



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN 

 MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR SONNENSYSTEMFORSCHUNG 

**Internationales Heliophysikalisches Jahr 2007**

**Unsere Sonne – Feuer des Lebens**

 Geschichte und aktuelle Forschung

Öffentliche Vorlesungsreihe

Paulinerkirche Göttingen – 18. April 2007

# Das Rätsel der Sonnenneutrinos

W. Hampel

Max-Planck-Institut für Kernphysik Heidelberg



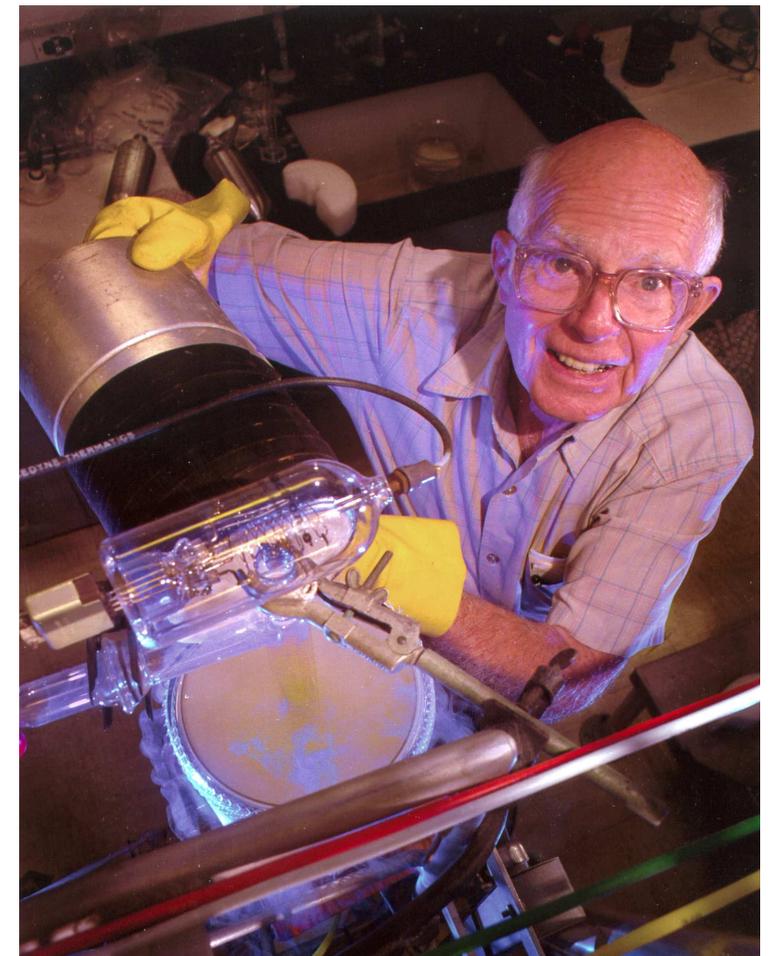
# Pionier der Neutrino-Astronomie

**Raymond Davis Jr. (1914 – 2006)**

**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
- 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.



# Wie produziert die Sonne ihre Energie ?

- Chemische Energie

Sonne aus Steinkohle → ~ 5000 Jahre

- Gravitations-Energie

Sonne zieht sich zusammen (Helmholtz, Kelvin)

→ ~ 30 Millionen Jahre

- Kernfusion

Umwandlung von Wasserstoff in Helium (Bethe, v. Weizsäcker)

→ ~ 10 Milliarden Jahre

$$\text{Einstein: } E = m \times c^2$$

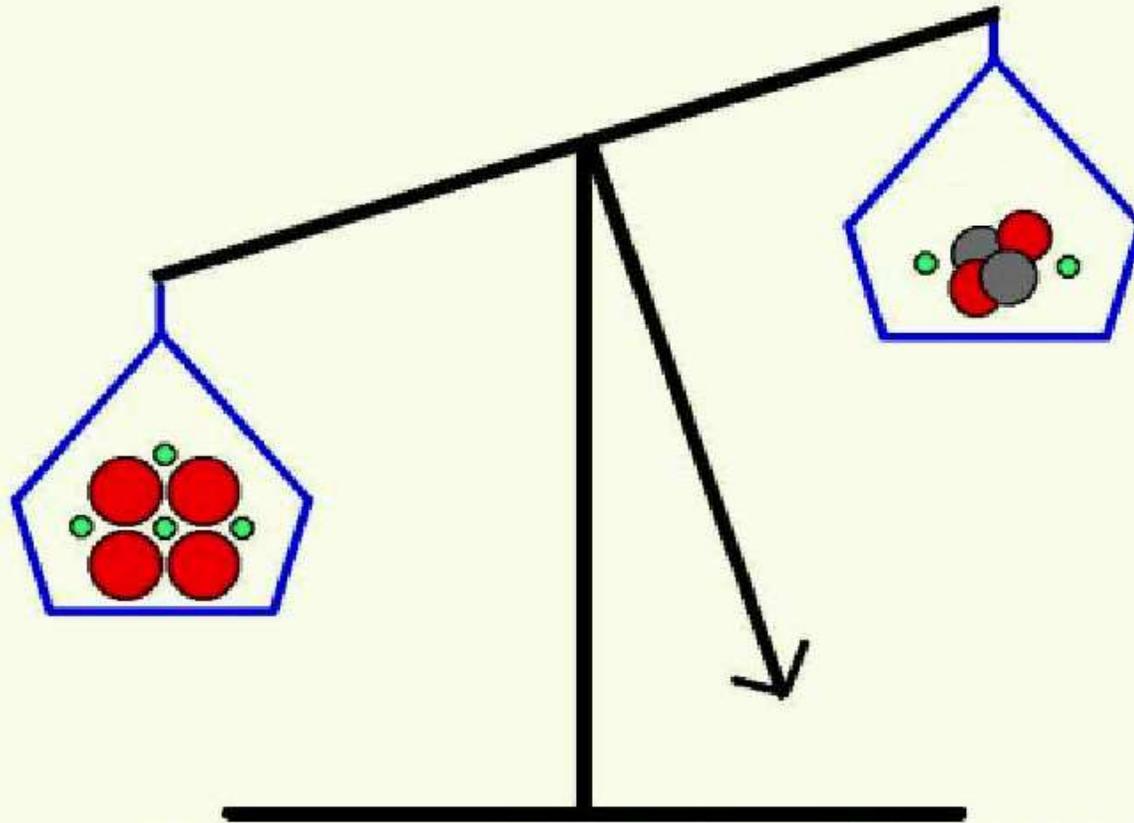
$$L_{\odot} \sim 4 \times 10^{23} \text{ kW für } 10^{10} \text{ Jahre}$$

$$\equiv 1.3 \times 10^{30} \text{ g}$$

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



$$\text{Einstein: } E = m \times c^2$$

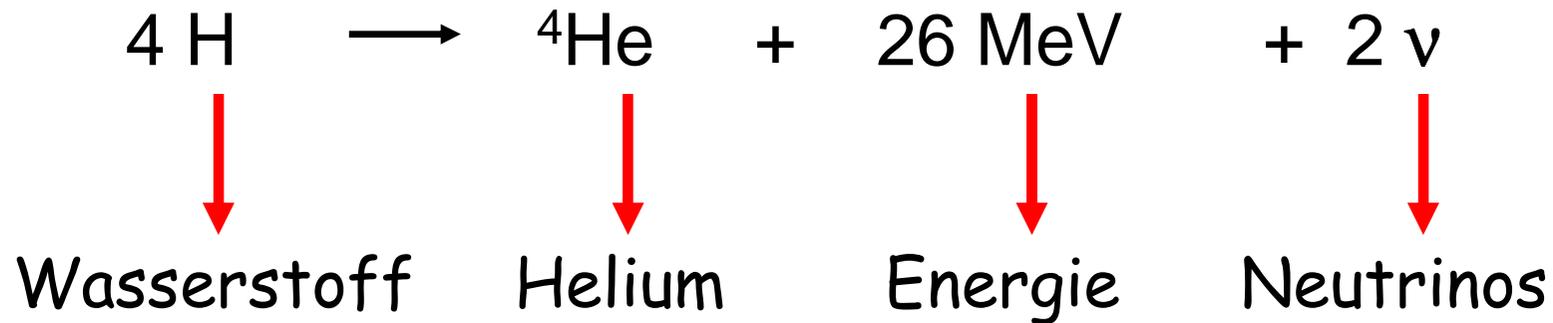


4 Protonen  
+ 4 Elektronen

Helium-Kern  
+ 2 Elektronen

0.7 % leichter als

# Wasserstoff-Fusion



→ 1 Neutrino pro 13 MeV Energieerzeugung

Fluss der Sonnen-Neutrinos am Ort der Erde:

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

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

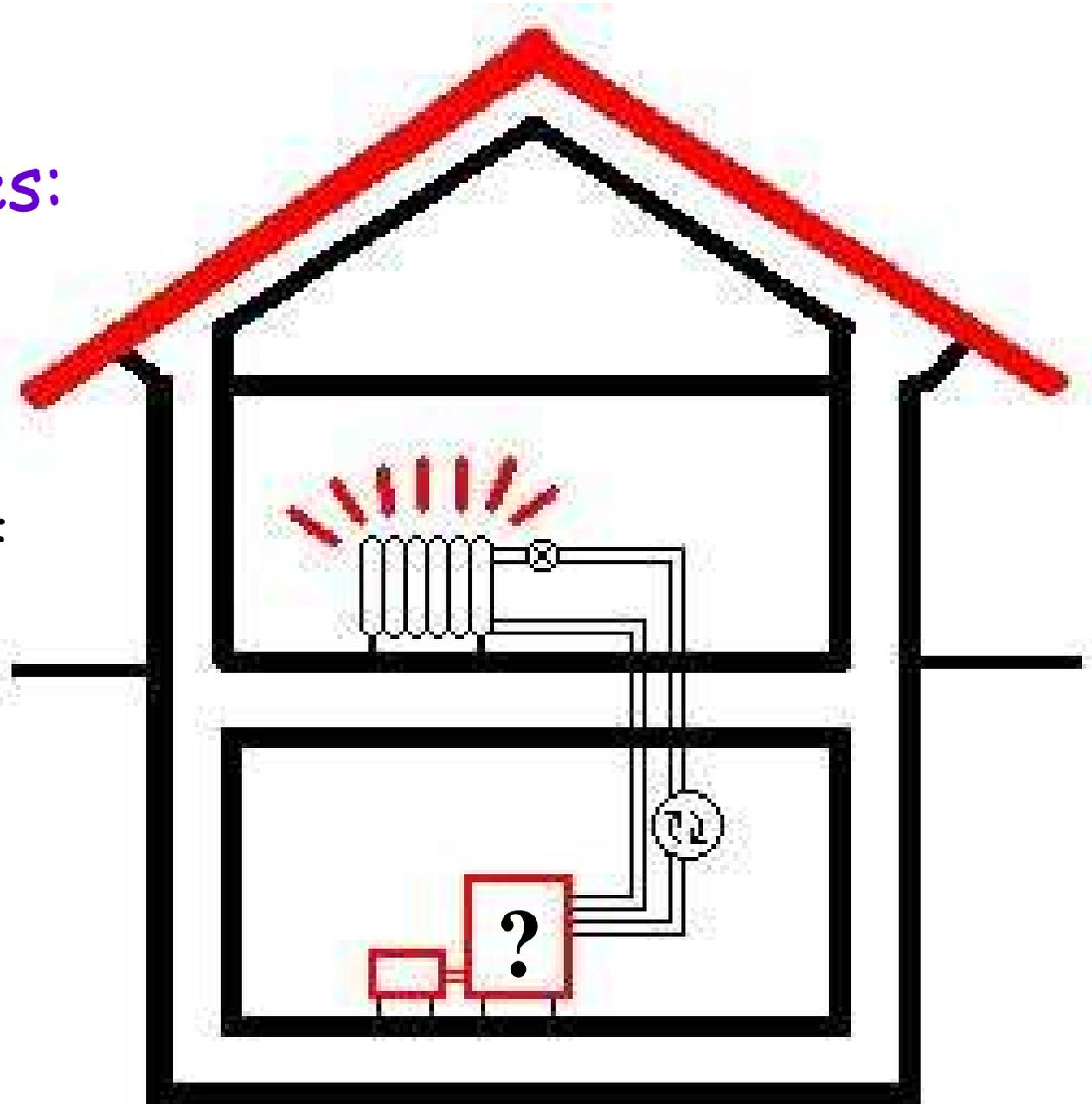
$$1 \text{ Kilowatt-Stunde} = 2,3 \times 10^{19} \text{ MeV}$$

