

Nachweis der Neutrinooszillationen mit SNO



Nachweis der Neutrinooszillationen mit SNO

- Geschichte des Neutrinos
- Neutrinos im Standardmodell
- Neutrinos von der Sonne
- Homestake-Experiment
- Solares Neutrino Problem
- Neutrinooszillationen
- SNO-Experiment
- Datennahme und Auswertung
- Ergebnisse

Geschichte des Neutrinos

1. Geschichte des Neutrinos

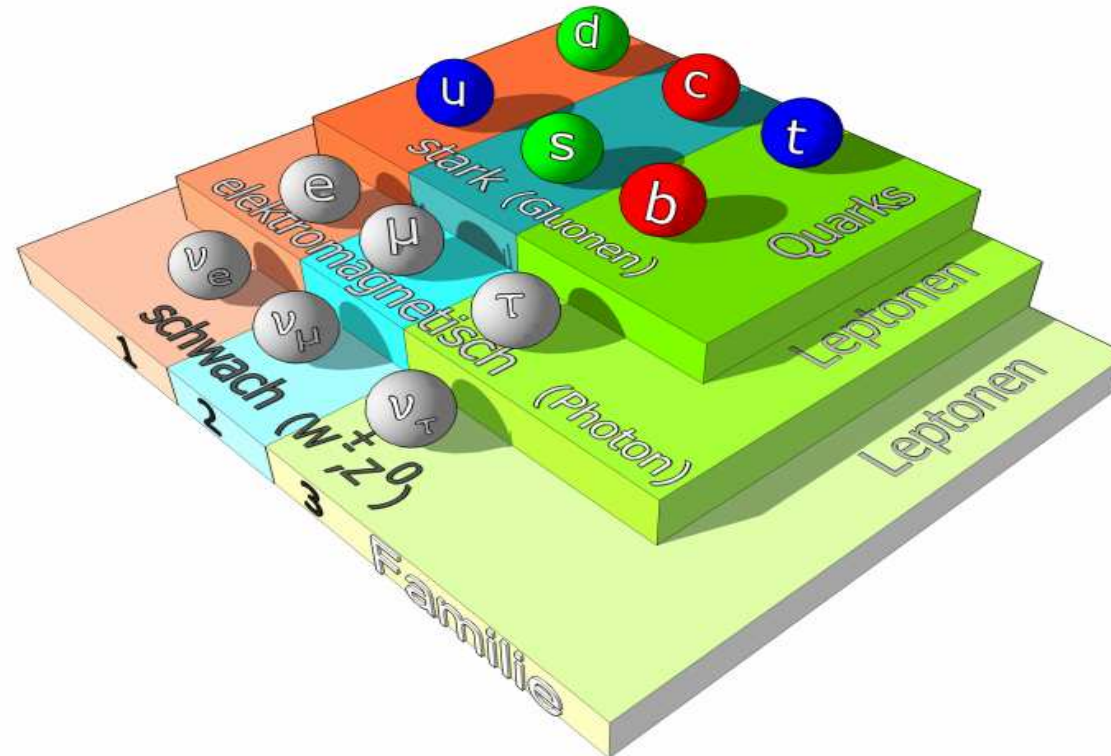
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino-Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme und Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- 1930: Pauli postuliert neues leichtes Spin-1/2-Teilchen damit die Energieerhaltung beim β -Zerfall gegeben ist
- 1933: Fermi formuliert erste Theorie des nuklearen β -Zerfalls und nennt das Teilchen „Neutrino“
- 1956: Cowan und Reines detektieren von einem Reaktor emittierte Elektron-Antineutrinos
- 1957: Pontecorvo sagt Neutrino-Oszillationen theoretisch voraus
- 1957: Goldhaber-Experiment: Neutrinos linkshändig und masselos
- 1962: zweite Neutrinosorte (Myon-Neutrino) wird entdeckt
- 1968: Homestake-Experiment → „solares Neutrino-Defizit“
- 1978: Entdeckung des τ Leptons → Tauon-Neutrino
- 1998: Super-Kamiokande entdeckt Evidenz für Neutrino-Massen
- 2001: erstmals Neutrino-Oszillationen aus SNO-Daten nachgewiesen



Neutrinos im Standardmodell

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme und Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



- Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung, die sie erzeugt und vernichtet
- keine Ladung, keine Masse $\rightarrow$ nur schwachen Wechselwirkung
- Leptonenzahlerhaltung im Standardmodell: Übergänge nur innerhalb der Leptonenfamilien



Warum Interesse an Neutrinos?

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

„Only neutrinos, with their extremely small interaction cross sections, can enable us to see into the interior of a star, and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in stars.“

John N. Bahcall (1964)

Fusion von Wasserstoff zu Helium

pp-Zyklus

CNO-Zyklus

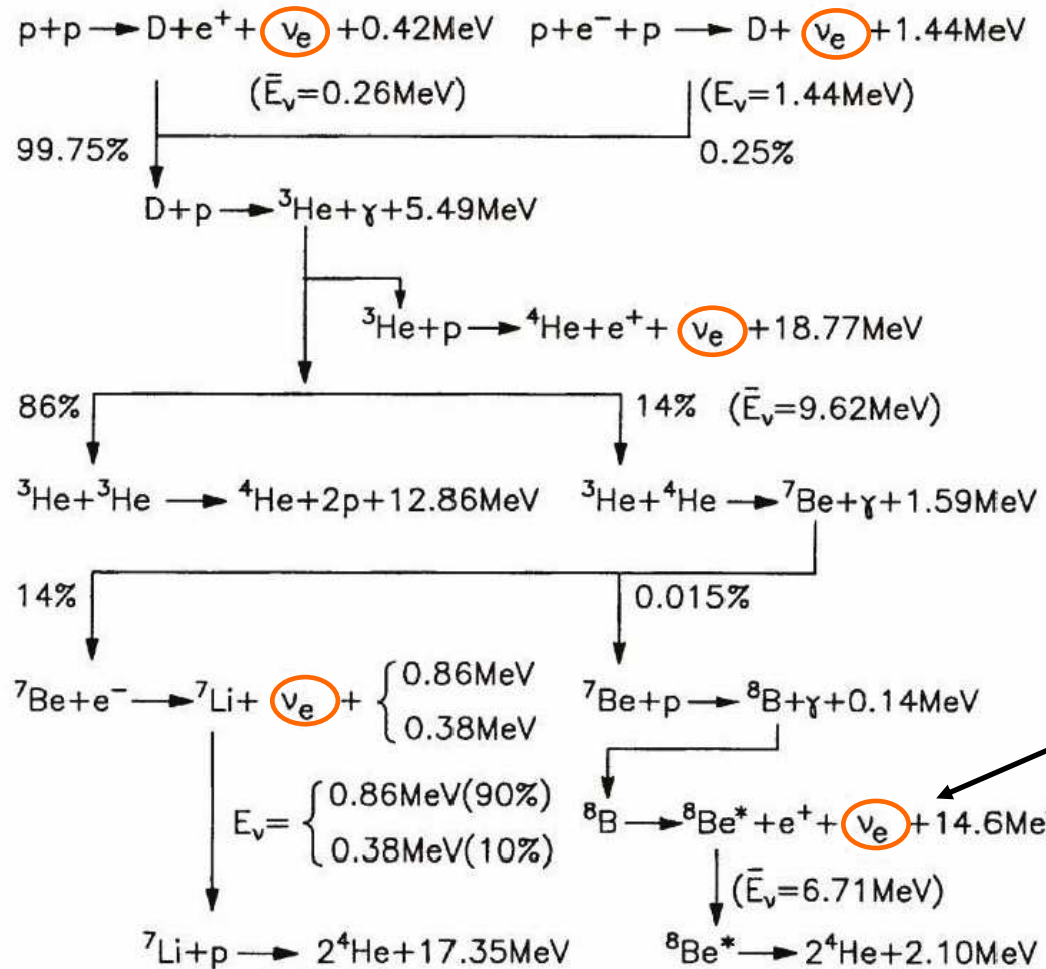
- 98.4 % der Sonnenenergie
- 98.6 % der solaren Neutrinos

