

Entdeckung der Neutrino-Oszillation am SNO

Im Rahmen des Seminars:
Präzisionsexperimente der Teilchenphysik

Thomas Buchner

May 23, 2014

- 1 Das Neutrino
 - als Teil des Standardmodells
 - und seine Entdeckungsgeschichte
 - und die Theorie zu seiner Oszillation
 - und sein Nachweis

- 2 Neutrinoquellen
 - Irdische Quellen
 - Solare Quellen

- 3 Neutrinodetektoren
 - für ersten direkten Nachweis
 - für Sonnenneutrinos

- 4 Die Zukunft der Neutrinoexperimente
 - IceCube

- 5 Ende
 - Quellen und Danksagung

Das Standardmodell postuliert Neutrinos:

- als Spin 1/2 Teilchen der schwachen Wechselwirkung
- ohne elektrische Ladung
- ohne Masse
- ohne Flavourmischung

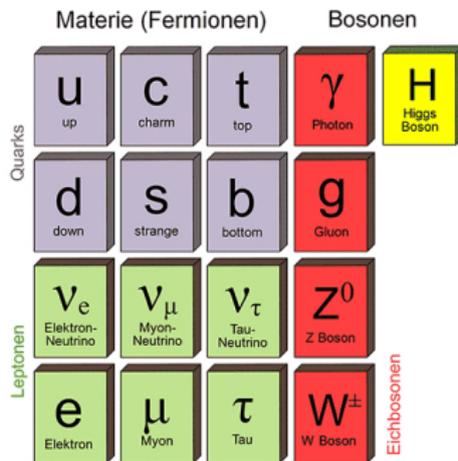


Abb.: Standardmodell

- 1930 Pauli postuliert hypothetisches Teilchen um Energieerhaltung beim β -Zerfall zu erklären
- 1934 Fermi veröffentlicht Theorie zum β -Zerfall mit Neutrinos
- 1956 Erster Nachweis von Neutrinos ($\bar{\nu}_e$ aus einem Kernreaktor) durch Cowan und Reines mit Hilfe eines Szintillatordetektors
- 1957 Pontecorvo postuliert Neutrinooszillation
- 1962 Entdeckung eines weiteren Neutrino flavours ν_μ durch Steinberger, Schwartz und Lederman
- 1970 Beginn der Homestake Messung (Detektion von Sonnenneutrinos)
- 1975 Entdeckung des τ -Leptons und Theorie zum ν_τ
- 1998 Super-Kamiokande gibt Hinweis auf Neutrinomasse
- 2000 Entdeckung des ν_τ im DONUT-Experiment
- 2001 Neutrinooszillation am SNO nachgewiesen

Die Theorie der Neutrinooszillation

- Wenn wir Neutrinos (ν_e , ν_μ und ν_τ) messen, unterscheiden wir sie nach ihren Flavour-Eigenzuständen
- Massen sind auch Eigenzustände ν_1, ν_2, ν_3 , deren Superposition der Flavour-Eigenzustand ist mit U_{e1} , U_{e2} und $U_{e3} \in$ PMNS-Matrix.

$$|\nu_e\rangle = U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle$$

Die Theorie der Neutrinooszillation

- Wenn wir Neutrinos (ν_e , ν_μ und ν_τ) messen, unterscheiden wir sie nach ihren Flavour-Eigenzuständen
- Massen sind auch Eigenzustände ν_1, ν_2, ν_3 , deren Superposition der Flavour-Eigenzustand ist mit U_{e1}, U_{e2} und $U_{e3} \in$ PMNS-Matrix.

$$|\nu_e\rangle = U_{e1} |\nu_1\rangle + U_{e2} |\nu_2\rangle + U_{e3} |\nu_3\rangle$$

Daraus ergeben sich die Mischungswahrscheinlichkeiten:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^2(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2 1.27 \Delta m_{23}^2 \cdot \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 1.27 \Delta m_{23}^2 \cdot \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \cos^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 1.27 \Delta m_{23}^2 \cdot \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}$$

Parameter der Mischungswahrscheinlichkeit

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2 1.27 \Delta m_{23}^2 \cdot \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}$$

- θ steht für den Mischwinkel der Eigenzustände. (Für $\theta = 0$ sind die Zustände identisch, für $\theta = \frac{\pi}{4}$ ist die Oszillation maximal.)
- Da die quadratische Massendifferenz Δm^2 in der Mischungswahrscheinlichkeit vorkommt, müssen Neutrinos massenbehaftet sein.
- Der letzte Parameter $\frac{L}{E}$ zeigt an, dass die Neutrinooszillation von der Energie sowie dem zurückgelegten Weg abhängt.