# Wie erzeugt die Sonne ihre Energie ?

Vergleich:  
Heizung eines Hauses:

2 Fragen:

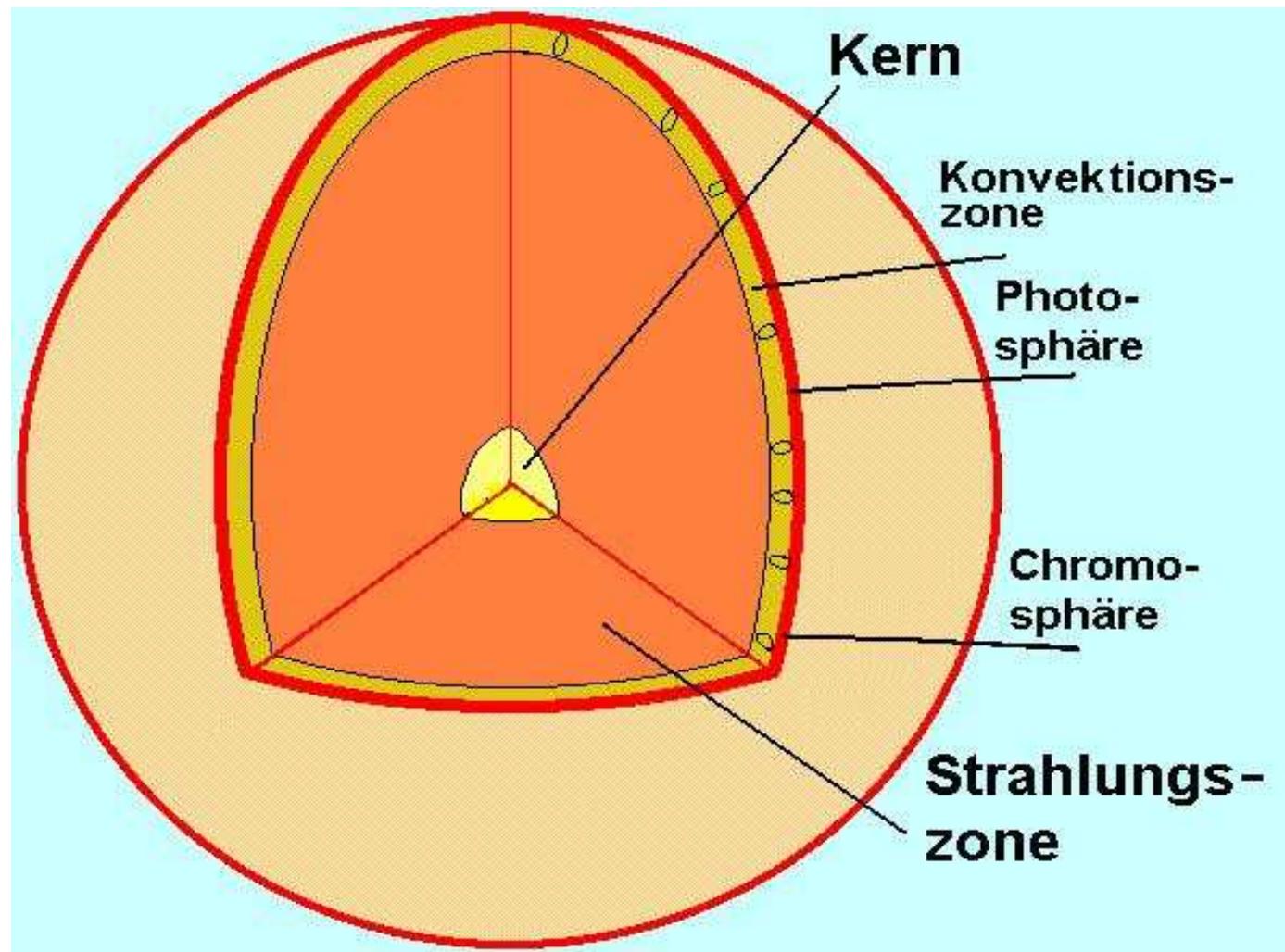
- (1) Welcher Brennstoff (Kohle, Öl, Gas..)?
- (2) Ist der Brenner gerade in Betrieb?



# Das Standard-Sonnenmodell der Astrophysik

Ein wesentliches Ergebnis: Die im Zentrum erzeugte Energie (in Form von Lichtquanten) braucht etwa 40.000 Jahre, bis sie die Oberfläche der Sonne erreicht und von hier als sichtbares Licht in den Weltraum abgestrahlt wird !

Im Gegensatz dazu:  
Die im Sonnenkern erzeugten Neutrinos können die Sonne praktisch ungehindert verlassen und erreichen etwa 8 Minuten später die Erde !



# 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: ~ 40.000 Jahre
- Neutrinos: ~ 8 min

- **Elementarteilchenphysik**

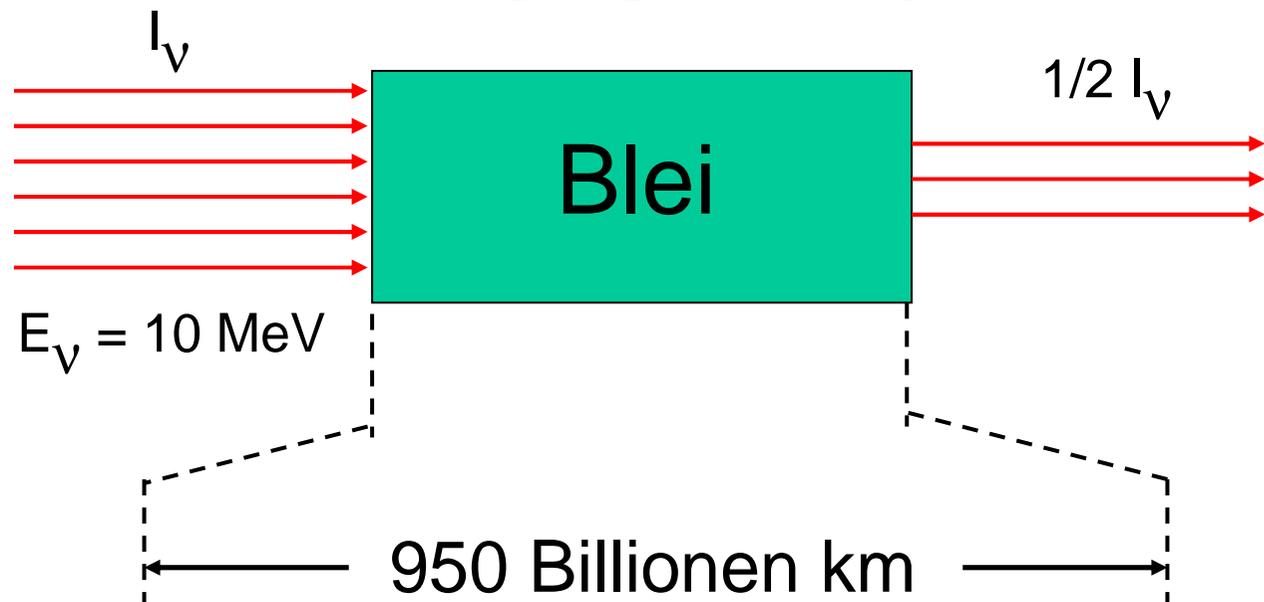
Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino:

- haben weitreichende Konsequenzen für die Elementarteilchenphysik und die Kosmologie



# Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino ( $\nu$ ) - 1

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



( =  $6.3 \cdot 10^6 \text{ AE}$  = 100 Lichtjahre )



# Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino ( $\nu$ ) - 2

- Aus Experimenten mit Neutrinos an Teilchenbeschleunigern:  
→ es gibt 3 Arten von Neutrinos

Elektron-Neutrinos

$\nu_e$

Müon-Neutrinos

$\nu_\mu$

Tauon-Neutrinos

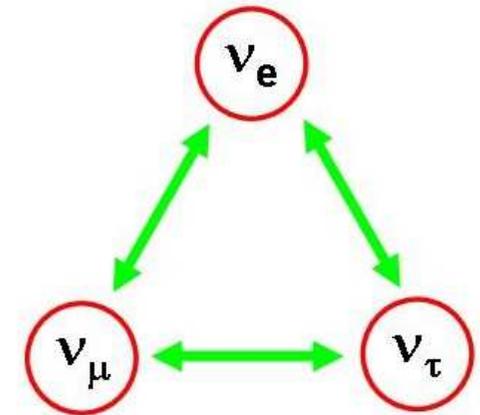
$\nu_\tau$

- In den Kernreaktionen in der Sonne:  
→ es werden nur Elektron-Neutrinos produziert



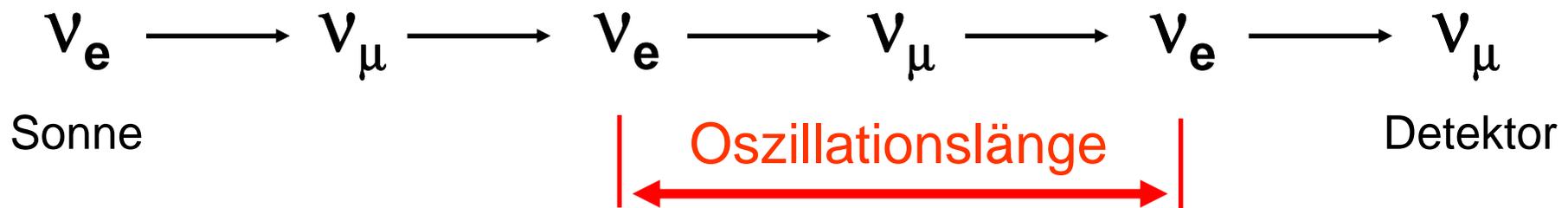
# Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino ( $\nu$ ) - 3

- Jedoch: falls Neutrinos eine von Null verschiedene Ruhemasse haben, können sich die verschiedenen Neutrino-Arten ineinander umwandeln



→ Neutrino-Oszillationen

Beispiel: maximale Umwandlung (Mischung) zwischen  $\nu_e$  und  $\nu_\mu$

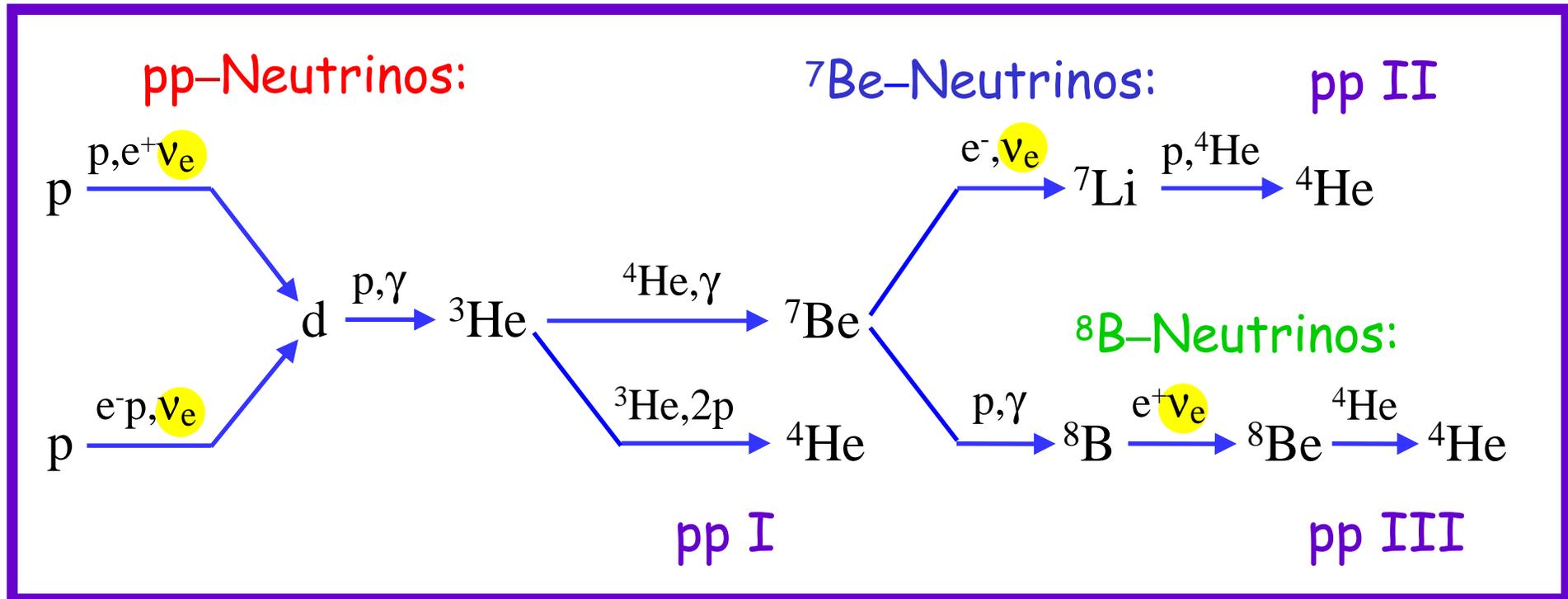


hängt ab von der Neutrinoenergie und den Ruhmassen der an den Oszillationen beteiligten Neutrinos

