

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

$\gamma$ -Astronomie

Detektoren  
auf  
Satelliten

(außer Hochenergie  $\gamma$ -Astronomie)

- Teilchenstrahlung

geladene Teilchen (p,  $\alpha$ , e)

ungeladene Teilchen ( $\nu$ )

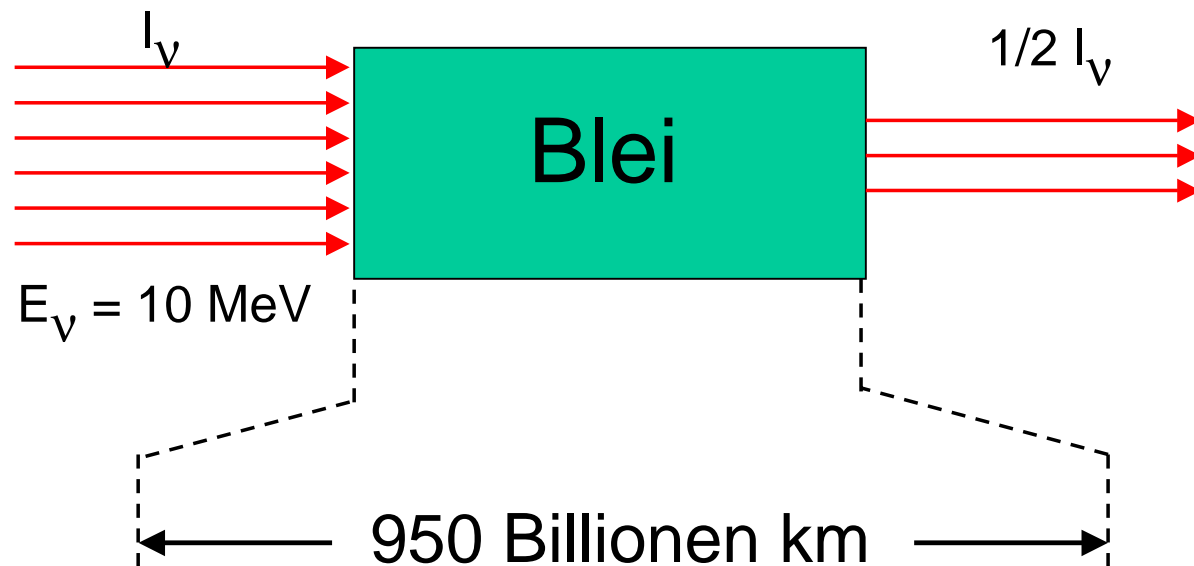
Problem: Magnetfelder

Hier:

Astronomie mit Neutrinos ?

# Eigenschaften des Elementarteilchens Neutrino ( $\nu$ )

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



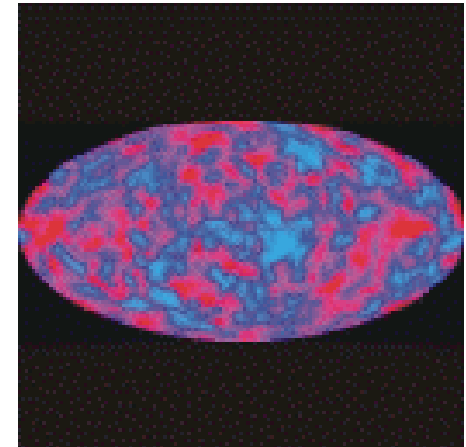
$$( = 6.3 \cdot 10^6 \text{ AE} = 100 \text{ Lichtjahre} )$$

# Wo entstehen Neutrinos ?

## ● Natürliche Neutrinoquellen

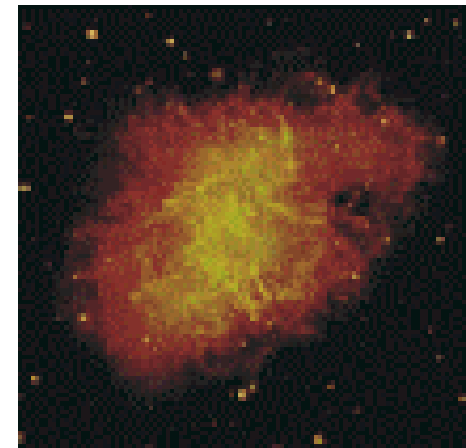
### Urknall

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



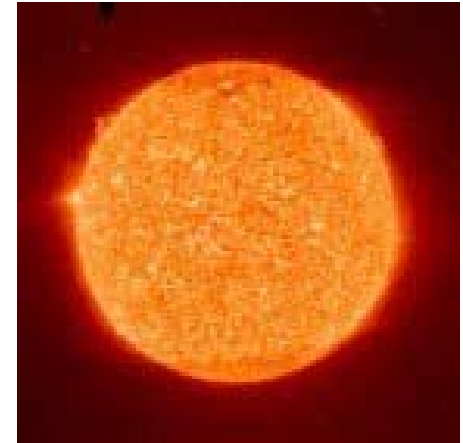
### Supernovae

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.



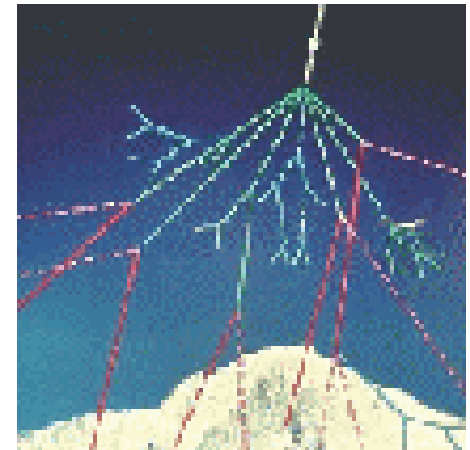
## Sonne und Sterne

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 ( $\beta$ -Zerfälle) im Erdinneren entstehen Neutrinos



## ● Künstliche Neutrinoquellen

### Teilchen-Beschleuniger

Mit großen Teilchenbeschleunigern kann man sehr intensive Neutrinostrahlen herstellen



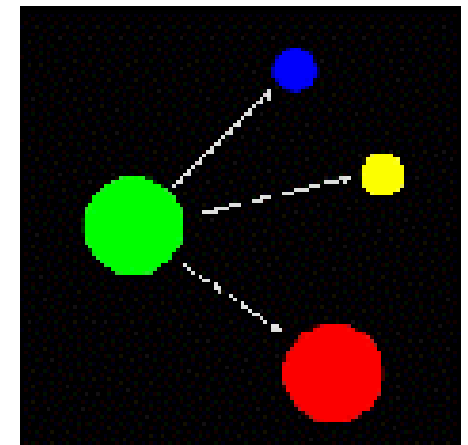
### Kernreaktoren

Bei der Kernspaltung in Reaktoren werden ebenfalls Neutrinos erzeugt



### Künstliche radioaktive Quellen

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



# Wie produziert die Sonne ihre Energie ?

- Chemische Energie

Sonne aus Steinkohle  $\longrightarrow$  ~ 5000 Jahre

- Gravitations-Energie

Sonne zieht sich zusammen (Helmholtz, Kelvin)  
 $\longrightarrow$  ~ 30 Millionen Jahre

