

Astronomie mit Neutrinos: Von den Anfängen bis zum Physik-Nobelpreis 2002

W. Hampel

Physik am Samstagmorgen
Schülertreffen
am Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg
23. November 2002



Information von astronomischen Objekten

Im Prinzip zwei Möglichkeiten:

- elektromagnetische Strahlung

optische Astronomie

Radioastronomie

Infrarot-Astronomie

UV-Astronomie

Röntgen-Astronomie

γ -Astronomie

Detektoren
auf
Satelliten

(außer Hochenergie γ -Astronomie)

- Teilchenstrahlung

geladene Teilchen (p, α , e) Problem: Magnetfelder

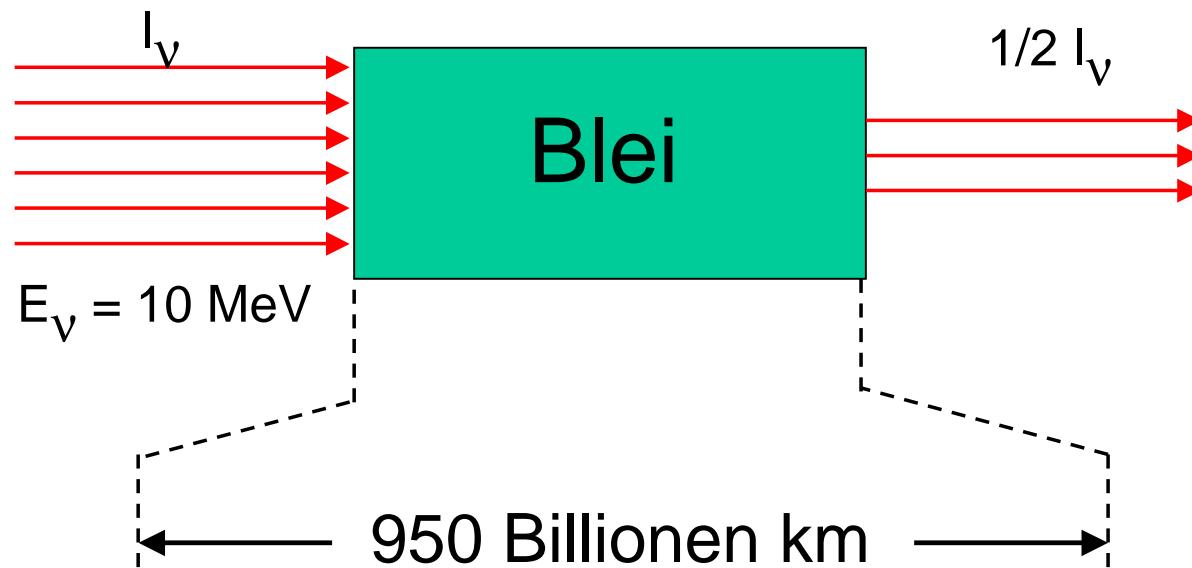
ungeladene Teilchen (ν)

Hier:

Astronomie mit Neutrinos ?

Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino (ν)

- nur sehr kleine Masse
 - breiten sich mit fast Lichtgeschwindigkeit aus
 - keine elektrische Ladung
 - keine elektromagnetische Wechselwirkung
 - unterliegen nicht der Kernkraft
- extrem großes Durchdringungsvermögen

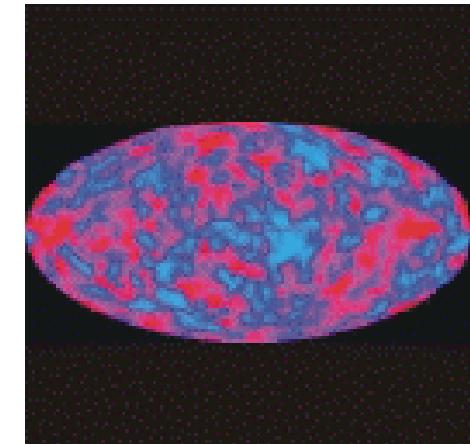


Wo entstehen Neutrinos ?

● Natürliche Neutrinoquellen

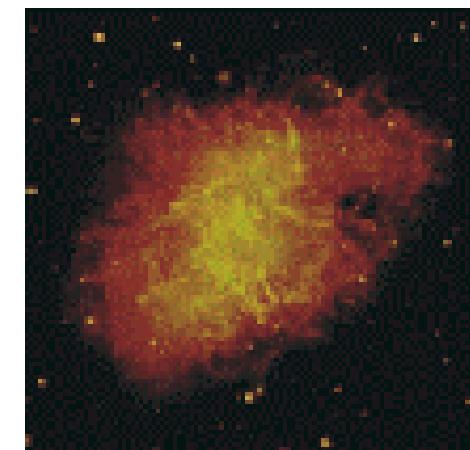
Urknall

Die Neutrinos, die beim Urknall erzeugt wurden (die sogenannten kosmologischen Neutrinos), sind die häufigsten Teilchen im Universum



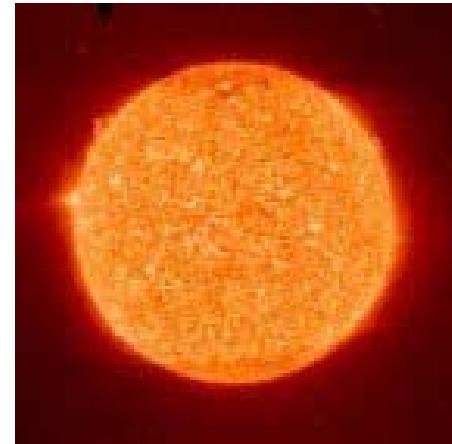
Supernovae

Sterne, die wesentlich massereicher sind als die Sonne explodieren am Ende ihres Lebens als Supernova. Dabei wird innerhalb von einigen Sekunden eine riesige Anzahl von Neutrinos erzeugt.



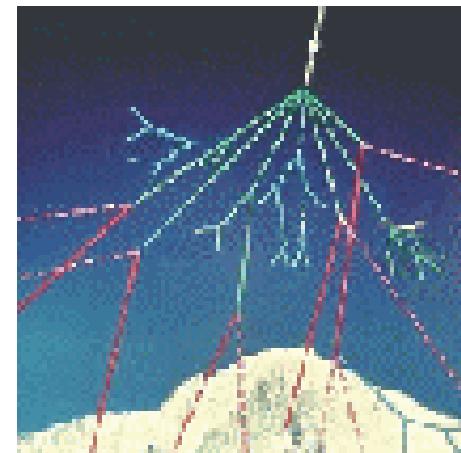
Sonne und Sterne

Bei der Kernfusion im Sonneninneren (wie auch in allen anderen Sternen) entstehen Neutrinos



Erdatmosphäre

In den Kernreaktionen, die Teilchen der Kosmischen Strahlung beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre auslösen, werden Neutrinos erzeugt



Erde

Bei einer bestimmten Sorte von Zerfällen radioaktiver Elemente (β -Zerfälle) im Erdinneren entstehen Neutrinos



● Künstliche Neutrinoquellen

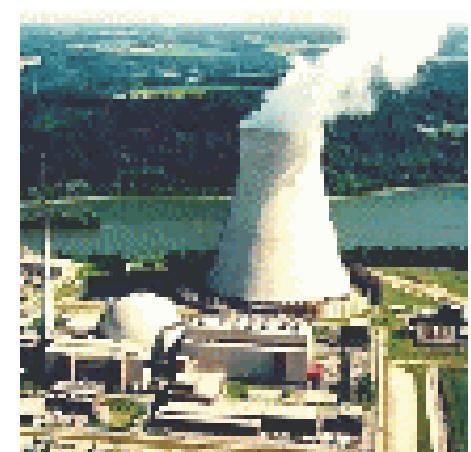
Teilchen-Beschleuniger

Mit großen Teilchenbeschleunigern kann man sehr intensive Neutrinostrahlen herstellen



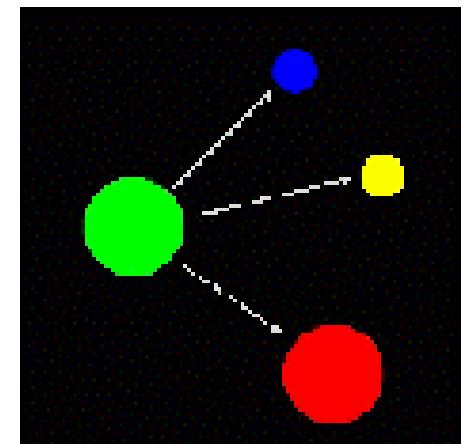
Kernreaktoren

Bei der Kernspaltung in Reaktoren werden ebenfalls Neutrinos erzeugt



Künstliche radioaktive Quellen

Bei einer bestimmten Sorte radioaktiver Quellen (sogenannte β -Strahler) entsteht bei jedem Zerfall ein Neutrino



Wie produziert die Sonne ihre Energie ?

- Chemische Energie

Sonne aus Steinkohle $\rightarrow \sim 5000$ Jahre

- Gravitations-Energie

Sonne zieht sich zusammen (Helmholtz, Kelvin)
 $\rightarrow \sim 30$ Millionen Jahre

- Kernfusion

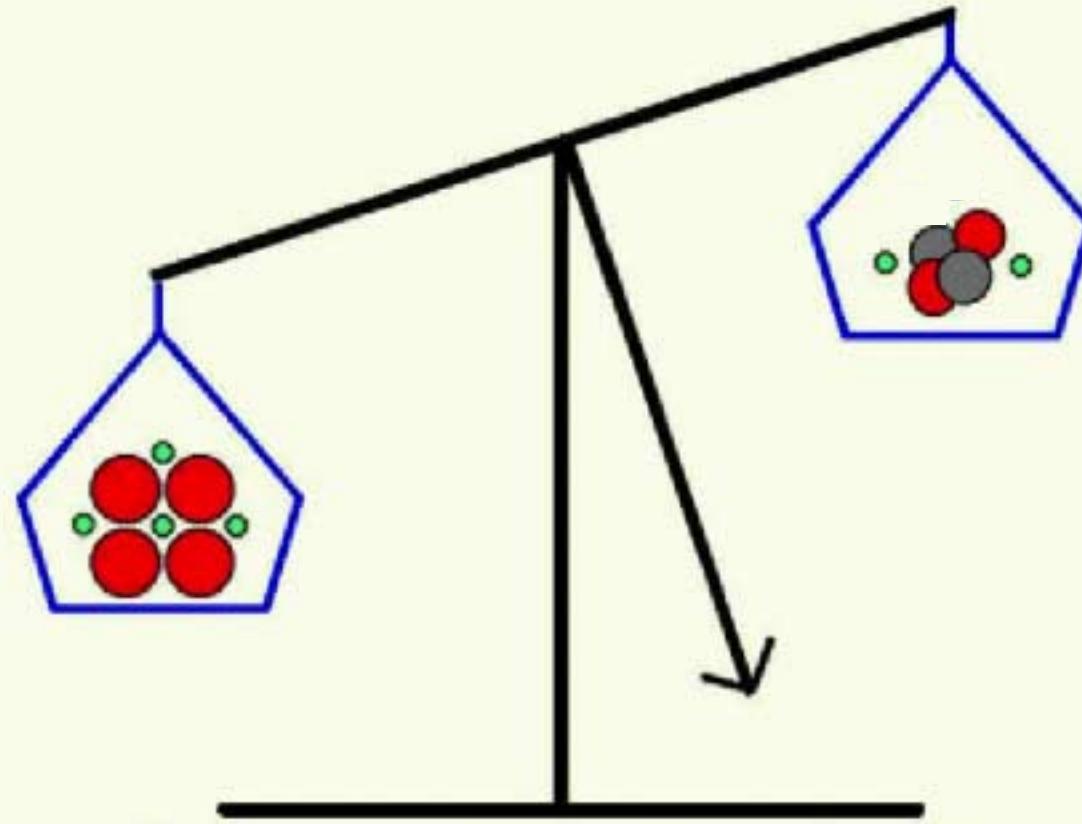
Umwandlung von Wasserstoff in Helium (Bethe,
v. Weizsäcker) $\rightarrow \sim 10$ Milliarden Jahre