# Proton-Proton-Zyklus

erzeugt nach dem Standard-Sonnenmodell  
~ 99% der Sonnenleuchtkraft

Fusion von Wasserstoff zu Helium erfolgt über 3 Sub-Zyklen: ppI, ppII, ppIII



# Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus

in der Sonne unbedeutend: erzeugt  
nach dem Standard-Sonnenmodell  
nur ~ 1% der Sonnenleuchtkraft



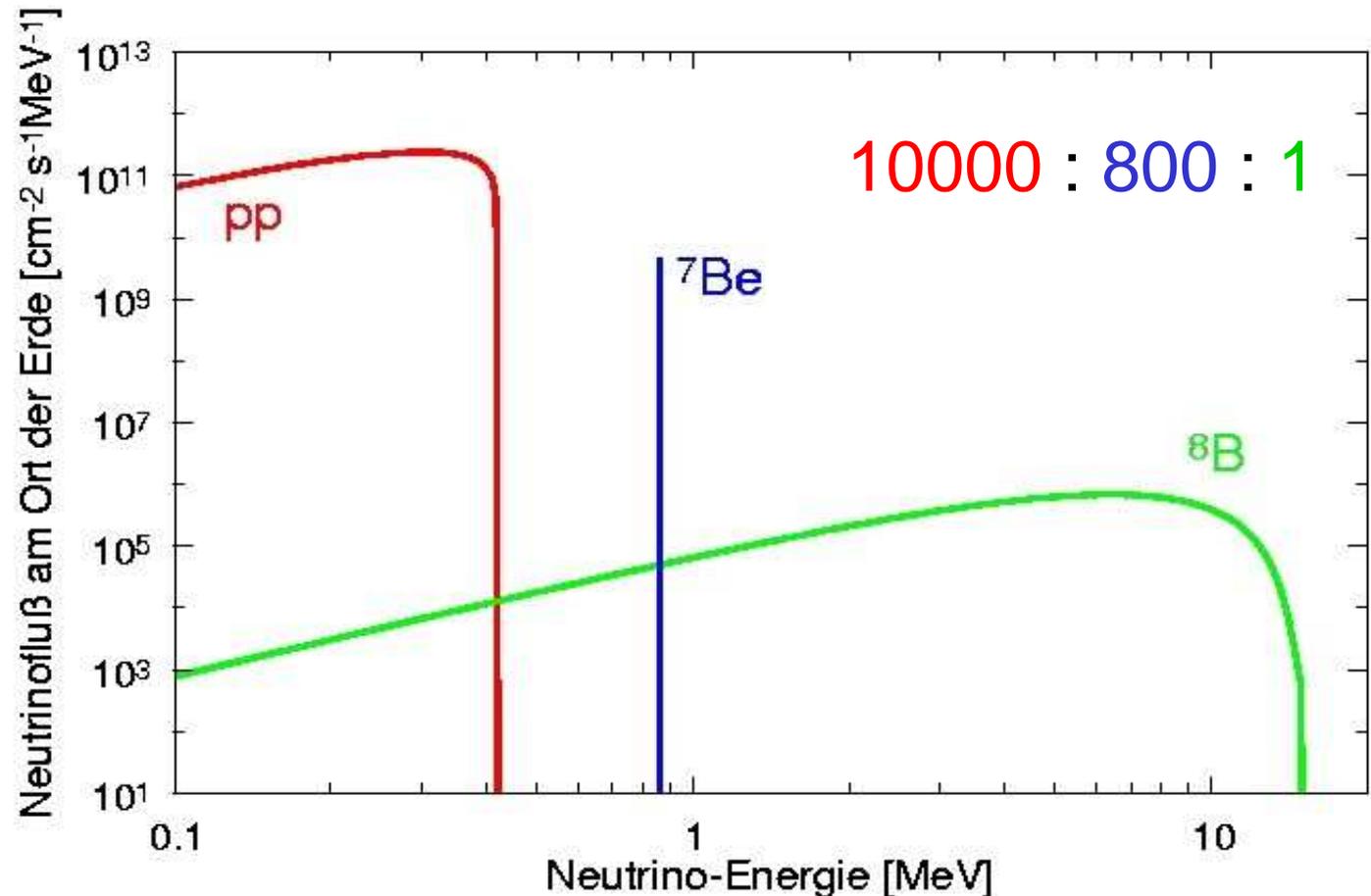
# Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos

pp-Neutrinos: aus der Startreaktion der Wasserstoff-Fusion, verantwortlich für 90% der Energieproduktion der Sonne

$^7\text{Be}$ -Neutrinos: erzeugt in einem Seitenzweig der Wasserstoff-Fusion, in dem 10% der Sonnen-Energie produziert werden

$^8\text{B}$ -Neutrinos:

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



# Sonnenneutrino-Nachweis

im Prinzip drei Möglichkeiten:

## 1 Reaktionen von Neutrinos mit Atomkernen



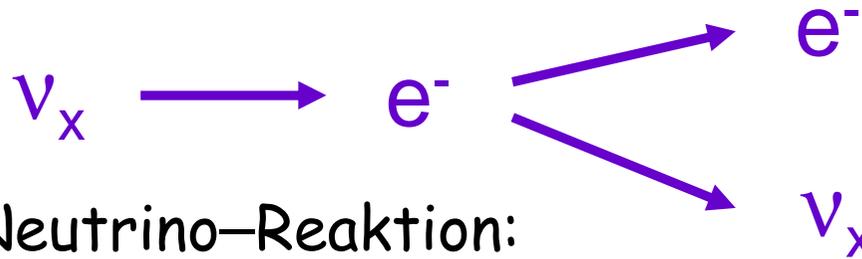
Nachweis der Neutrino-Reaktion über die Umwandlung eines Atomkerns in den Atomkern eines anderen chemischen Elements oder aber Nachweis des emittierten Elektrons

**Diese Reaktionsart: nur Elektron-Neutrinos !**



# Sonnenneutrino-Nachweis

## 2 Reaktionen von Neutrinos mit Elektronen



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

Diese Reaktionsart: überwiegend Elektron-Neutrinos !

## 3 Aufspaltung eines Atomkerns durch Neutrinos



Nachweis: Messung des freigewordenen Neutrons

Diese Reaktionsart: alle drei Neutrino-Arten !

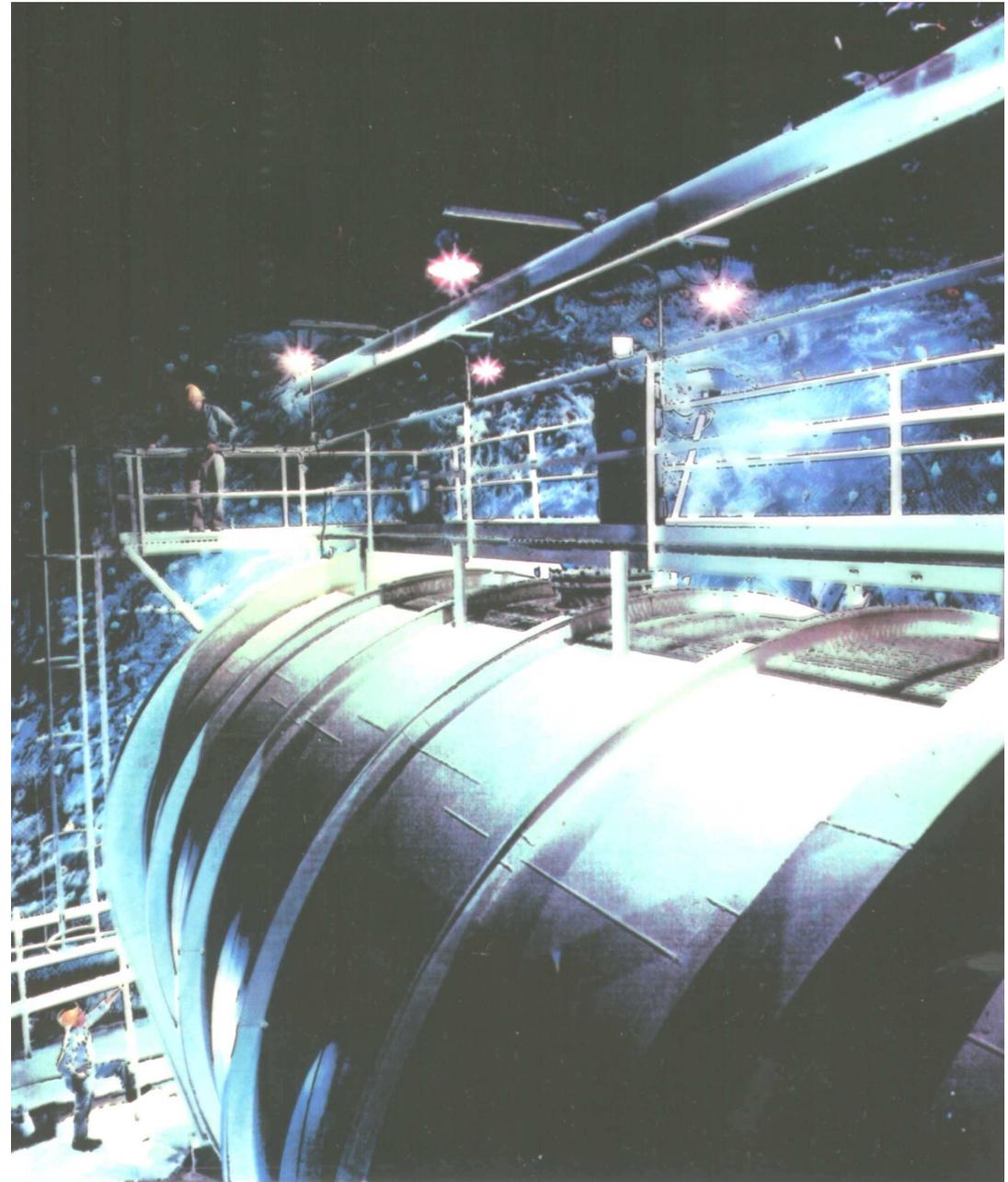


# Der Chlor-Sonnenneutrino-Detektor

Raymond Davis (Brookhaven, USA)  
und Mitarbeiter



- Größe: 610 Tonnen  $\text{C}_2\text{Cl}_4$   
(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:  Beginn des Sonnenneutrino-Rätsels

## 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 Ausbreitungseigenschaften 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)

