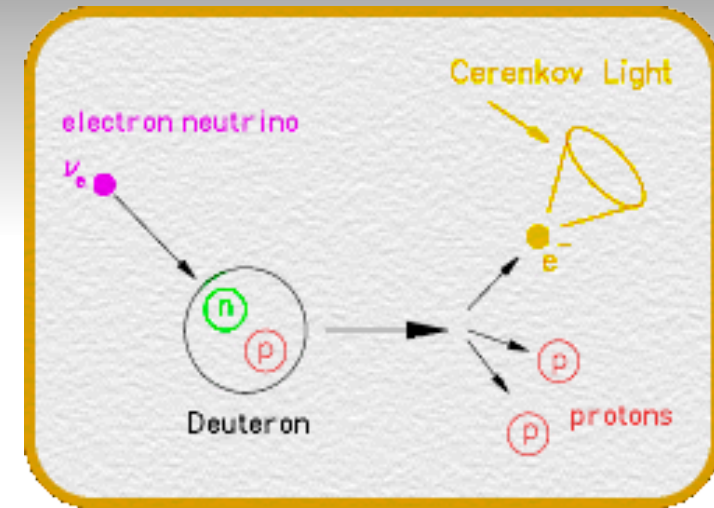
$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad (NC)$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (ES)$$

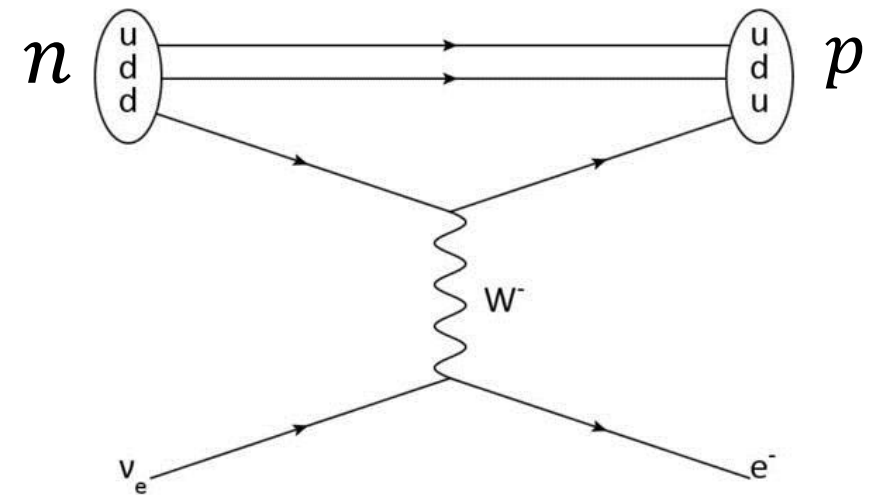
Die CC Reaktion

- Die „charged current“ (CC) Reaktion wird durch die Cherenkov –Strahlung des erzeugten Elektrons bestimmt
- Ist nur auf den Elektron-Neutrino-Fluss ϕ_e sensitiv