Einstein: $E = m \times c^2$

$L_{\odot} \sim 4 \times 10^{23} \text{ kW für } 10^{10} \text{ Jahre}$
 $\equiv 1.3 \times 10^{30} \text{ g}$

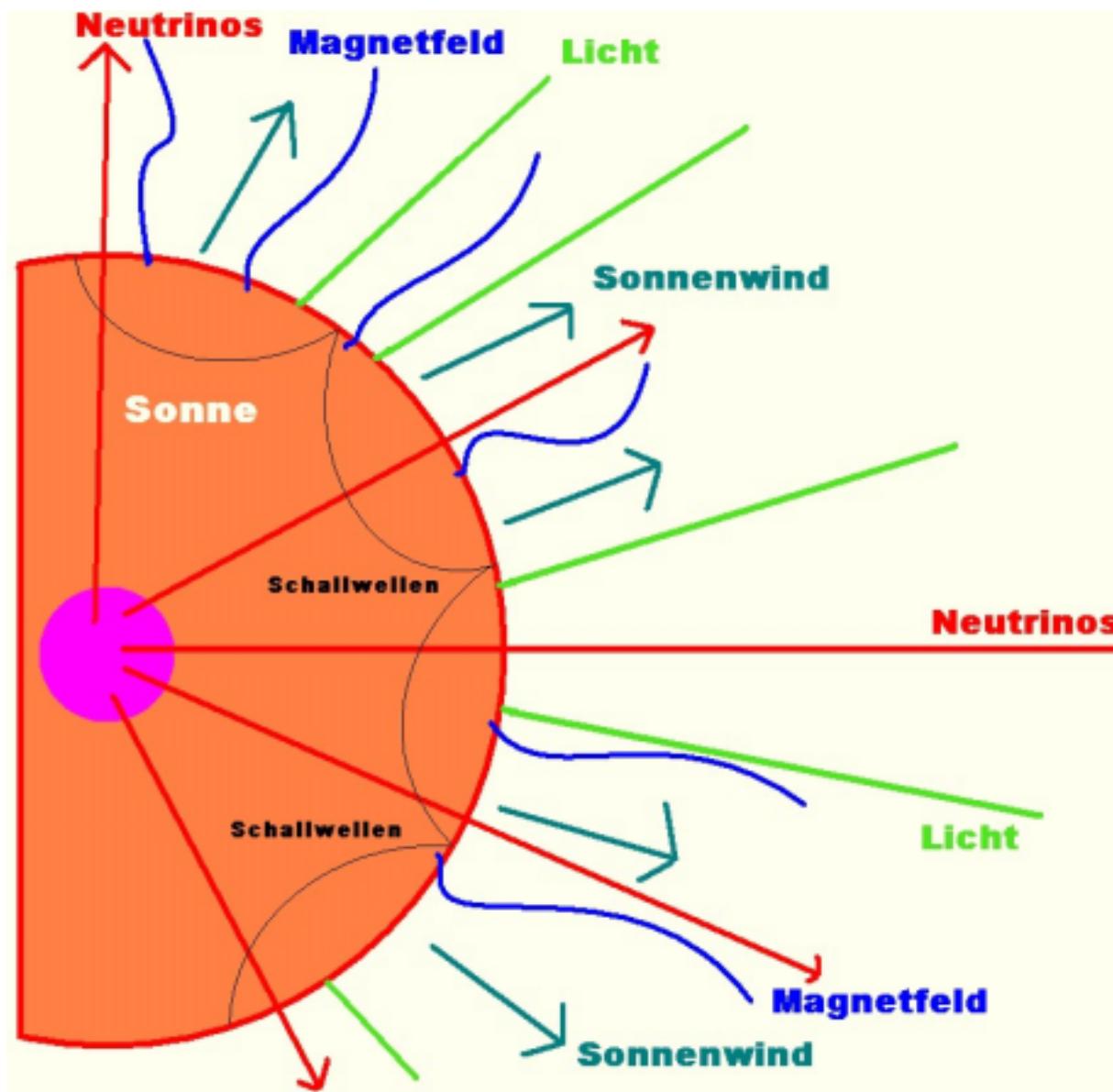
$M_{\odot} = 2 \times 10^{33} \text{ g} \rightarrow 0.065\%$

Einstein: $E = m \times c^2$

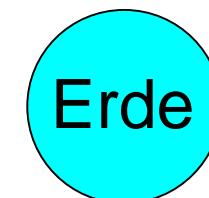


0.7 % leichter als

Informationen von der Sonne

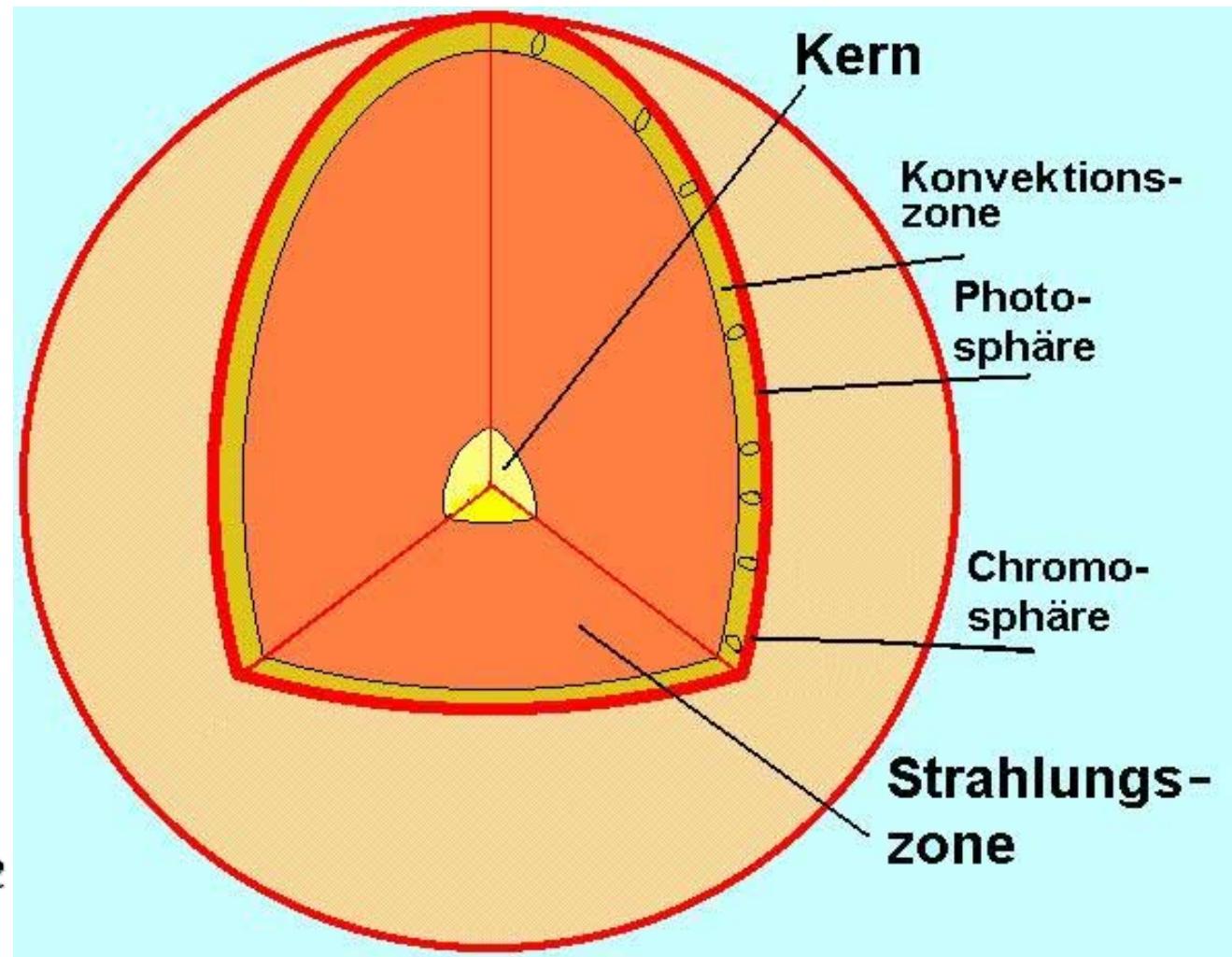


- Elektromagnetische Strahlung (Licht, Wärme)
- Sonnenwind (Teilchen)
- Magnetfelder
- Schallwellen
- Neutrinos



Das Standard-Sonnenmodell der Astrophysik

Ein wesentliches Ergebnis: Die im Zentrum erzeugte Energie (in Form von Lichtquanten) braucht etwa 100.000 Jahre, bis sie die Oberfläche der Sonne erreicht und von hier als sichtbares Licht in den Welt- raum abgestrahlt wird !