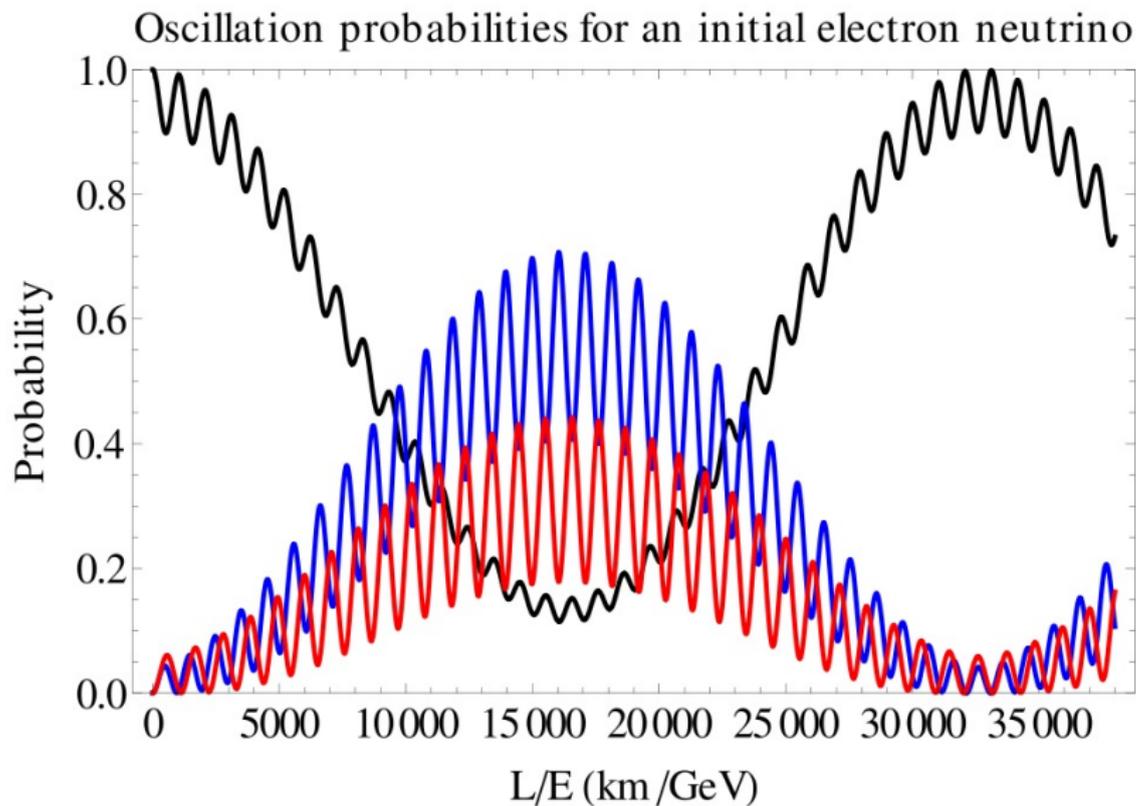


Abb.: schwarz ν_e , blau ν_μ und rot ν_τ

Szintillator-Detektor

- $\bar{\nu}_e$ stößt mit p des Wasser und erzeugt e^+ und n
- Gamma-Quanten entstehen durch $e^+ e^-$ -Anihilation und Neutron-Einfang

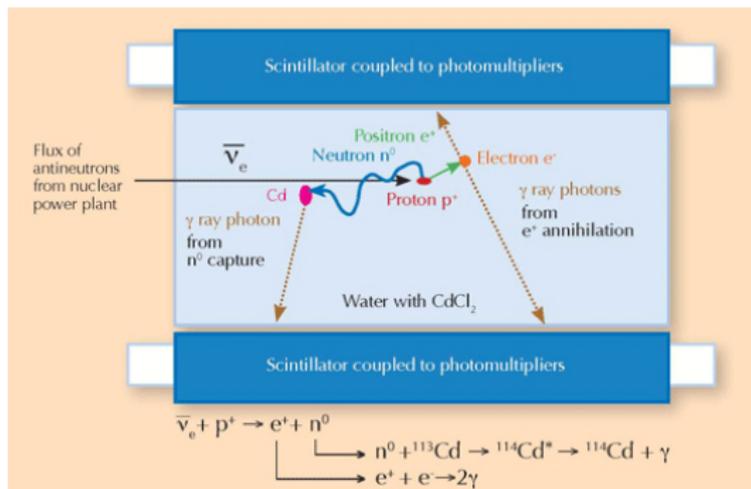


Abb.: Funktionsweise eines Szintillatordetektors

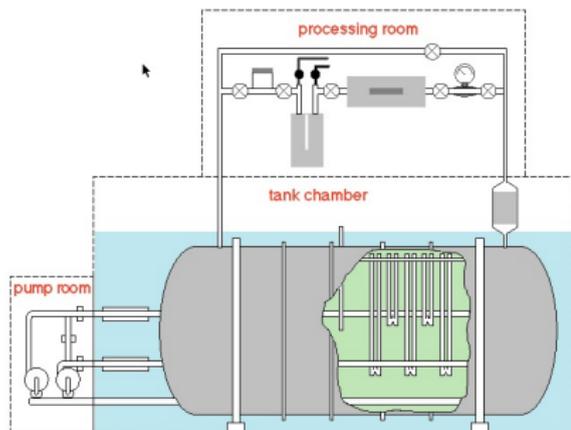
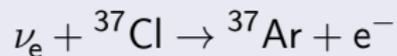


Abb.: Aufbau des
Homestake-Chloriddetektors

Chlor-Detektor

Nach der Reaktion



erzeugt jedes wechselwirkende ν_e ein Argon Atom, welche später aus dem Tank gefiltert und gezählt werden.

Cherenkovdetektor

Cherenkov Strahlung \Leftrightarrow geladenes Teilchen bewegt sich schneller als das Licht in einem Medium

$$v_{\text{Teilchen}} > \frac{c}{n}$$

Es entsteht eine elektromagnetische Schockwelle:

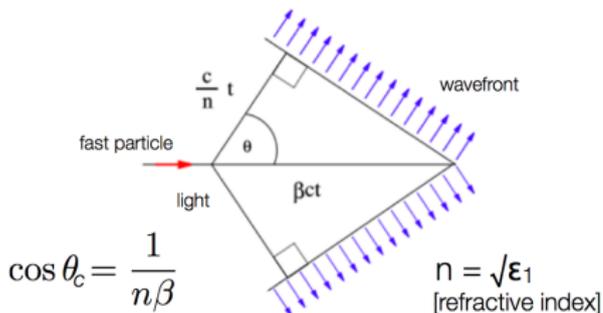


Abb.: Cherenkov Strahlung

Abb.: Mach'scher Kegel

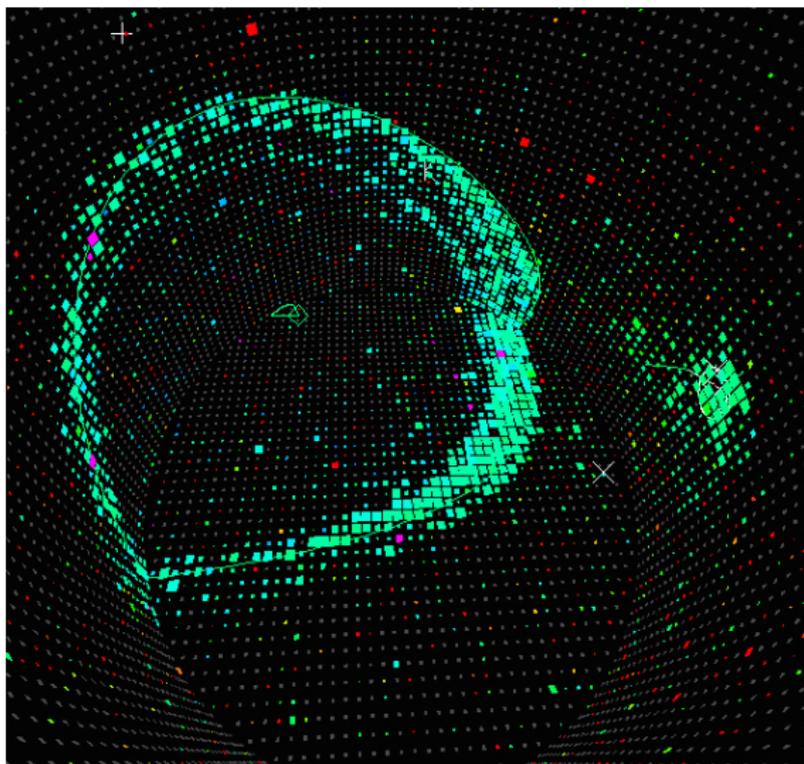


Abb.: Detektorsignal eines K2K-Neutrinos

$$1\text{mb} = 10^{-27}\text{cm}^2 = 10^{-31}\text{m}^2$$

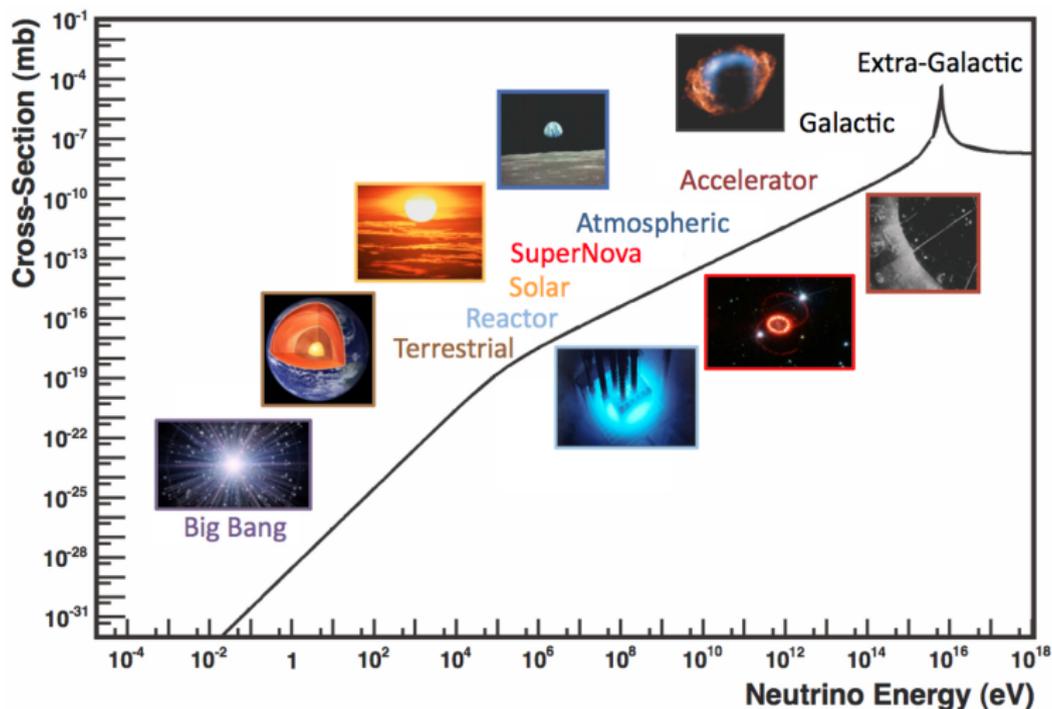


Abb.: Elektroschwacher Wirkungsquerschnitt für $\bar{\nu}_e e^- \rightarrow \bar{\nu}_e e^-$ Streuung an freien Elektronen

Wirkungsquerschnitt von Neutrinos

Beispielsrechnung:

Als Einheit für experimentelle Neutrino-Eingangsgraten wird üblicherweise die "Solar Neutrino Unit" (SNU) verwendet

$$1\text{SNU} := 10^{-36}\text{Einfänge pro Targetatom und Sekunde}$$

Das entspricht ungefähr einer Neutrinowechselwirkung pro Tag alle 10^{30} Targetatome (\sim mehrere 100 Tonnen H_2O)

\Rightarrow Sehr große Detektoren, vor Myonen und kosmischer Strahlung abgeschirmt (unter der Erde oder in Seen)

Radioaktive β -Strahler

Alle β -Strahler erzeugen $\bar{\nu}_e$, aufgrund der geringen Konzentrationen sind sie jedoch kaum für ν -Messungen geeignet.

Kernreaktoren

Erzeugen viele Neutrinos durch Kernspaltung (β -Zerfall) als Abfallprodukt und sind daher sehr gut für ν -Experimente geeignet.

Teilchenbeschleuniger

Können Neutrinos in hoher Anzahl zu bestimmten Energien erzeugen und sind daher auch sehr gut für Experimente geeignet.

Unsere Sonne

Die Kernfusion im inneren der Sonne erzeugt ν_e in hoher Anzahl (größter Neutrinoproduzent des Sonnensystems). Das Wasserstoffbrennen geschieht dabei in zwei unterschiedlichen Zyklen:

- Proton-Proton-Reaktion (pp-Kette)
 - 98,5% der Reaktion
- Bethe-Weizsäcker-Zyklus (CNO-Zyklus)
 - Für unsere Sonne und deren Neutrinoproduktion von geringer Bedeutung

Mit Hilfe des von John Bahcall in den 1930ern entwickelten Standard-Sonnenmodells lassen sich die auf der Erde erwarteten Neutrino-Flüsse und -Flussspektren bestimmen