- 1.6 % der Sonnenenergie
- 1.4 % der solaren Neutrinos



pp-Zyklus

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



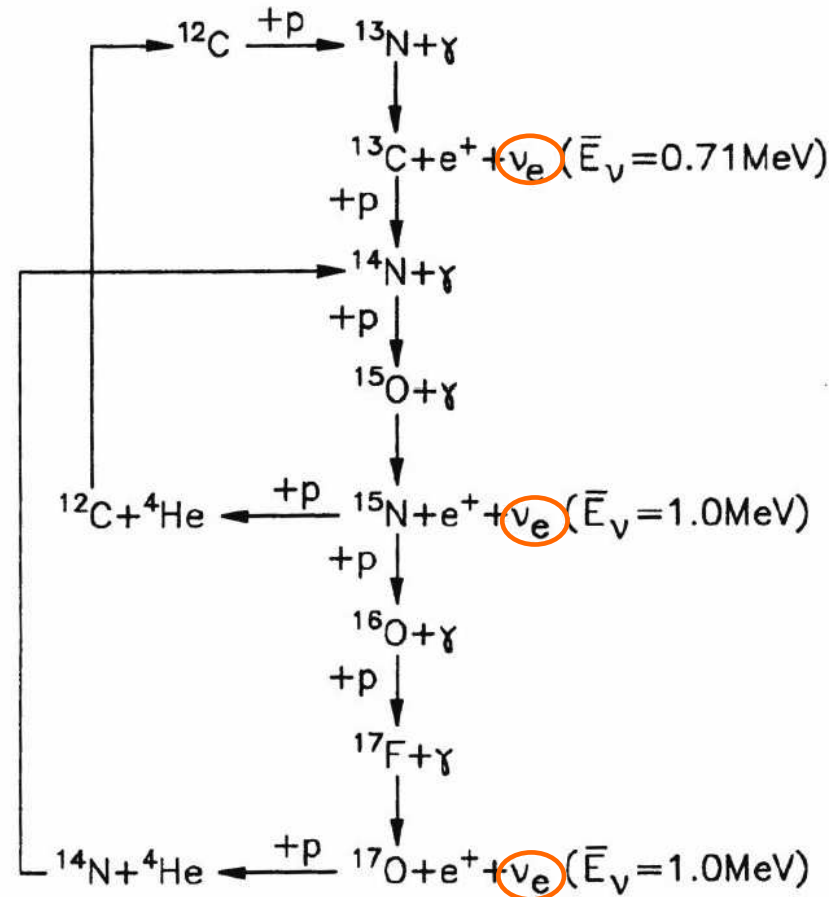
- hohe Temperatur
→ Kerne vollständig ionisiert
- nur Elektron-Neutrinos
- sehr energiereiche
8B-Neutrinos
- hauptsächlich produzierte
pp-Neutrinos tragen zu
den meisten
Experimenten nicht bei



Netto-Reaktion: $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2 \nu_e$

CNO-Zyklus

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



- CNO-Zyklus ist theoretisch noch nicht sehr gut verstanden
- spielt in unserer Sonne für Temperatur und Neutrinoerzeugung nur untergeordnete Rolle
- wäre die Sonne etwas heißer, würde Anteil des CNO-Zyklus stark zunehmen

Netto-Reaktion: $4p \rightarrow \text{He}^4 + 2e^+ + 2 \bar{\nu}_e$

Das Standard-Sonnenmodell

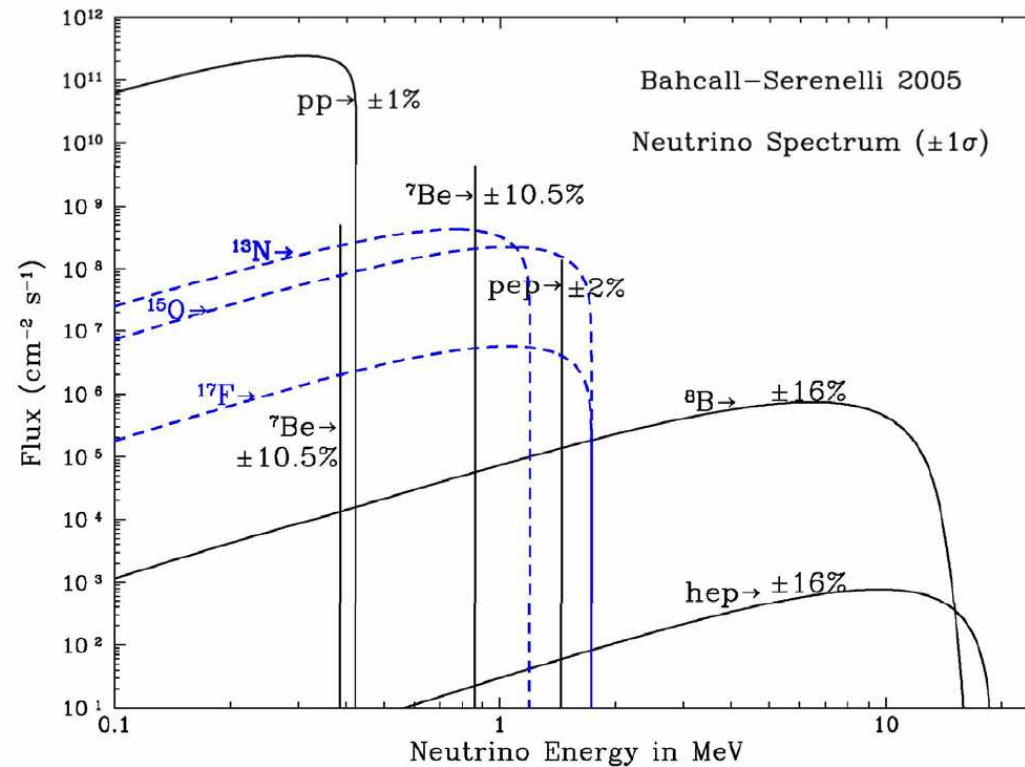
1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme und Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- wurde von John N. Bahcall (1934 – 2005) entwickelt
- beschreibt die Sonne als Plasmaball im hydrodynamischen Gleichgewicht
- Grundlage für die Berechnung fast aller stellaren Entwicklungen
- beschreibt quantitativ die solaren Kernreaktionen
- beschreibt detailliert die Neutrinoerzeugung
- war zur Zeit der ersten Neutrinoversuche noch nicht gesichert