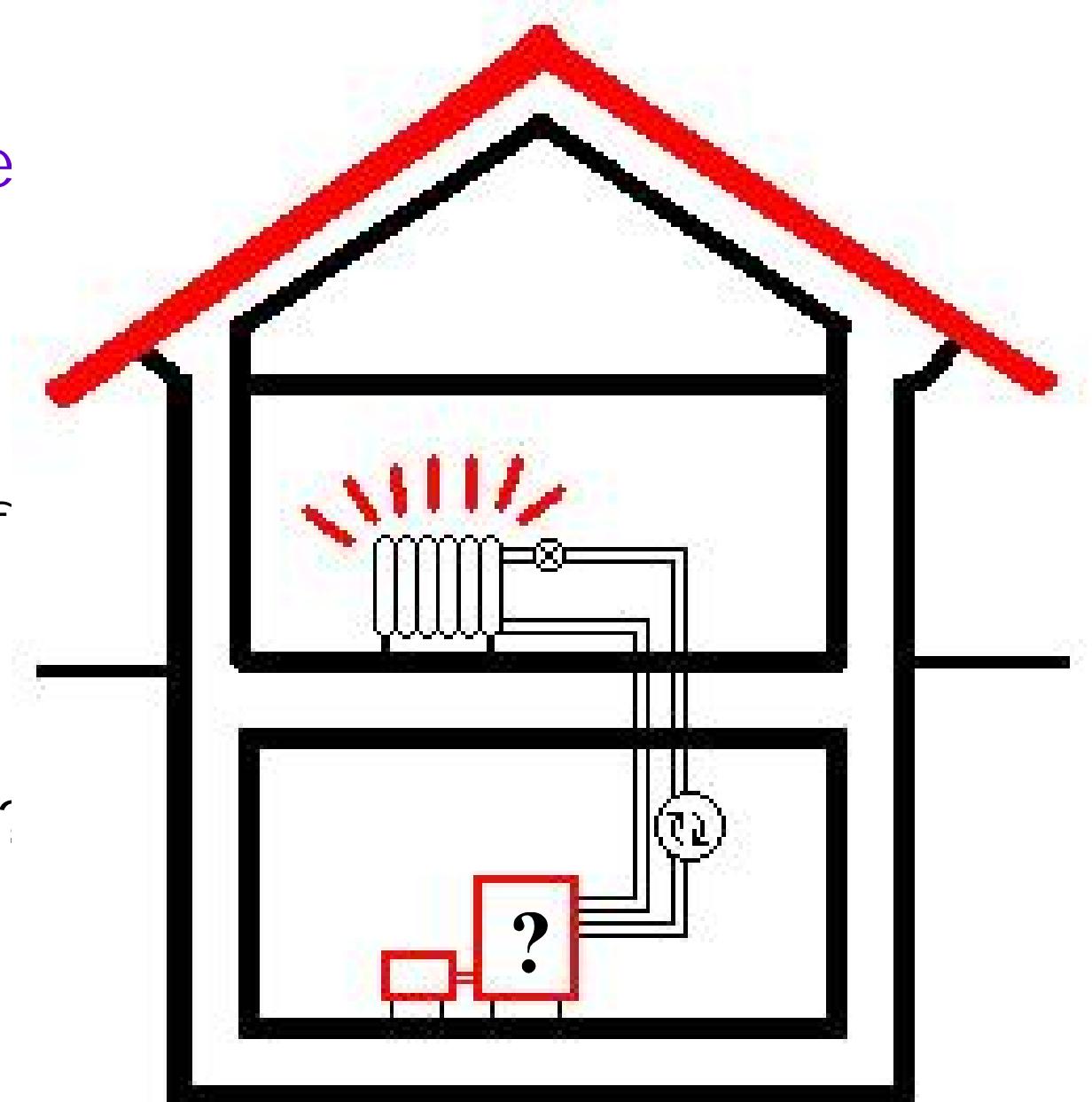


Wie erzeugt die Sonne ihre Energie ?

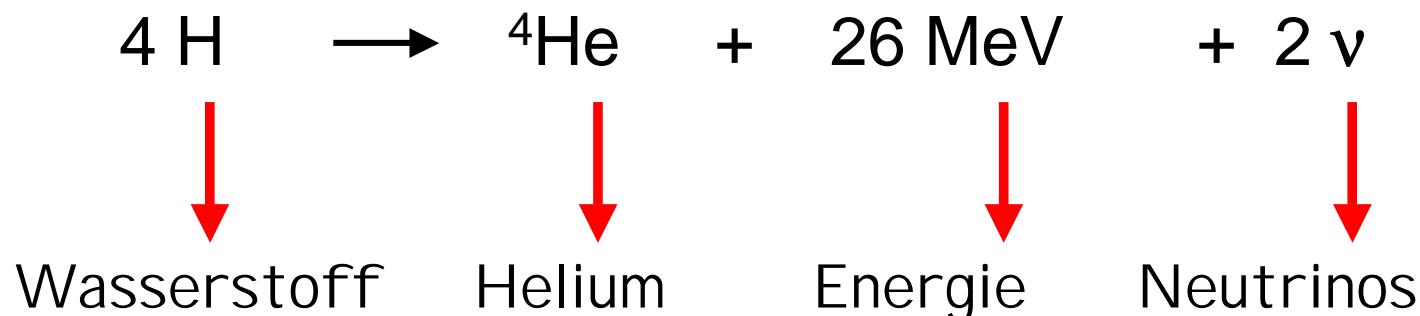
Vergleich:
Heizung eines Hauses

2 Fragen:

- (1) Welcher Brennstof
(Kohle, Öl, Gas..) ?
- (2) Ist der Brenner
gerade in Betrieb ?



Wasserstoff-Fusion



→ 1 Neutrino pro 13 MeV Energieerzeugung

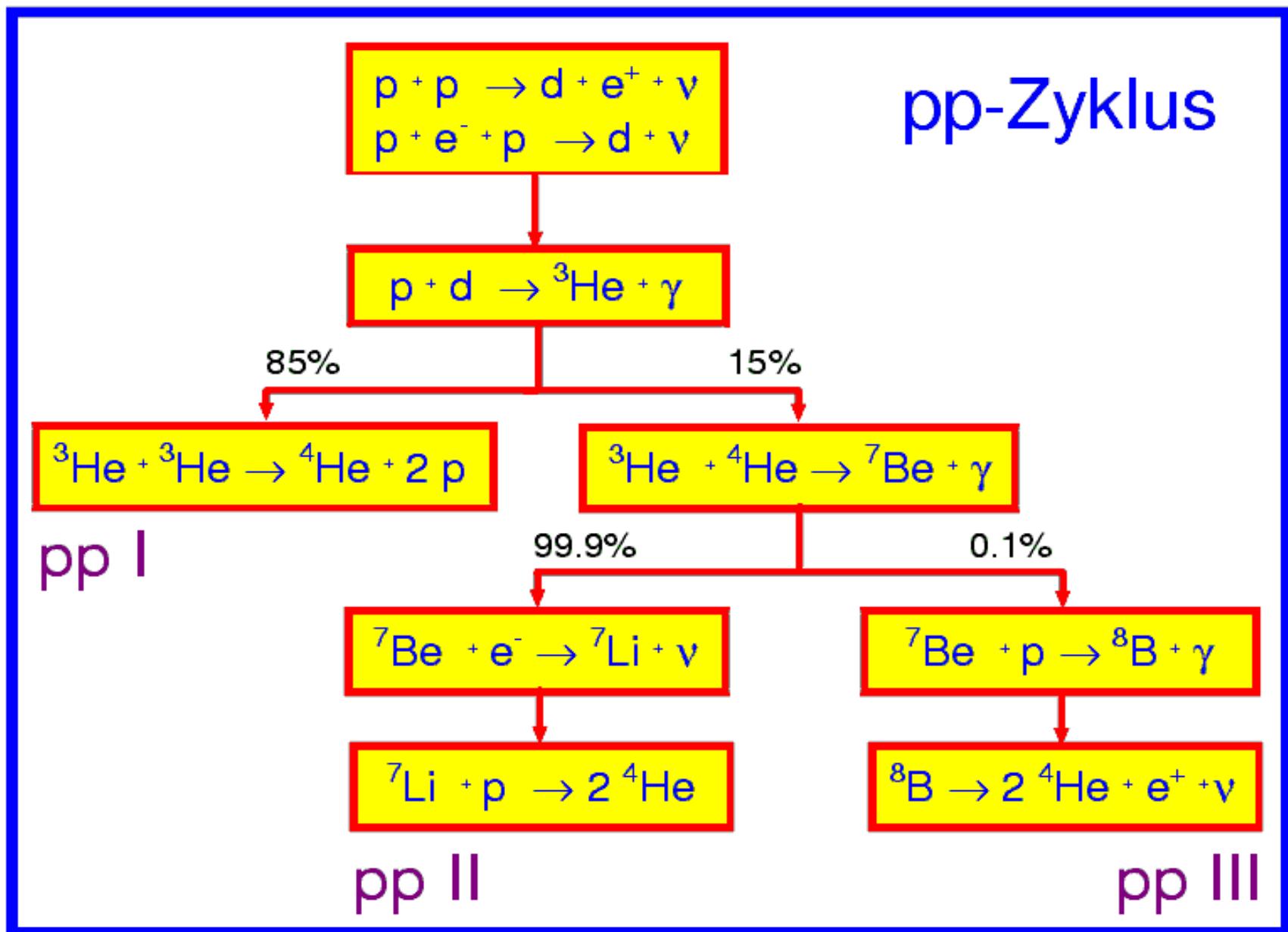
Fluss der Sonnen-Neutrinos am Ort der Erde:

$$\Phi_\nu = \frac{L_{\text{Sonne}}}{13 \text{ MeV} \cdot 4\pi R^2}$$
$$= 65 \text{ Milliarden } / \text{cm}^2 \text{ sec}$$

$$L_{\text{Sonne}} = 4 \cdot 10^{23} \text{ kW} \quad R = 1 \text{ AE} = 150 \text{ Millionen km}$$

