

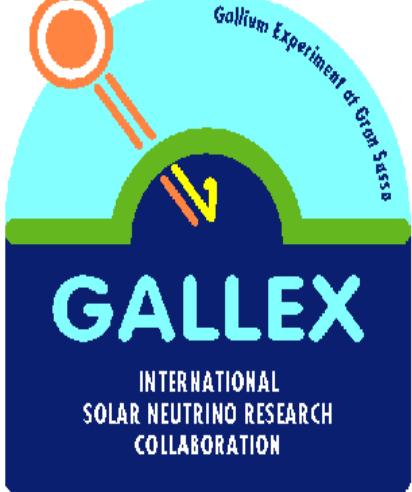
Sonnenneutrino- Experimente

W. Hampel

Physik am Samstagmorgen
Schülertreffen
am Max-Planck-Institut für Kernphysik
Heidelberg
18. November 2000



Max-Planck-Institut für Kernphysik



GALLEX

Messung der niedriger-energetischen Sonnen-Neutrinos, durchgeführt von 1991 bis 1997



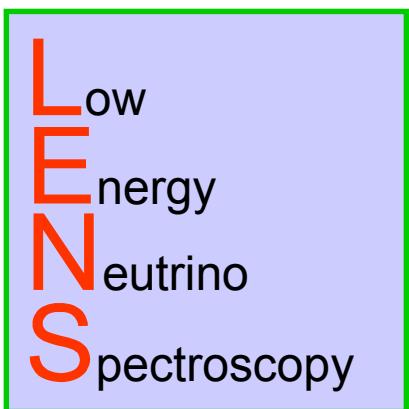
GNO

Nachfolge-Experiment von GALLEX, läuft seit 1998



Borexino

Messung der ⁷Be-Neutrinos, wird gegenwärtig aufgebaut, Messbeginn im Jahr 2002



LENS

Experiment zur Direkt-messung der pp-Neutrinos, zur Zeit in der Pilotphase