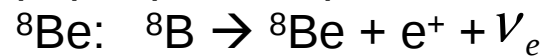
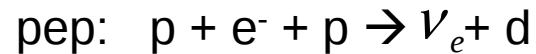
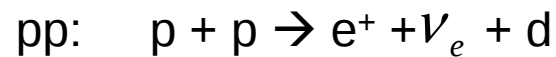


Solares Neutrinospektrum

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



Notation:



Erwarteter Neutrinofluss

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Luminosität der Sonne: $L_* = 3.846 \times 10^{26} \text{ W} = 2.401 \times 10^{39} \text{ MeV} / \text{s}$
- Neutrinoemissionsrate: $dN(\nu_e) / dt = 2L_* / Q \approx 1.84 \times 10^{38} \text{ s}^{-1}$
- Neutrinofluss auf der Erde: $\Phi(\nu_e) \approx 6.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Homestake-Experiment

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- seit 1970 in der Homestake Goldmine in South Dakota
- in einer Tiefe von 1480 m zur Abschirmung der kosmischen und atmosphärischen Strahlung
- 615 t Perchlorethylen (C_2Cl_4)

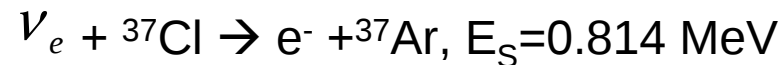


→ 2002: Nobelpreis an Davis, Koshiba und Giacconi

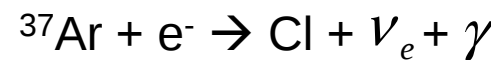
Nachweismethode Homestake-Experiment

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Nachweis über radiochemische Messung von ^{37}Ar :



- da $E_S = 0.814 \text{ MeV}$: sensitiv ab ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos
- aus 615 t Perchlorethylen (C_2Cl_4) werden nach 60 – 70 Tagen Messzeit (Sättigung erreicht) alle Argonatome mit Hilfe von Helium ausgespült
- in Proportionalzählern wird ^{37}Ar -Zerfall gemessen ($t_{1/2} = 37 \text{ Tage}$)



Ergebnisse Homestake-Experiment

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- nach Messzeit von 108 Zyklen (1970 – 1994):
- Resultat: 0.482 ± 0.042 Neutrinoereignisse pro Tag
→ $R_{\text{exp}} = 2.56 \pm 0.22$ SNU

Anm.: 1 SNU (Solar Neutrino Unit)
= 1 Neutrino-Einfang pro sec und 10^{36} Targetkernen

- aus Sonnenmodell erwartet: $R_{\text{SSM}} = 8.0 \pm 3.0$ SNU

→ $\frac{R_{\text{exp}}}{R_{\text{SSM}}} \approx \frac{1}{3}$ solares Neutrinodefizit



Solares Neutrino Problem

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme und Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- gemessener Neutrinofluss deutlich zu gering gegenüber solarem Standardmodell

→ Zwei Hauptmöglichkeiten:

- Solares Standardmodell ist falsch oder zumindest teilweise fehlerhaft
- Neutrinooszillationen, d.h. Umwandlungen von einem Neutrino flavour in das andere



Lösungsansätze für das Solare Neutrino Problem

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- fehlerhaft angenommene Neutrinoeigenschaften

Neutrinozerfall

Umwandlung in Antineutrinos

Umwandlung in rechtshändige Neutrinos

Neutrinooszillationen im Vakuum

Neutrinooszillationen in Materie



Neutrinooszillationen

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino-Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Neutrinooszillation als Erklärung für solares und atmosphärisches Neutrino-Problem:

Defizit im Neutrino-Fluss der Sonne (Homestake-Experiment):

$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ Umwandlung

Defizit in den durch kosmische Strahlung erzeugten Neutrinos
In der Atmosphäre (Kamiokande-Experiment):

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Umwandlung



Annahmen

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- stabile, ultrarelativistische Neutrinos im Vakuum
- reiner Dirac- oder Majorana-Charakter
- CP-Erhaltung
- mindestens ein Neutrino besitzt eine von Null verschiedene Ruhemasse
- Mischung der Flavourzustände möglich
→ Leptonenzahlerhaltung verletzt!

Allgemein:

n Flavour-Eigenzustände (Leptonenzahl-Eigenzustände) $|\nu_a\rangle$

n Masse-Eigenzustände $|\nu_i\rangle$

Flavour- und Masse-Eigenzustände sind über eine unitäre 3x3 Mischungsmatrix U miteinander verbunden: $|\nu_a\rangle = U|\nu_i\rangle$

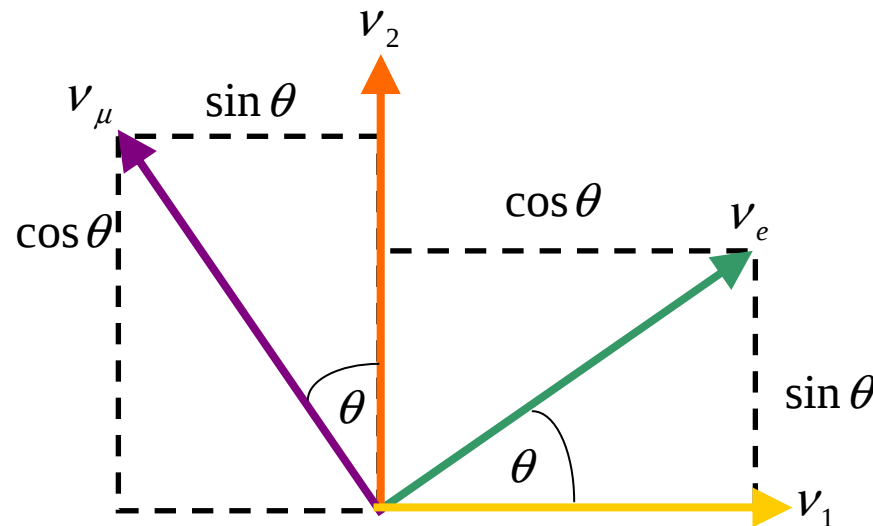
17



Zustandsmischungen

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- für kleines θ ist $\cos \theta \approx 1 \rightarrow |\nu_e\rangle \approx |\nu_1\rangle$ mit m_1 und $|\nu_\mu\rangle \approx |\nu_2\rangle$ mit m_2
- für $\theta = \pi/4$ (maximaler Mischungswinkel) bestehen die Zustände gleichermaßen aus den Masseneigenzuständen



Zustandsmischungen

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

bei zwei Flavour-Eigenzuständen:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad \text{mit Mischungswinkel } \Theta$$