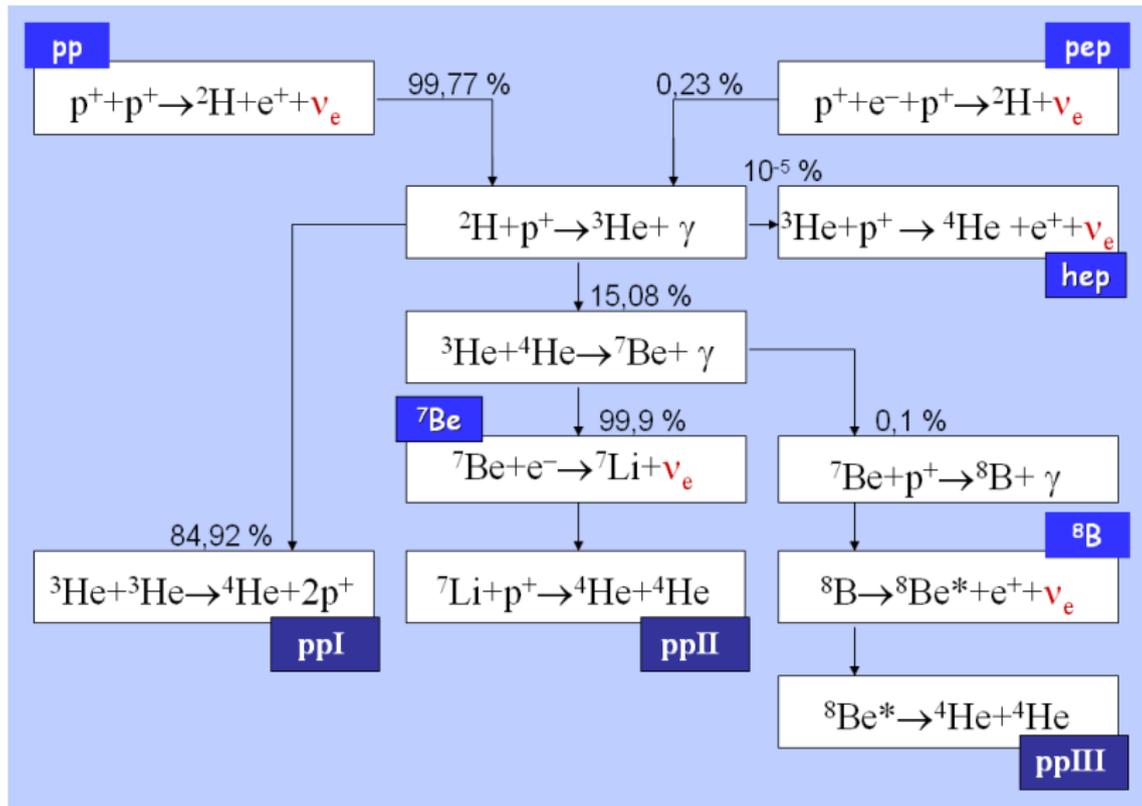


Abb.: Schema der pp-Kette

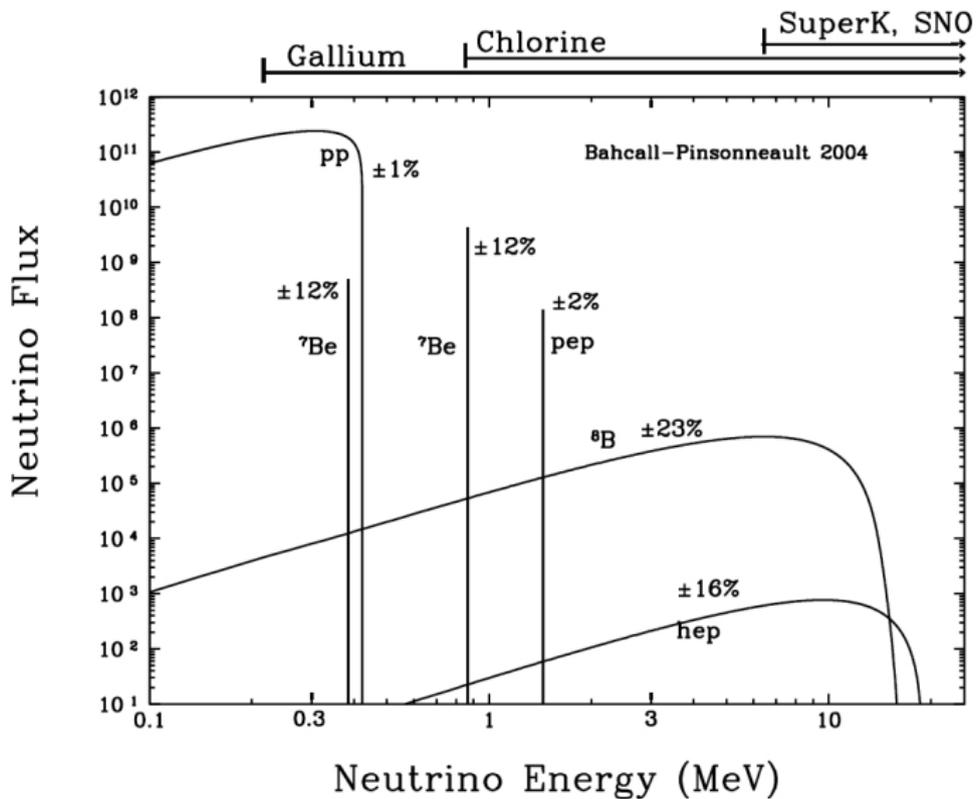


Abb.: Neutrinofluss auf der Erde nach BP04-Modell (Unsicherheiten in Klammern)

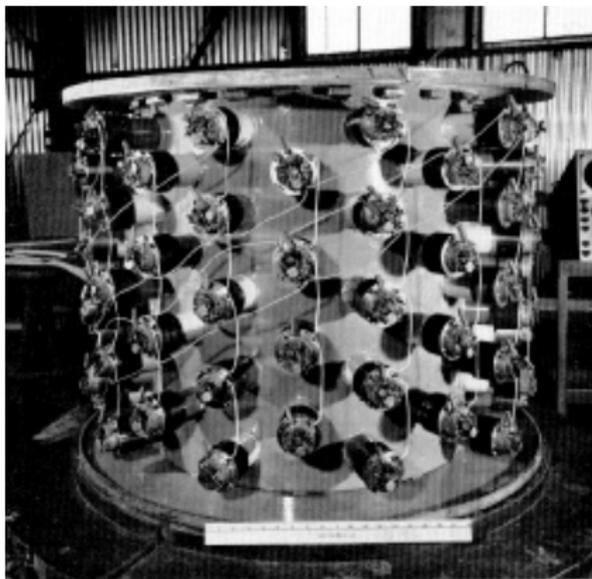


Abb.: Experimenteller Aufbau

Das Cowan-Reines-Neutrino-Experiment

- erstes Experiment, welches Neutrinos ($\bar{\nu}_e$ aus einem Kernreaktor $> 1,8\text{MeV}$) nachweisen konnte
- Szintilator-detektor mit 380Liter Cadmiumchlorid
- Reines erhielt für den experimentellen Nachweis des Neutrinos 1995 den Nobelpreis

Sonnenforschung mit Neutrinos

Wenn Neutrinos von unserer Sonne detektiert werden können, dann:

- besseres Verständnis des Sonneninneren, da Neutrinos den Kern der Sonne ungehindert verlassen können
- Photon aus dem Inneren der Sonne diffundiert über ca. 1000a nach außen.
- Neutrinos reagieren kaum mit der Sonne und können so frühzeitig Informationen aus dem Kern nach außen tragen.