$$1 \text{ Kilowatt-Stunde} = 2,3 \times 10^{19} \text{ MeV}$$

Reaktionen des Proton-Proton-Zyklus in der Sonne

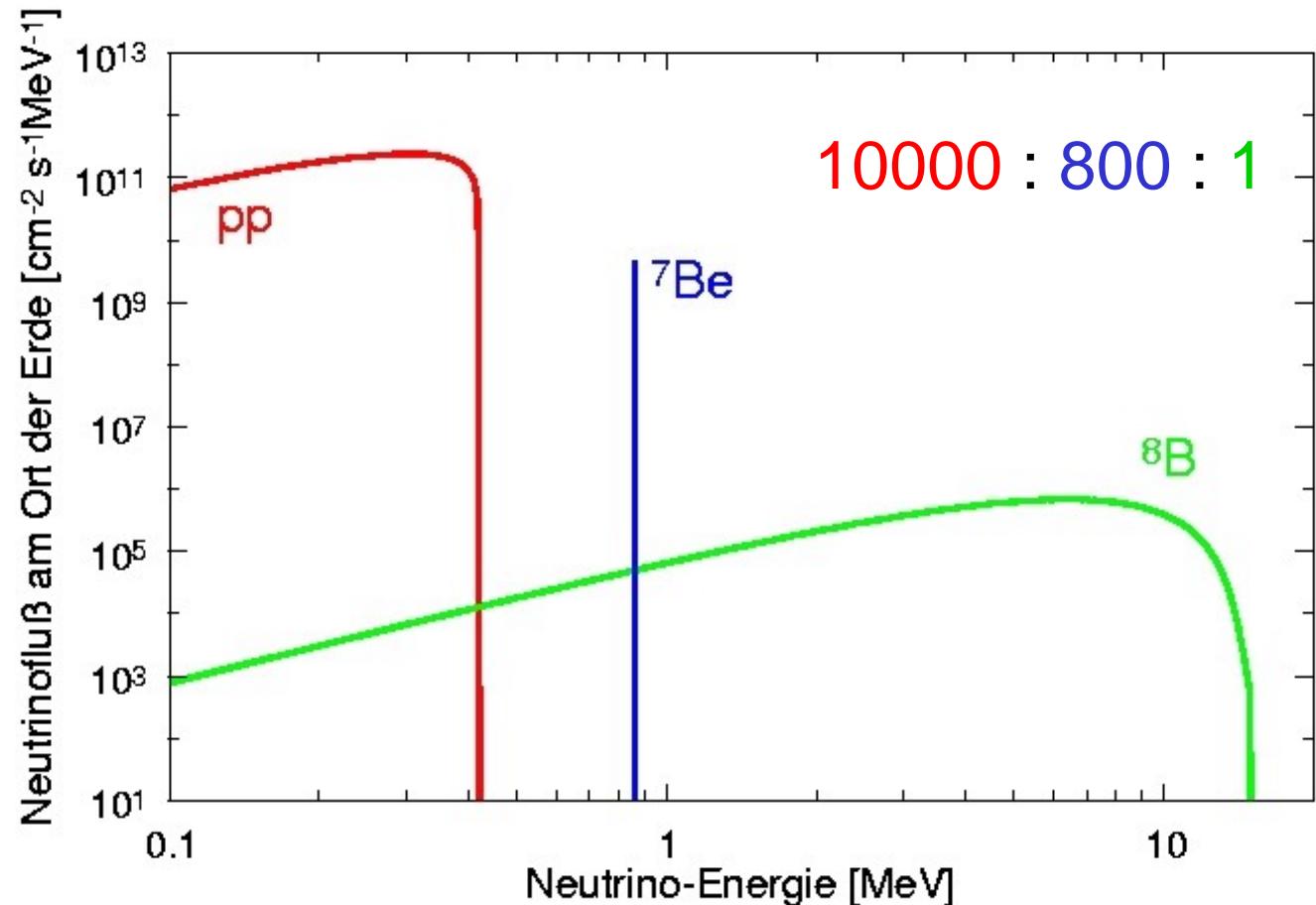


Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos

- pp-Neutrinos: aus der Startreaktion der Wasserstoff-Fusion, verantwortlich für 90% der Energieproduktion der Sonne
- ^7Be -Neutrinos: erzeugt in einem Seitenzweig der Wasserstoff-Fusion, in dem 10% der Sonnen-Energie produziert werden

^8B -Neutrinos:

aus seltenem Seitenzweig, der total unbedeutend für die Energie-Erzeugung in der Sonne ist



Motivation für Sonnenneutrino-Experimente

- **Astrophysik**

Experimentelle Überprüfung der Energieerzeugungsprozesse in der Sonne (auch stellvertretend für alle Hauptreihensterne):

Information über den Zustand des Sonneninneren heute:

- Licht: ~ 100.000 Jahre
- Neutrinos: ~ 8 min

- **Elementarteilchenphysik**

Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino:

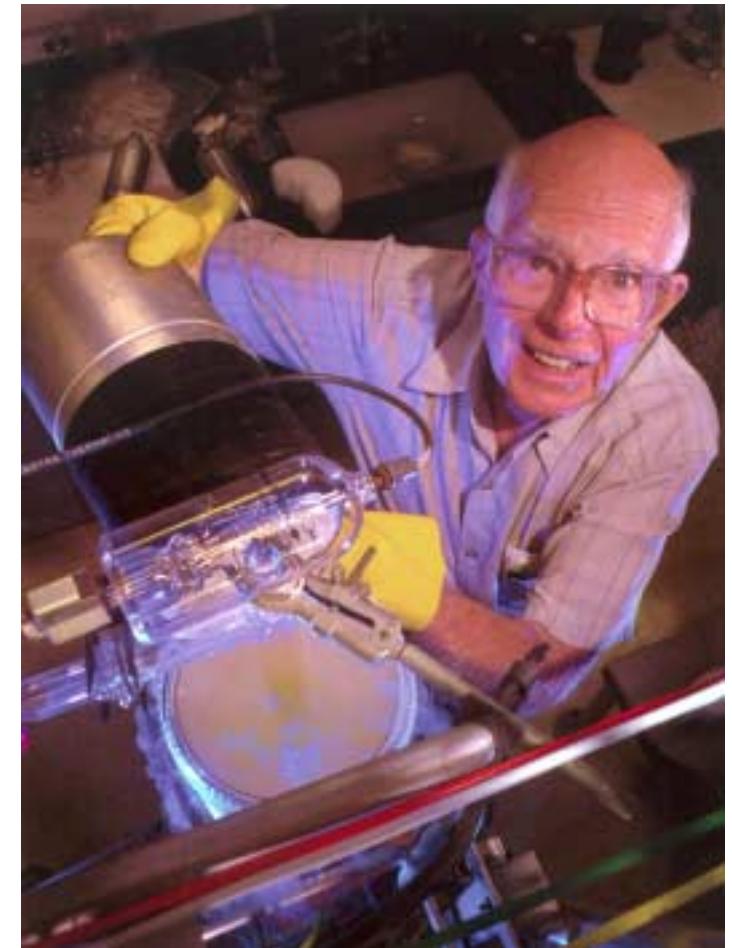
- haben weitreichende Konsequenzen für die Elementarteilchenphysik und die Kosmologie

Pionier der Neutrino-Astronomie

Raymond Davis Jr.

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA
University of Pennsylvania, Philadelphia, USA

- 1963** Erste Überlegungen von R. Davis zum Bau eines Chlor-Sonnenneutrino-Detektors
- 1967** Fertigstellung des Chlor-Detektors, erste Sonnenneutrino-Daten
- 1977** R. Davis gibt dem MPI für Kernphysik als Gutachter die Empfehlung, sich in der Sonnenneutrino-Forschung zu engagieren
- 1978** Pilotexperiment BNL-MPI für einen Gallium-Sonnenneutrino-Detektor (bis 1983)
- 1980** Chlor-Experiment wird von der University of Pennsylvania in Philadelphia übernommen
- 1994** Letzter Chlor-Sonnenneutrino-Run
- 2002** Physik-Nobelpreis für Raymond Davis Jr.





Fourth International Solar Neutrino Conference

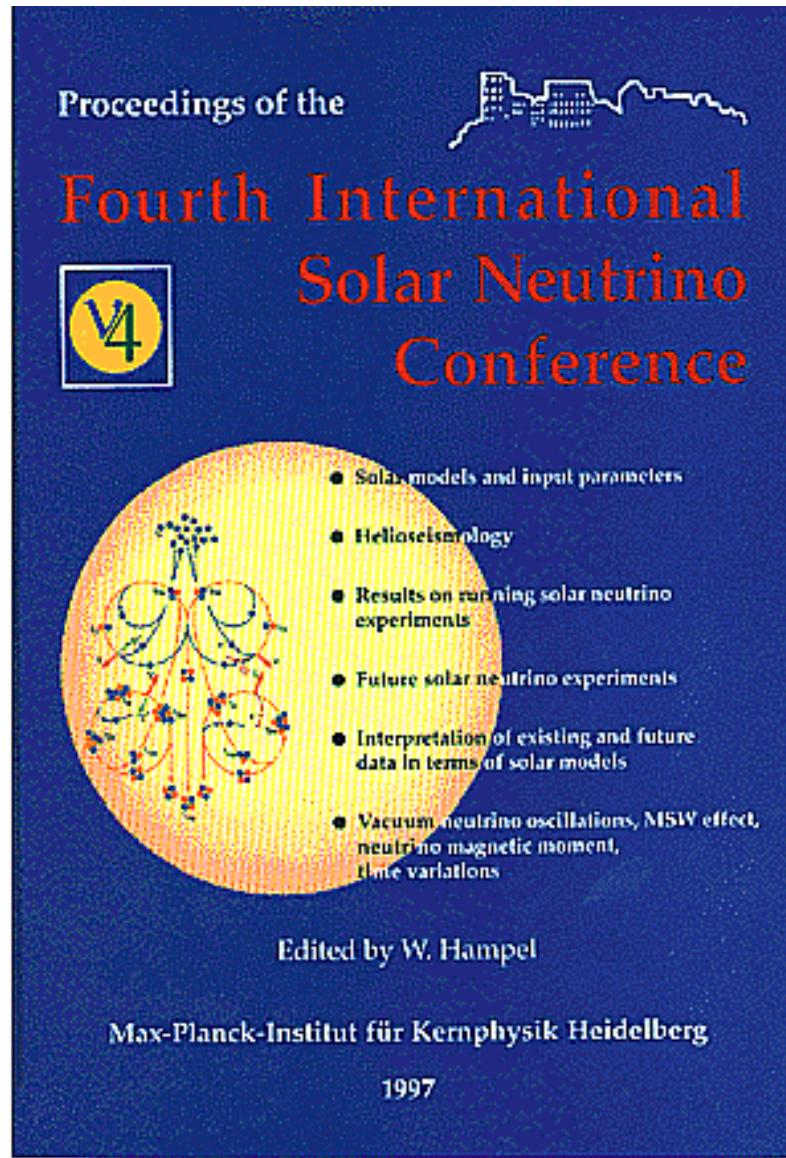
Heidelberg, 8. - 11. April 1997

A History of the Homestake Solar Neutrino Experiment

R. Davis Jr., B.T. Cleveland, T. Daily,
R. Distel, K. Lande, C.K. Lee,
P.S. Wildenhain and J. Ullman

Measurements of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector

B.T. Cleveland, T. Daily, **R. Davis Jr.**,
R. Distel, K. Lande, C.K. Lee,
P.S. Wildenhain and J. Ullman



Physik – Nobelpreis 2002

→ für bahnbrechende Arbeiten in der Astrophysik,
insbesondere für den Nachweis kosmischer Neutrinos

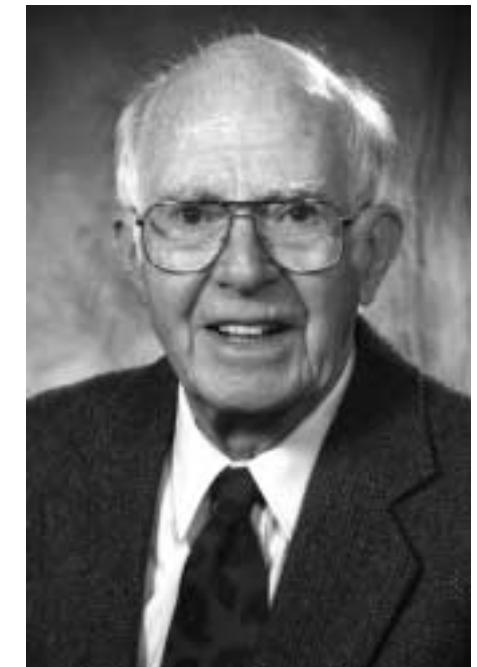


Masatoshi Koshiba

University of Tokyo, Japan

Raymond Davis Jr.

