Fakultätskolloquium 26 Mai 1997

Auf der Suche nach den fehlenden Sonnenneutrinos

- Neutrinoerzeugung in der Sonne
- Aktueller Stand der Experimente
- Die Rätsel der fehlenden Neutrinos
- Lösungsansatz: Neutrino–Oszillationen
- Künftige experimentelle Überprüfung

J. A. Crittenden

Physikalisches Institut
Universität Bonn

Neutrinos

Eigenschaften im Standardmodell der Teilchenphysik

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Ausschließlich *schwache* Wechselwirkungen

Freie Weglänge für 1 MeV Neutrinos in Eisen: 10^{11} km

Masselos: $m_{\nu_e} < 5$ eV $m_{\nu_\mu} < 160$ keV $m_{\nu_\tau} < 30$ MeV

Strenge Erhaltung der e–, μ–, τ–Quantenzahlen

Bisher verwendete Nachweisreaktionen

- Inverser β–Zerfall

$$\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\mathrm{Ar}$$
$$\nu_e + {}^{71}\mathrm{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\mathrm{Ge}$$

z.B. 0.5 Reaktionen pro Tag in 600 Tonnen flüssigem C_2Cl_4

- Elastische Streuung an Elektronen

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

Echtzeit–Aufnahme vom Čerenkov-Licht des Endzustandselektrons
$\Longrightarrow$ Energie und Richtung der Endzustandselektronen meßbar

Erhebliche Maßnahmen gegen Höhenstrahlungsuntergrund erforderlich!

Die Reaktionsketten im Sonnenmodell

H. Bethe 1939: Kernfusion als Energiequelle der Sonne

Das Sonnenmodell (Temperatur– und Dichteprofil)

zusammen mit dem Standardmodell der Teilchenphysik

liefert Vorhersagen für den Sonnenneutrinofluss auf der Erde

		Fluss $\mathrm{cm^{-2}\,s^{-1}}$
$p + p \rightarrow {}^2H + e^+ + \nu_e$	pp	5.91×10^{11}
oder		
$p + e^- + p \rightarrow {}^2H + \nu_e$	pep	0.01×10^{11}
$\Rightarrow {}^2H + p \rightarrow {}^3He + \gamma$		
$\Rightarrow {}^3He + {}^3He \rightarrow \alpha + 2p$		
oder		
${}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma$		
$\Rightarrow {}^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \nu_e$	^{7}Be	5.2×10^6
oder		
${}^7Be + p \rightarrow {}^8B + \gamma$		
$\Rightarrow {}^8B \rightarrow {}^8Be^* + e^+ + \nu_e$	^{8}B	6.6×10^6

Die vier Experimente

- Homestake-Bergwerk, Minnesota, USA
  (1970–1992) Ray Davis, BNL

  615 Tonnen C_2Cl_4 $\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow e^- + {}^{37}Ar$
  Rate: $\simeq 0.5$/Tag $E_\nu > 0.8$ MeV

- GALLEX, Gran–Sasso–Tunnel, Italien
  (1991–heute)

  30 Tonnen Gallium $\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow e^- + {}^{71}Ge$
  Rate: $\simeq 1$/Tag $E_\nu > 0.2$ MeV

- SAGE, Baksan–Tal (Bergwerk), Rußland
  (1990–heute)

  60 Tonnen Gallium $\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow e^- + {}^{71}Ge$
  Rate: $\simeq 2$/Tag $E_\nu > 0.2$ MeV