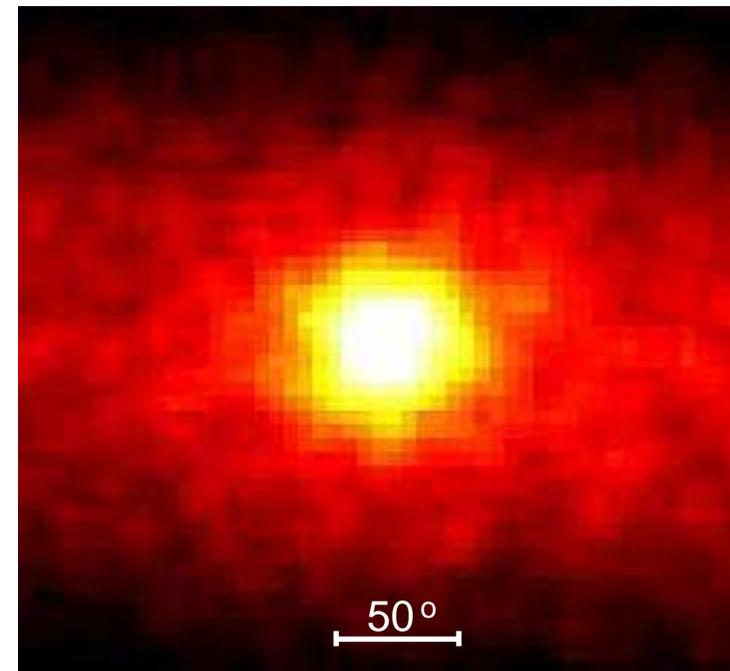
Nachweis-Reaktion

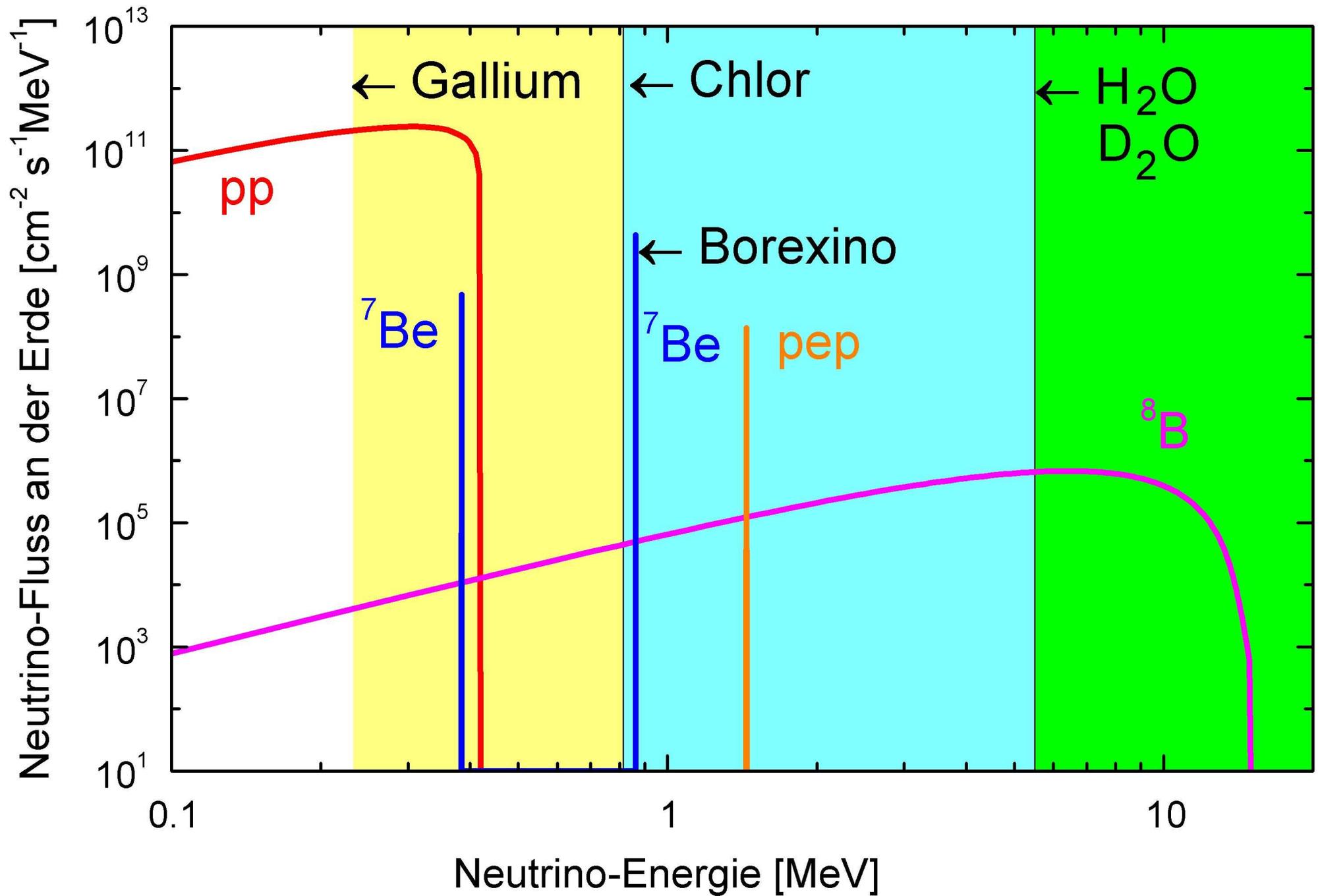


Stoß des Neutrinos mit einem Elektron, dies bewegt mit fast Lichtgeschwindigkeit im Wasser. Messung des dabei emittierten Lichts mit Lichtdetektoren (Photomultiplier). Bei großem Energieübertrag: Elektron behält annähernd die Flugrichtung des Neutrinos bei: **richtungsempfindlich !**

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

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





# 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:

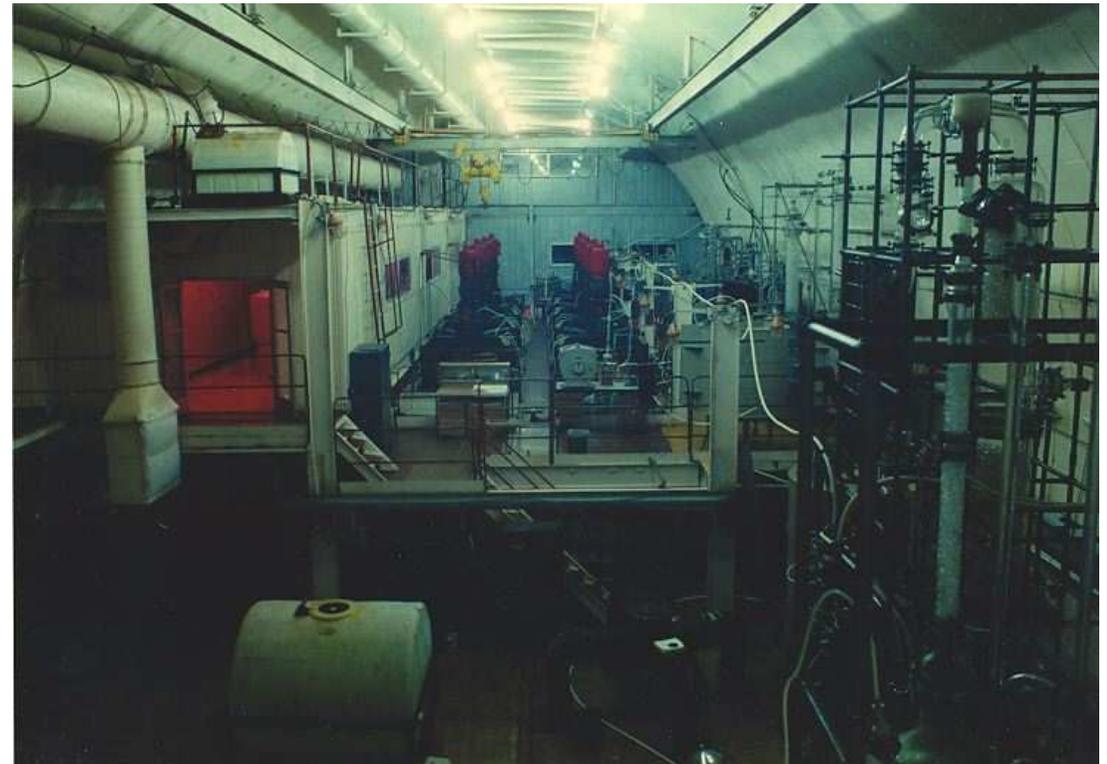
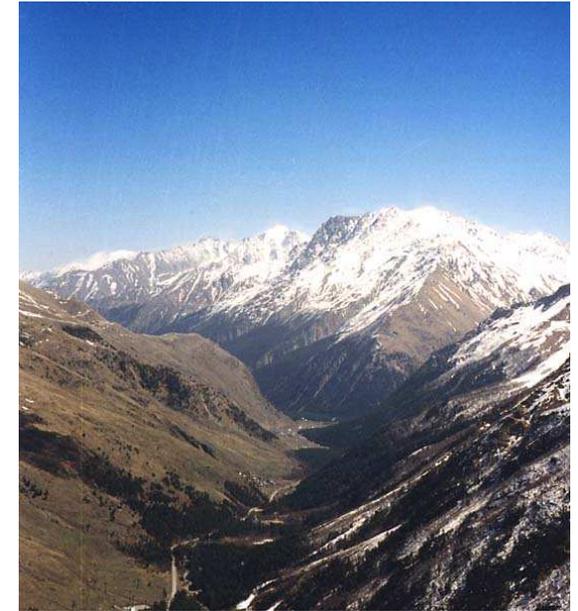
**~ 1 Reaktion pro Tag !**

- Extraktion von wenigen Ge-Atomen aus 30 Tonnen Gallium
- Nachweis einzelner  ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome durch Messung ihres radioaktiven Zerfalls (11,4 Tage Halbwertszeit)



# SAGE-Sonnenneutrino-Detektor

- Russisch–Amerikanische Kollaboration
- Baksan–Untergrund–Labor im Kaukasus
- 50 Tonnen Gallium in metallischer Form
- Messbeginn 1990



# GALLEX-Kollaboration

Deutschland: Heidelberg – Karlsruhe – München

Frankreich: Saclay – Nice

Italien: Gran Sasso – Milano – Rome

Israel: Rehovot

USA: Brookhaven

Mai 1991 – April 1997

- 65 Sonnenneutrino-Runs
- 2 Experimente mit einer  $^{51}\text{Cr}$ -Neutrinoquelle
- 1 Extraktions-Experiment mit  $^{71}\text{As}$