$$\phi_{cc} = \phi_e$$



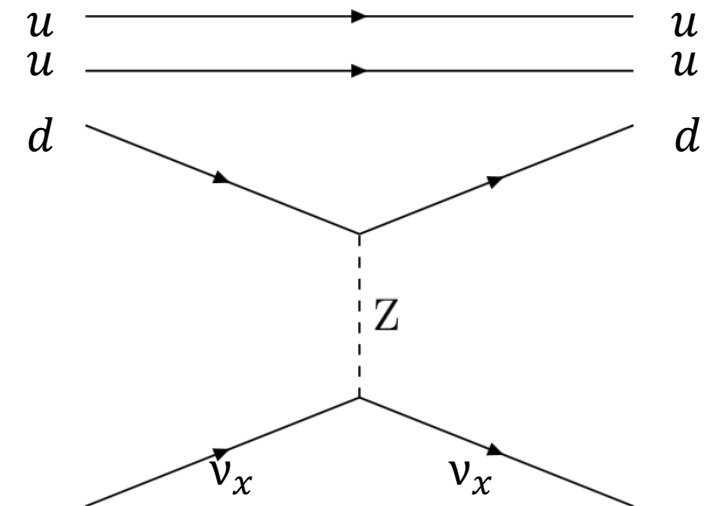
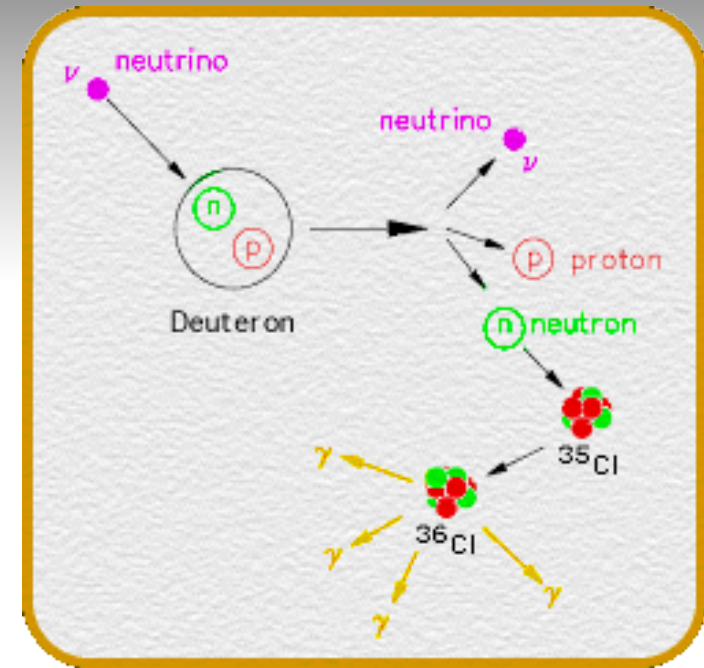
$$E_{min,cherenkov} = 776keV$$



Die NC Reaktion

- Bei „neutral current“ (NC) Reaktion wird ein Neutron erzeugt, welches von Deuterium bzw. ^{35}Cl eingefangen werden kann, worauf dieser Photonen aussendet
- Die NC-Reaktion ist auf alle Neutrinos gleich sensitiv und gibt den Gesamtfluss der Neutrinos an

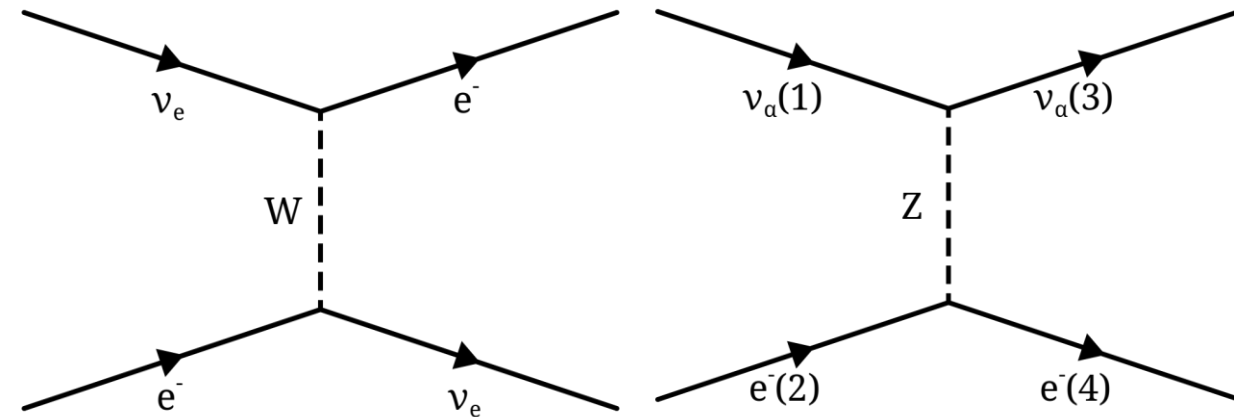
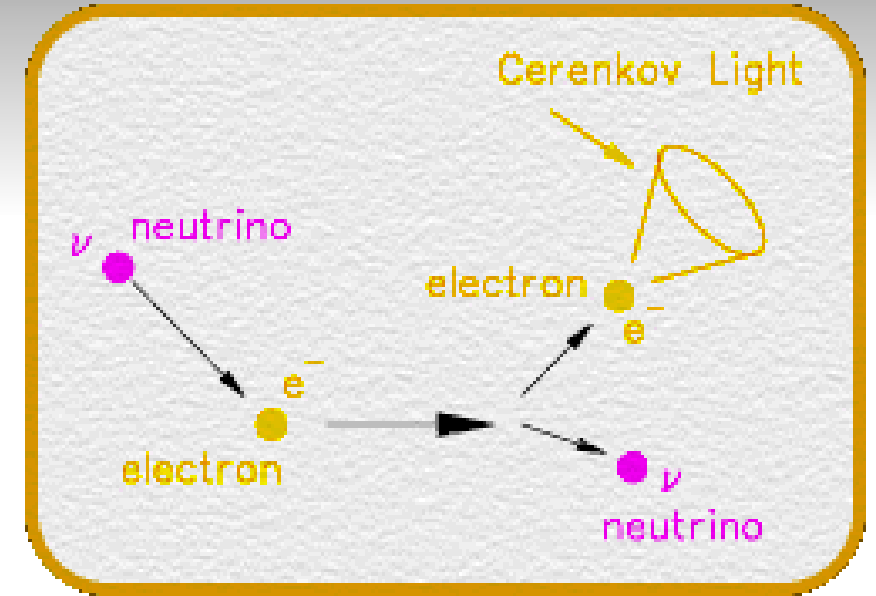
$$\Phi_{NC} = \Phi_e + \Phi_{\mu\tau}$$