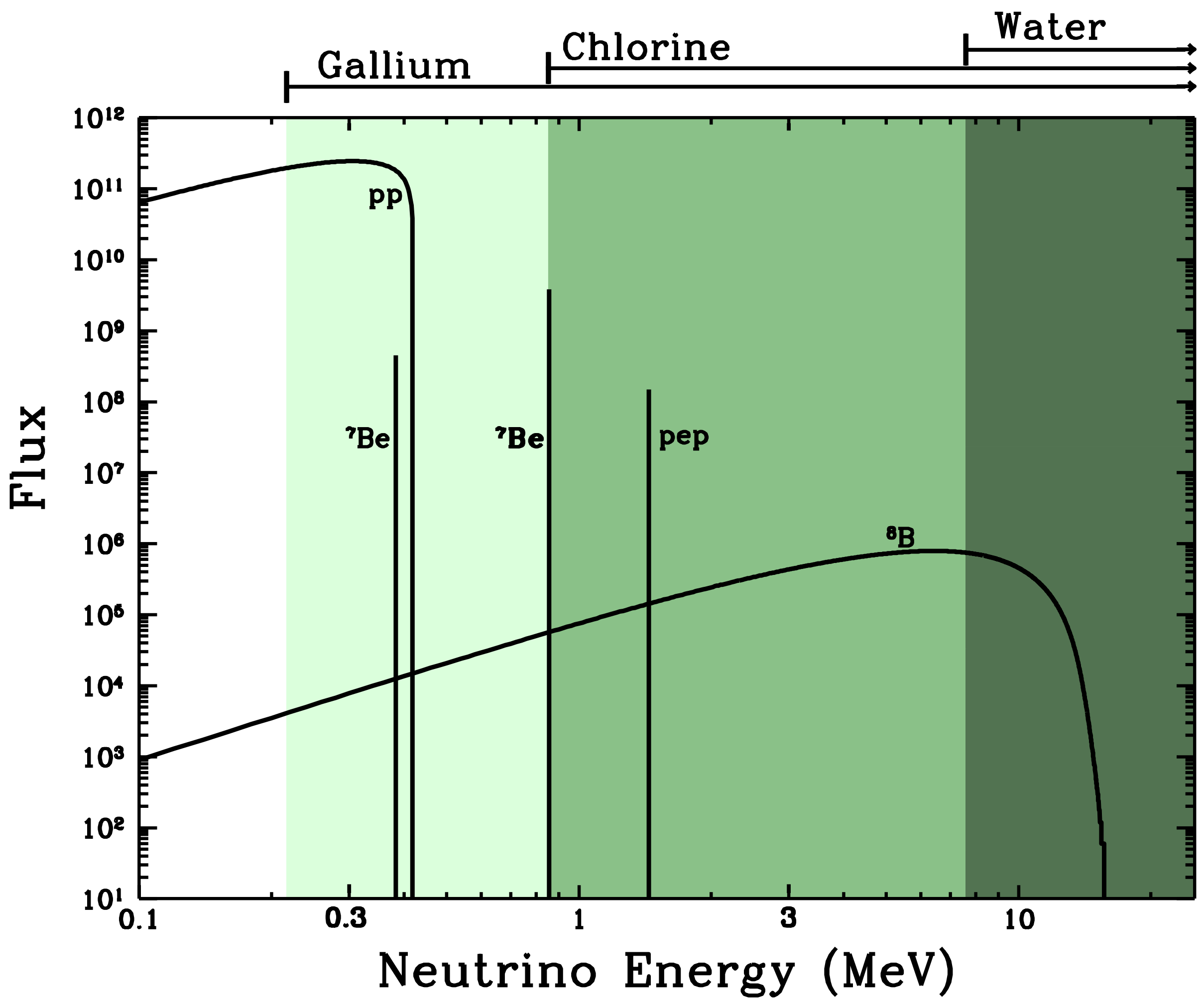
- Kamiokande (Bergwerk), Japan
  (1986–1994)