- Kernfusion

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

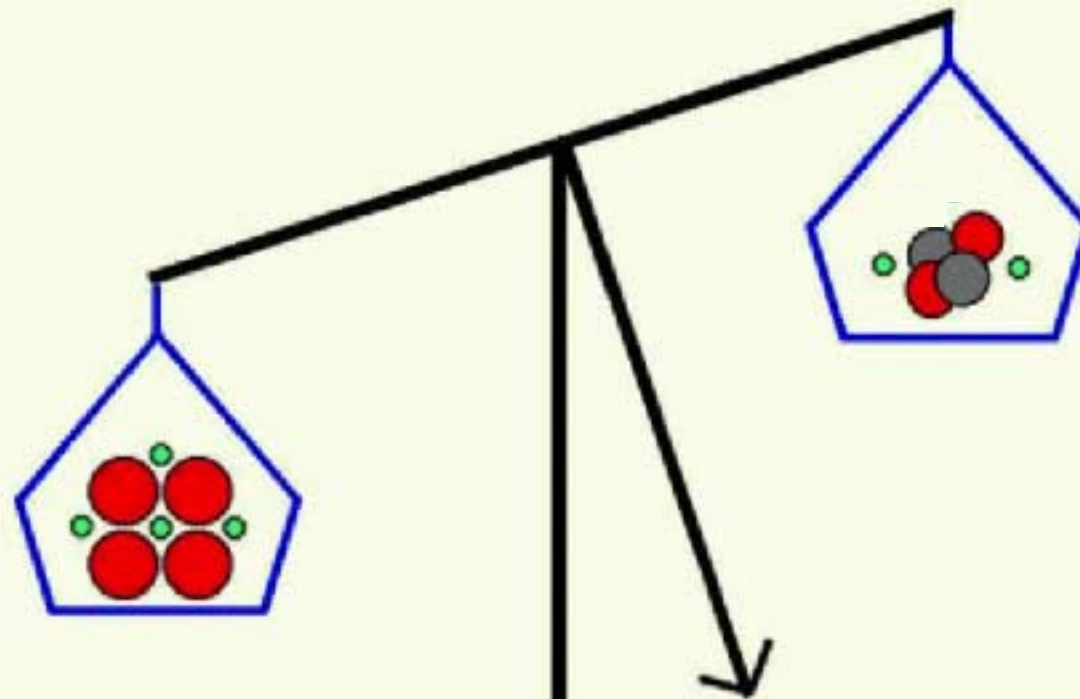
$$\text{Einstein: } E = m \times c^2$$

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

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

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

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



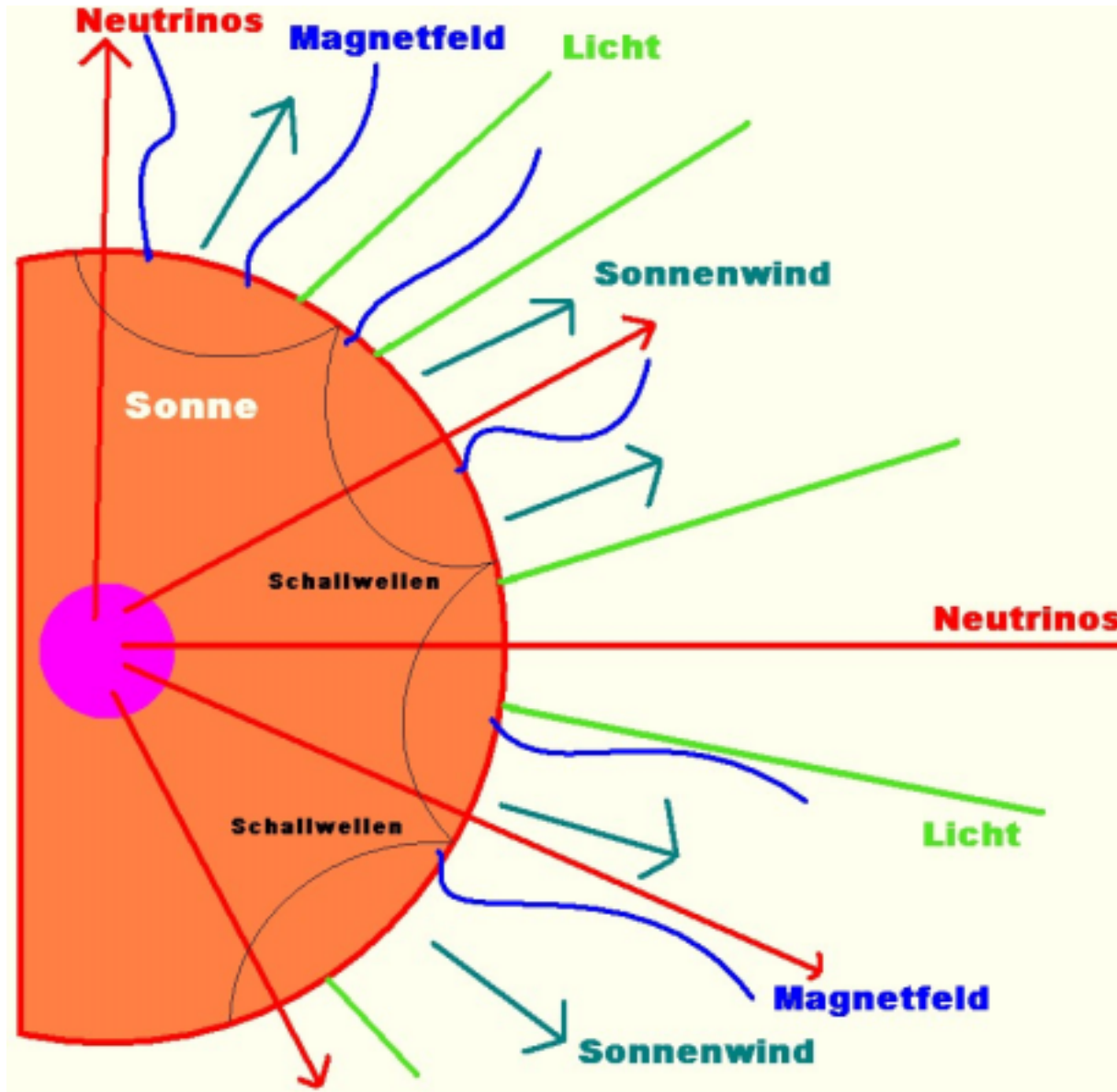
4 Protonen  
+ 4 Elektronen

Helium-Kern  
+ 2 Elektronen

0.7 % leichter als

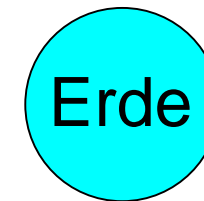


# Informationen von der Sonne



- Elektromagnetische Strahlung (Licht, Wärme)

- Sonnenwind (Teilchen)