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

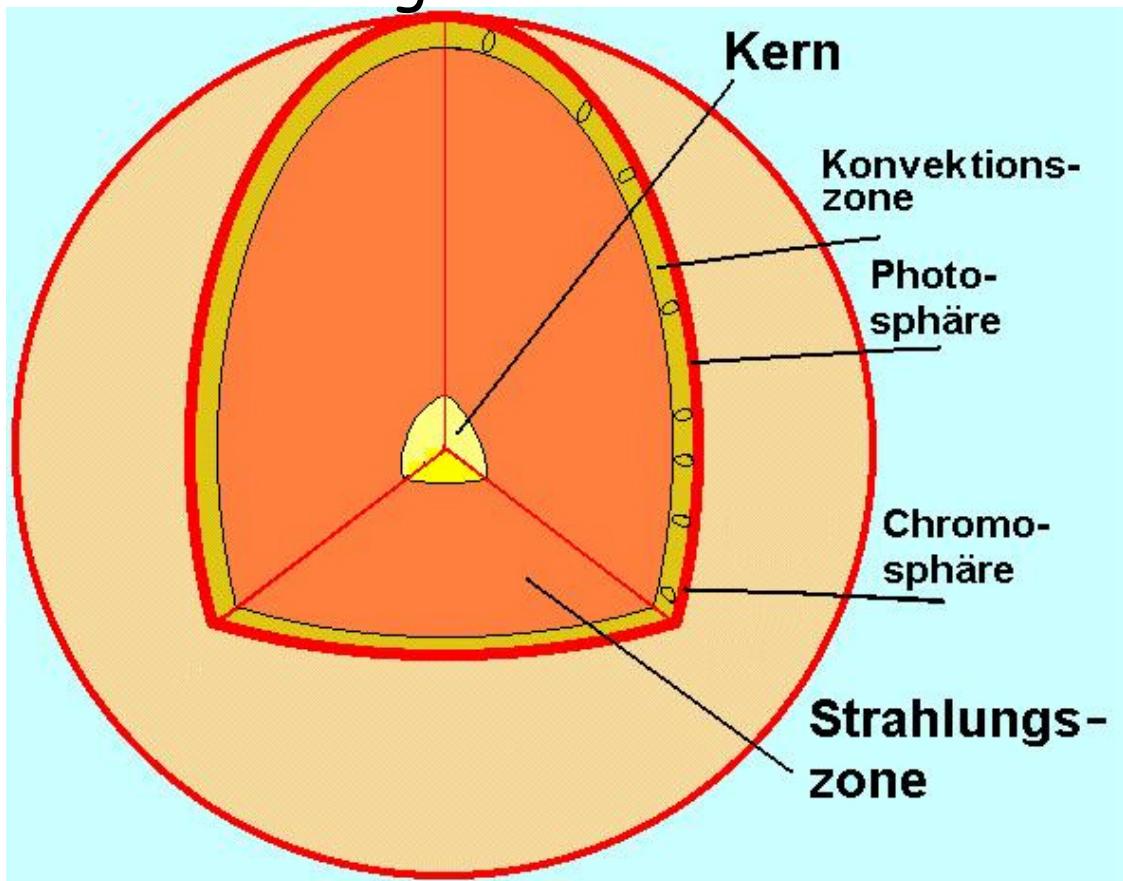
● Teilchenphysik

Eigenschaften des Elementarteilchens
Neutrino

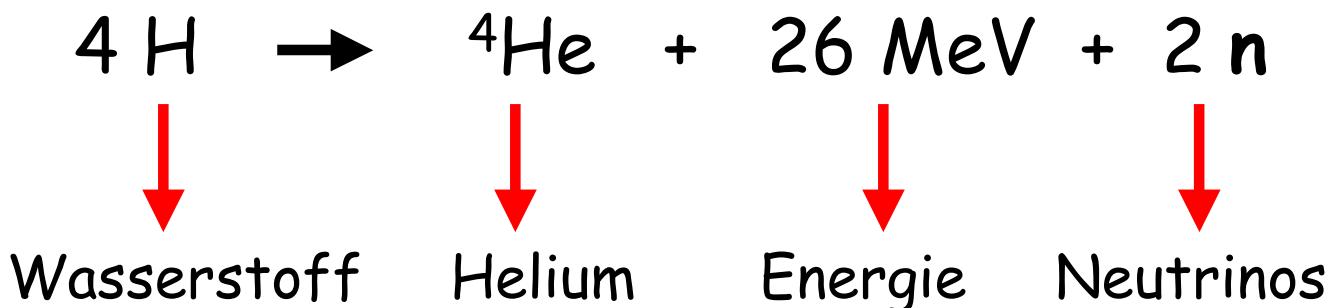
- weitreichende Konsequenzen für
Teilchenphysik und Kosmologie)

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 Weltraum abgestrahlt wird !



Wasserstoff-Fusion



→ 1 Neutrino pro 13 MeV
Energieerzeugung

Fluss der Sonnen-Neutrinos am Ort der Erde:

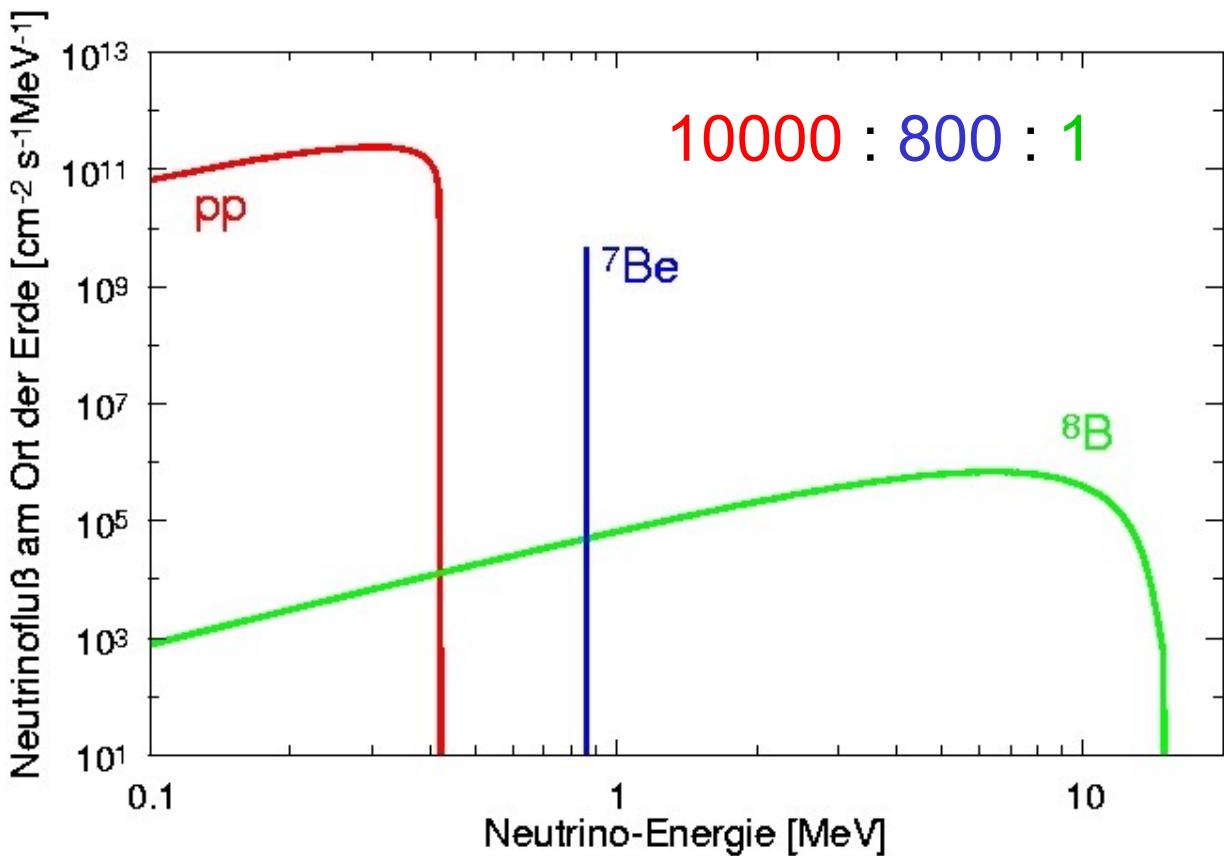
$$F_n = \frac{L_{\text{Sonne}}}{13 \text{ MeV} \cdot 4\pi R^2}$$
$$= 65 \text{ Milliarden /cm}^2 \text{ sec}$$