  3000 Tonnen H_2O $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$
  Rate: $\simeq 0.5$/Tag $E_\nu > 7$ MeV

$\Longrightarrow$ Korrelation mit Sonnenrichtung beobachtet

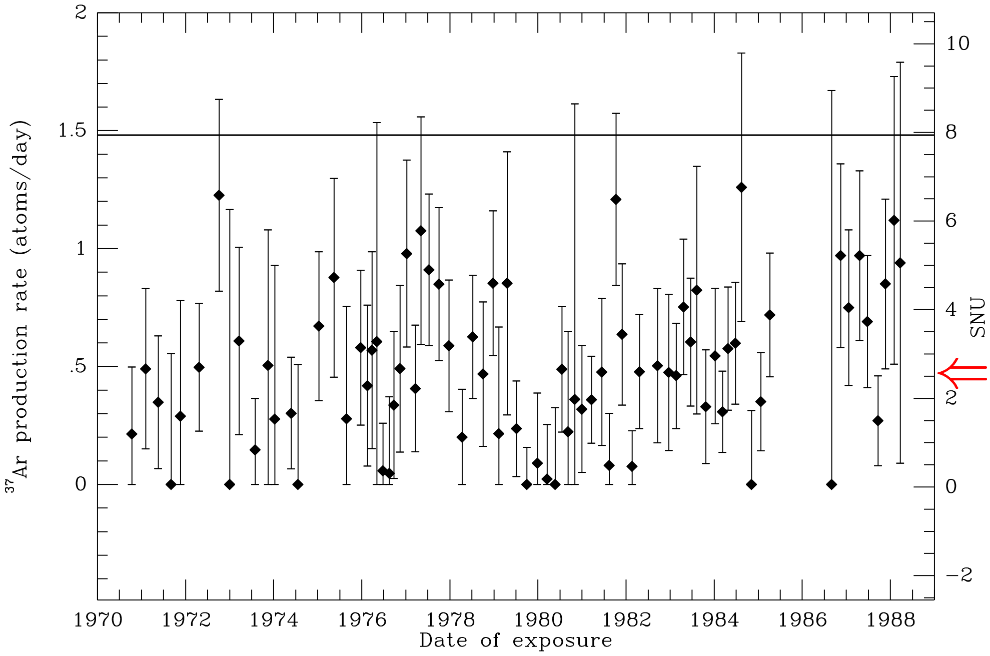
Neutrinos von Supernova 1987A nachgewiesen !!

Vorhergesagter Fluss der Sonnenneutrinos auf der Erde



(Einheiten: $cm^{-2}\ s^{-1}$ bzw. $cm^{-2}\ s^{-1}\ MeV^{-1}$)