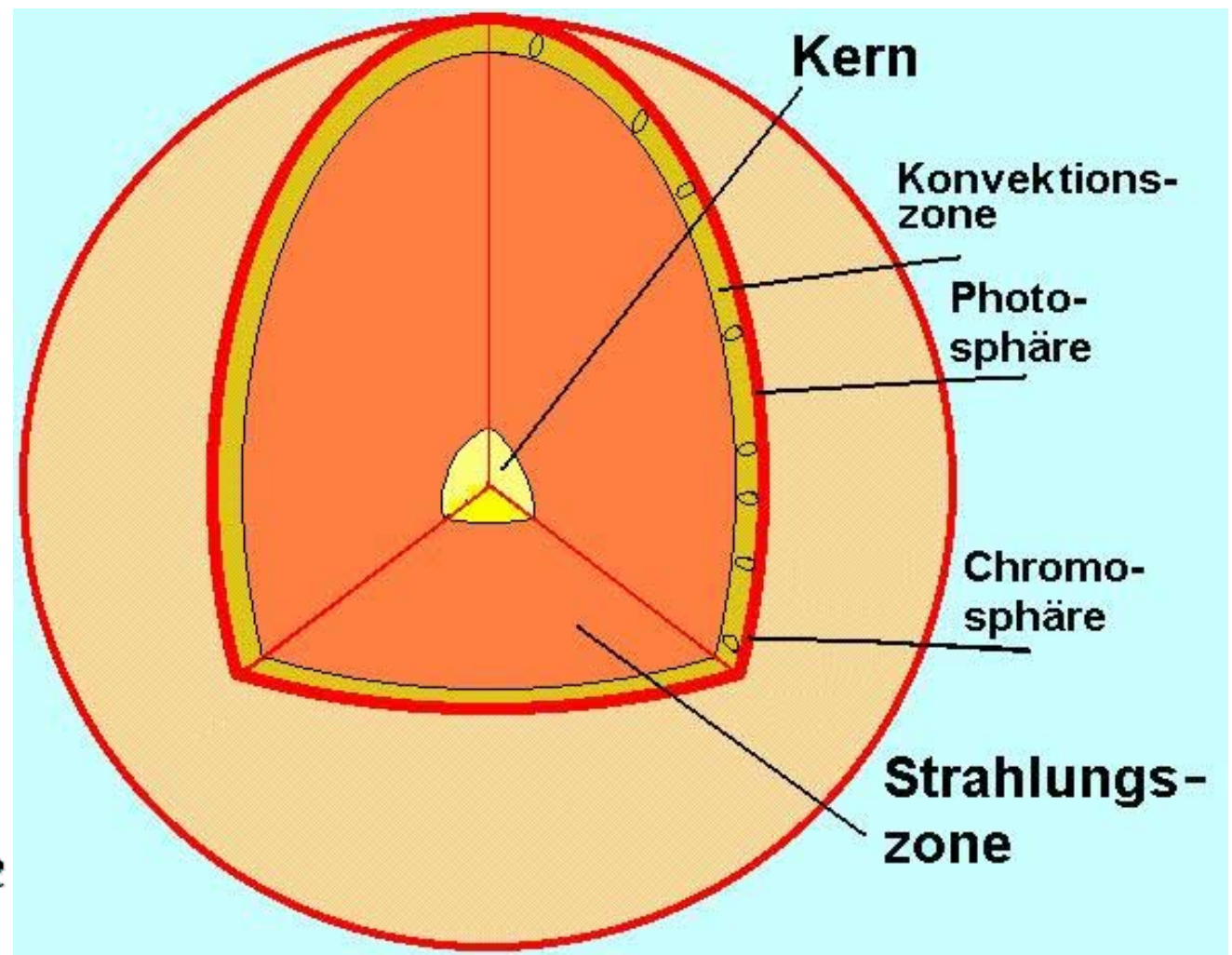


- Magnetfelder
- Schallwellen
- Neutrinos

# 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 !

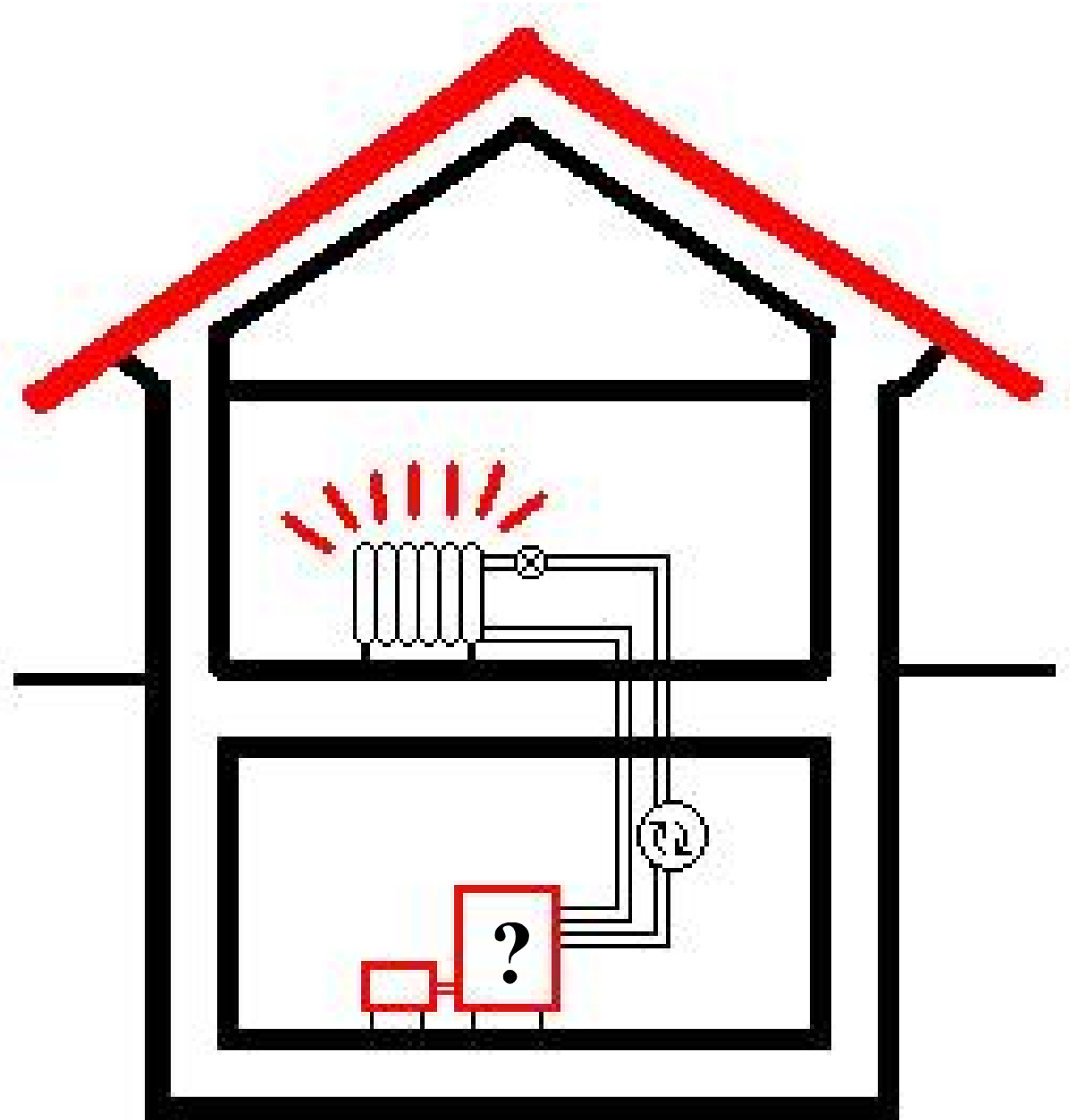


# Wie erzeugt die Sonne ihre Energie ?

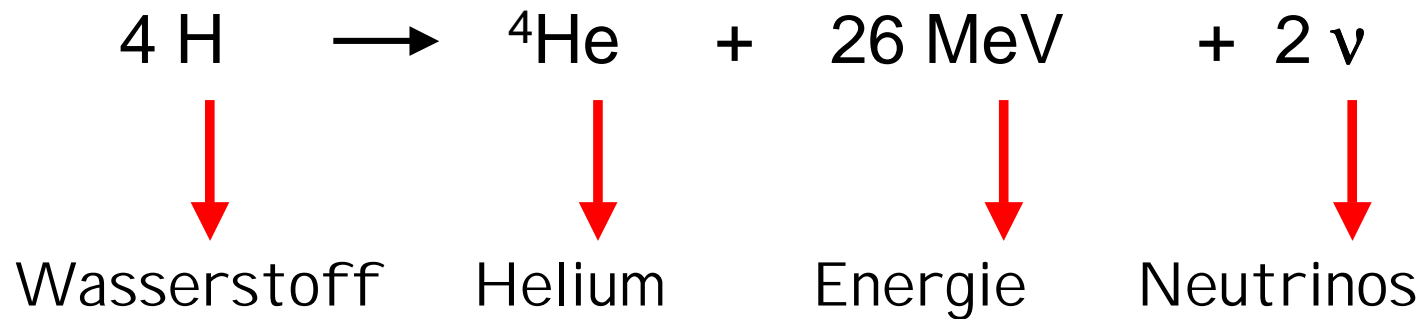
Vergleich:  
Heizung eines Hause

2 Fragen:

- (1) Welcher Brennstoff  
(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:

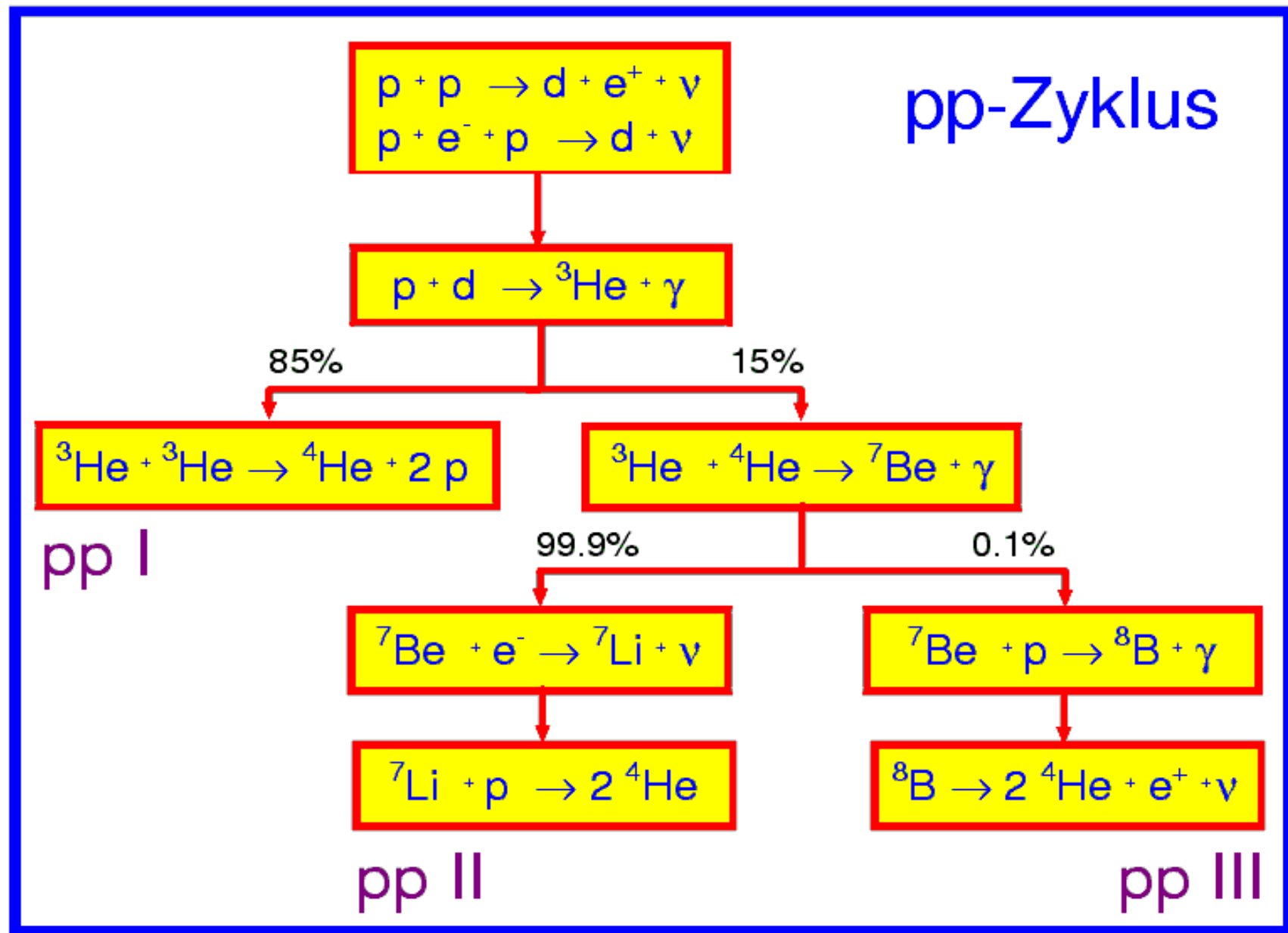
$$\Phi_{\nu} = \frac{L_{\text{Sonne}}}{13 \text{ MeV} \cdot 4\pi R^2}$$
$$= 65 \text{ Milliarden /cm}^2 \text{ sec}$$