Abb.: Experimenteller Aufbau

Das Homestake Experiment

- erster Detektor, der Neutrinos von Sonne ($> 0,814\text{MeV}$) messen konnte
- konnte nur Φ_{ν_e} messen
- Chlordetektor mit 615Liter Tetrachloretylen
- 1478m unter der Erde in der Homestake-Mine
- Nobelpreis 2002 an Raymond Davis Jr.
- 1970 bis 1994 in Betrieb

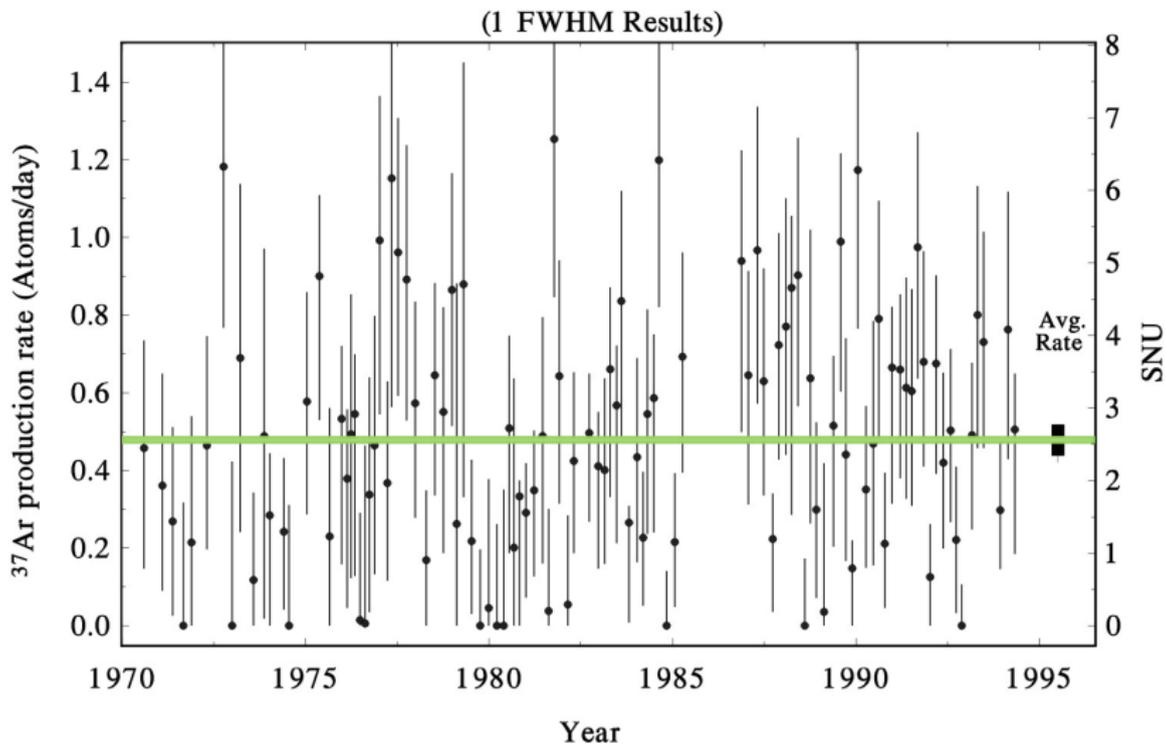


Abb.: Plot der Messergebnisse über 24 Jahre

No. 1, 1998

MEASUREMENT OF THE SC

7.6. Measured Solar Neutrino Flux

The solar neutrino-induced ^{37}Ar production rate in the Homestake chlorine detector is 0.478 ± 0.030 (statistical) ± 0.029 (systematic) day^{-1} . Since the detector contains 2.16×10^{30} ^{37}Cl atoms, this gives a neutrino capture rate of 2.56 ± 0.16 (statistical) ± 0.16 (systematic) $\times 10^{-36}$ per target atom s^{-1} or 2.56 ± 0.16 (statistical) ± 0.16 (systematic) SNU. This measurement is to be compared with the solar model predictions for the chlorine detector of 9.3 ± 1.3 SNU (Bahcall & Pinsonneault 1995), 6.36 SNU (Turck-Chièze & Lopes 1993), and 7.64 SNU (Sackman, Boothroyd, & Fowler 1990). Clearly, the observed flux is much lower than that predicted. This discrepancy between observation and prediction has existed since the early 1970s when the observations of the Homestake detector were first reported.

Abb.: Ausschnitt aus der Publikation von 1998

No. 1, 1998

MEASUREMENT OF THE SC

7.6. Measured Solar Neutrino Flux

The solar neutrino-induced ^{37}Ar production rate in the Homestake chlorine detector is 0.478 ± 0.030 (statistical) ± 0.029 (systematic) day^{-1} . Since the detector contains 2.16×10^{30} ^{37}Cl atoms, this gives a neutrino capture rate of 2.56 ± 0.16 (statistical) ± 0.16 (systematic) $\times 10^{-36}$ per target atom s^{-1} or 2.56 ± 0.16 (statistical) ± 0.16 (systematic) SNU. This measurement is to be compared with the solar model predictions for the chlorine detector of 9.3 ± 1.3 SNU (Bahcall & Pinsonneault 1995), 6.36 SNU (Turck-Chièze & Lopes 1993), and 7.64 SNU (Sackman, Boothroyd, & Fowler 1990). Clearly, the observed flux is much lower than that predicted. This discrepancy between observation and prediction has existed since the early 1970s when the observations of the Homestake detector were first reported.

Abb.: Ausschnitt aus der Publikation von 1998

Das Solare Neutrino Problem

Die im Homestake-Experiment bestimmte solare Neutrinorate war nur ein Drittel der erwarteten Rate. Dies ging in die Geschichte als Solares Neutrino Problem ein.

Erklärungsversuche:

- Alle bisherigen Experimente haben einen Fehler
- Die Neutrinofluss-Vorhersage durch das SSM ist falsch
- Neutrinos wechseln Flavour ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ und/oder ν_τ)
- Anderer, unbekannter Effekt (z.B. ν_e mixen mit sterilen ν)

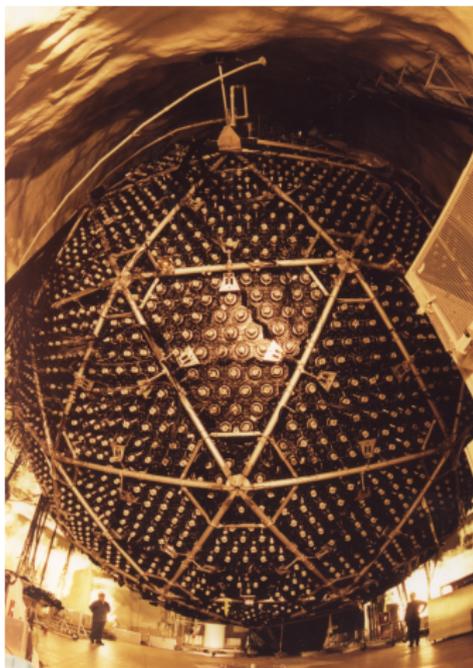


Abb.: Bild der Außenhülle des SNO

Das Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

- kann Φ_{ν_e} und $\Phi_{\nu_\tau \& \nu_\mu}$ messen
- Cherenkovdetektor mit 1000t D_2O (+2t $NaCl$)
- 9547 Photodetektoren um den Tank angeordnet
- 2000m unter der Erde in einer alten Nickelmine nahe Sudbury
- Planung ab 1990
- Seit 1999 in Betrieb