Das ^{37}Cl–Experiment



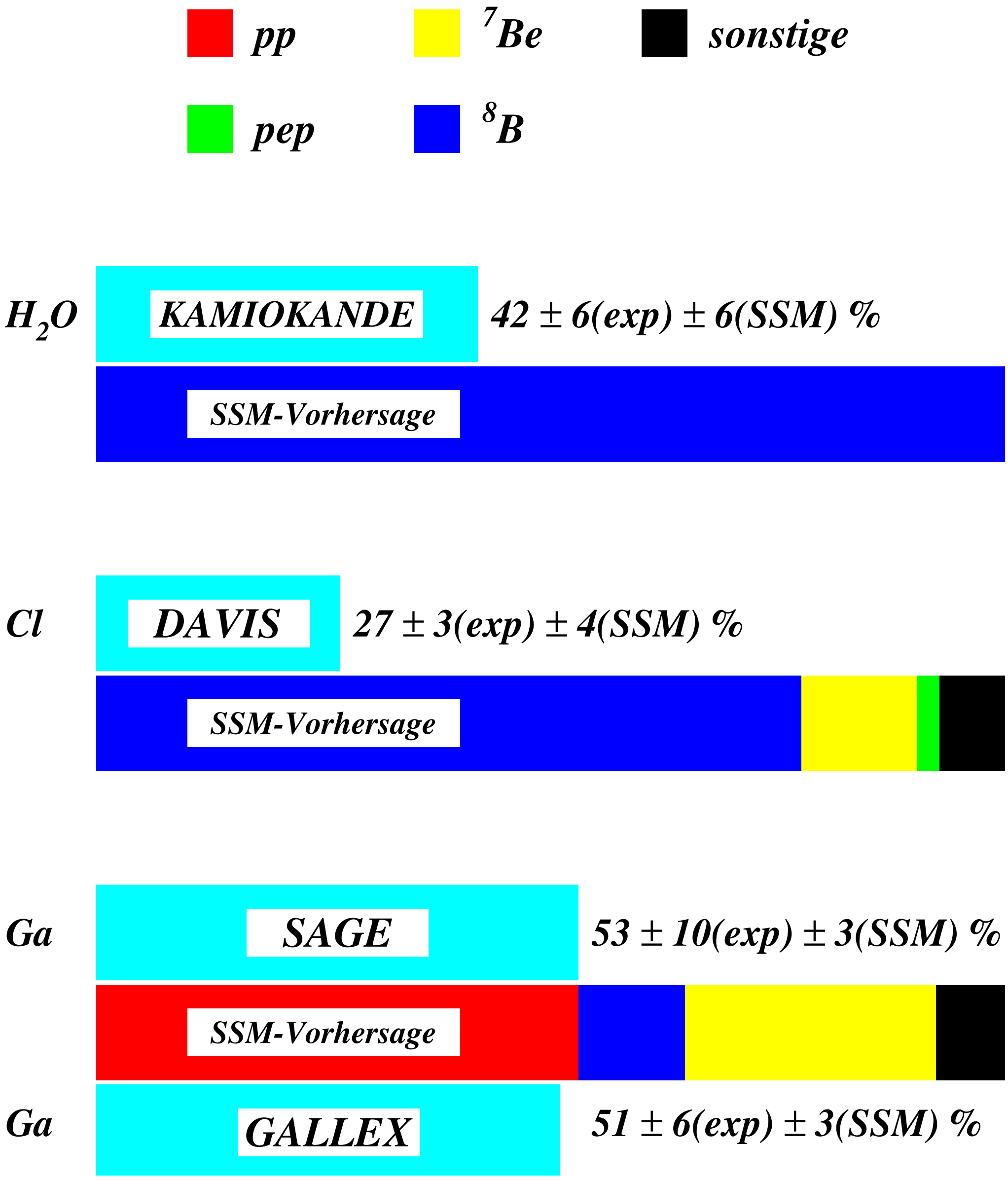
2.55
±0.25
SNU

SNU = Solar Neutrino Unit

10^{-36} Reaktionen pro Atom pro Sekunde

Experimenteller Status

Standard-Sonnenmodell-Vorhersage (SSM)



Die Rätsel der fehlenden Neutrinos

- *Alle* Experimente messen ein signifikantes Defizit.
- Kamiokande und das Chlor–Experiment unstimmig.

  Beide hauptsächlich empfindlich auf ^{8}B–ν's
  aber mit unterschiedlichen Energieschwellen

- Die Gallium–Experimente:

  Wo sind die ^{7}Be–Neutrinos geblieben?

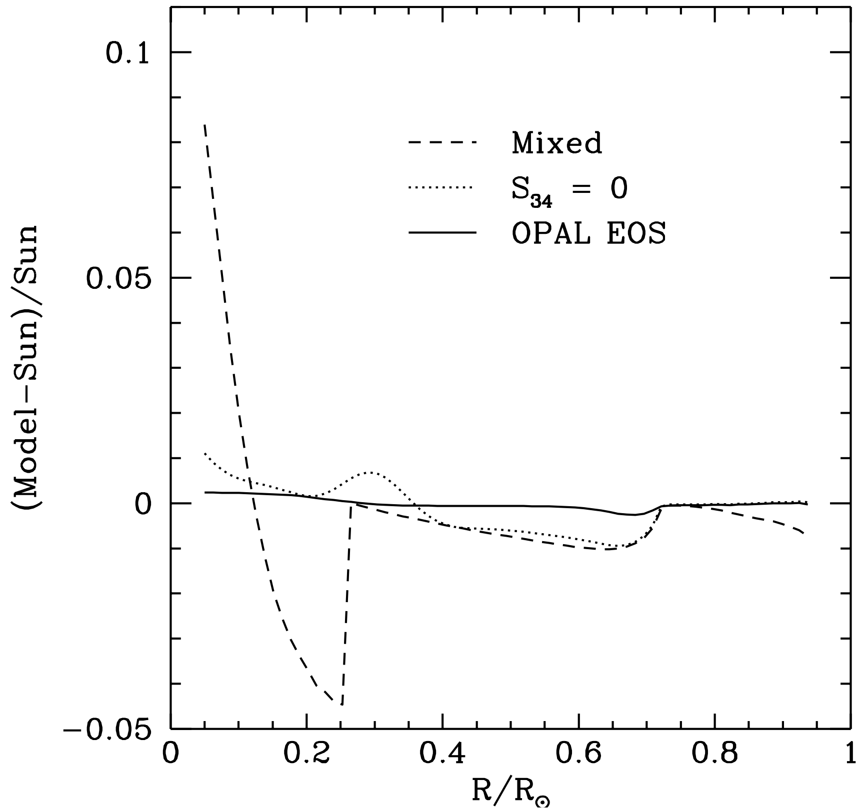
Sind die Vorhersagen
der Erzeugungsraten falsch (Sonnenmodell)?

oder

Geschieht den Neutrinos etwas zwischen
Erzeugung und Nachweis?