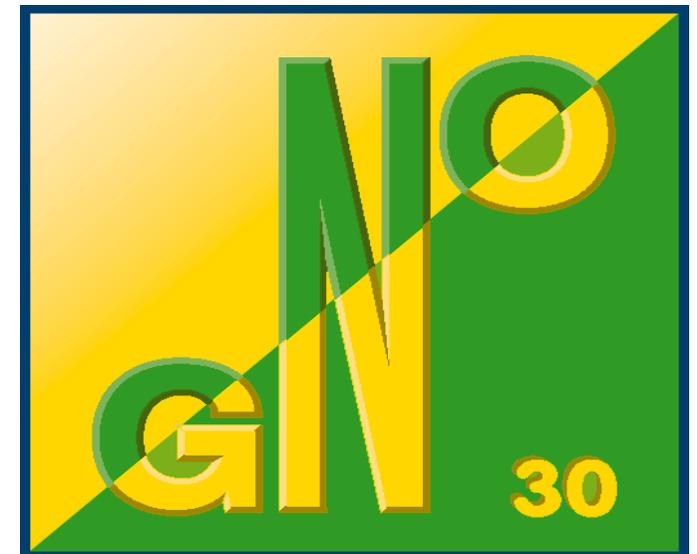
# GNO-Kollaboration

Italien: Mailand – Gran Sasso – Rom – L'Aquila

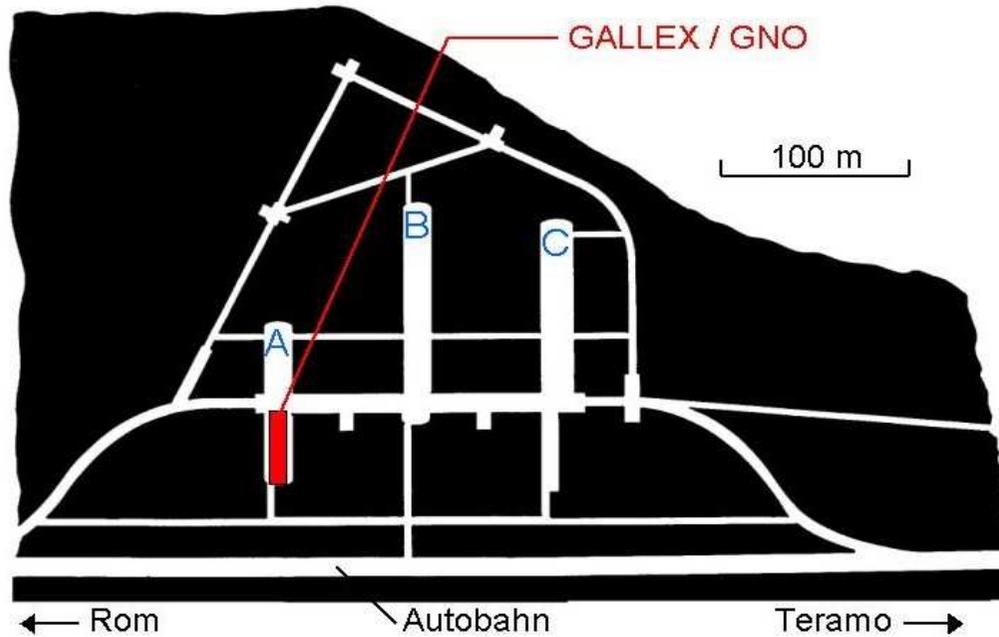
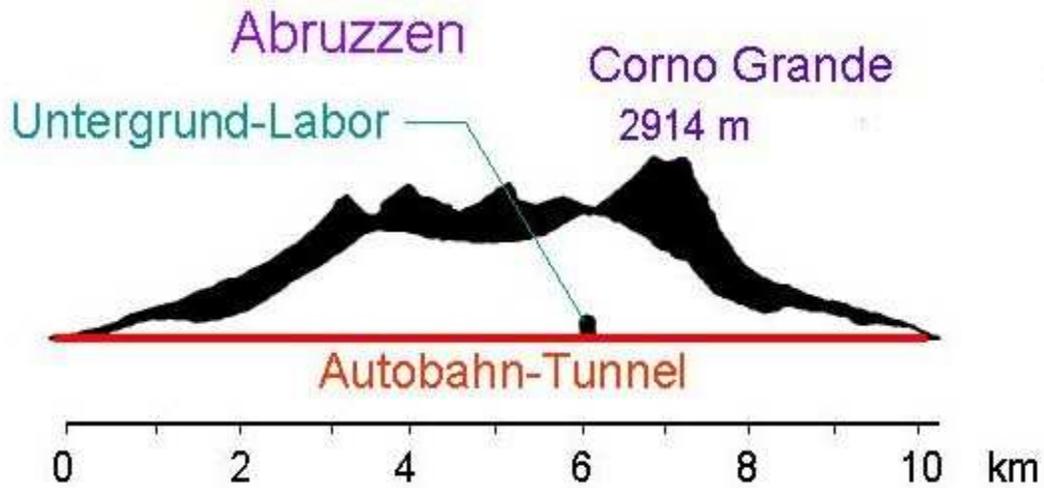
Deutschland: Heidelberg – Karlsruhe – München

April 1998 – April 2003

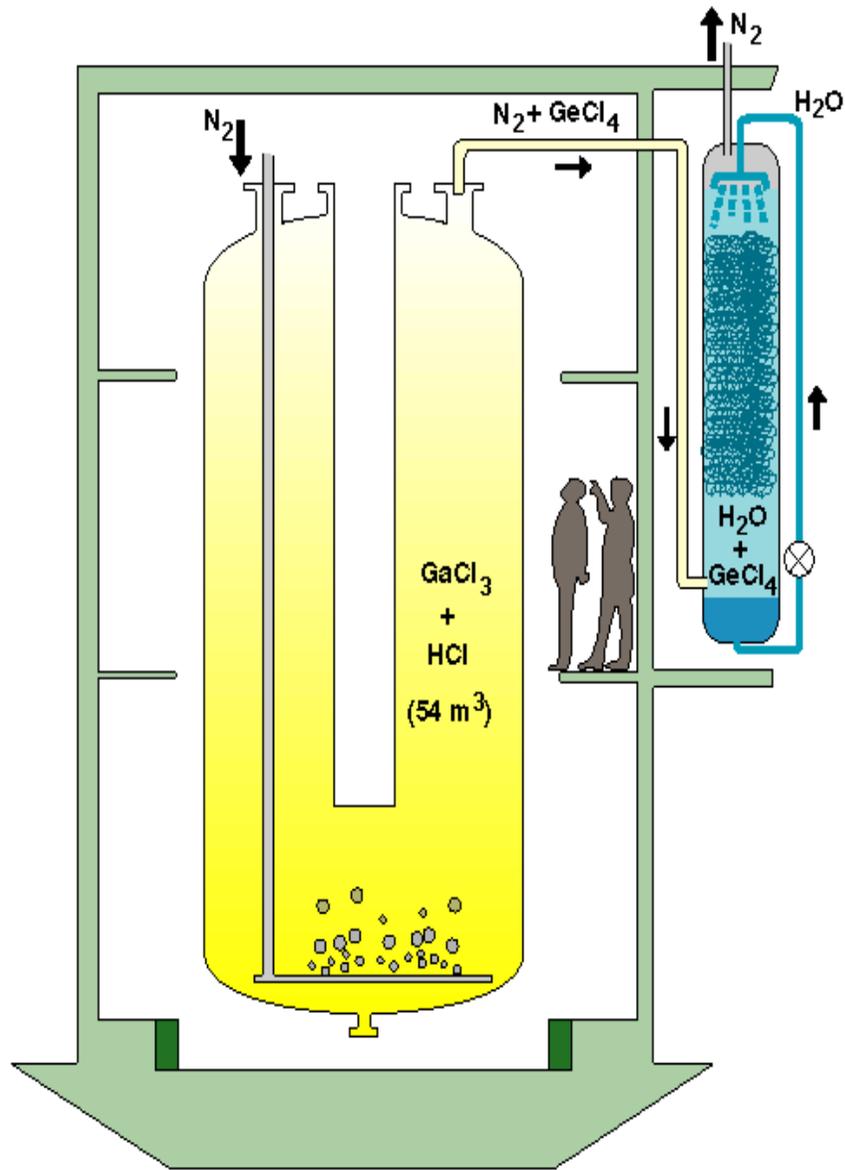
- 58 Sonnenneutrino-Runs



# Das Gran-Sasso-Untergrundlabor



# GALLEX/GNO-Sonnenneutrino-Detektor



## Detektor:

30.3 t Ga als  $\text{GaCl}_3 - \text{HCl}$  - Lösung  
(Gesamtgewicht 105 t)

## Exponierung:

für 3 bis 4 Wochen

## Extraktion:

Zugabe von 1 mg normalem Ge,  
wegen HCl-Überschuss  $\rightarrow \text{GeCl}_4$ ,  
spülen mit  $2000 \text{ m}^3 \text{ N}_2$

## Umwandlung:

$\text{GeCl}_4 + \text{NaBH}_4 \rightarrow \text{GeH}_4$

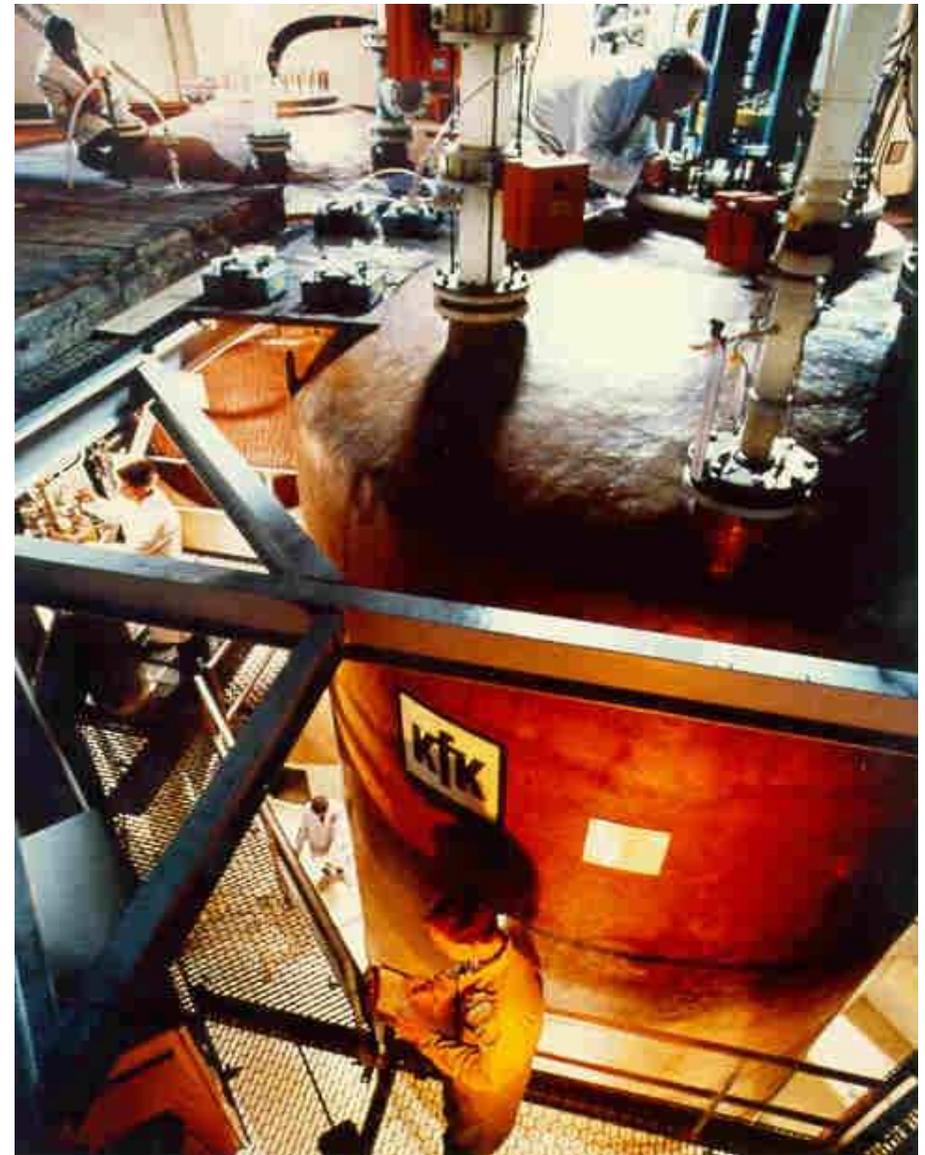
## Nachweis:

$\text{GeH}_4$  mit Xe in ein Proportional-  
Zählrohr ( $\sim 1 \text{ cm}^3$ ) füllen, Messen  
der Elektronen und Röntgenstrahlen  
vom  $^{71}\text{Ge}$ -Zerfall



# GALLEX / GNO

Absorptions-Kolonnen zum Auffangen des aus dem Gallium-Tank extrahierten Germaniums