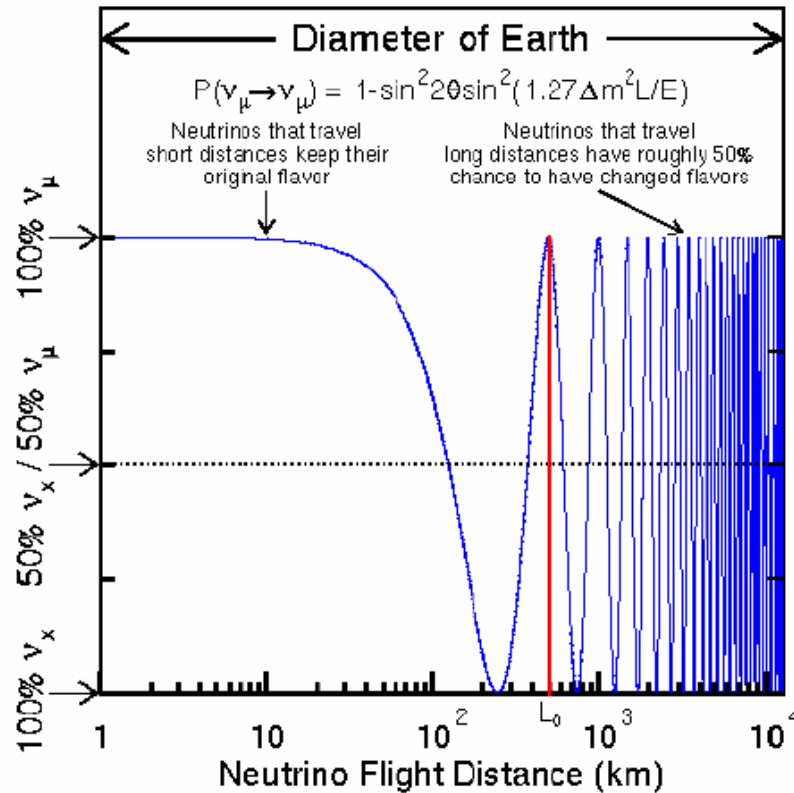
Übergangswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \left| \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta \\ \sin \Theta & \cos \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right|^2$$



Oszillationslänge im Vakuum

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



Oszillationswahrscheinlichkeit:
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\Theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E}\right)$$

→ nur Oszillationen, falls Θ und Δm nicht verschwinden

→ nur Massendifferenz, nicht Masse fließt mit ein



Anforderungen für Experiment

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Homestake-Experiment ergab solares Neutrino Defizit
 - eben Genanntes erklärt Ergebnisse aus Homestake-Experiment
 - aber: Homestake-Experiment konnte Neutrinos nicht unterscheiden
- Experiment zur Messung der Elektron-Neutrinos und der gesamten Neutrinos nötig



Sudbury Neutrino Observatory - Messmethode

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Neutrinos nicht direkt messbar
→ indirekte Messung über Elektronen

- Cerenkov-Detektor mit 1000 t reinem schwerem Wasser (D_2O)

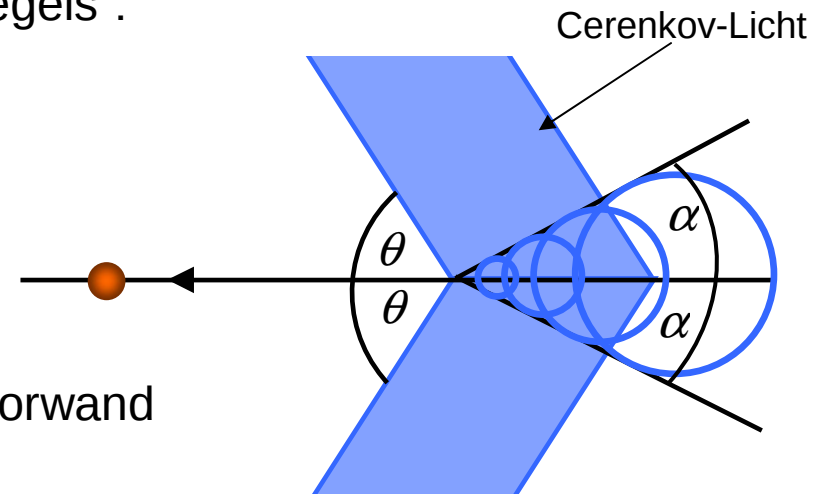
- geladenes Teilchen mit $v > c_{Medium}$ strahlt Lichtkegel in bestimmtem Öffnungswinkel ab

- Öffnungswinkel des „Machkegels“:

$$\sin \alpha = \frac{1}{n\beta}$$

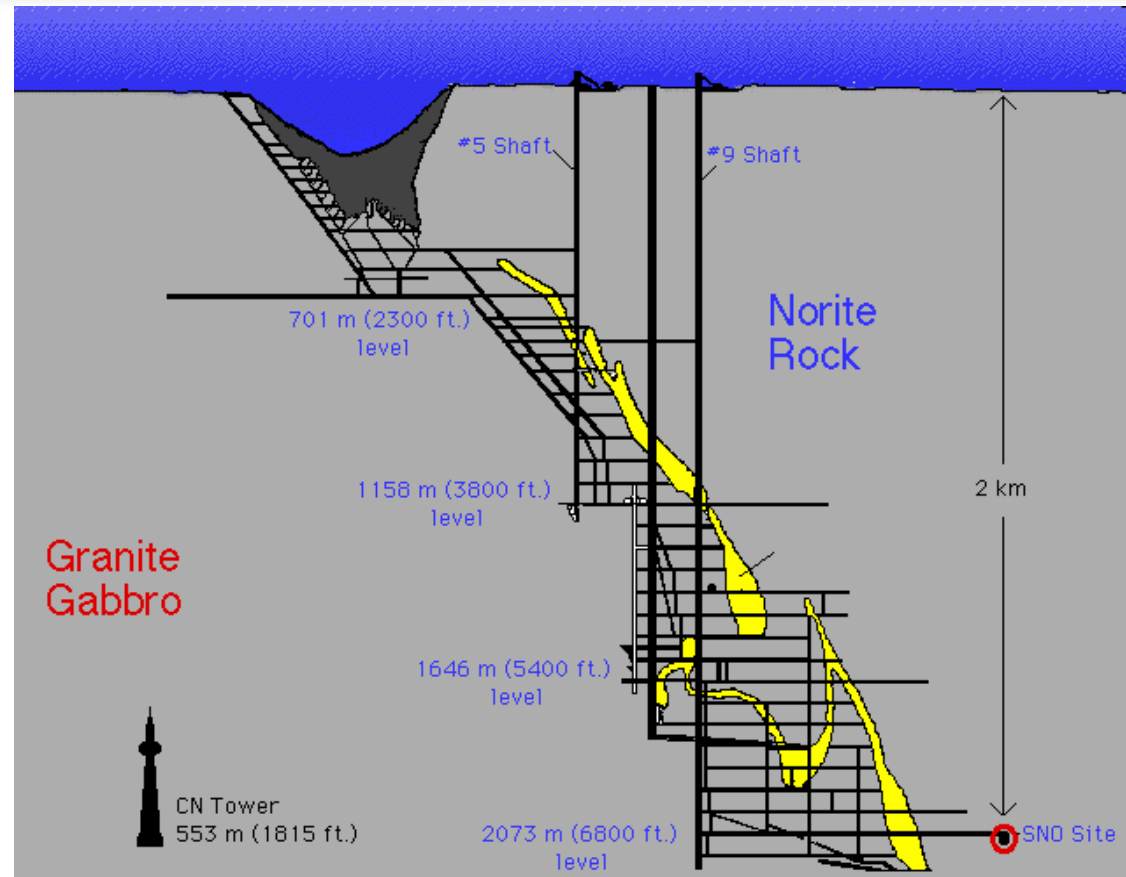
für Lichtkegel: $\theta = 90^\circ - \alpha$