$$L_{\text{Sonne}} = 4 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

$$R = 1 \text{ AE} = 150 \text{ Millionen km}$$

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

# Reaktionen des Proton-Proton-Zyklus in der Sonne



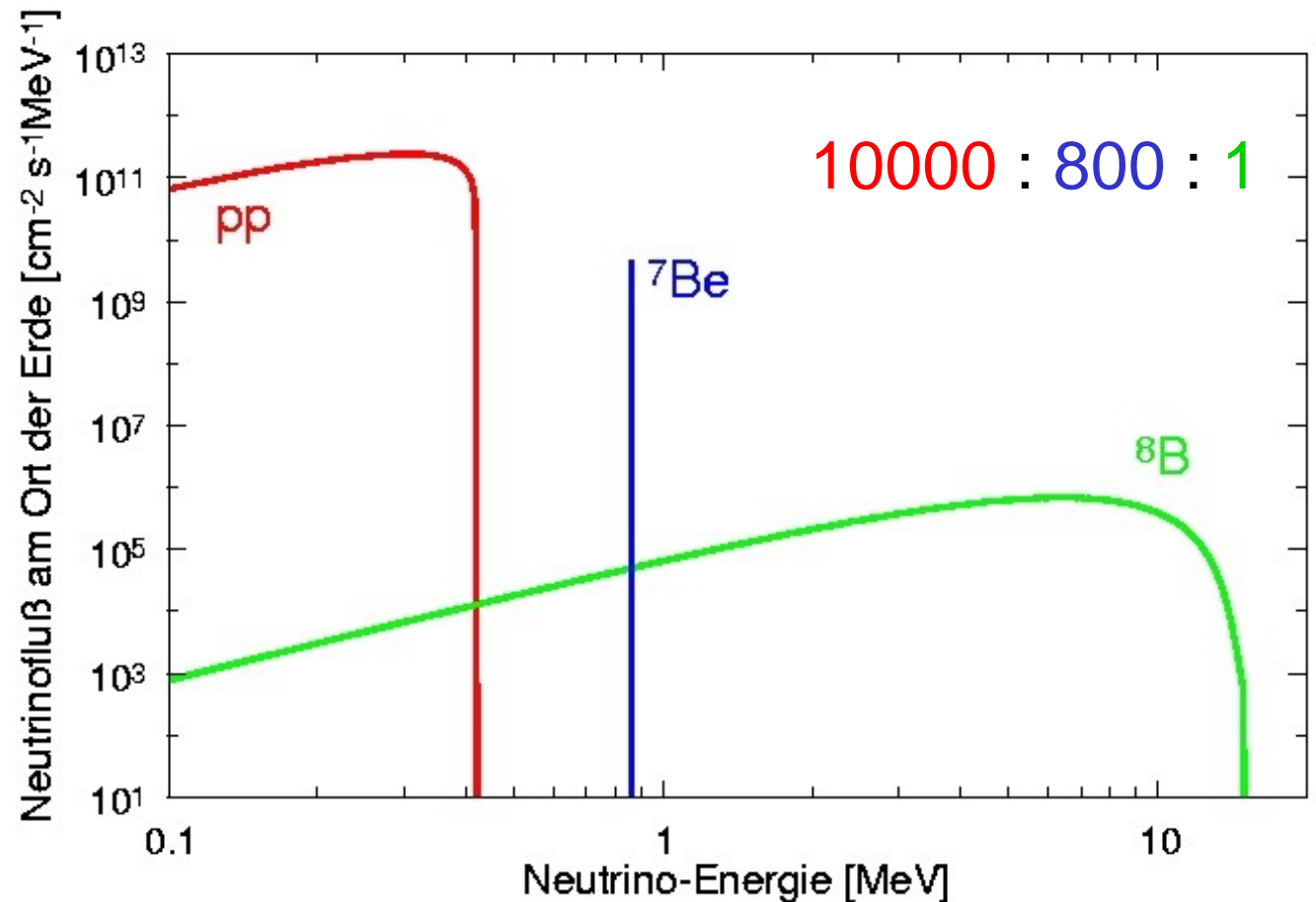
# Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos

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

$^7\text{Be}$ -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



# 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



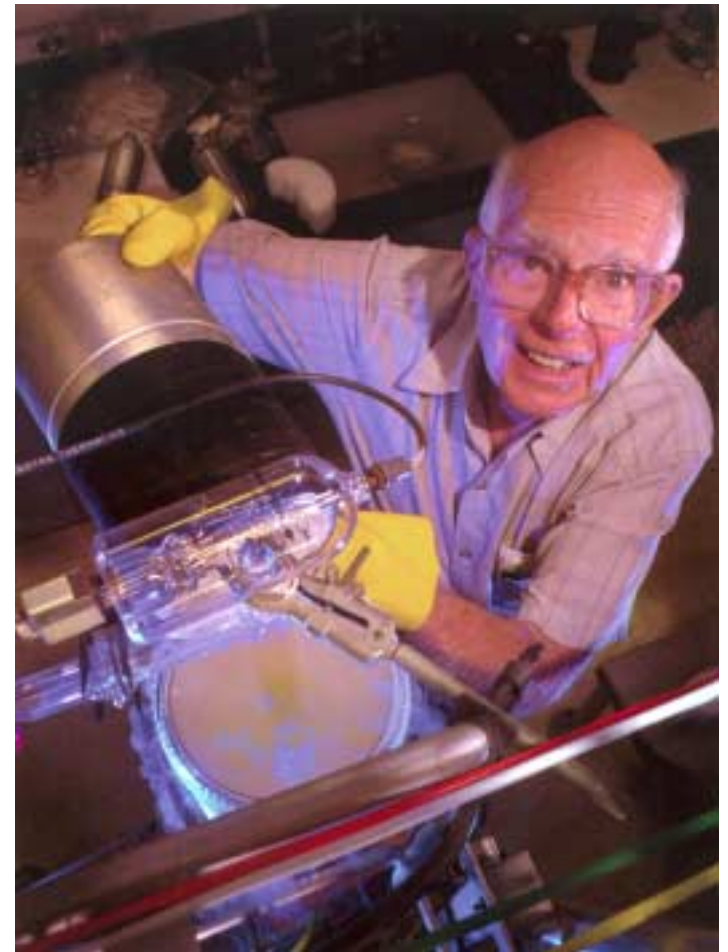
# Pionier der Neutrino-Astronomie

## 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

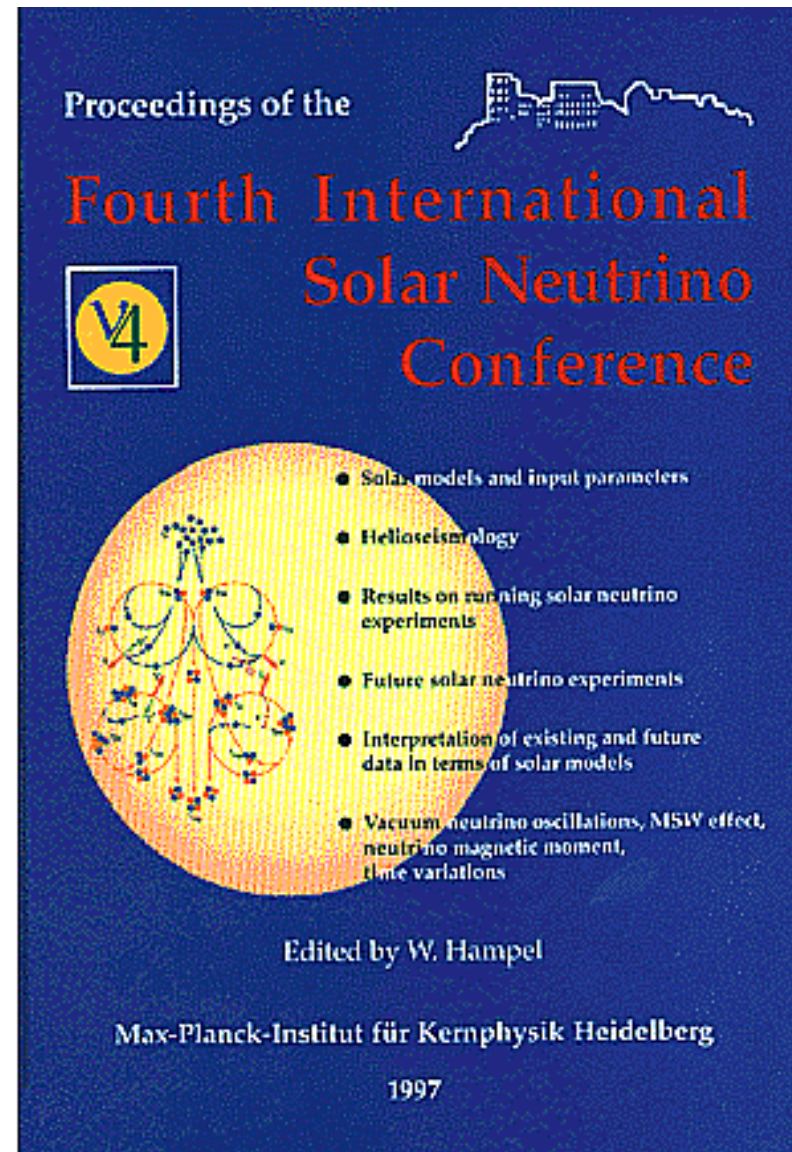
Heidelberg, 8. - 11. April 1997

## 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 Koshihara**

University of Tokyo, Japan

**Raymond Davis Jr.**

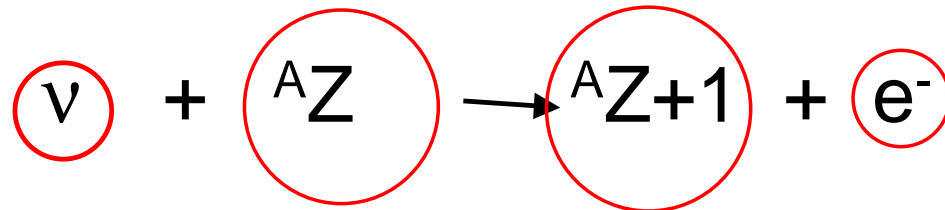
University of Pennsylvania,  
Philadelphia, USA



# Sonnenneutrino-Nachweis

im Prinzip zwei Möglichkeiten:

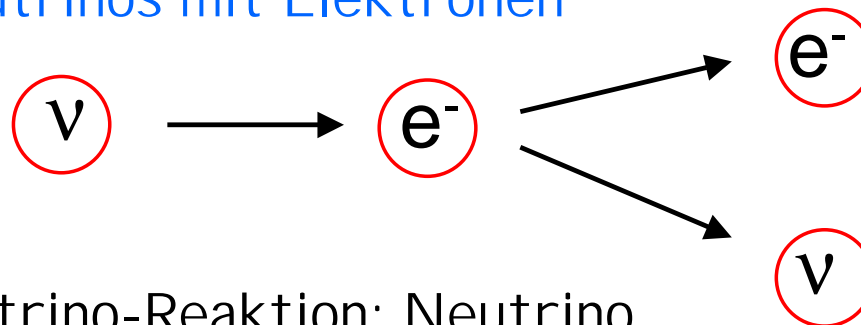
- Reaktionen von Neutrinos mit Atomkernen



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  $\text{C}_2\text{Cl}_4$   
(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:  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 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 Koshiha (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)

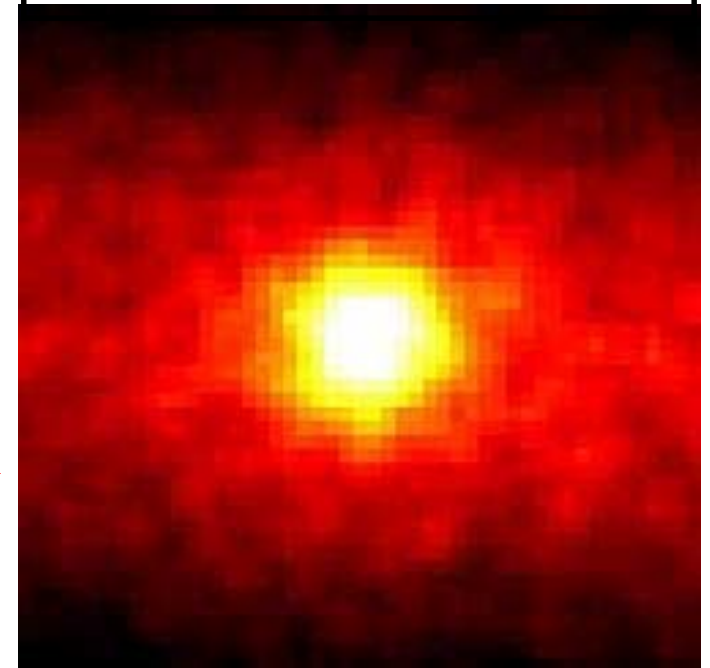
Nachweis-Reaktion



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** !

**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



# Die Supernova 1987A

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

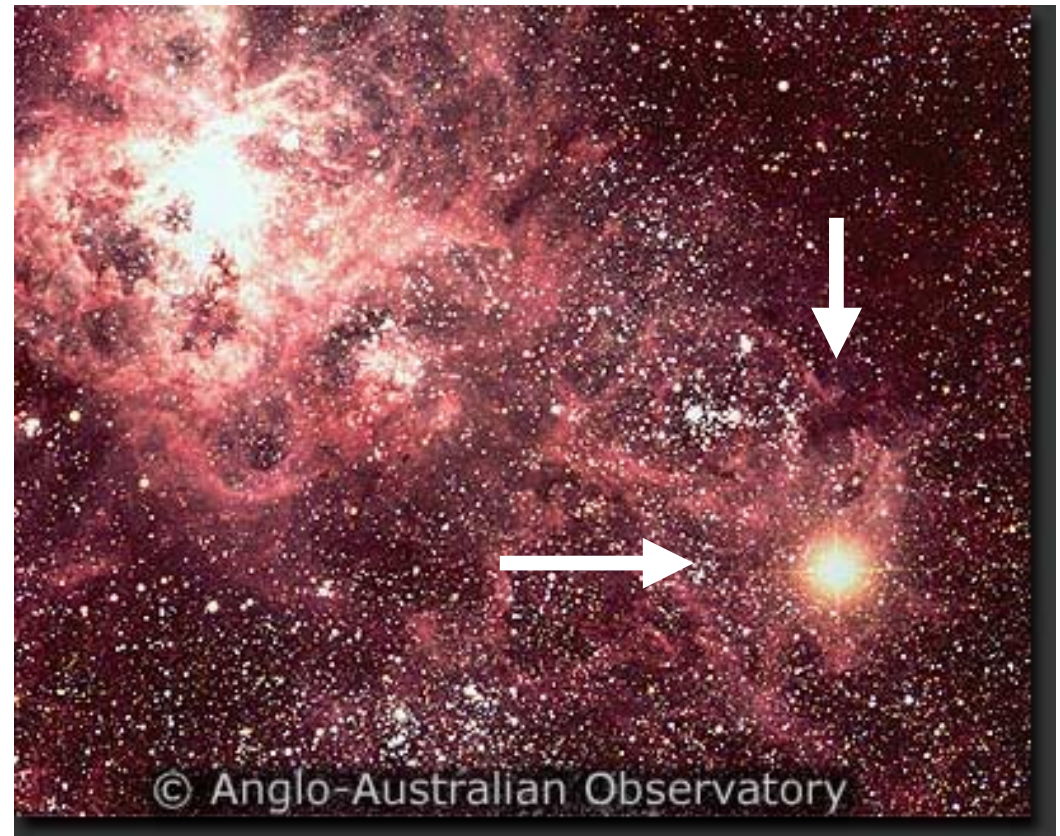
Entfernung von der Erde: 150.000 Lichtjahre

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 !