Zuverlässigkeit des Sonnenmodells

Helioseismologische Messungen
der
Schallgeschwindigkeit innerhalb der Sonne
(1996)



Diese Messungen prüfen erstmals die vorhergesagten
Temperatur– und Dichteprofile des Sonnenmodells
mit einer Genauigkeit von 0.2% !!

Lösungsansatz: Neutrino–Oszillationen

Welche Änderungen im
Standardmodell der Elementarteilchen
können diese Effekte erklären?

Pontecorvo (1958)

Schwachen Eigenzustände
= Mischungen der Masseneigenzustände

$$\nu_e = +\nu_1 \cos\Theta + \nu_2 \sin\Theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin\Theta + \nu_2 \cos\Theta$$

Wenn $m_1 \neq m_2$, dann unterschiedliche Geschwindigkeiten

Überlebenswahrscheinlichkeit

$$\langle \nu_e | \nu_e(x) \rangle \propto 1 - F(\Theta) \sin^2 2\pi x / L$$

mit

$$L \propto \frac{E_\nu}{m_1^2 - m_2^2} \equiv \frac{E_\nu}{\Delta m^2}$$

$\Longrightarrow$ Empfindlich auf kleine Massenunterschiede

nur über lange Distanzen

Sonne–Erde 10^8 km, $E_\nu \simeq 1$ MeV $\rightarrow \Delta m^2 \gtrsim 10^{-11}$ eV^2

Nicht zugänglich für erdgebundene Experimente !!

Der MSW–Effekt

Wolfenstein (1978)

Oszillationen werden in Materie durch unterschiedliche Reaktionswahrscheinlichkeiten für $\nu_{\mathrm{e}}, \nu_\mu$ verändert

Mikheev und Smirnov (1984)