Die ES Reaktion

- Die „elastic scattering“ (ES) Reaktion ist ein Streuprozess, bei dem Neutrinos an Elektronen streuen, wobei diese Cherenkov-Strahlung aussenden
- Überlagerung aus NC + CC
- Diese Reaktion ist auf den gesamten Neutrino-Fluss sensitiv, jedoch empfindlicher auf Elektron-Neutrinos

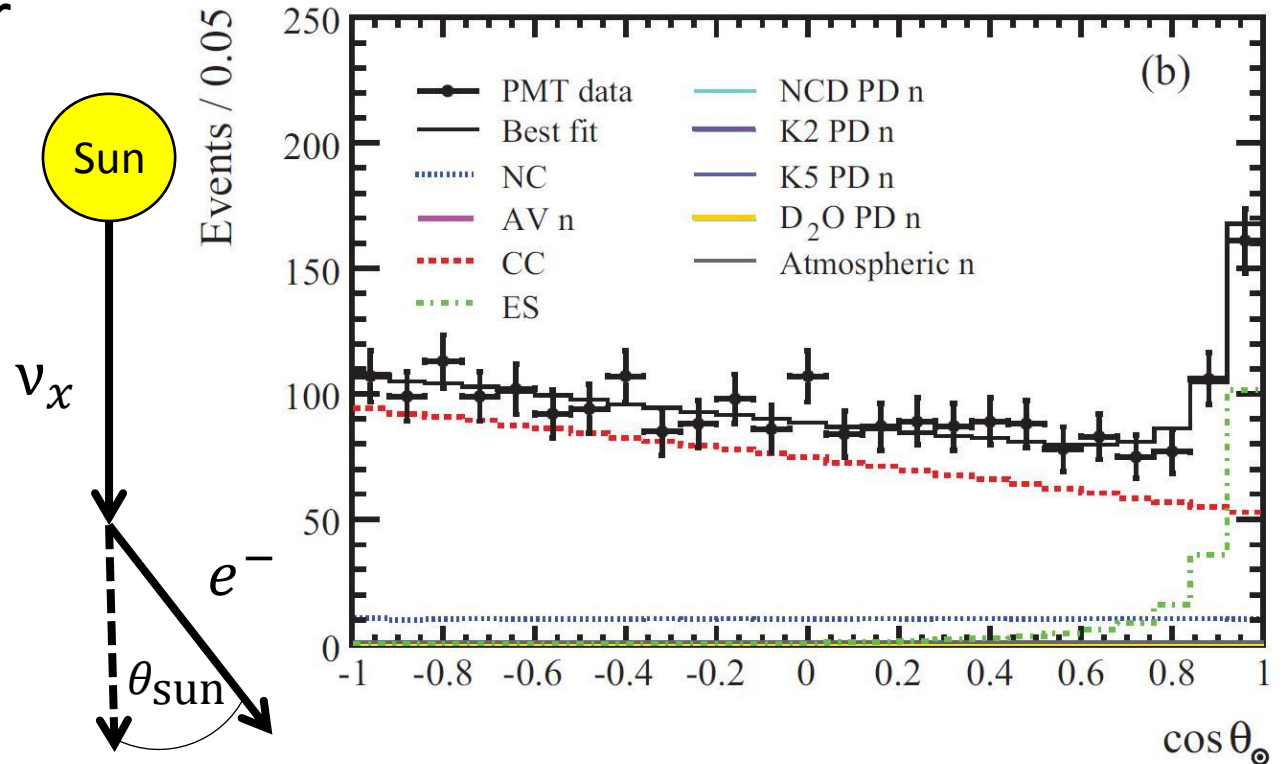
$$\phi_{ES} = \phi_e + 0.16\phi_{\mu\tau}$$