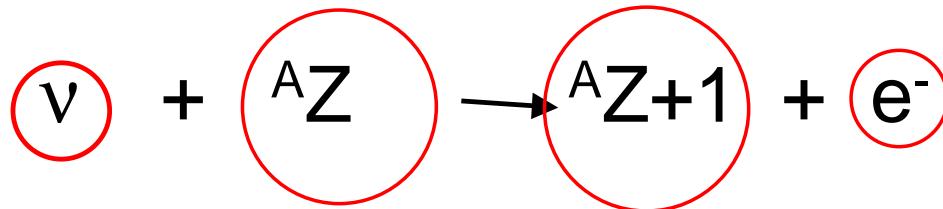
University of Pennsylvania,
Philadelphia, USA



Sonnenneutrino-Nachweis

im Prinzip zwei Möglichkeiten:

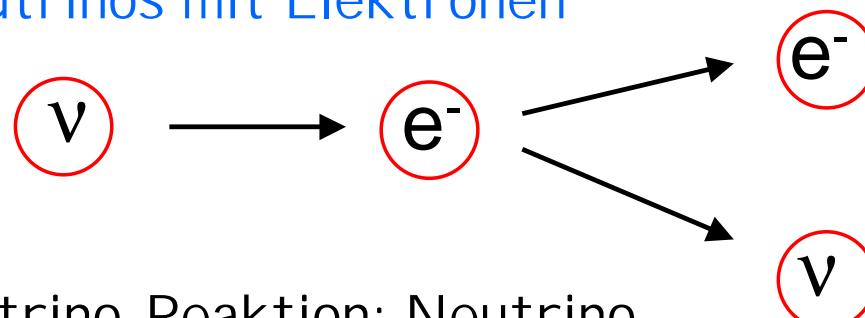
- Reaktionen von Neutrinos mit Atomkernen



Nachweis der Neutrino-Reaktion über die Umwandlung eines Atomkerns in den Atomkern eines anderen chemischen Elements



- Reaktionen von Neutrinos mit Elektronen



Nachweis der Neutrino-Reaktion: Neutrino überträgt einen Teil seiner Energie auf das gestoßene Elektron

Der Chlor-Sonnenneutrino-Detektor

Raymond Davis (Brookhaven, USA)
und Mitarbeiter

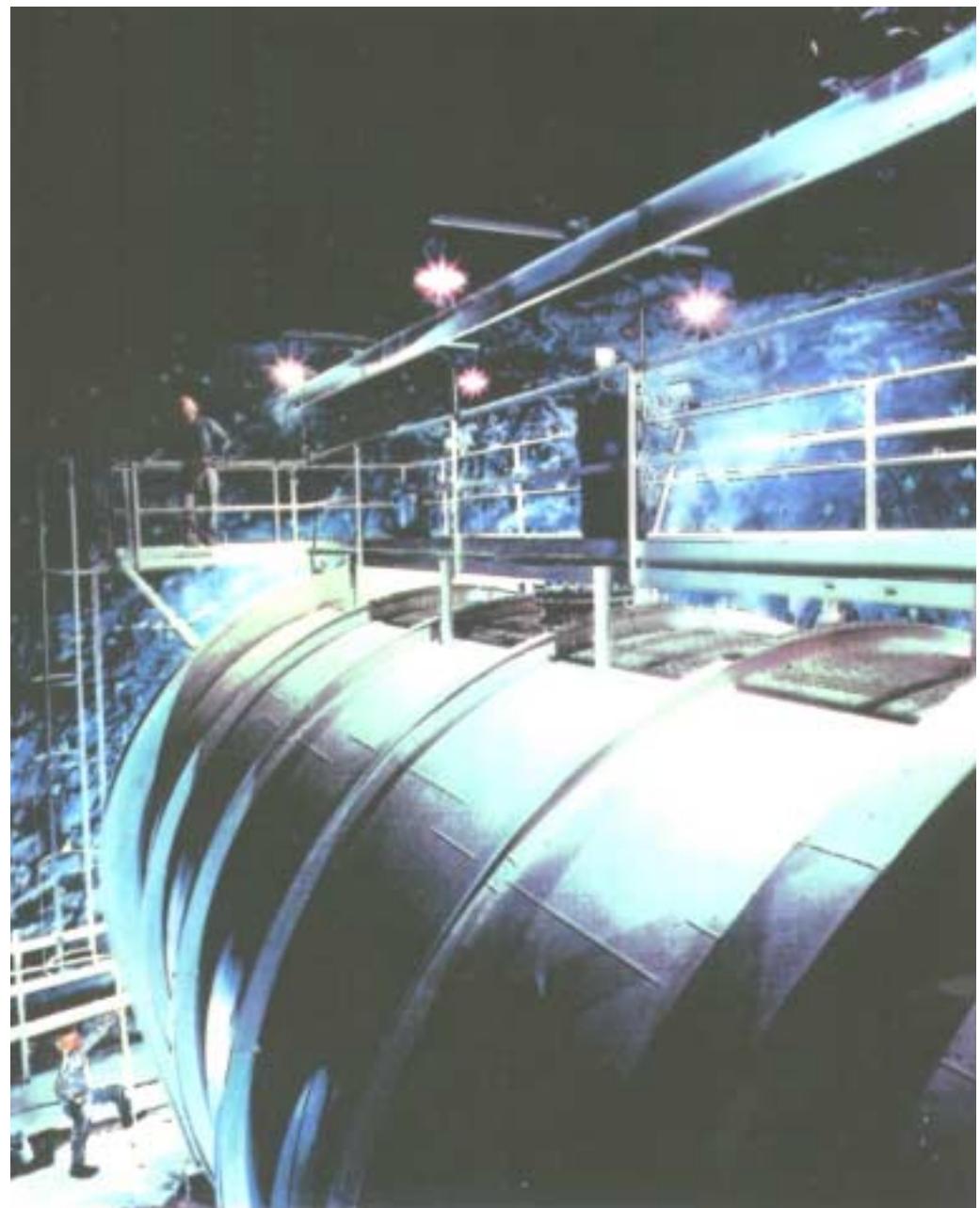


Größe: 610 Tonnen C_2Cl_4
(Perchloräthylen)

Ort: Homestake Goldbergwerk
in Süd-Dakota, USA
1.5 km unter der Erde

Extraktion: nach 3 Monaten ~25
radioaktive Argon-Atome,
werden mit Helium aus dem
Tank herausgespült

Nachweis: Argon wird in ein Zählrohr
gefüllt und der radioaktive
Zerfall des extrahierten
Argons wird gemessen
(~10 Ereignisse pro Monat)



Ergebnis des Chlor-Sonnenneutrino-Detektors:

Sonnenneutrino-Fluß nur etwa 1/3 des erwarteten Wertes !

Dieses Defizit:  Sonnenneutrino-Problem

Was ist die Ursache ?

● Experimentelle Lösung:

Der Detektor funktioniert nicht richtig

● Astrophysikalische Lösung:

Details der Vorgänge im Sonneninneren nicht verstanden, daher ist die Vorhersage des Standard-Sonnen-Modells (SSM) falsch

● Teilchenphysikalische Lösung:

Neutrinos werden im Sonneninneren produziert wie vom SSM vorhergesagt. Ihre Ausbreitungs-Eigenschaften sind anders als bisher angenommen: dies führt zu einem reduzierten Messwert

Kamiokande- und Super-Kamiokande: Sonnenneutrino-Detektoren in der Kamioka-Mine in Japan

Masatoshi Koshiba (Universität Tokio, Japan) und Mitarbeiter

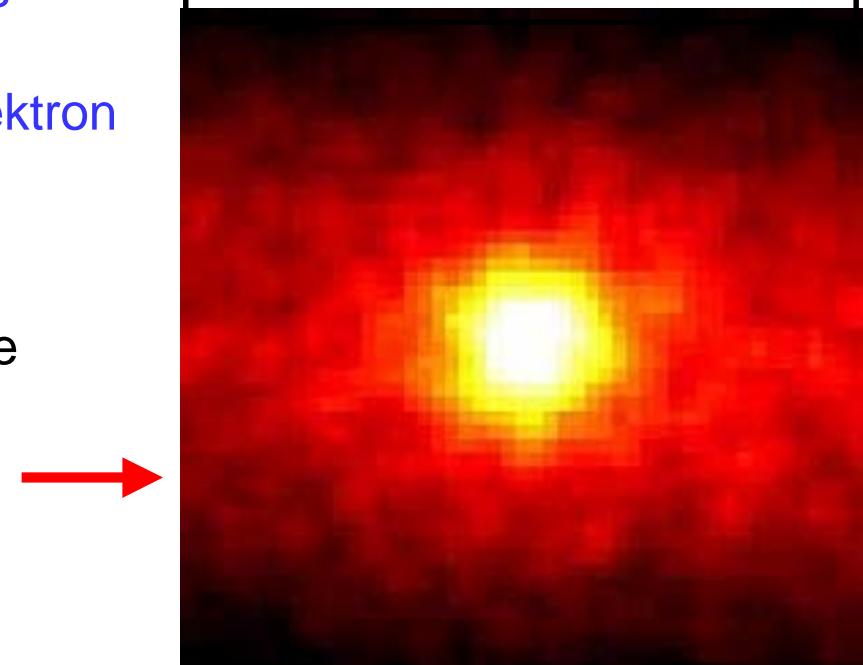
Kamiokande (2140 Tonnen Wasser): ursprünglich gebaut zum Nachweis des Protonenzerfalls, wurde von 1986 bis 1995 als Sonnenneutrino-Detektor eingesetzt. Ab 1996: Nachfolge-Experiment **Super-Kamiokande** (50.000 Tonnen Wasser)

Nachweis-Reaktion



Stoß des Neutrinos mit einem Elektron, dies bewegt mit fast Lichtgeschwindigkeit im Wasser. Messung des dabei emittierten Lichts mit Lichtdetektoren (Photomultiplier). Bei großem Energieübertrag: Elektron behält annähernd annähernd die Flugrichtung des Neutrinos bei: **richtungsempfindlich** !

Super-Kamiokande: Bild des Sonnenkerns im "Lichte" von Neutrinos



Ergebnis: Auch hier ein Defizit, beide Experimente messen nur etwa 50% des erwarteten Signals.
Aber: **Signal kommt eindeutig von der Sonne**

Die Supernova 1987A

Ein Stern von etwa 20 Sonnenmassen explodiert am 23. Februar 1987 in der großen Magellanschen Wolke am Südhimmel als Supernova