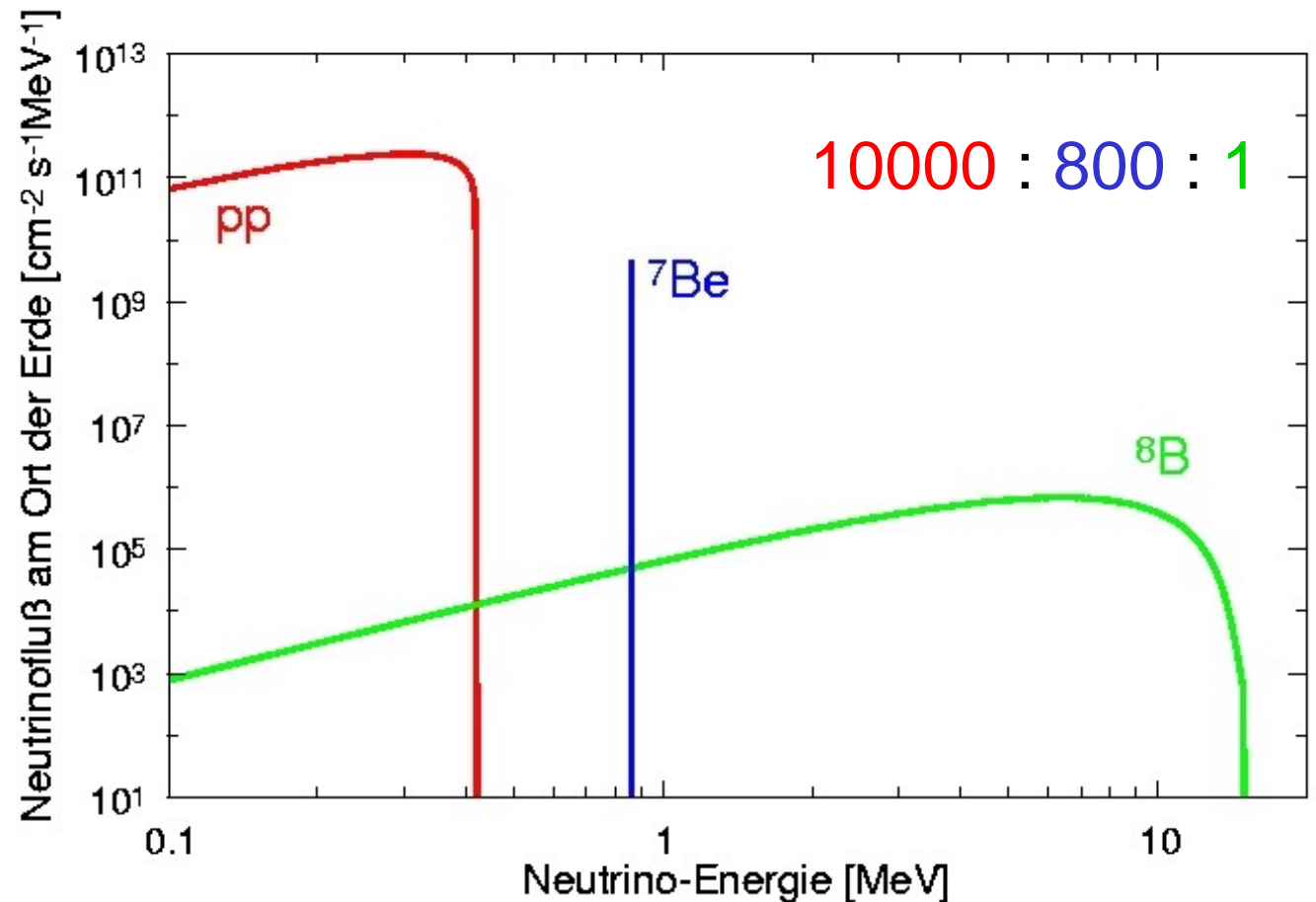
# Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos

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

$^7\text{Be}$ -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-Experimente am MPI für Kernphysik

## GALLEX

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



## GNO

Nachfolge-Experiment von GALLEX, läuft seit 1998



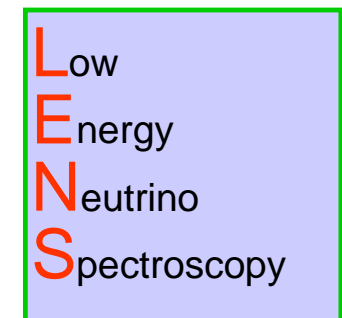
## Borexino

Messung der  $^7\text{Be}$ -Neutrinos, wird gegenwärtig aufgebaut, Messbeginn im Jahr 2003



## LENS

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



# Reaktionen von Sonnenneutrinos mit Gallium



Atomkern des Elements  
Gallium (31 Protonen,  
40 Neutronen)

Atomkern des Elements  
Germanium (32 Protonen,  
39 Neutronen)

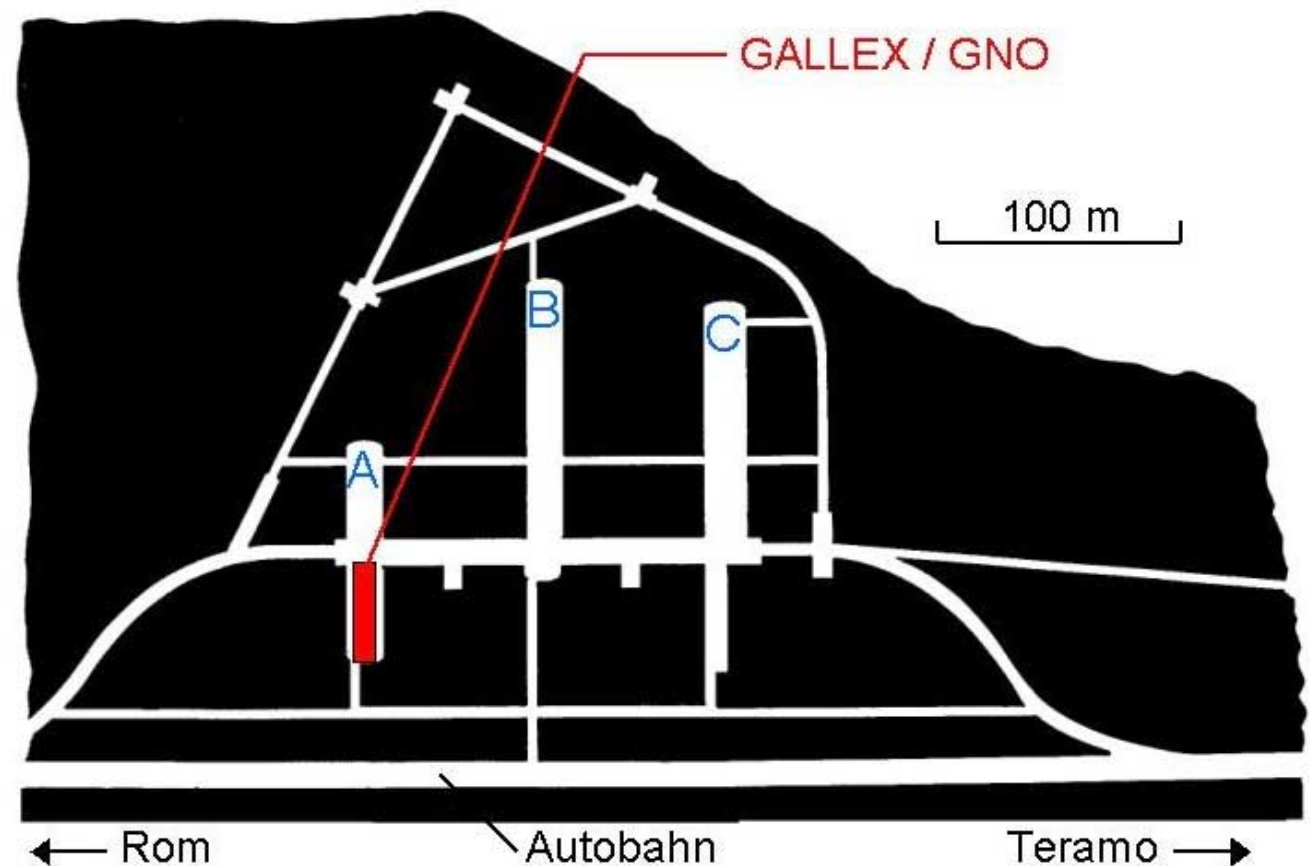
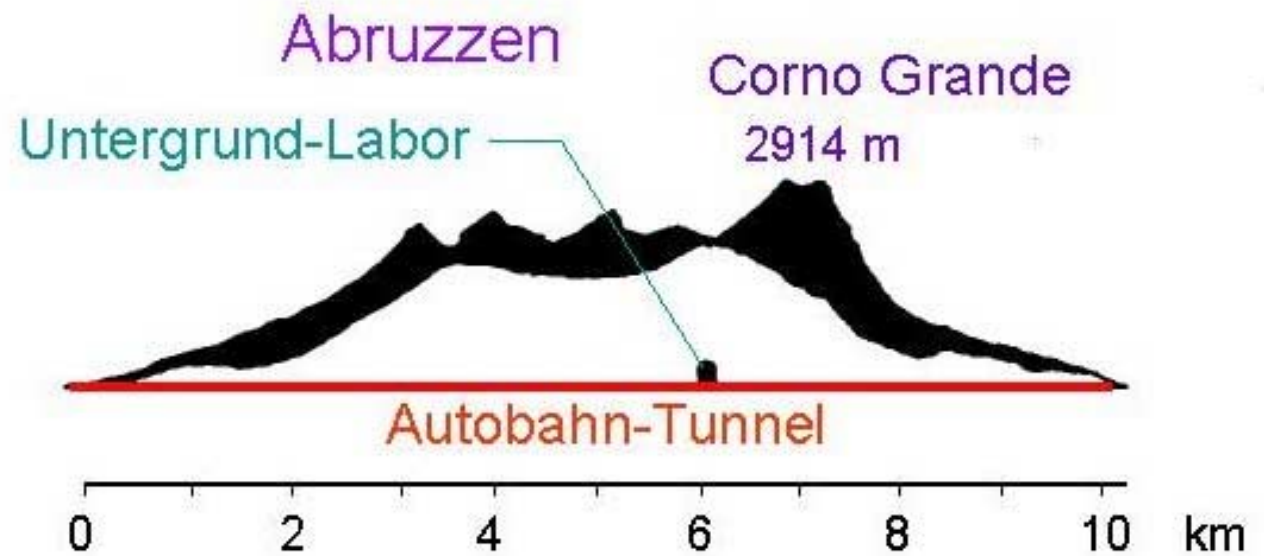
In 30 Tonnen Gallium ( $10^{29}$   ${}^{71}\text{Ga}$  Atome) erwartet:

~ 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



Physik am Samstagmorgen - 23.11.02

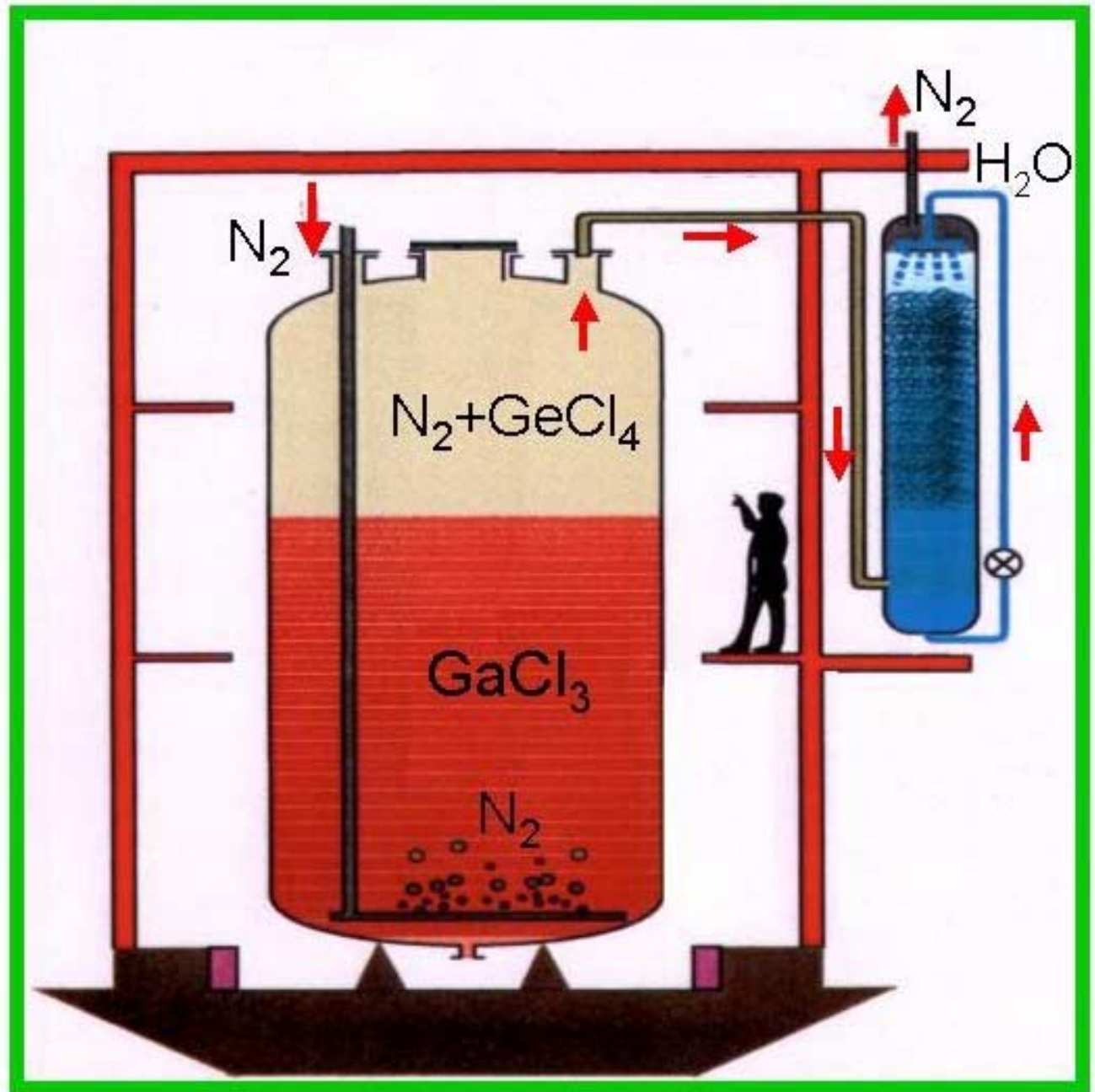


W. Hampel MPIK Heidelberg

# 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

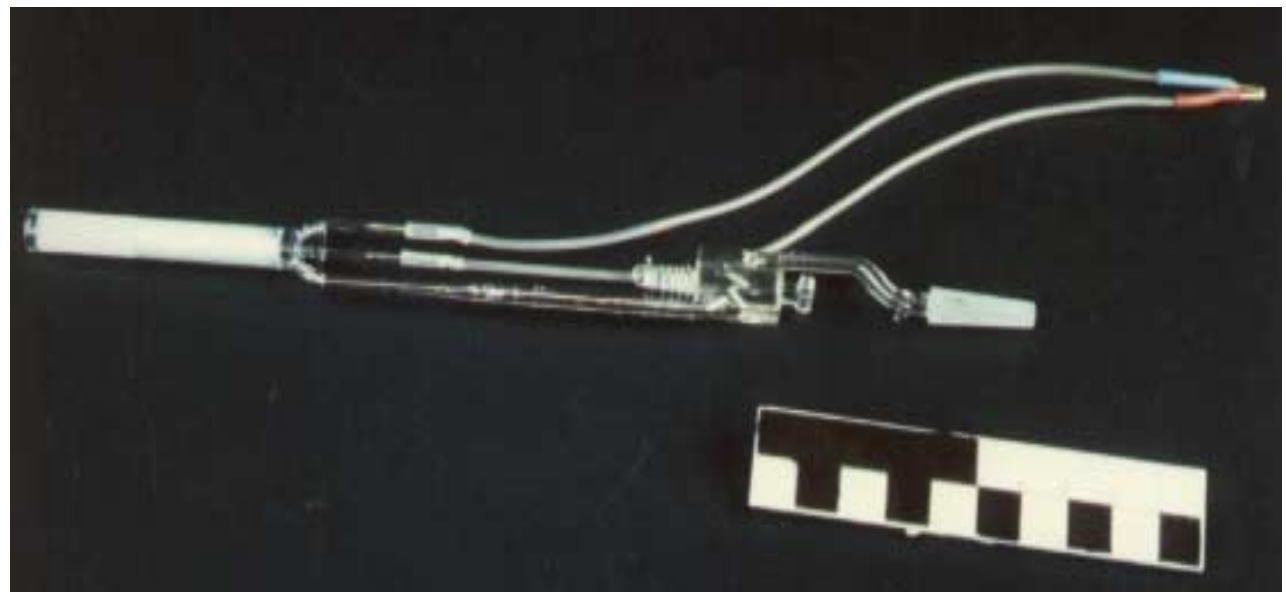
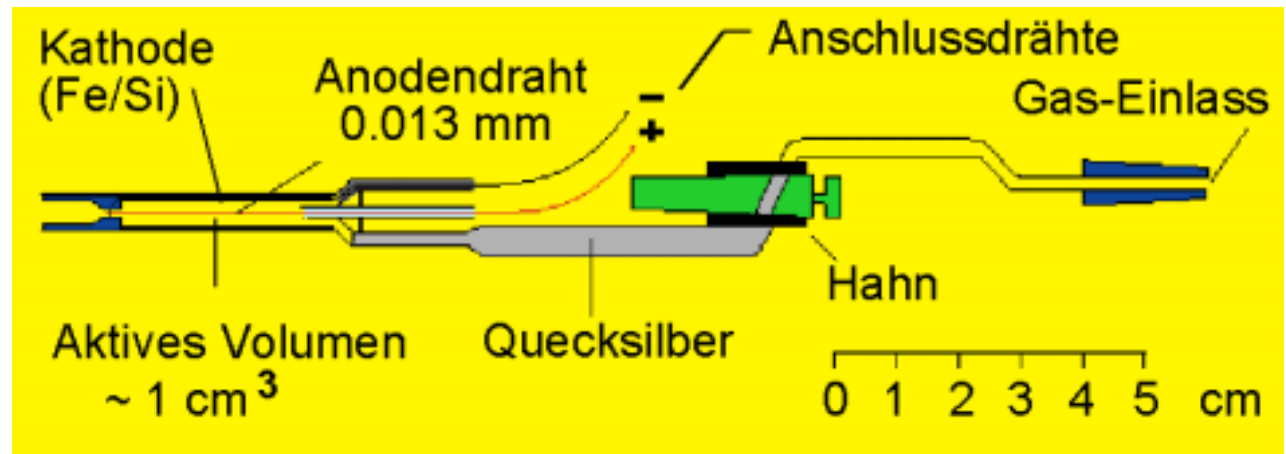