Datenanalyse

- Rekonstruktion der Herkunft der Neutrinos in Abhängigkeit zum Zenitwinkel
- Die Winkelverteilungen der einzelnen Reaktionen (CC,NC,ES) sind bekannt

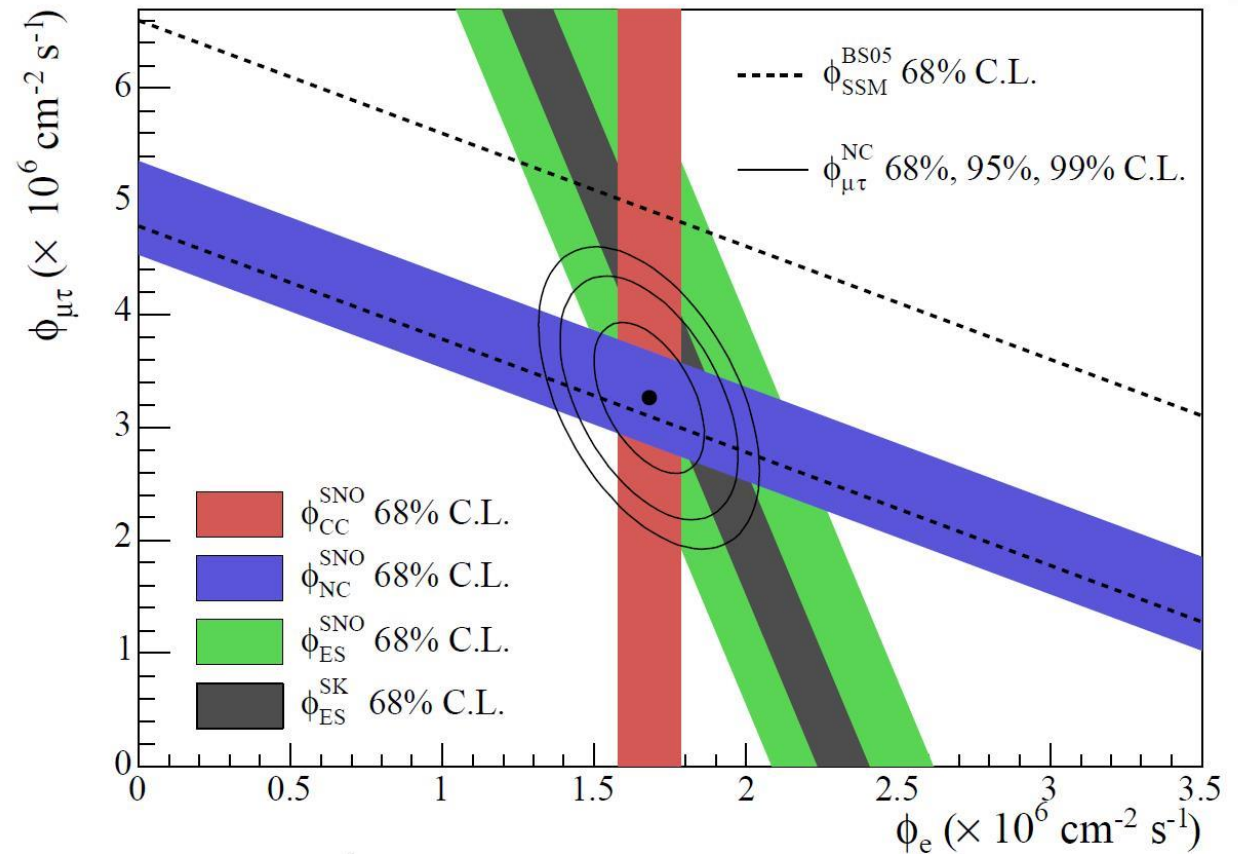
$$\begin{aligned}\phi_{CC} &= \phi_e \\ \phi_{NC} &= \phi_e + \phi_{\mu\tau} \\ \phi_{ES} &= \phi_e + 0.16\phi_{\mu\tau}\end{aligned}$$