Die Funktionsweise des SNO-Detektors an der Tafel

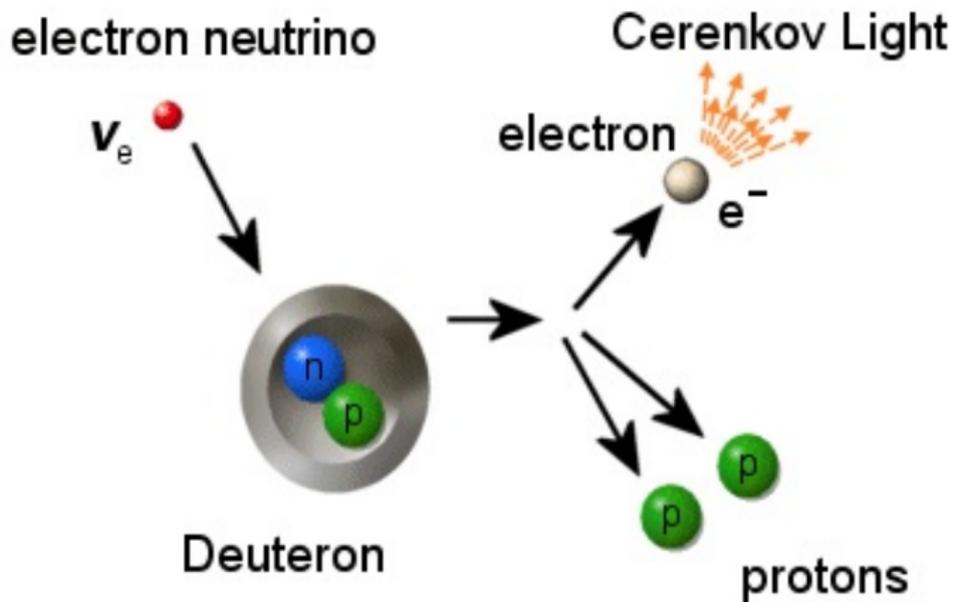


Abb.: The Standard Solar Model predicts about 30 charged current events per day in SNO. Nur ν_e

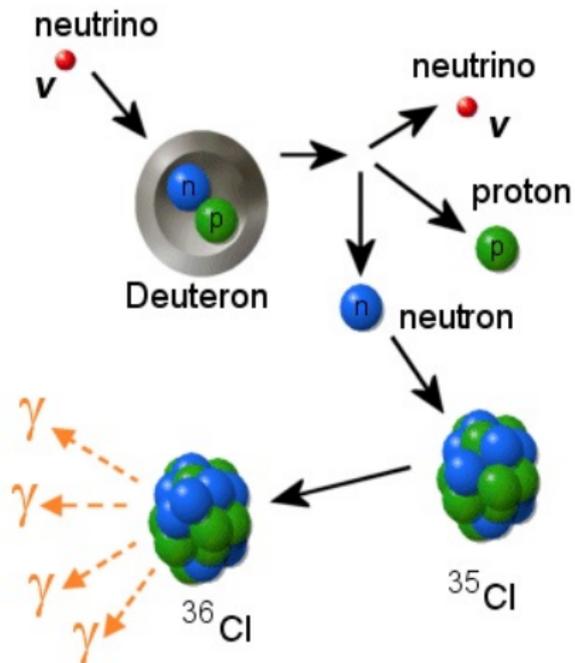


Abb.: The Standard Solar Model predicts about 30 neutrons per day in SNO.

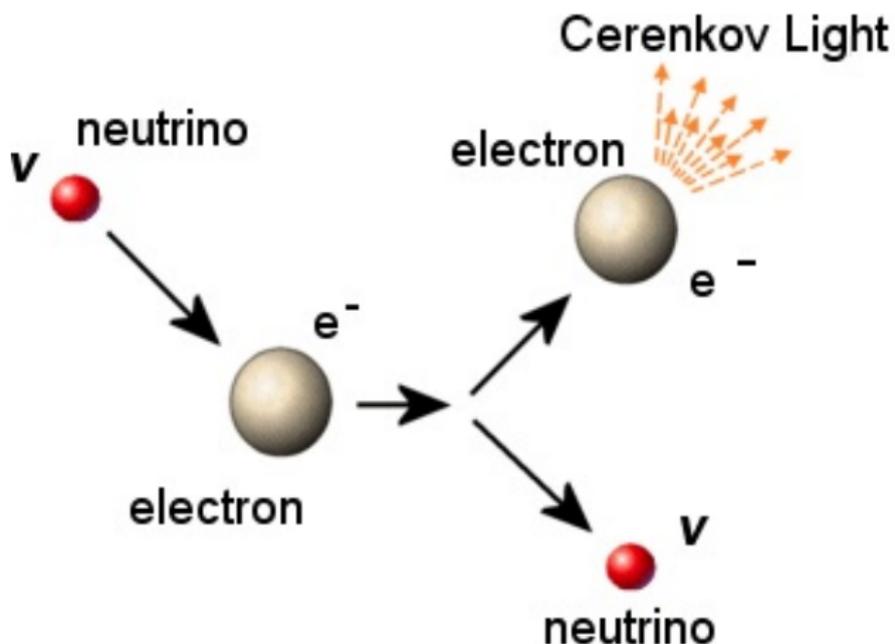


Abb.: The Standard Solar Model predicts about 3 electron scattering events per day in SNO. Für ν_τ und ν_μ um den Faktor 7 kleiner als für ν_e

Messwerte des SNO-Experiments

- $\Phi_{ES}^{SNO} = \Phi(\nu_e) + \epsilon \cdot \Phi(\nu_{\mu,\tau})$
- $\Phi_{CC}^{SNO} = \Phi(\nu_e)$
- $\Phi_{NC}^{SNO} = \Phi(\nu_e) + \Phi(\nu_{\mu,\tau}) = \Phi_{tot}$

Messwerte des SNO-Experiments

- $\Phi_{ES}^{SNO} = \Phi(\nu_e) + \epsilon \cdot \Phi(\nu_{\mu,\tau})$
- $\Phi_{CC}^{SNO} = \Phi(\nu_e)$
- $\Phi_{NC}^{SNO} = \Phi(\nu_e) + \Phi(\nu_{\mu,\tau}) = \Phi_{tot}$