# GALLEX/GNO-Proportional-Zählrohr

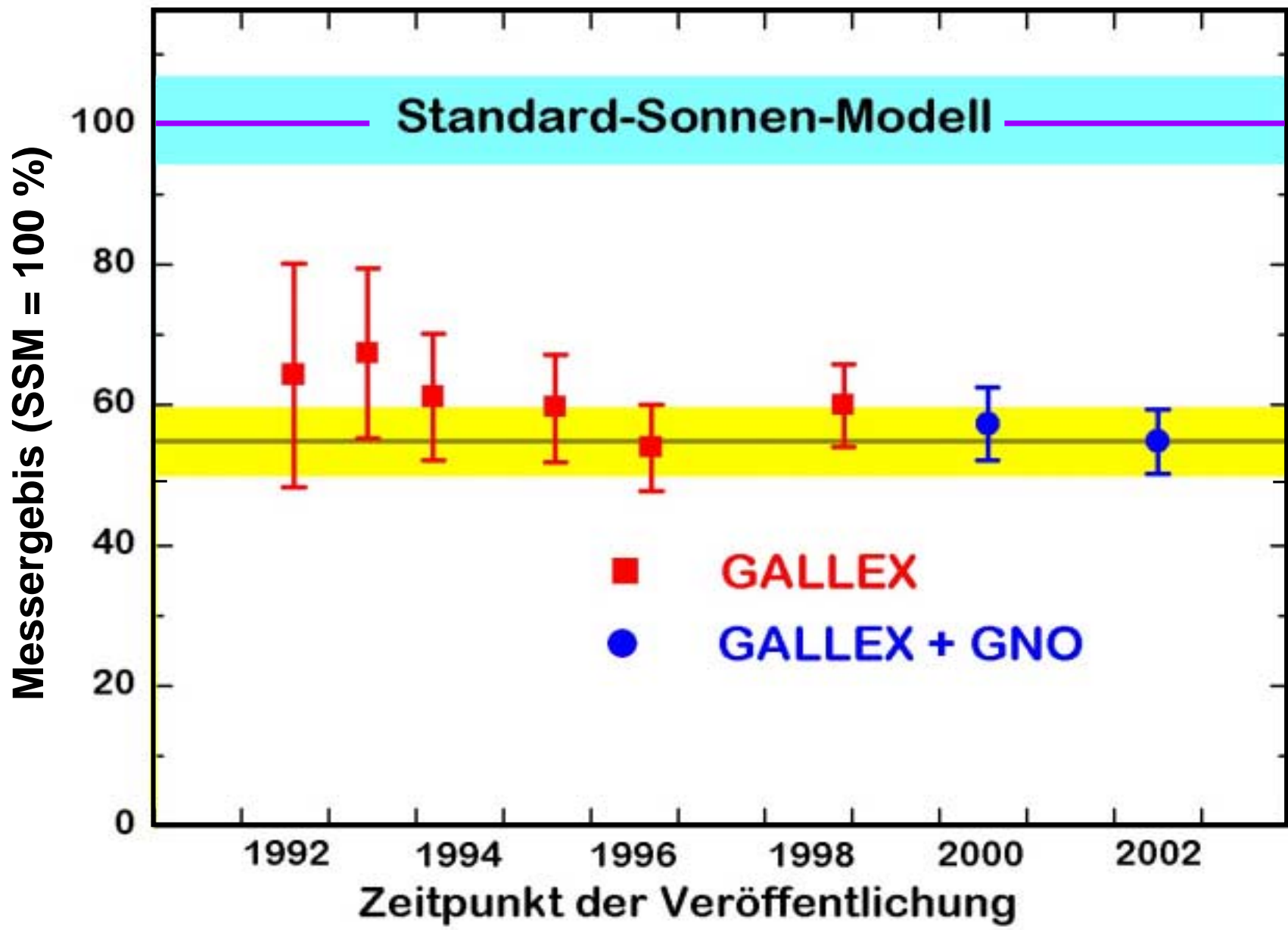
Normales Zählrohr: ~ 3 Pulse / Minute

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



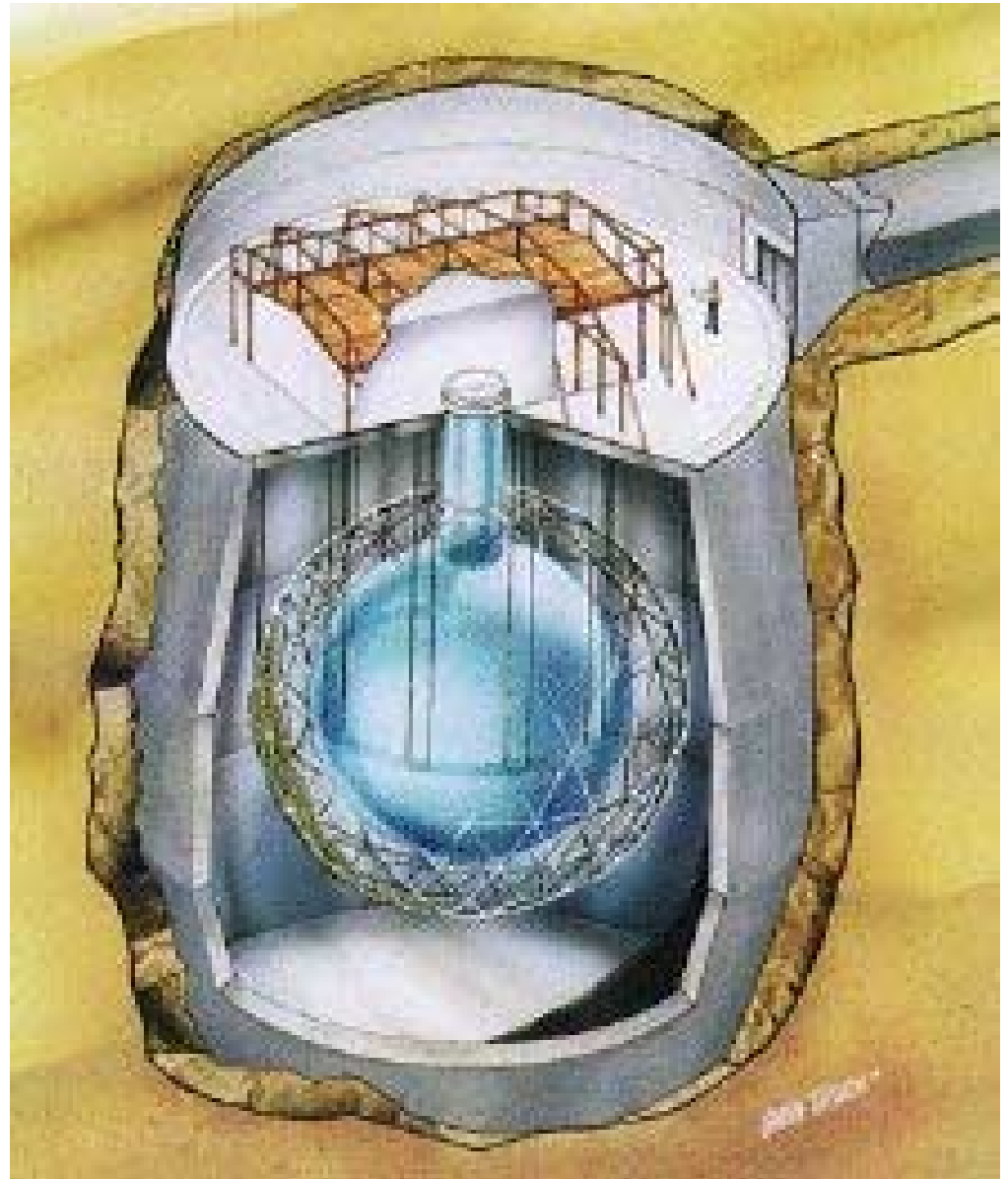


# Der SNO-Sonnenneutrino-Detektor

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 ( $\nu + {}^{37}\text{Cl}$ )	${}^8\text{B}$ , ${}^7\text{Be}$	$33 \pm 3$
Kamiokande ( $\nu + e^-$ )	${}^8\text{B}$	$54 \pm 8$
Super-Kam. ( $\nu + e^-$ )		$46 \pm 2$
GALLEX/GNO ( $\nu + {}^{71}\text{Ga}$ )	pp, ${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$	$55 \pm 5$
SAGE ( $\nu + {}^{71}\text{Ga}$ )		$55 \pm 5$
SNO ( $\nu + d$ )	${}^8\text{B}$	$34 \pm 2$
( $\nu + e^-$ )		$46 \pm 5$
( $\nu + d$ )		$99 \pm 12$



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