Tank mit 30 Tonnen Gallium in Form von 105 Tonnen  $\text{GaCl}_3$ -Lösung

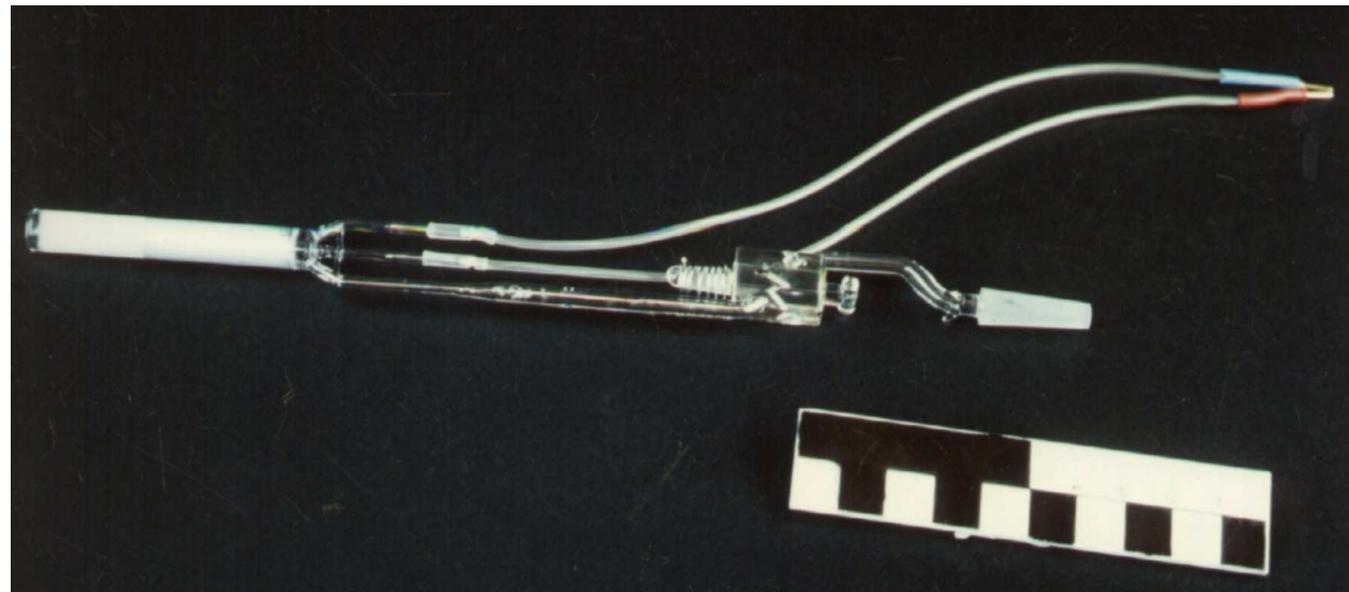
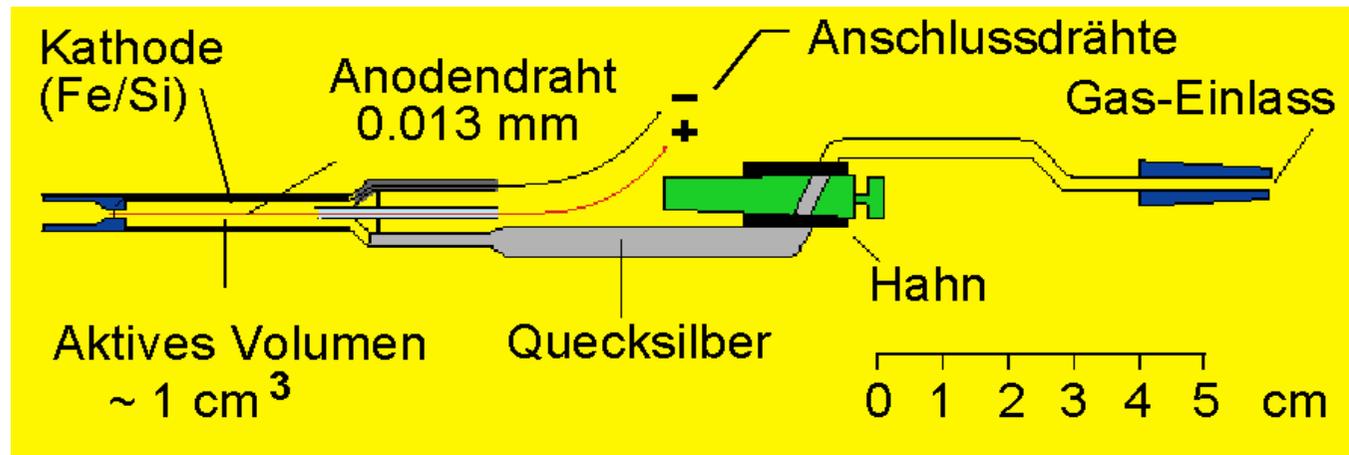


# GALLEX/GNO-Proportional-Zählrohr

Normales Zählrohr: ~ 3 Pulse / Minute

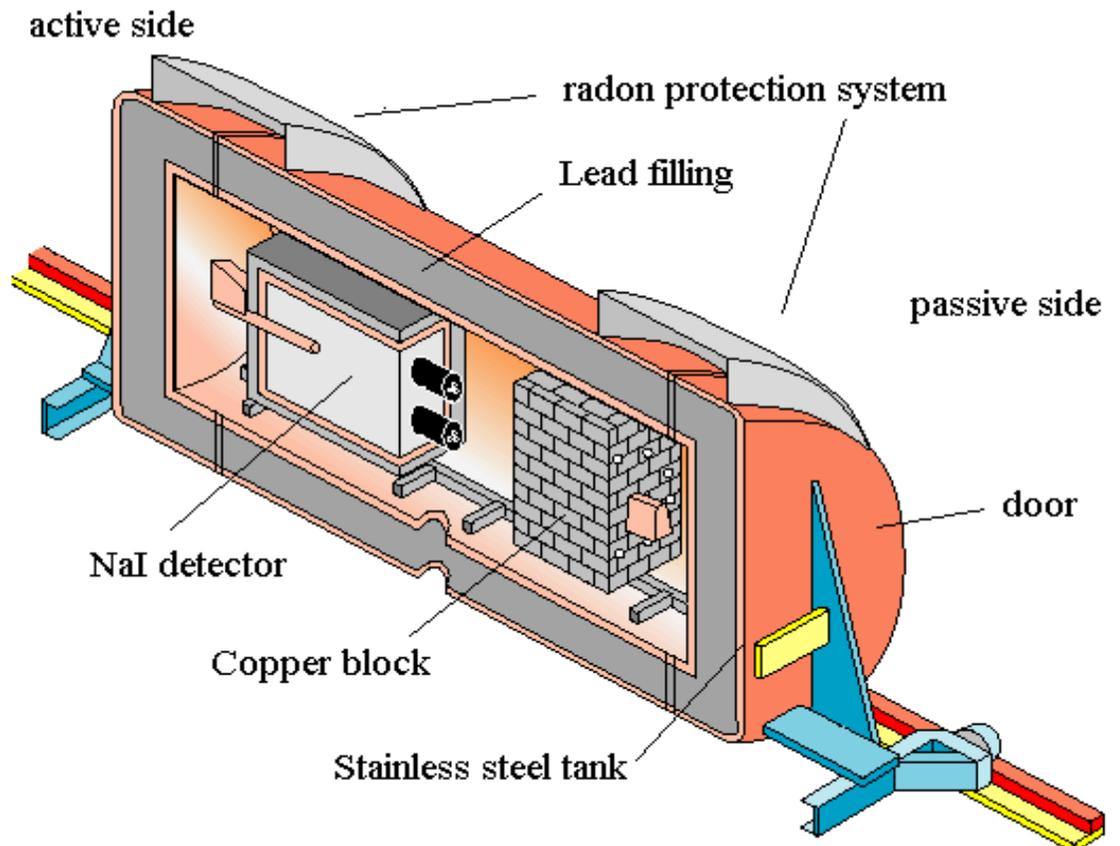
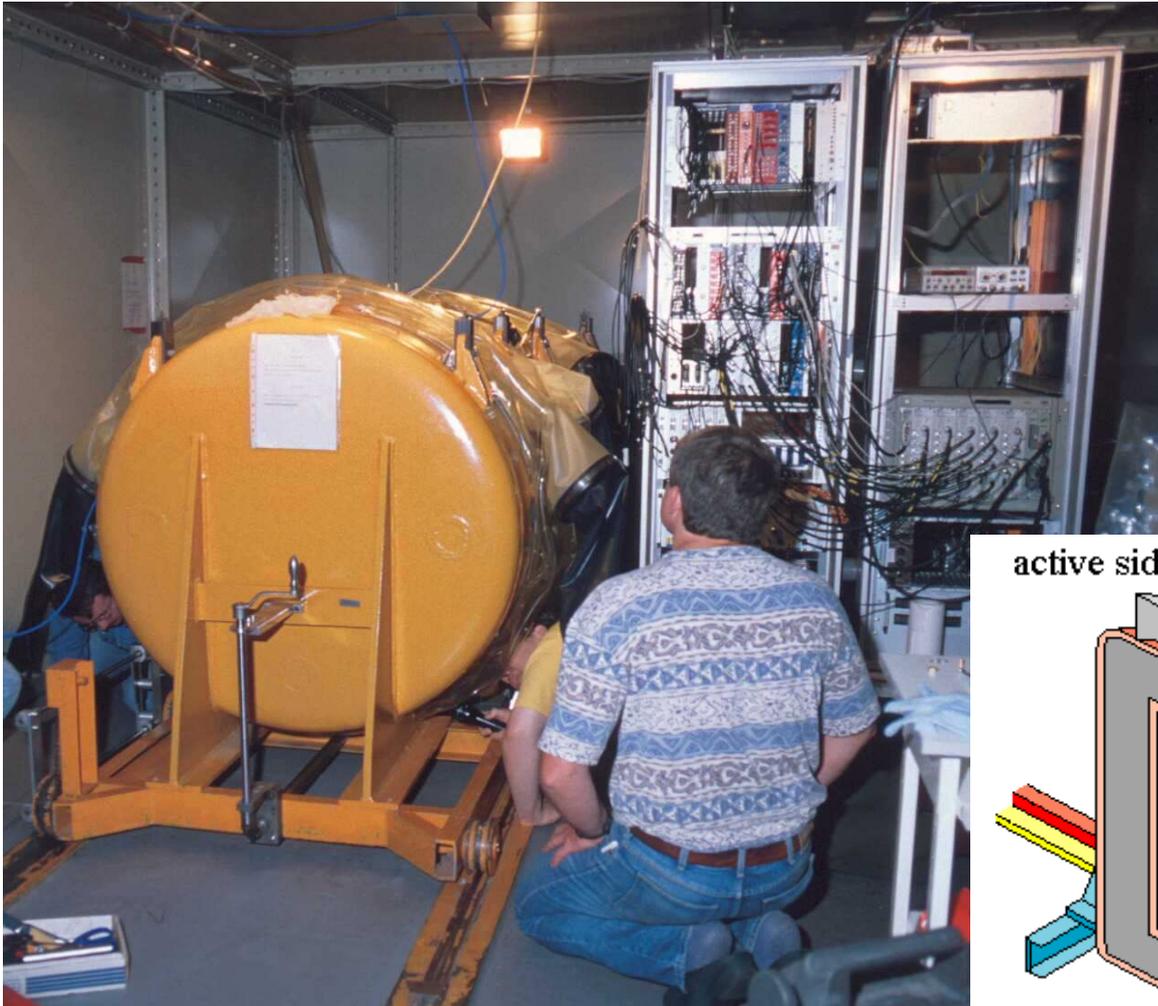
GALLEX/GNO-Zählrohr: ~ 1 Puls / 3 Wochen → Faktor 100.000 !