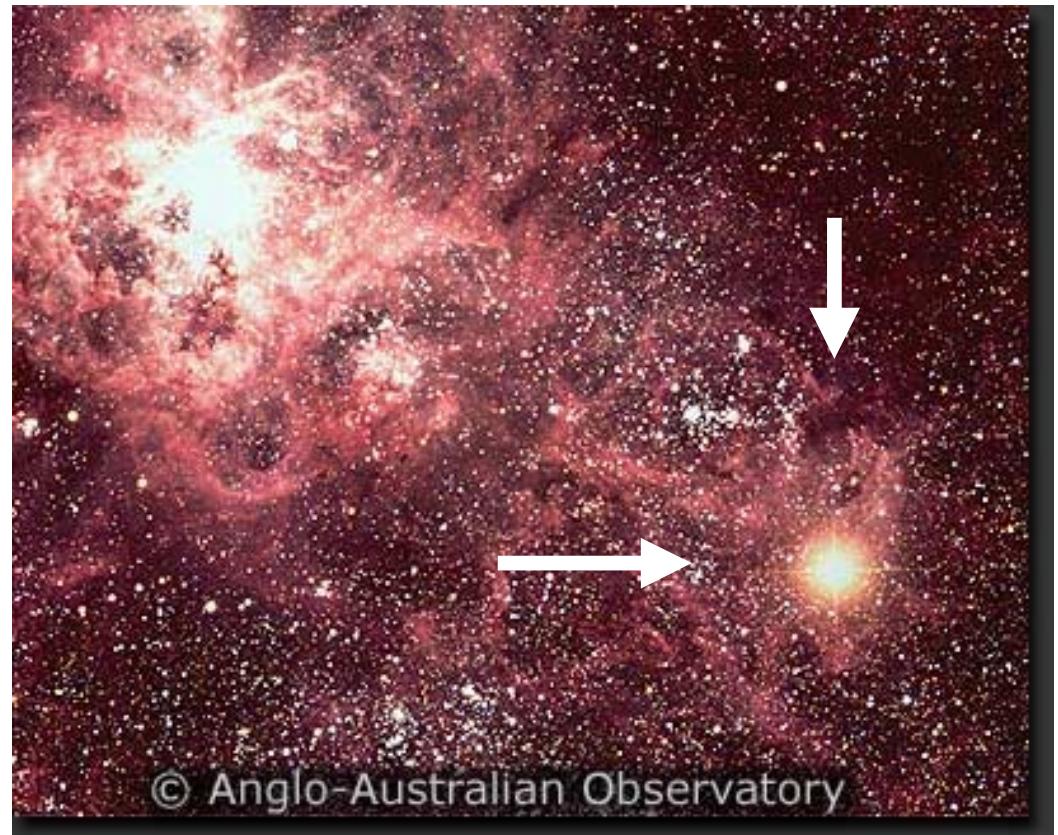
Entfernung von der Erde: 150.000 Lichtjahre

Theorie der Supernova-Explosionen sagt voraus: der größte Teil der beim Kollaps freiwerdenden Energie wird in Form von Neutrinos abgestrahlt

Kamiokande-Experiment:

11 Neutrino-Ereignisse innerhalb von 12 Sekunden beobachtet

→ in erster Näherung:
Supernova-Theorie glänzend bestätigt !

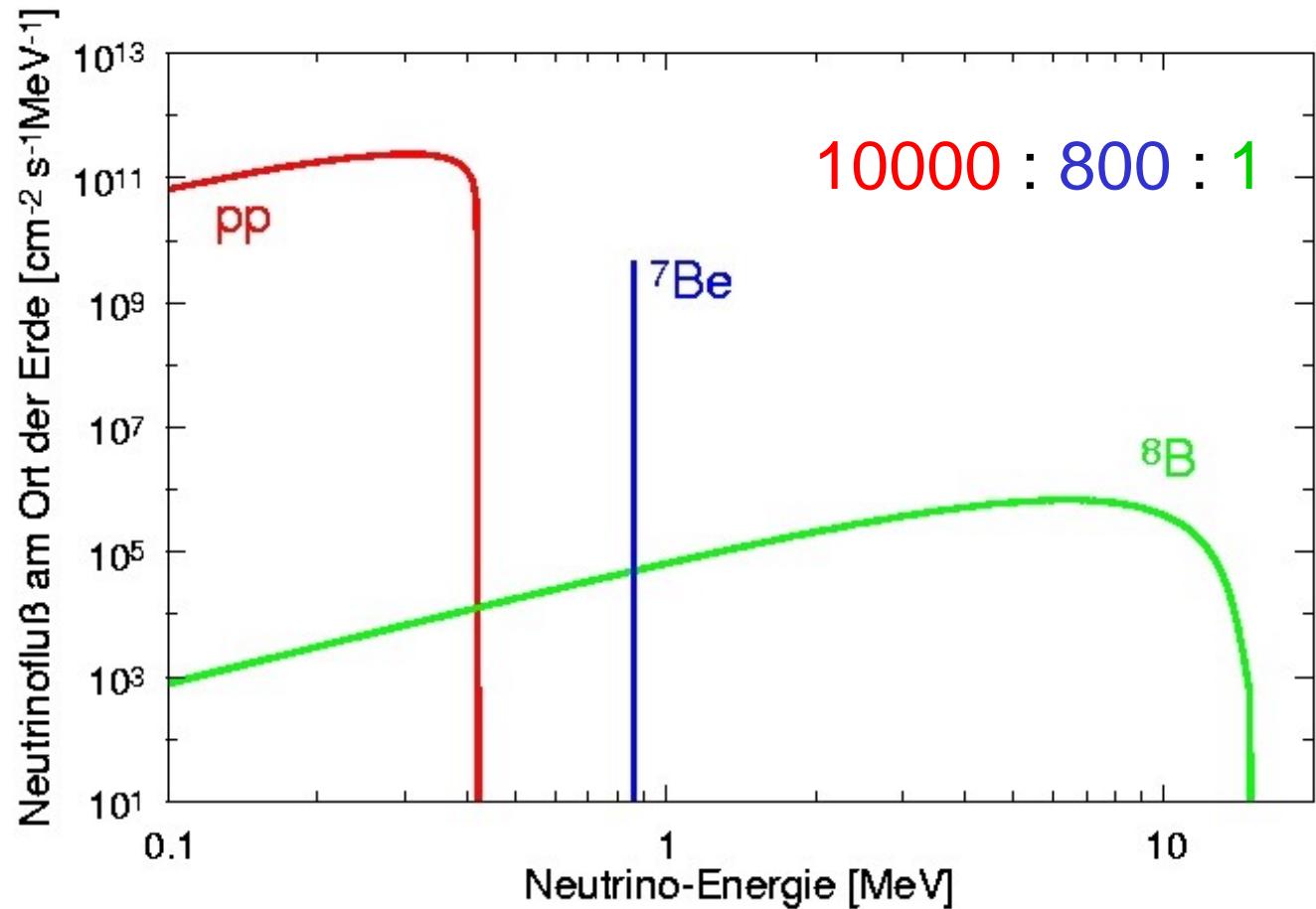


Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos

- pp-Neutrinos: aus der Startreaktion der Wasserstoff-Fusion, verantwortlich für 90% der Energieproduktion der Sonne
- ^7Be -Neutrinos: erzeugt in einem Seitenzweig der Wasserstoff-Fusion, in dem 10% der Sonnen-Energie produziert werden

^8B -Neutrinos:

aus seltenem Seitenzweig, der total unbedeutend für die Energie-Erzeugung in der Sonne ist



Sonnenneutrino-Experimente am MPI für Kernphysik

GALLEX

Messung der niederenergetischen Sonnen-Neutrinos,
durchgeführt von 1991 bis 1997



GNO

Nachfolge-Experiment von GALLEX, läuft seit 1998



Borexino

Messung der ^7Be -Neutrinos, wird gegenwärtig
aufgebaut, Messbeginn im Jahr 2003

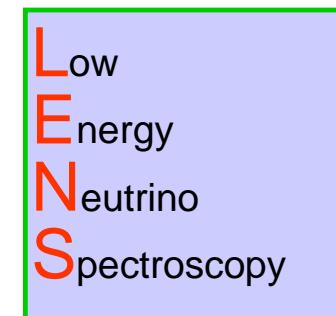


LENS

Experiment zur Direktmessung der pp-Neutrinos, zur
Zeit in der Pilotphase

Physik am Samstagmorgen - 23.11.02

 W. Hampel MPIK Heidelberg



Reaktionen von Sonnenneutrinos mit Gallium



Atomkern des Elements
Gallium (31 Protonen,
40 Neutronen)

Atomkern des Elements
Germanium (32 Protonen,
39 Neutronen)

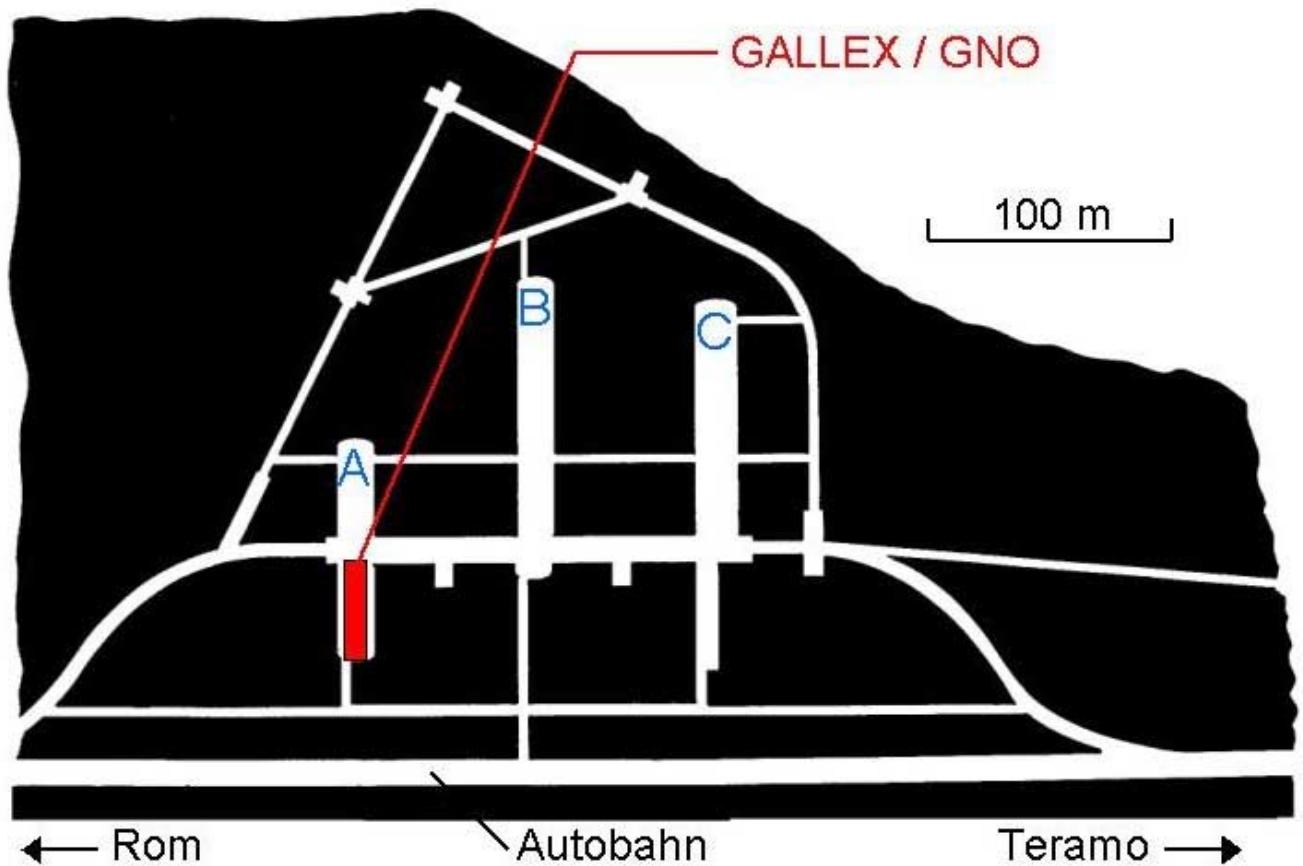
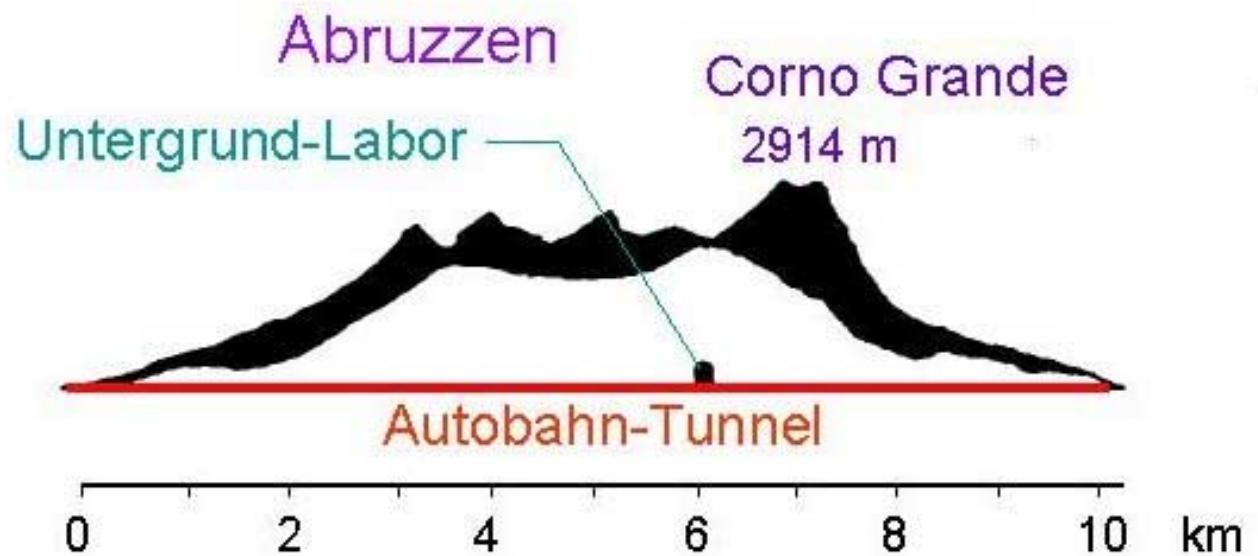
In 30 Tonnen Gallium (10^{29} ${}^{71}\text{Ga}$ Atome) erwartet:

~ 1 Reaktion pro Tag !

- Extraktion von wenigen Ge-Atomen aus 30 Tonnen Gallium
- Nachweis einzelner ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome durch Messung ihres radioaktiven Zerfalls (11.4 Tage Halbwertszeit)



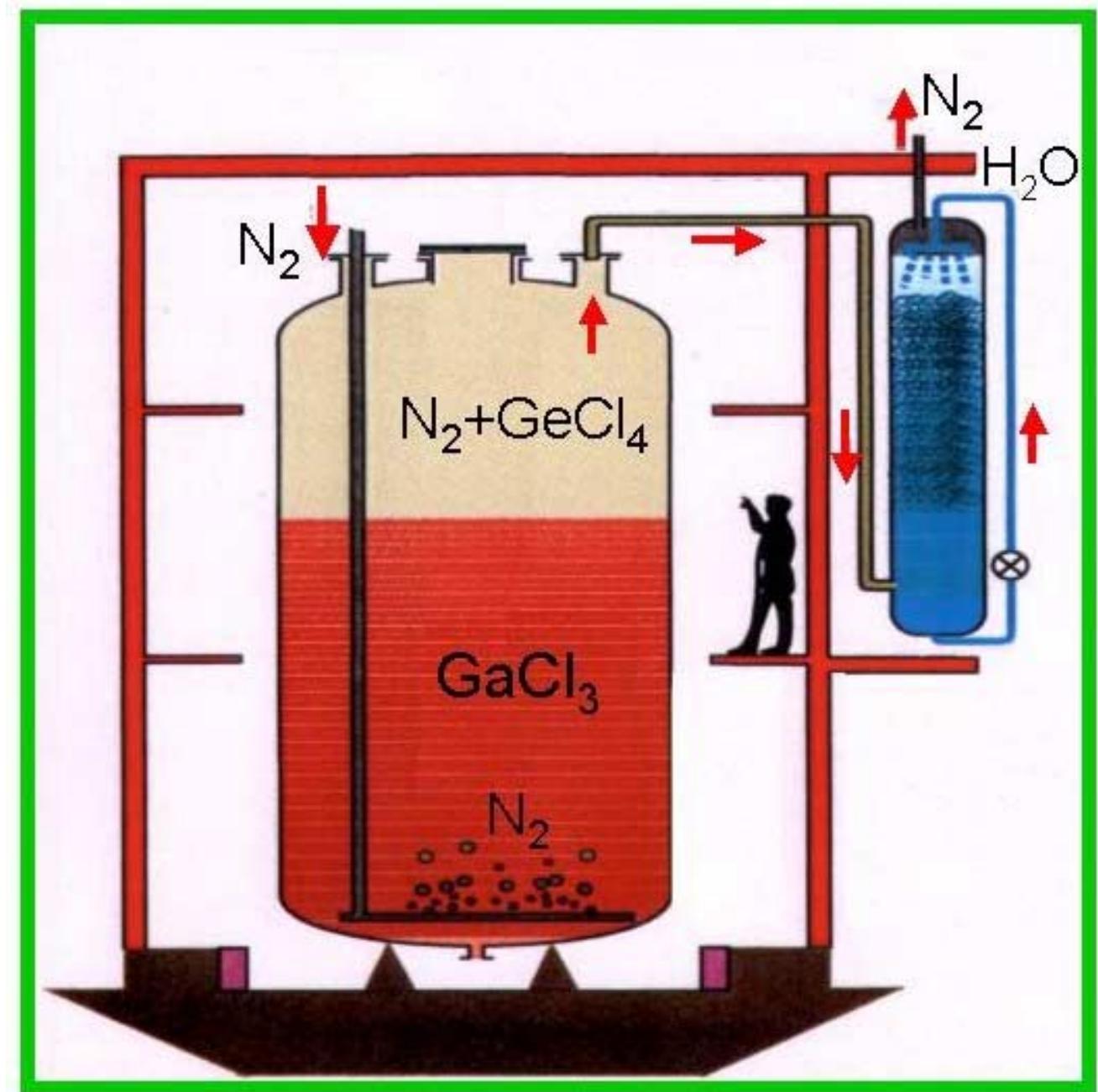
Das Gran-Sasso- Untergrund- Labor



Gallium-Sonnenneutrino-Detektor GALLEX/GNO

30,3 Tonnen Gallium
in Form
von 100 Tonnen
Galliumchlorid-
Lösung

Aufgebaut in
Halle A des
Gran-Sasso-
Untergrund-Labors

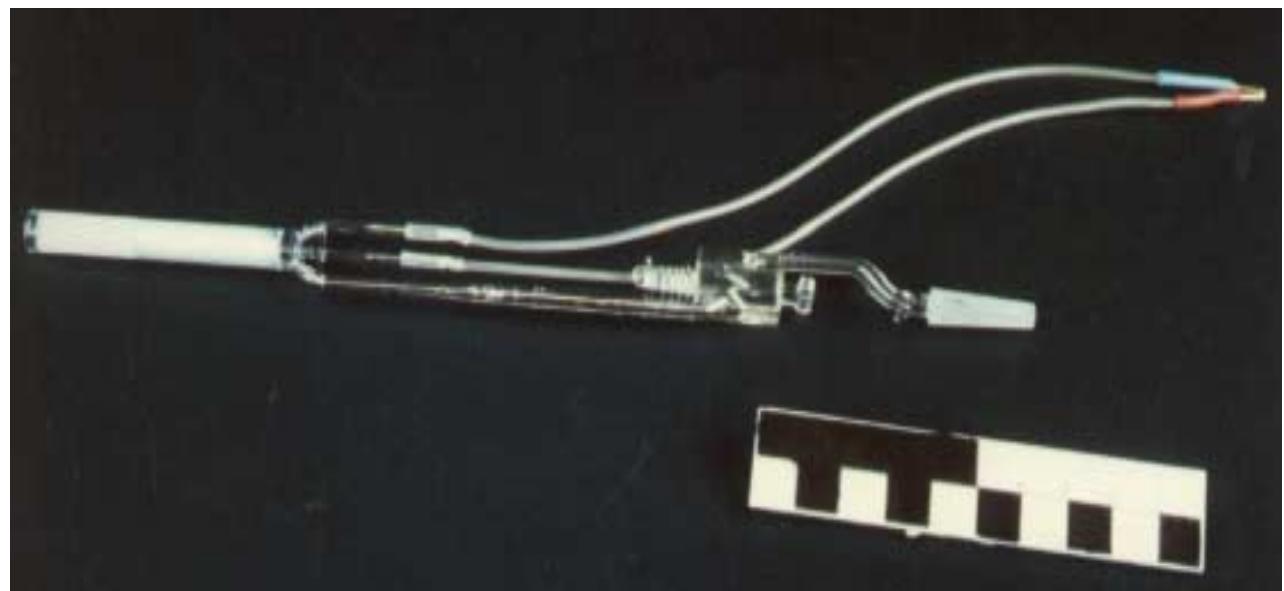
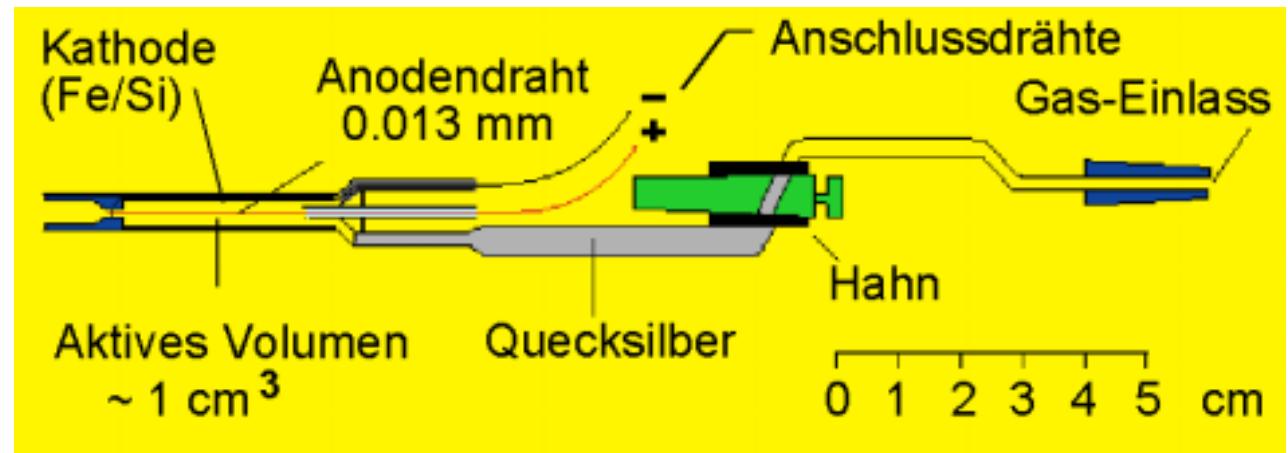