- Lichtkegel beleuchtet Detektorwand ringförmig
- Ringintensität lässt Rückschluss auf Energie zu



Sudbury Neutrino Observatory

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick



der Detektor befindet sich ca. 2 km unter der Erdoberfläche
in der Creighton Mine

→ Schutz gegen kosmische Strahlung



Sudbury Neutrino Observatory

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

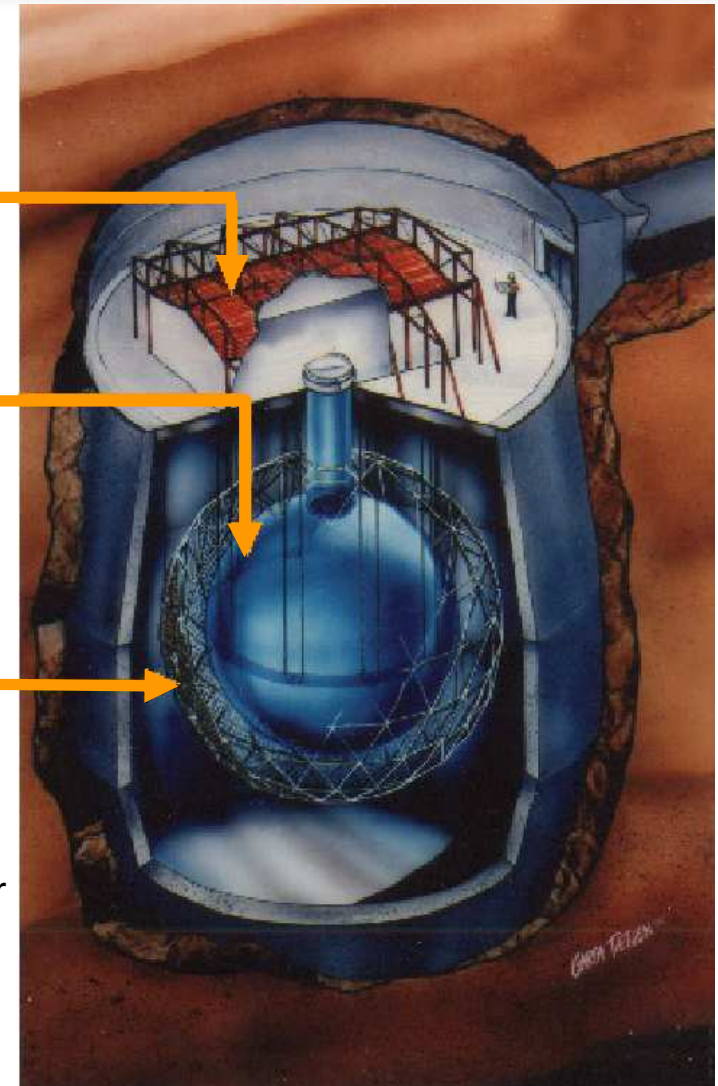
Photomultiplier-Tubes

Acryl-Hohlkugel

12 m Durchmesser
1000 t D₂O (kleiner Neutrino-WQ)
umgeben von 1700 t leichtem Wasser

Support Sphere

9456 20-cm-Photomultiplier-Tubes
54 % von 4π
umgeben von 5700 t leichtem Wasser
91 nach außen gerichtete Photomultiplier
23 nach innen gerichtete Photomultiplier

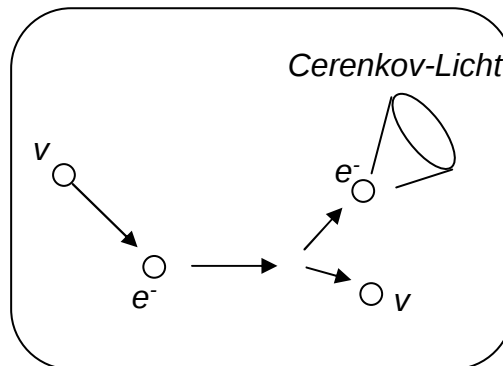


Reaktionen im SNO Detektor

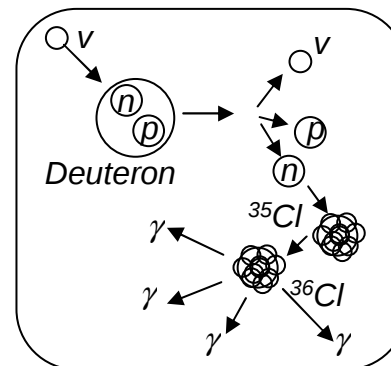
1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Verwendung von D_2O hat einen entscheidenden Vorteil gegenüber anderen Experimenten: SNO ist für alle Neutrino-Flavours sensitiv

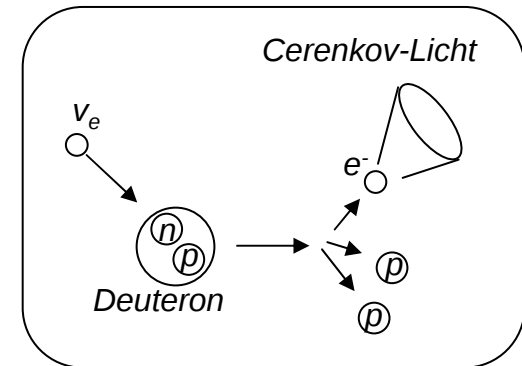
→ direkter Vergleich zwischen den einzelnen Neutrino-Flüssen