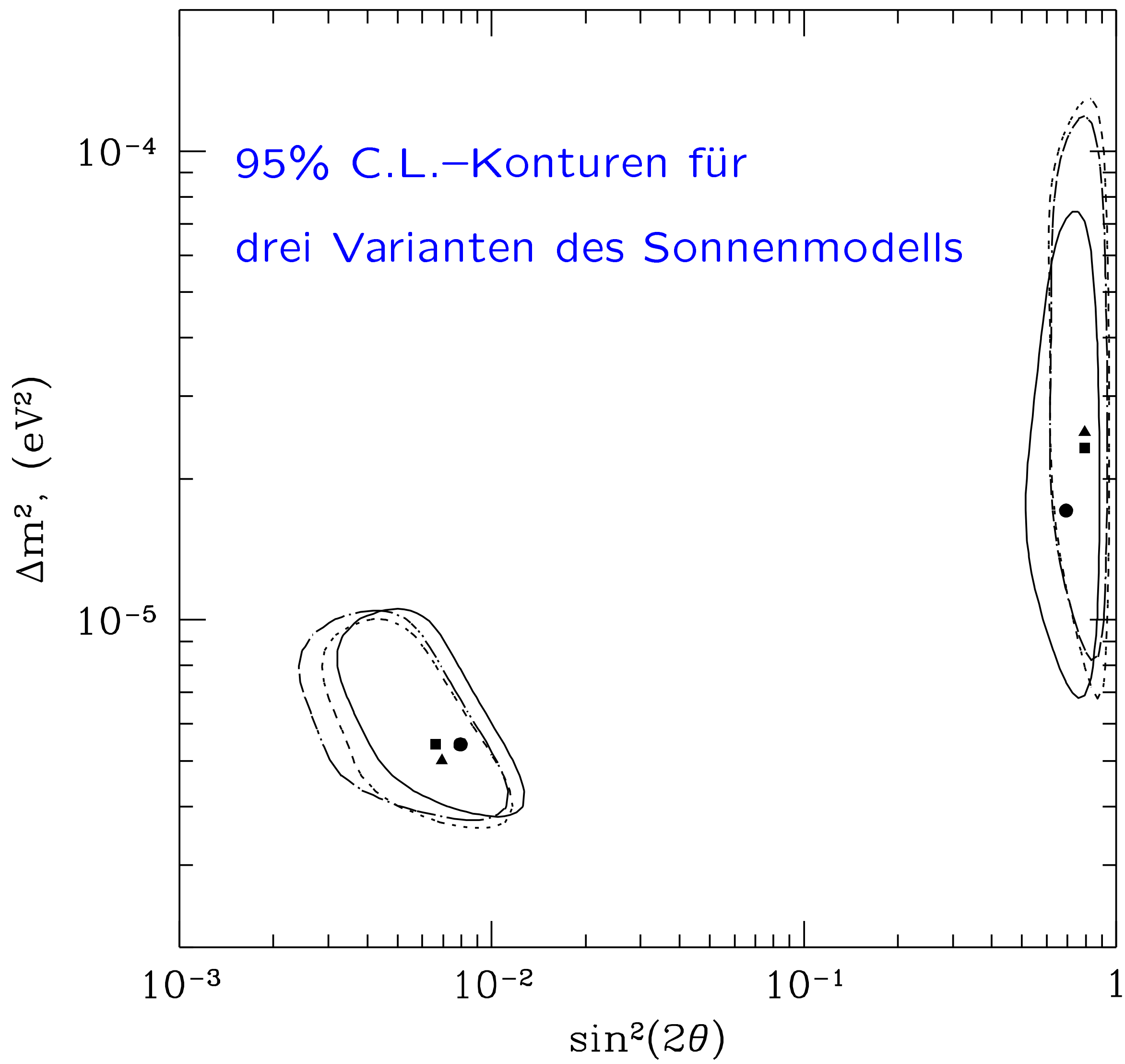
Resonanzartige Verstärkung der Oszillationen
bei bestimmten Verhältnissen
von Elektronendichte, Δm^2, und $\sin\Theta$

Kann man alle experimentellen Beobachtungen

mit nur zwei Parametern erklären ??

Erlaubte Bereiche der Oszillations–Parameter

Minimierung (MSW-Vorhersagen – Messergebnisse)
ergibt zwei lokale Minima
(Oszillationen in der Sonne)



Geringer Einfluss der Unsicherheiten im Sonnenmodell

Überprüfung des Lösungsansatzes

- Vorhersagen für die Neutrinoflüsse auf der Erde

- Erwartete Formen der Energiespektren auf der Erde

- Werden Zeitabhängigkeiten der Flüsse beobachtet?
  MSW–Effekt in der Erde
  $\Longrightarrow$ Tag/Nacht–Unterschiede

- Werden andere Neutrinotypen als
  Elektron-Neutrinos auf der Erde beobachtet?