⇒ falls keine Oszillation muss gelten:

$$\Phi_{ES}^{SNO} = \Phi_{CC}^{SNO} = \Phi_{NC}^{SNO}$$

SSM-Vorhersage für B^8 -Neutrinos am SNO

$$\Phi_{tot}^{SSM} = 5,82 \pm 1,34 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Ergebnisse des SNO-Experiments nach NaCl-Zugabe

- $\Phi_{ES}^{SNO} = 2,21_{-0,26}^{+0,31}(stat) \pm 0,10(syst) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\Phi_{CC}^{SNO} = \Phi(\nu_e) = 1,59_{-0,07}^{+0,08}(stat)_{-0,08}^{+0,06}(syst) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $\Phi_{NC}^{SNO} = \Phi_{tot}^{SNO} = 5,09 \pm 0,27(stat) \pm 0,38(syst) \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

SSM-Vorhersage für B^8 -Neutrinos am SNO

$$\Phi_{tot}^{SSM} = 5,82 \pm 1,34 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

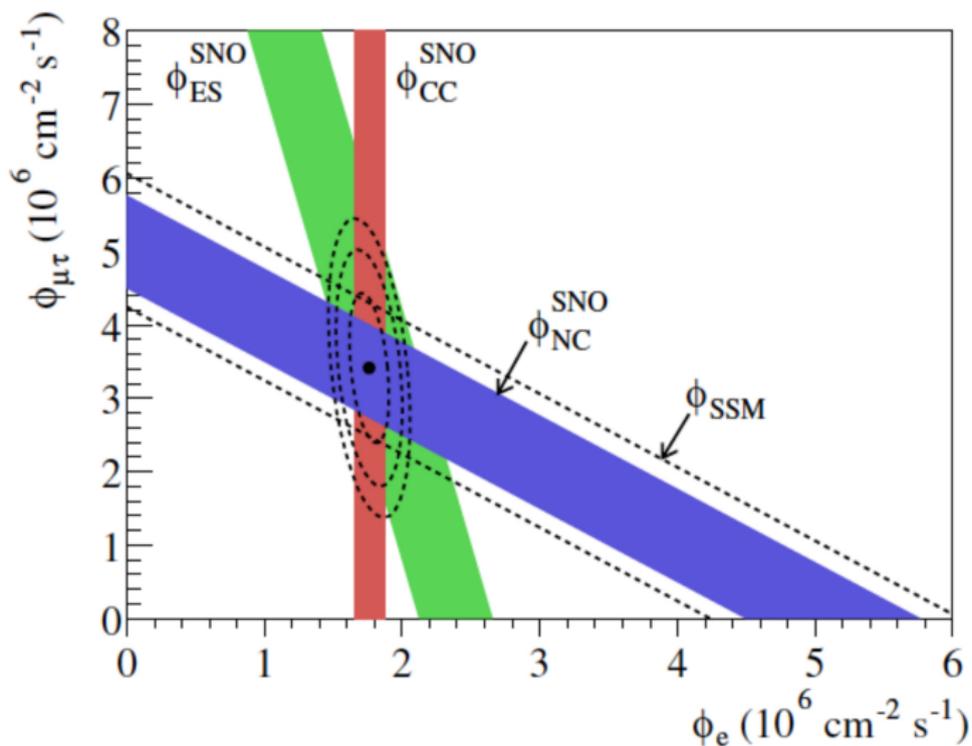


Abb.: CC, NC und ES Messungen am SNO mit reinem D₂O

Zusammenfassung der SNO-Ergebnisse

- $\sim 2/3$ der B^8 -e-Neutrinos mixen zu ν_μ oder ν_τ
- Der gemessene Gesamt-Neutrinofluss ist konsistent mit der SSM-Vorhersage
- Dies löst das solar-neutrino-problem
- Das Standard Sonnen Modell macht korrekte Vorhersagen

$$1\text{mb} = 10^{-27}\text{cm}^2 = 10^{-31}\text{m}^2$$

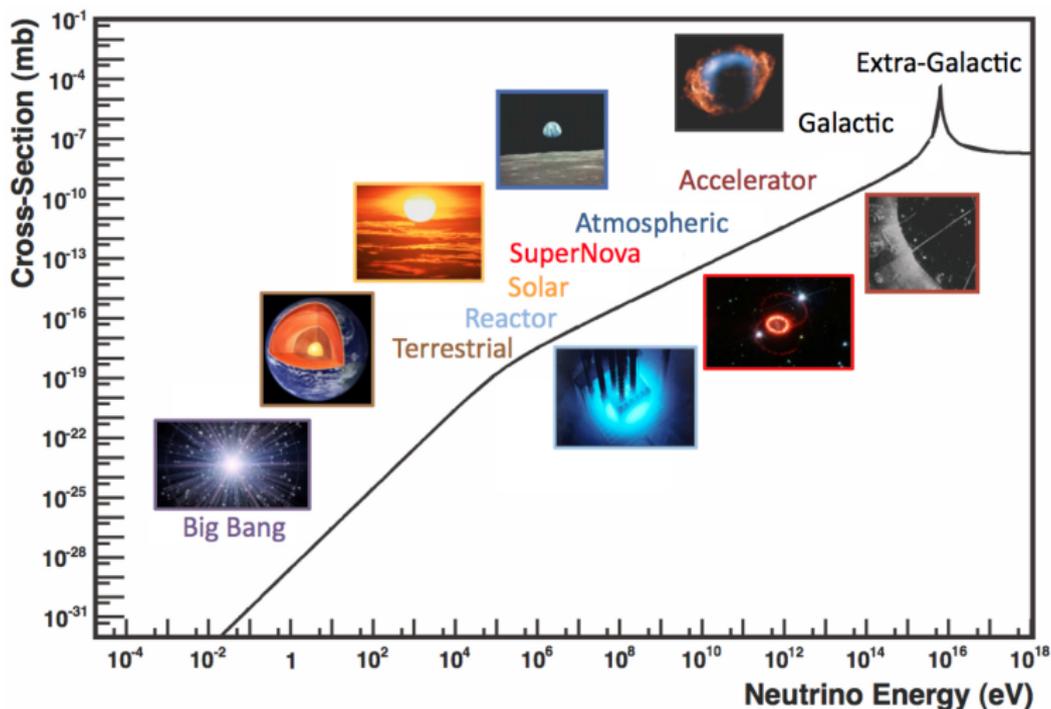


Abb.: Elektroschwacher Wirkungsquerschnitt für $\bar{\nu}_e e^- \rightarrow \bar{\nu}_e e^-$ Streuung an freien Elektronen