ES-Reaktion (Streuung)
fast nur Elektron-Neutrinos



NC-Reaktion
(mit Z-Bosonen)
alle Neutrinos



CC-Reaktion
(mit W-Bosonen)
nur Elektron-Neutrinos

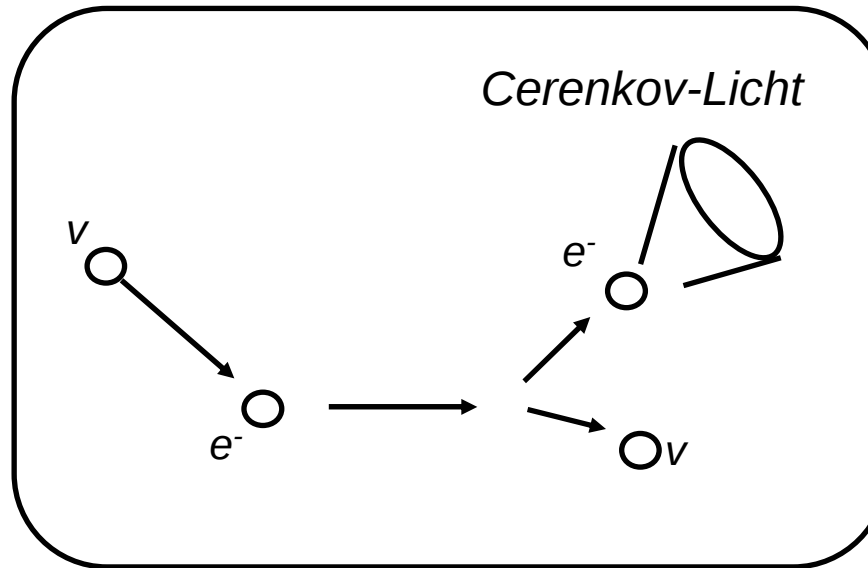
→ ES: Kinematisch klar korreliert
NC: nicht korreliert (viele Zwischenschritte)
CC: etwas korreliert



Reaktionen im SNO Detektor

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Elastic-Scattering-Reaktion



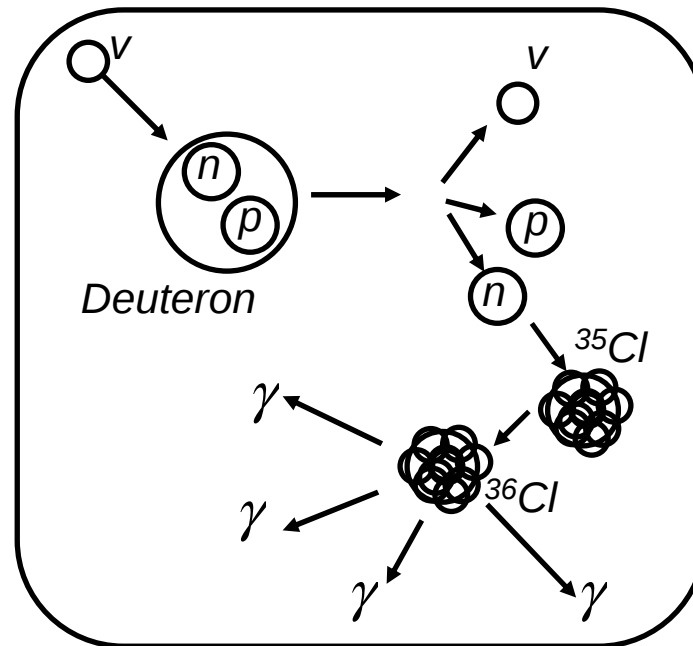
- $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- genügend Intensität: $E_e > 5 \text{ MeV}$
- Wirkungsquerschnitt für ν_μ und ν_τ um Faktor 7 kleiner als für ν_e
- 3 Events/Tag erwartet
- entgegen der Sonne gerichtet



Reaktionen im SNO Detektor

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Neutral-Current-Reaktion



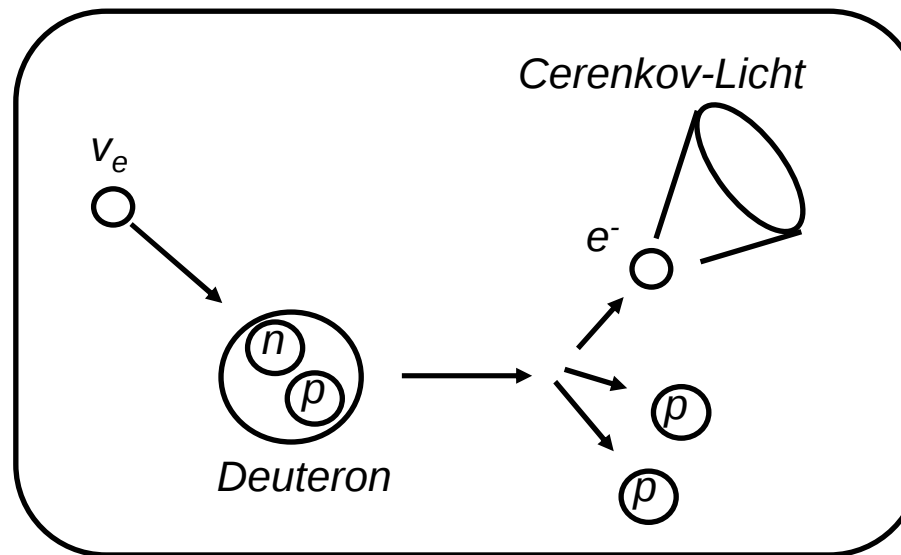
- $\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$
- sensitiv für alle drei Flavours
- Neutron-Einfang: γ -Strahlung
- Streuung an Elektronen (Compton-Effekt)
- e^- beschleunigt
- Cerenkov-Licht
- 30 Events / Tag erwartet
- isotrop



Reaktionen im SNO Detektor

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Charged-Current-Reaktion



- $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
- Nachweis: nur für ν_e
- 30 Events/Tag erwartet
- ca. 30 % anti-gepeakt



SNO Phase I und Phase II

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

■ SNO Phase I

Verwendung von 1000 Tonnen D_2O wie beschrieben

■ SNO Phase II

Zusatz von 2 Tonnen NaCl

→ Erhöhung der Neutrinoeinfang-Kapazität
und des Cherenkov-Lichts

→ Neutroneneinfang von ^{35}Cl produziert mehrere γ -Strahlen
während CC- und ES-Reaktionen nur einen Strahl erzeugen

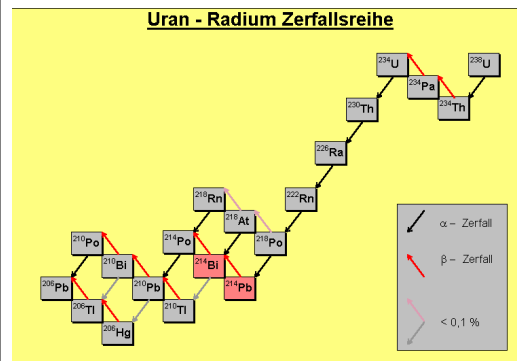
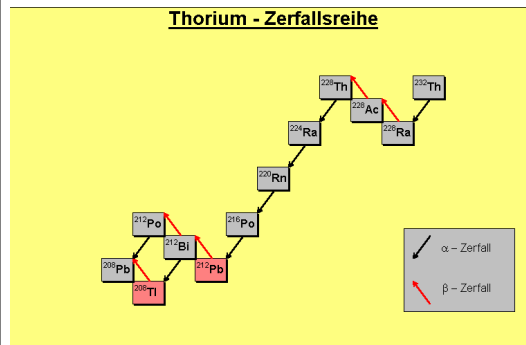
→ gute statistische Trennung der Event-Arten