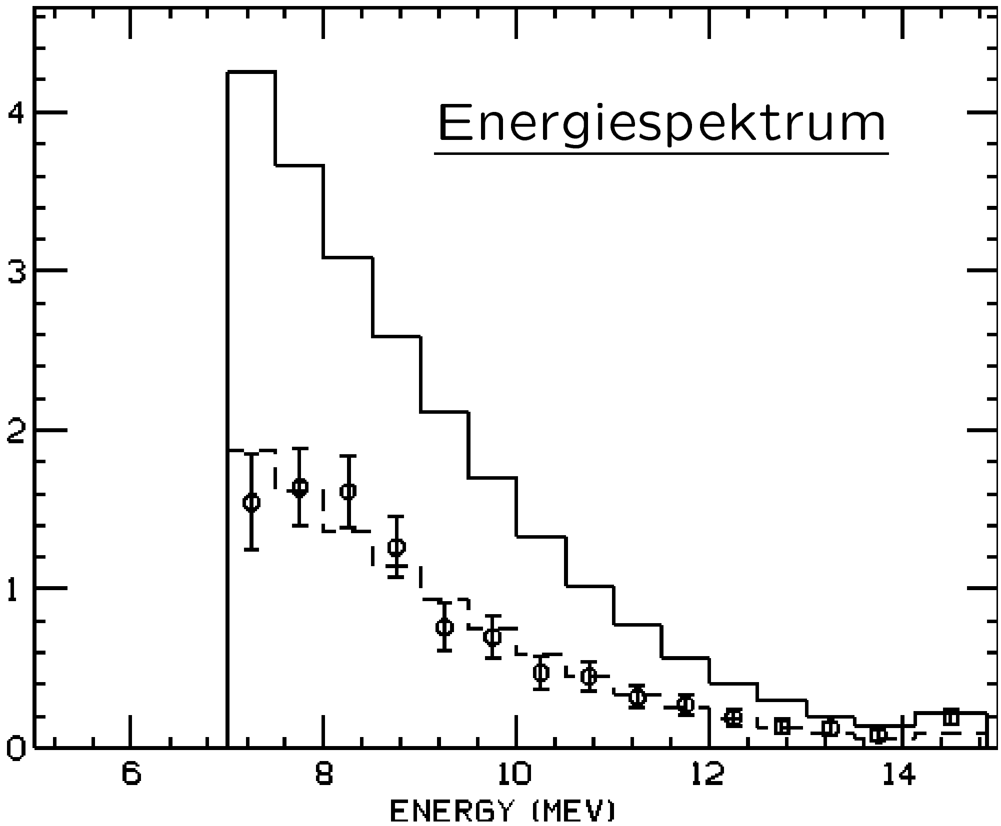
Resultate von Super-Kamiokande

50.000 Tonnen reines H_2O Rate: 10/Tag

Datennahme seit April 1996

Vorläufige Ergebnisse bestätigen Resultate

von Kamiokande (2000 Tage Laufzeit)



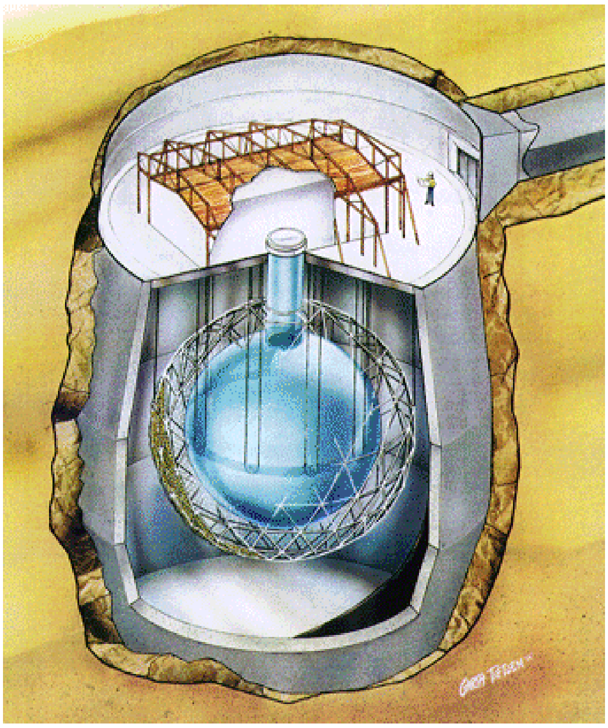
Vorhandene Statistik von $\simeq$ 1000 Ereignissen

zeigt keinen signifikanten Tag/Nacht–Unterschied

Künftige Messungen am Sudbury Neutrino Observatory (Walden, Canada)

1000 Tonnen D_2O

Datennahme ab Ende 1997



$\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$ Rate: $\simeq 30$/Tag $E_\nu > 5$ MeV

$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$ Rate: $\simeq 10$/Tag $E_\nu > 2$ MeV

Zusammenfassung

- Das Neutrino–Defizit jetzt mehrfach bestätigt

- Neue Messungen der Sonnenstruktur unterstützen das Sonnenmodell

$\Longrightarrow$ Evidenz für das Verschwinden
der Elektron–Neutrinos
zwischen
Erzeugung und Nachweis

Die neuen Experimente sollen Aufschluß
über Neutrino–Oszillationen
(d.h. Massen der Neutrinos)
noch in diesem Jahrtausend geben

Neutrino–Flüsse