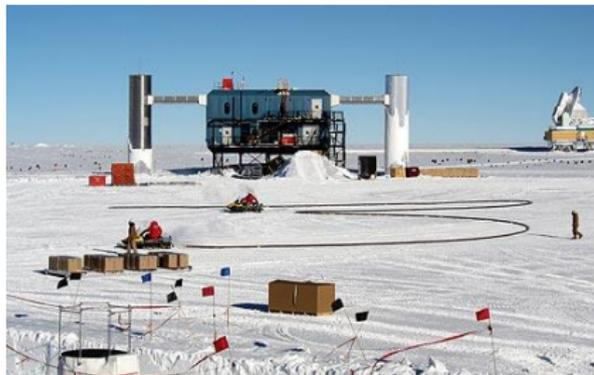
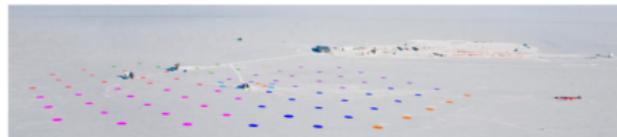
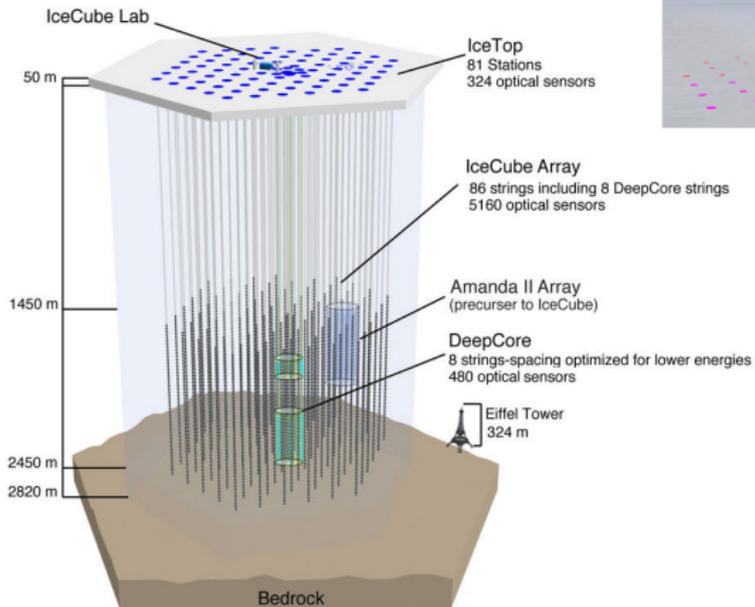


Abb.: Bild der Forschungsstätte

Der IceCube-Detektor

- erstes Experiment, das extragalaktische Neutrinos nachweisen konnte
- 1 km^3 Polareis
- 5160 Photodetektoren
- in Betrieb seit Ende 2010
- konnte bis Ende 2013 bereits 28 Neutrinos von außerhalb unseres Sonnensystems nachweisen



IceCube Aerial View



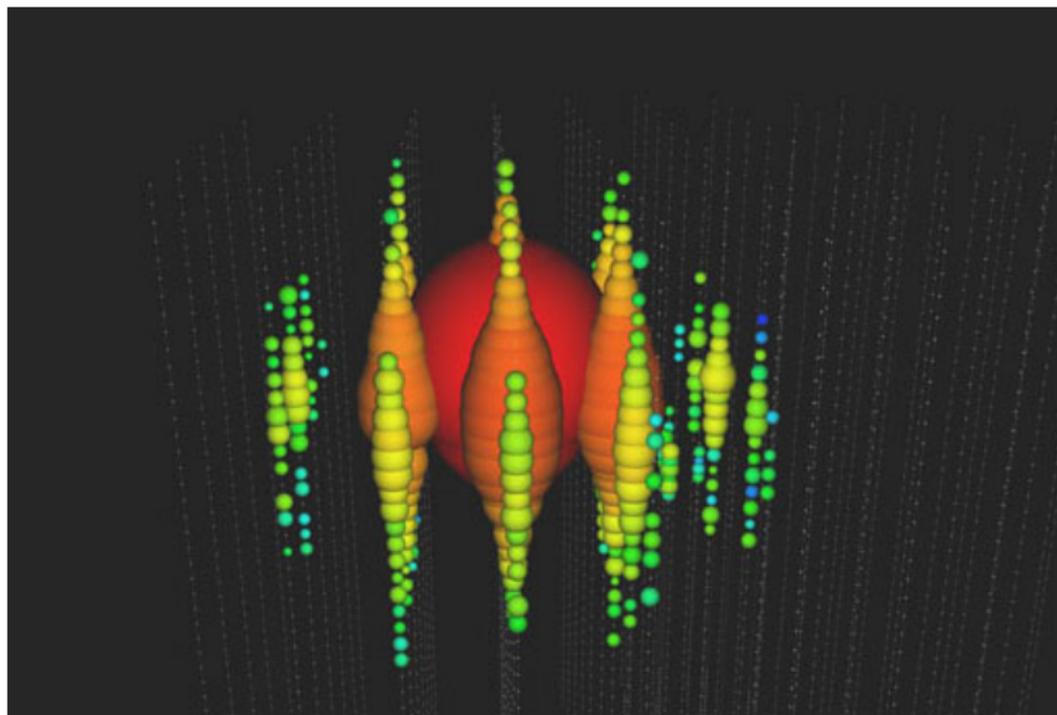
Digital Optical Module (DOM)

Abb.: IceCube Übersicht

Aufgaben von IceCube

- Quellen Hochenergetischer Neutrinos kartografieren
- Indirekte Suche nach Dunkler Materie
- Suche nach sterilen Neutrinos

Abb.: "Big Bird" - mit 2-PeV das energiereichste Neutrinoevent je gemessen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Quellen:

- THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 496:505–526, 1998 March 20
- kernfragen.de/img/kernfragen/lexikon/Elementarteilchen2013.gif
- Formaggio, J., and G. Zeller. “From eV to EeV: Neutrino Cross Sections Across Energy Scales.” *Reviews of Modern Physics* 84.3 (2012): 1307–1341. © 2012 American Physical Society
- Warwick Universität; Vorlesung PX435 Neutrino Physics
- spektrum.de/alias/icecube/wir-waren-absolut-isoliert-in-voelliger-dunkelheit-und-extremer-kaelte/1053139
- Wikipedia (u.a. Neutrino, Neutrinooszillation, Detektoren)
- SLAC Summer Institute on Particle Physics (SSI04), Aug. 2-13, 2004
Results from the Sudbury Neutrino Observatory D. Waller for the SNO Collaboration