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

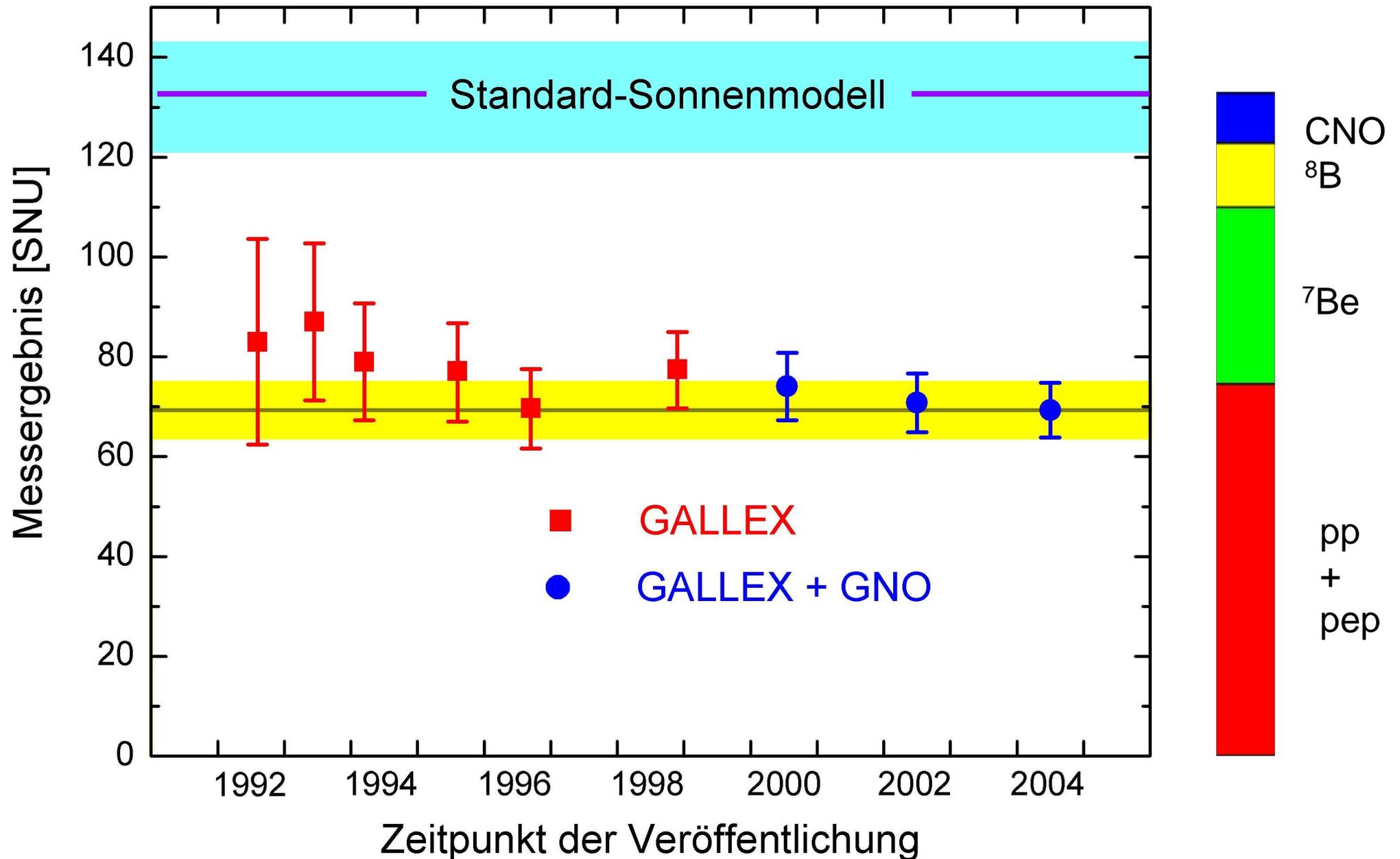


# GALLEX / GNO

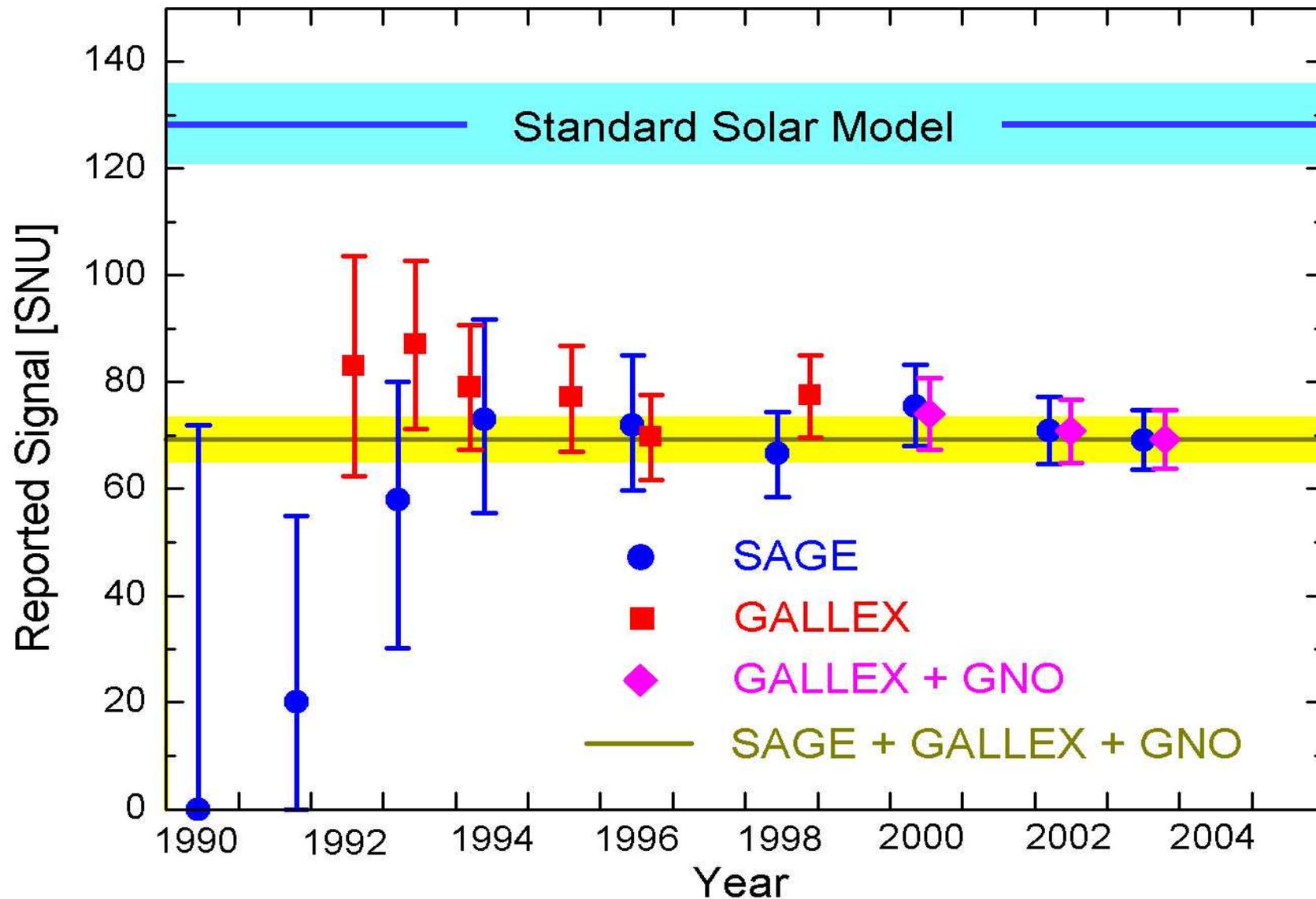
Abschirmtank für die  
Proportional-Zählrohre



# Ergebnis der GALLEX/GNO-Sonnenneutrino-Experimente



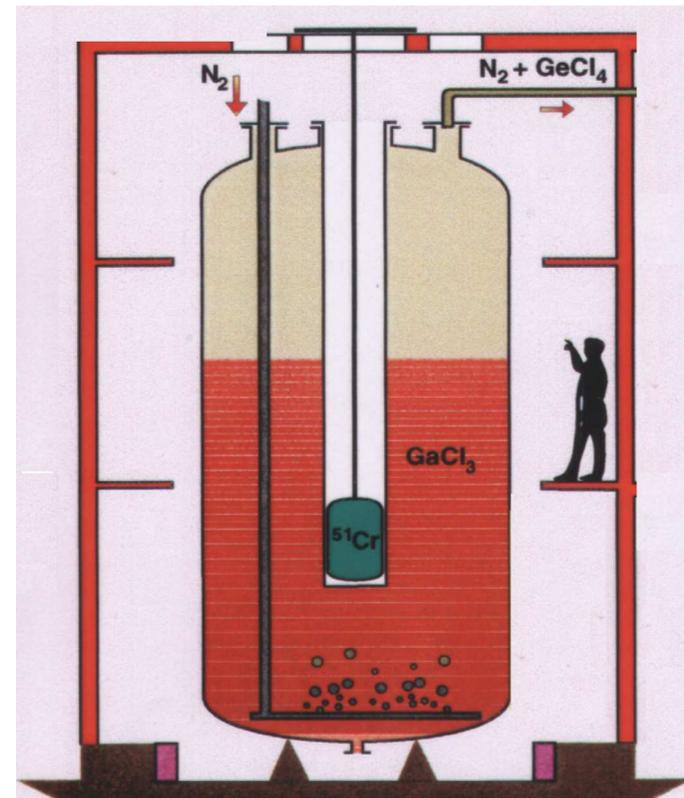
# Ergebnisse beider Gallium-Sonnenneutrino-Experimente



# GALLEX $^{51}\text{Cr}$ Neutrinoquell-Experimente



Stärkste jemals hergestellte künstliche Neutrinoquelle ( $6 \times 10^{16}$  Bequerel)



Ergebnis: innerhalb der Fehlergrenzen wurde der Erwartungswert gemessen, d.h. der GALLEX-Detektor funktioniert einwandfrei !



# Was bedeutet das GALLEX-GNO-Ergebnis ?

- pp-Neutrinos nachgewiesen

→ experimentelle Bestätigung für den Ablauf der Wasserstoff-Fusion in der Sonne

- entweder

→ die gegenwärtig in der Sonne ablaufenden Fusionsreaktionen reichen nicht aus, um die heutige Leuchtkraft der Sonne zu erzeugen

oder aber

→ aufgrund von Neutrino-Oszillationen erreichen nicht alle in der Sonne produzierten Elektron-Neutrinos die terrestrischen Detektoren als Elektron-Neutrinos



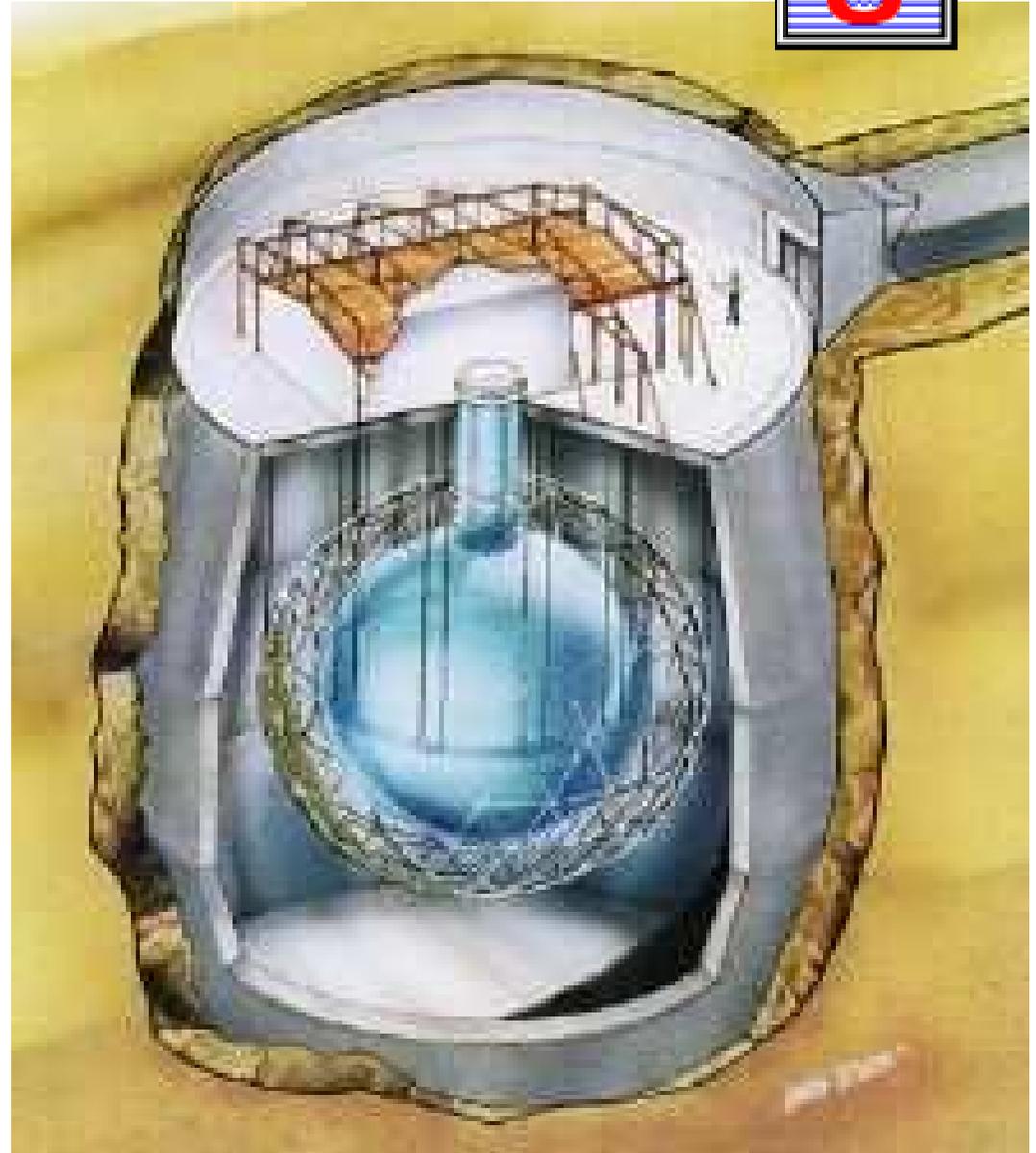
# Der SNO-Sonnenneutrino-Detektor



Detektor mit 1000 Tonnen  
schwerem Wasser ( $D_2O$ )