GALLEX/GNO-Proportional-Zählrohr

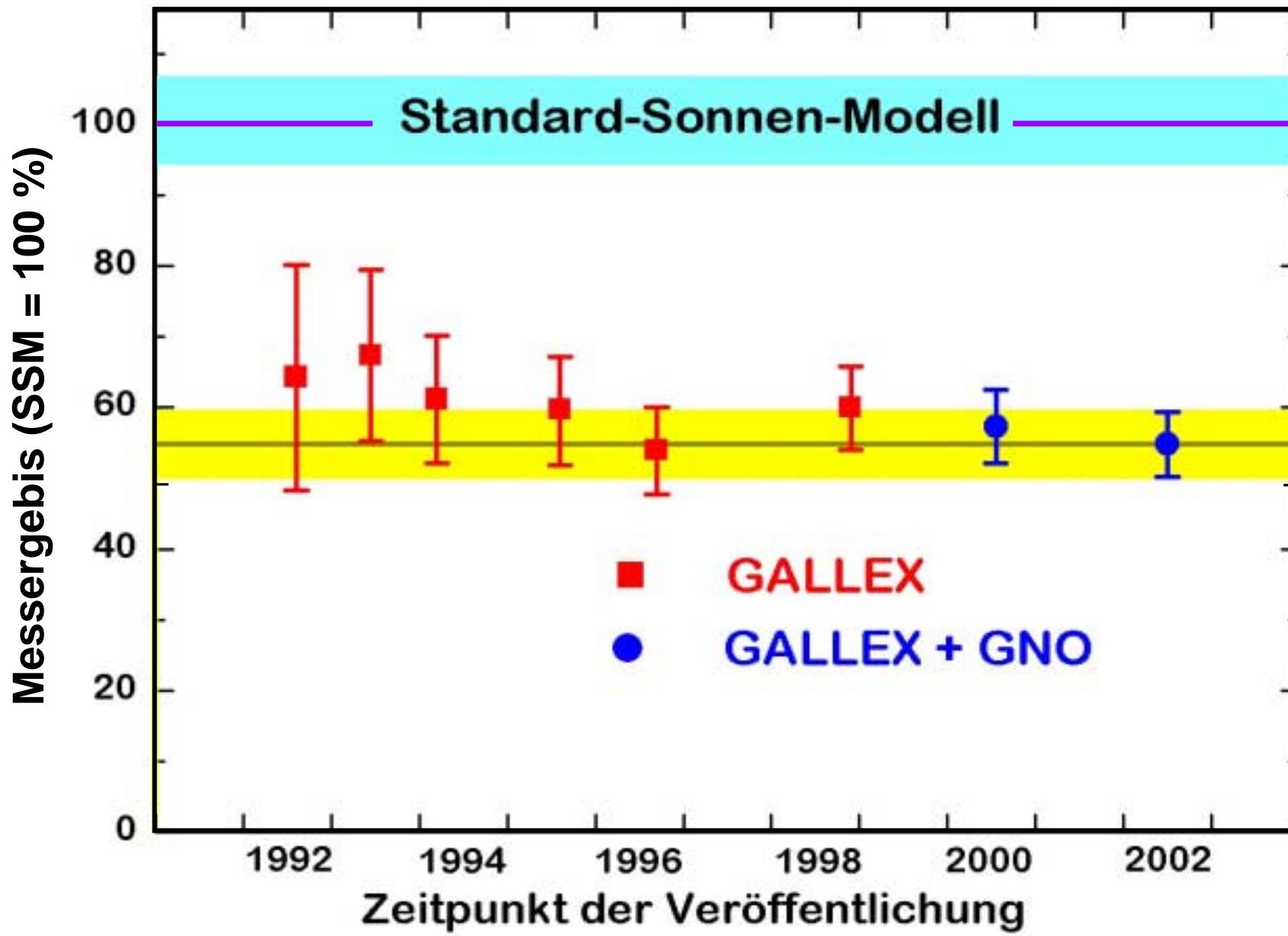
Normales Zählrohr: ~ 3 Pulse / Minute

GALLEX/GNO-Zählrohr: ~ 1 Puls / 3 Wochen → Faktor 100.000 !

- Extrem reine Baumaterialien
- Abschirmung durch dicke Blei- u. Kupferwände
- Mess-System 1300 m unter Tage
- Aufwendige Mess-Elektronik



Ergebnis der GALLEX/GNO-Sonnenneutrino-Experimente

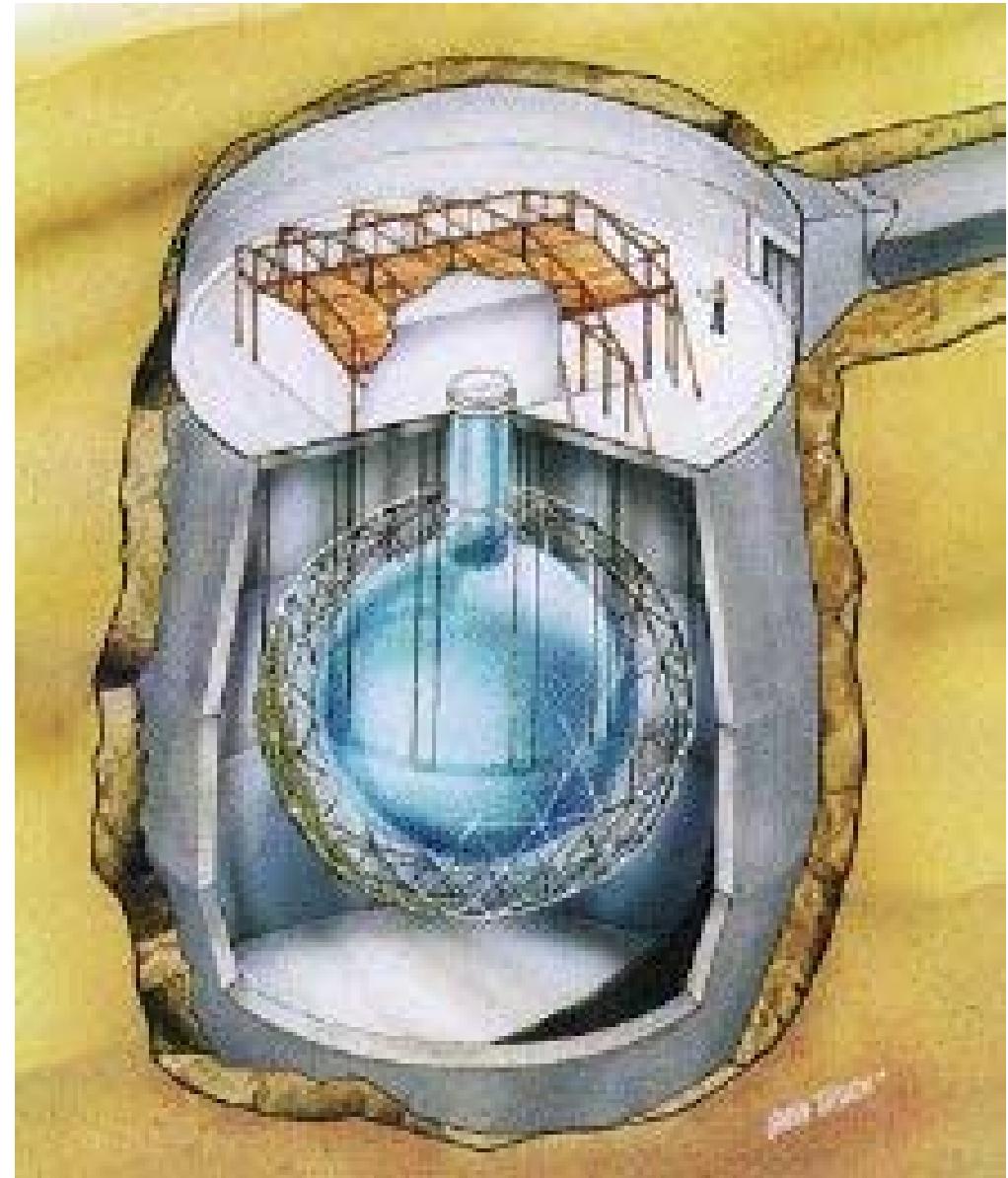


Der SNO-Sonnenneutrino-Detektor

Detektor mit 1000 Tonnen
schwerem Wasser (D_2O)

in der Creighton Nickel Mine
Sudbury, Kanada
in 2 km Tiefe

Neutrino-Reaktionen:



Resultate aller 7 Sonnenneutrino-Experimente

ergeben Defizit verglichen mit SSM → Sonnenneutrino-Problem

Detektor	Sensitivität für Sonnen-Neutrinos	Ergebnis (in % vom SSM- Erwartungswert)
Homestake ($\nu + {}^{37}\text{Cl}$)	${}^8\text{B}, {}^7\text{Be}$	33 ± 3
Kamiokande ($\nu + e^-$)	${}^8\text{B}$	54 ± 8
Super-Kam. ($\nu + e^-$)	${}^8\text{B}$	46 ± 2
GALLEX/GNO ($\nu + {}^{71}\text{Ga}$)	${}^8\text{B}$	55 ± 5
SAGE ($\nu + {}^{71}\text{Ga}$)	${}^8\text{B}$	55 ± 5
SNO ($\nu + d$)	${}^8\text{B}$	34 ± 2
($\nu + e^-$)	${}^8\text{B}$	46 ± 5
($\nu + d$)	${}^8\text{B}$	99 ± 12

Was ist die endgültige Lösung des Sonnenneutrino-Problems ?



Experimentelle Lösung:

Die Detektoren messen falsch: durch zahlreiche Tests der Detektoren praktisch ausgeschlossen !



Astrophysikalische Lösung:

Details der Vorgänge im Sonneninneren nicht verstanden:
inzwischen weitgehend ausgeschlossen durch andere astrophysikalische Beobachtungen !



Teilchenphysikalische Lösung:

Die Ausbreitungs-Eigenschaften der Neutrinos sind anders als bisher angenommen: **Jetzt bewiesen !**

Sonnenneutrino-Problem gelöst !

Neutrinos haben eine von Null verschiedene Ruhmasse und können sich deshalb auf dem Weg vom Sonnenzentrum zur Erde in andere Neutrino-Arten umwandeln (Neutrino-Oszillationen). Die beobachteten (unterschiedlichen) Defizite bei den Ergebnissen können so erklärt werden

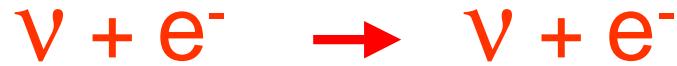
siehe Vortrag S. Schönert

Allerdings: die Parameter (Neutrinomassen, Mischungswinkel) dieser Umwandlungen noch nicht eindeutig festgelegt



Weitere Sonnenneutrino-Experimente benötigt
BOREXINO, LENS,

Der Borexino-Sonnenneutrino-Detektor in Halle C des Gran-Sasso-Untergrund-Labors



Messung des ${}^7\text{Be}$ -Sonnenneutrino-Flusses durch Elektron-Neutrino-Streuung in 100 Tonnen Szintillator-Flüssigkeit mit Hilfe von 2000 Licht-Detektoren (Photomultiplier)