Berücksichtigung von Untergrundeffekten

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

viele verschiedene Quellen für Untergrund



- ^{214}Bi u. ^{208}Tl aus Zerfallsketten von U u. Th

→ γ erzeugen freie Neutronen durch Spaltung des Deuteron

→ Cerenkov-Licht wie bei NC-Reaktion

- atmosphärische Neutrinos
- Neutrinos aus kosmischer Strahlung
- Neutrinos aus Kernreaktoren



SNO Phase I

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

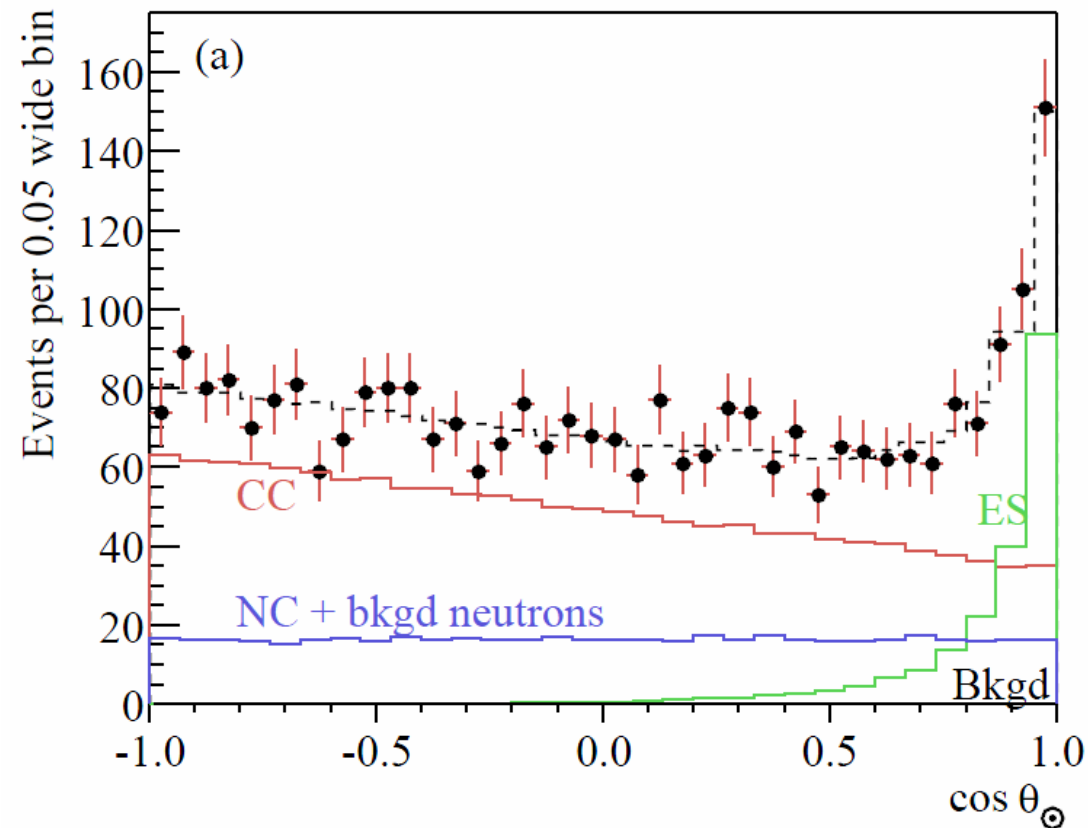
- 2. November 1999 – 28. Mai 2001
→ 306.4 Tage Messzeit
- Rohwerte reduziert auf 2929 Events im Bereich von 5 – 20 MeV
- Neutronendetektion mit ^{252}Cf -Neutronenquelle kalibriert



SNO Phase I

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Trennung der drei Reaktionen durch drei Verteilungen



- Volumen $R \leq 550$ cm, $T_{\text{eff}} \geq 5$ MeV
- $\cos \theta_{\odot}$: Cosinus des Winkels zwischen Richtung des Cherenkov-Events und der Sonnenrichtung



SNO Phase I

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrino Problem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Vorhersagen für CC, NC, ES
- gemessene Daten mit Maximum-Likelihood-Methode (Statistik)

$$\phi_{CC}^{\text{SNO}} = 1.76_{-0.05}^{+0.06}(\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst.})$$

$$\phi_{ES}^{\text{SNO}} = 2.39_{-0.23}^{+0.24}(\text{stat.})_{-0.12}^{+0.12}(\text{syst.})$$

$$\phi_{NC}^{\text{SNO}} = 5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat.})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst.})$$

$$\phi_e = 1.76_{-0.05}^{+0.05}(\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst.})$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.45}^{+0.45}(\text{stat.})_{-0.45}^{+0.48}(\text{syst.})$$

jeweils in Einheiten
von $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

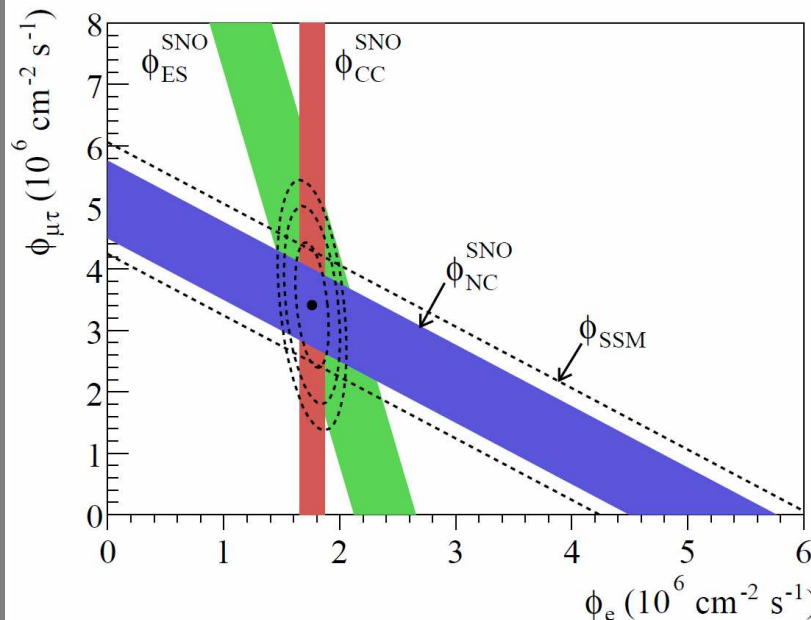


FIG. 3: Flux of ^8B solar neutrinos which are μ or τ flavor vs flux of electron neutrinos deduced from the three neutrino reactions in SNO. The diagonal bands show the total ^8B flux as predicted by the SSM [11] (dashed lines) and that measured with the NC reaction in SNO (solid band). The intercepts of these bands with the axes represent the $\pm 1\sigma$ errors. The bands intersect at the fit values for ϕ_e and $\phi_{\mu\tau}$, indicating that the combined flux results are consistent with neutrino flavor transformation assuming no distortion in the ^8B neutrino energy spectrum.