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

Neutrino-Reaktionen:



# Resultate aller 6 Sonnenneutrino-Experimente

ergeben Defizit verglichen mit SSM → Sonnenneutrino-Problem

Detektor	Sensitivität für Sonnen-Neutrinos	Ergebnis (in % vom SSM-Erwartungswert)
Homestake ( $\nu + {}^{37}\text{Cl}$ )	${}^8\text{B}$ , ${}^7\text{Be}$	$30 \pm 7$
Kamiokande ( $\nu + e^-$ )	${}^8\text{B}$	$48 \pm 13$
Super-Kam. ( $\nu + e^-$ )		$41 \pm 9$
GALLEX/GNO ( $\nu + {}^{71}\text{Ga}$ )	pp, ${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$	$53 \pm 6$
SAGE ( $\nu + {}^{71}\text{Ga}$ )		$51 \pm 6$
SNO ( $\nu + d$ )	${}^8\text{B}$	$30 \pm 7$
( $\nu + e^-$ )		$41 \pm 10$
( $\nu + d$ )		$86 \pm 21$



nur Elektron-Neutrinos



überwiegend Elektron-Neutrinos



alle Neutrino-Arten

# Teilchenphysikalische Lösung des Sonnenneutrino-Rätsels

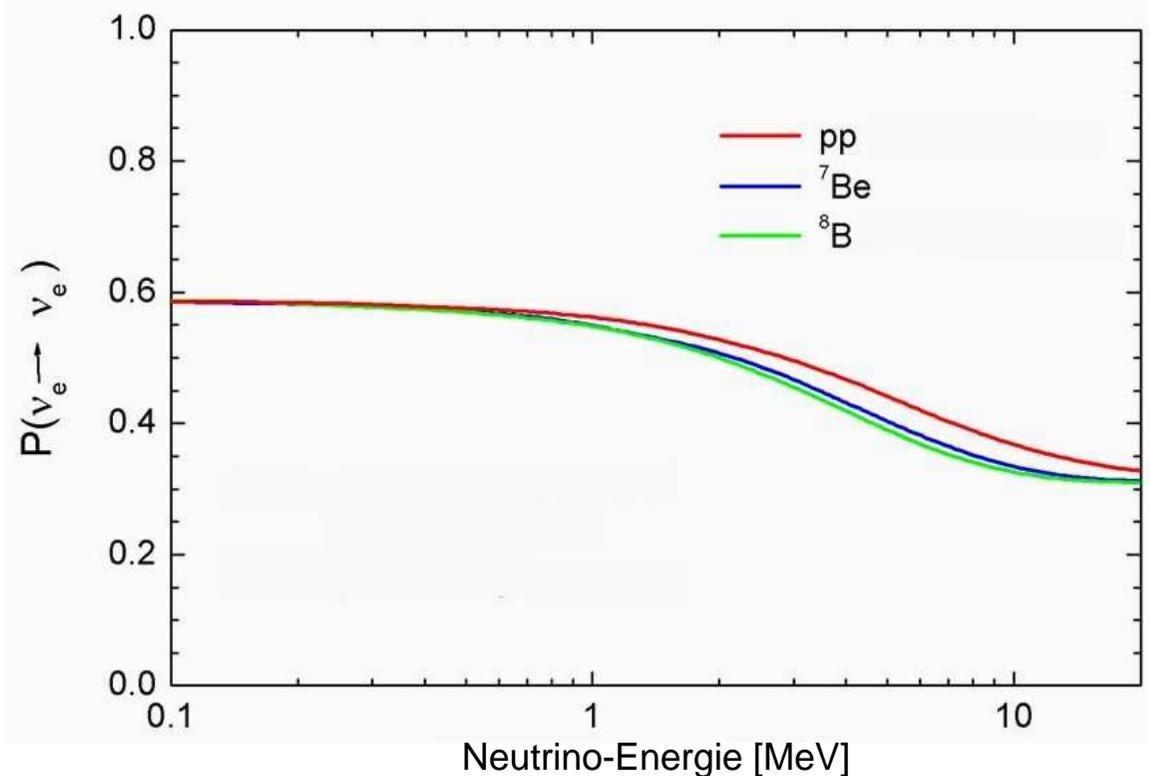
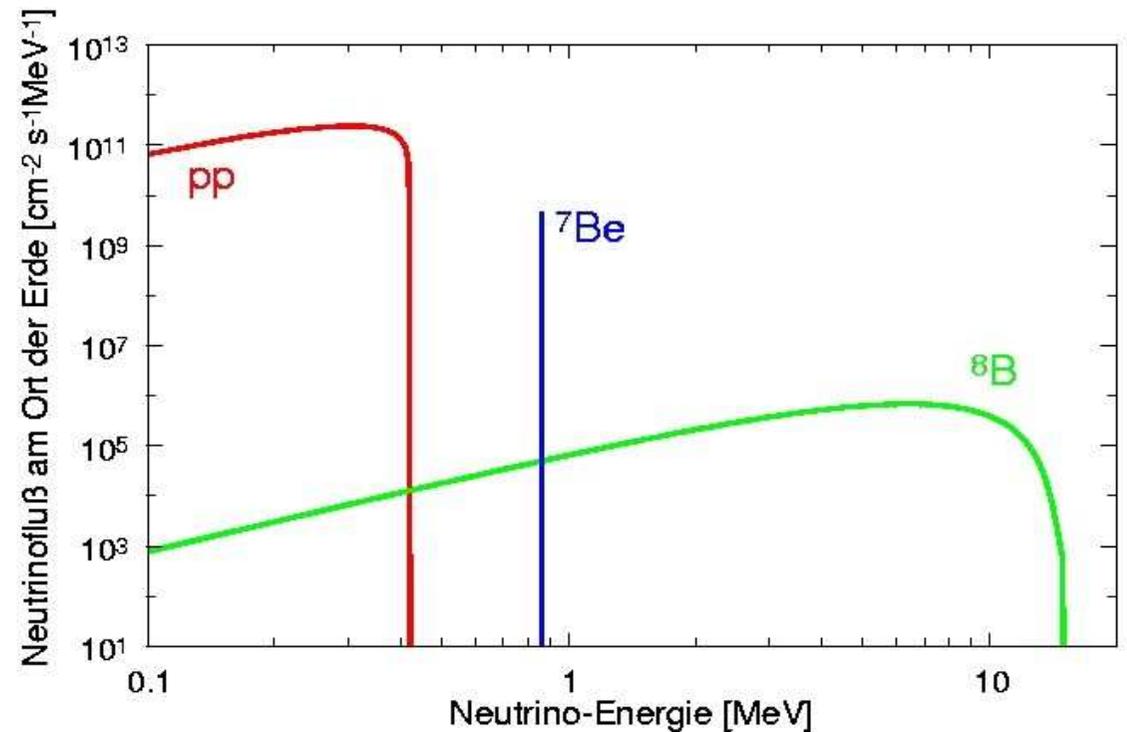
Es gibt einen Satz von Neutrino-Oszillations-Parametern, der alle Sonnenneutrino-Daten in Übereinstimmung mit den Vorhersagen des Standard-Sonnenmodells bringt

➔ der Elektron-Neutrinofluss ist am Ort der Erde reduziert auf:

~ 60% für pp-Neutrinos

~ 55% für  ${}^7\text{Be}$ -Neutrinos

~ 35% für  ${}^8\text{B}$ -Neutrinos  
( $> 5 \text{ MeV}$ )

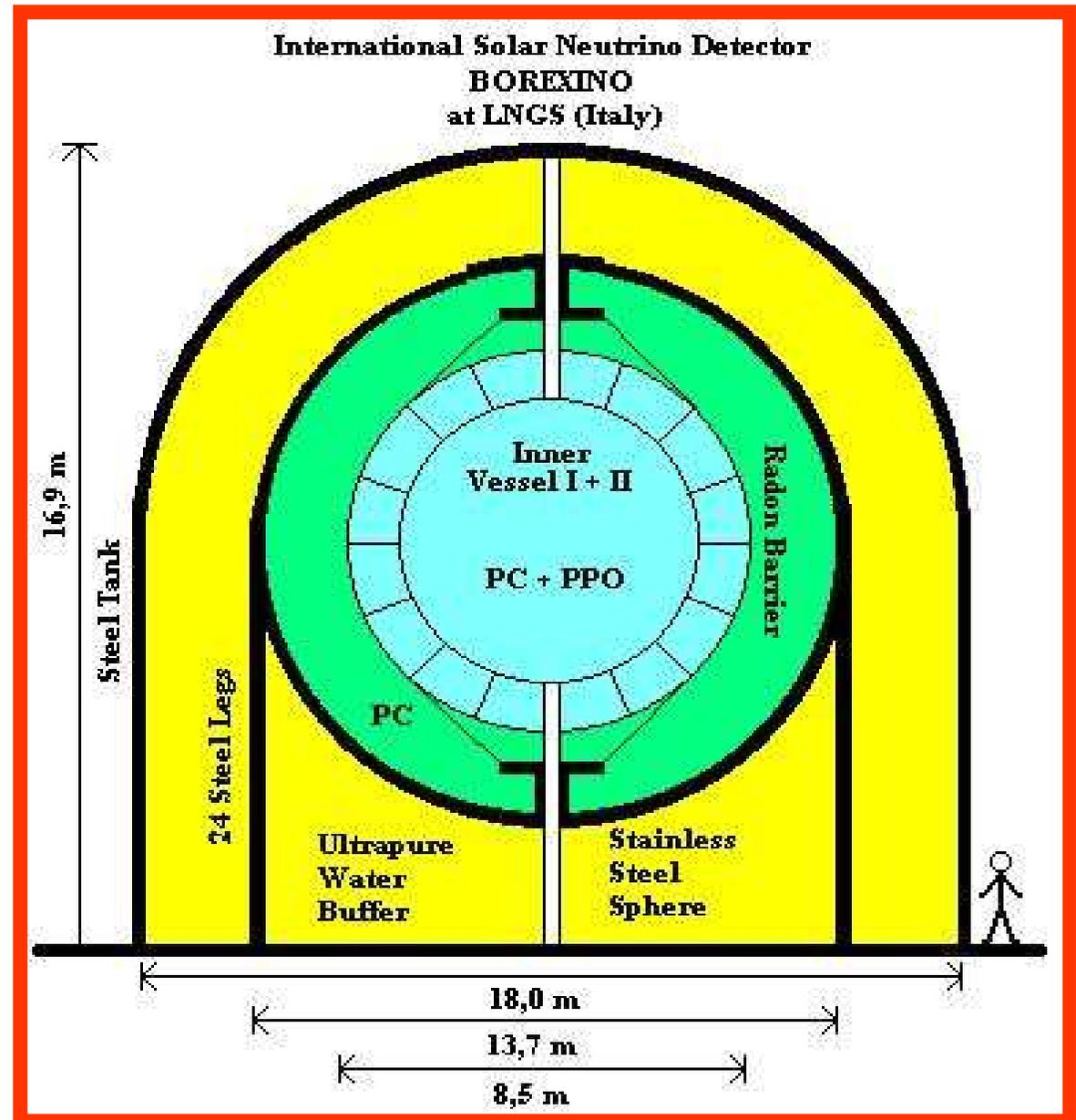


# Der Borexino-Sonnenneutrino-Detektor in Halle C des Gran-Sasso-Untergrund-Labors



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

Messbeginn noch  
in diesem Jahr !



# Sonnenneutrino-Rätsel gelöst !

- Das Standard-Sonnenmodell der Astrophysik ist im wesentlichen korrekt
  - siehe auch Vortrag „Helioseismologie – Einblicke in das Innere der Sonne“
- Neutrinos haben eine von Null verschiedene Ruhmasse, deshalb können sich die Elektron-Neutrinos auf dem Weg vom Sonnenzentrum zur Erde in andere Neutrino-Arten umwandeln (Neutrino-Oszillationen)
  - inzwischen sind Neutrino-Oszillationen auch für atmosphärische Neutrinos, Reaktor-Neutrinos und Beschleuniger-Neutrinos nachgewiesen und es ergibt sich ein insgesamt konsistentes Bild