B.Aharmim et al. (SNO-collab), Phys.Rev.C87 (2013) 1, 015502

Messengergebnis I

- SK: Super-Kamiokande
- SNO: Sudbury Neutrino Observatory
- SSM: Solar Sun Model



Q.R. Ahmad et al. (SNO-collab), Phys.Rev.Lett. 87 (2001) 071301
<http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2014-rev-neutrino-mixing.pdf>

Messergebnis II

- Für den Elektron-Neutrino-Fluss wurde ein Wert von

$$\phi_{\text{SNO}}^{\text{CC}}(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07 \text{ (stat.) } {}^{+0.12}_{-0.11} \text{ (sys.) } \pm 0.05 \text{ (theor.)} \\ \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

bestimmt

- Für den restlichen Fluss $\phi_{\mu\tau}$ wurde ein Wert von

$$\phi(\nu_{\mu\tau}) = 3.69 \pm 1.13 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

bestimmt

Messergebnis III

- Durch das Addieren der beiden Messergebnisse erhält man den Gesamtfluss

$$\phi(\nu_x) = 5.44 \pm 0.99 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

- Dieser stimmt im 1σ -Bereich mit dem theoretischen Referenzwert von

$$\phi_x = 5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

überein

John N. Bahcall, M.H. Pinsonneault,
Sarvani Basu, *Astrophys.J.* 555 (2001)
990-1012

IV. Zusammenfassung

- Durch die Neutrino-Oszillation konnte das Solare-Sonnen-Modell bestätigt werden
- Neutrino-Oszillation ist messbar und gibt einen Aufschluss über die Größenordnung der Neutrinomassen.

$$\Delta m_{21}^2 \approx 3.5 \times 10^{-3} eV^2 \xrightarrow{m_i=0} m_j \approx 0.05 eV$$

- Bekannte Obergrenzen für die Massen der Neutrinos

$$\begin{aligned} m_{\nu_e} &< 2 eV \\ m_{\nu_\mu} &< 0,19 MeV \\ m_{\nu_\tau} &< 18,2 MeV \end{aligned}$$

Nobelpreis 2015



Arthur McDonald
Direktor des SNO



Takaaki Kajita
Direktor des ICRR

Quellen

- B.Povh - Teilchen und Kerne (9. Auflage)
- C.Berger – Elementarteilchenphysik (3.Auflage)
- Q.R. Ahmad et al. (SNO-collab), Phys.Rev.Lett. 87 (2001) 071301
- <http://pdg.lbl.gov/2015/reviews/rpp2014-rev-neutrino-mixing.pdf>
- B.Aharmim et al. (SNO-collab), Phys.Rev.C87 (2013) 1, 015502
- John N. Bahcall, M.H. Pinsonneault, Sarbani Basu, Astrophys.J. 555 (2001) 990-1012
- <http://www.sno.phy.queensu.ca/sno/sno2.html>
- <http://danielscully.co.uk/thesis/thesis.pdf>