(Ergebnisse aus Paper von Mai 2002)



SNO Phase I

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- Ausklammern des Standard-Neutrino-Spektrums
→ unabhängig von Standard-Sonnen-Modell

$$\phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} = 6.42_{-1.57}^{+1.57}(\text{stat.})_{-0.58}^{+0.55}(\text{syst.})$$

- Vorhersage des Standard-Sonnen-Modells für ^8B -Neutrinos: 5.05

Ergebnis von SNO Phase I

- ^8B -Neutrinos unterliegen Flavour-Oszillationen
- Gesamtneutrinofluss aus NC-Reaktion stimmt im Rahmen der Fehlergrenzen mit dem SSM-Modell für ^8B überein



SNO Phase II

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- 26. Juli 2001 – 10. Oktober 2002 → 254.2 Tage Messzeit
- 435,721,068 Rohwerte
- reduziert auf 3055 Events
- Neutronendetektion mit ^{252}Cf -Neutronenquelle kalibriert
- Effizienz gegenüber Phase I um etwa den Faktor 3 gesteigert
- Vorhersagen für CC, NC, ES
- gemessene Daten mit Maximum-Likelihood-Methode (Statistik)

$$\begin{aligned}\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}} &= 1.70 \pm 0.07(\text{stat})_{-0.10}^{+0.09}(\text{syst}) \\ \phi_{\text{ES}}^{\text{SNO}} &= 2.13_{-0.28}^{+0.29}(\text{stat})_{-0.08}^{+0.15}(\text{syst}) \\ \phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} &= 4.90 \pm 0.24(\text{stat})_{-0.27}^{+0.29}(\text{syst})\end{aligned}\quad \begin{array}{l} \text{jeweils in Einheiten} \\ \text{von } 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \end{array}$$



Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

- SNO: Gesamtfluss der solaren Neutrinos entspricht sehr genau dem berechneten Fluss an
- ein Drittel ν_e : 1,76 Mio (cm s)⁻¹
- zwei Drittel ν_μ und ν_τ : 3,41 Mio (cm s)⁻¹ für $E_\nu \geq 5$ MeV
- Nachweis von Tag-Nacht-Schwankungen bzw. jahreszeitlichen Schwankungen der gemessenen Neutrinoverteilungen
- Asymmetrien zwischen Tag und Nacht lassen auf eine veränderte Neutrinooszillation in Materie schließen: gewisser Anteil der Neutrinos wird bei Durchgang durch die Erde (also nachts) wieder zu Elektron-Neutrinos

→ Neutrinos haben Masse (sonst keine Oszillationen)

→ Durchgang durch Materie beeinflusst Neutrino-Oszillationen



Oszillation in Materie: MSW-Effekt

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

MSW-Effekt geht zurück auf Mikheyev und Smirnow
auf Grundlage theoretischer Vorarbeit von Wolfenstein:

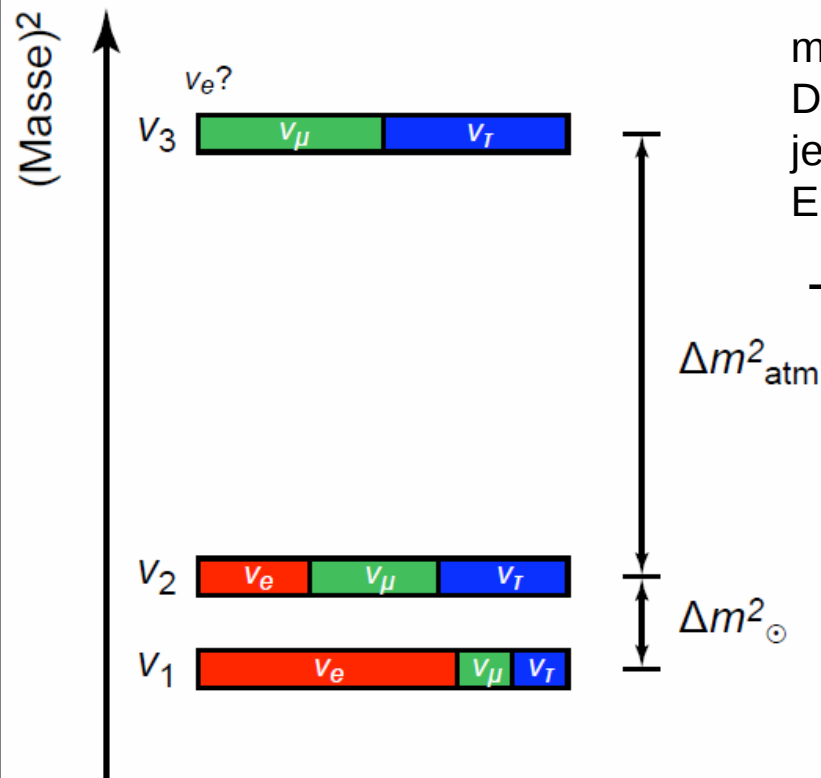
- Anwesenheit von Materie beeinflusst entscheidend Neutrino-Oszillation
- kohärente, elastische Vorwärtsstreuung von Neutrinos in Materie führt zu Abhängigkeit des Mischungswinkels und der Oszillationslänge von der Elektronendichte
- alle Neutrinos streuen über Z^0 -Austauschteilchen der schwachen WW
- Elektron-Neutrinos streuen zusätzlich über $W^{+/-}$ -Austausch



Ausblick: Massenhierarchie der Neutrinos

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme u. Auswertung
9. Ergebnisse
10. Ausblick

Neutrinooszillations-Experimente messen nur Massendifferenzen



mögliches Neutrino-Massenspektrum
Die drei Masseneigenzustände sind jeweils Mischungen aus den Flavor-Eigenzuständen ν_e , ν_μ und ν_τ

→ *so oder entgegengesetzt?*

→ *Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment (KATRIN)* hat die direkte Bestimmung der Elektron-Neutrinomasse zum Ziel



Quellen

1. Geschichte des Neutrinos
2. Neutrinos im Standardmodell
3. Neutrinos von der Sonne
4. Homestake-Experiment
5. Solares Neutrinoproblem
6. Neutrinooszillationen
7. SNO-Experiment
8. Datennahme und Auswertung
9. Ergebnisse

Brookhaven National Laboratory
www.bnl.gov

The Neutron Oscillation Industry
<http://www.neutrinooscillation.org/>

*Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory.**

By SNO Collaboration (Q.R. Ahmad/ et al.)
e-Print: [*nucl-ex/0204008*](#)

*Measurement of day and night neutrino energy spectra at SNO and constraints on neutrino mixing parameters.**

By SNO Collaboration (Q.R. Ahmad/ et al.)
e-Print: [*nucl-ex/0204009*](#)

*Measurement of the total active B-8 solar neutrino flux at the Sudbury Neutrino Observatory with enhanced neutral current sensitivity.**

By SNO Collaboration (S.N. Ahmed/ et al.)
e-Print: [*nucl-ex/0309004*](#)

C. Amsler et al. (Particle Data Group-Kollaboration), *Review of Particle Physics*, Phys. Lett. B667 (2008), 1.