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

$$R = 1 \text{ AE} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$$

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

Energie-Spektrum der Sonnen-Neutrinos



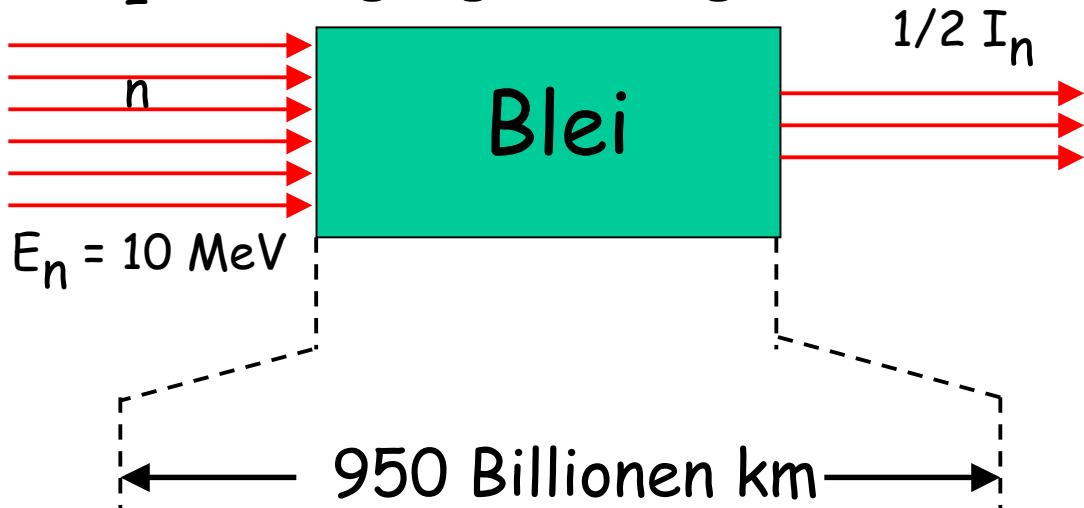
pp-Neutrinos: aus der Startreaktion der Wasserstoff-Fusion, verantwortlich für 90% der Energieproduktion der Sonne

⁷Be-Neutrinos: erzeugt in einem Seitenzweig der Wasserstoff-Fusion, in dem 10% der Sonnen-Energie produziert werden

⁸B-Neutrinos: aus seltenem Seitenzweig, total unbedeutend für die Energie- Erzeugung in der Sonne

Neutrino-Eigenschaften

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

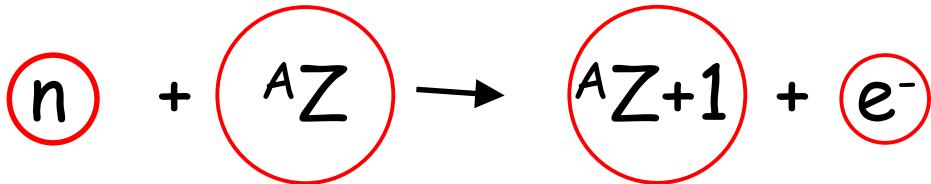


$$(= 6.3 \cdot 10^6 \text{ AE} = 100 \text{ Lichtjahre})$$

Sonnenneutrino-Nachweis

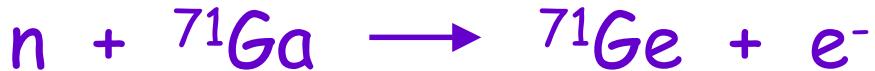
im Prinzip zwei Möglichkeiten:

- Reaktionen von Neutrinos mit Atomkernen

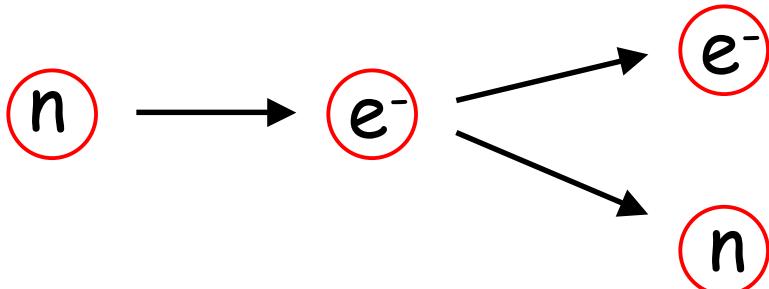


Nachweis der Neutrino-Reaktion über die Umwandlung eines Atomkerns in den Atom-kern eines anderen chemischen Elements

Beispiel:



- Reaktionen von Neutrinos mit Elektronen



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

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:

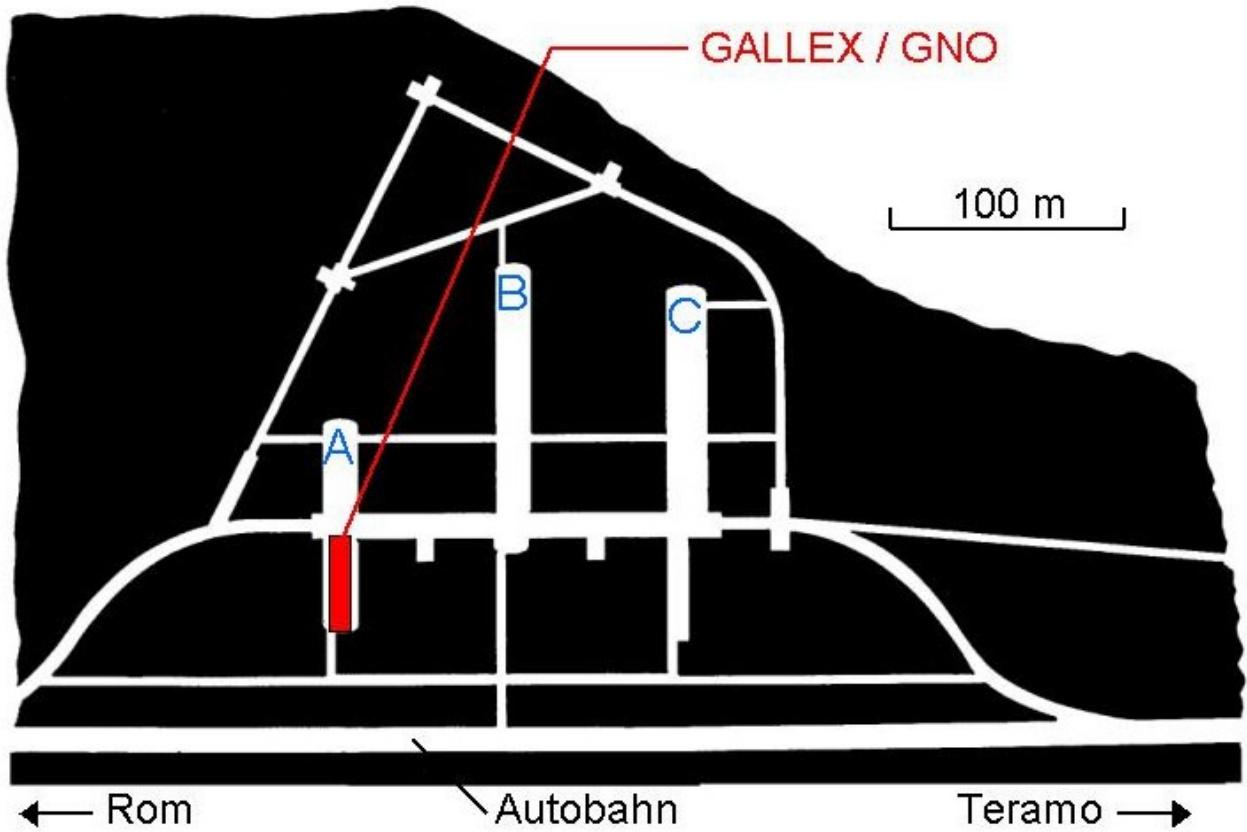
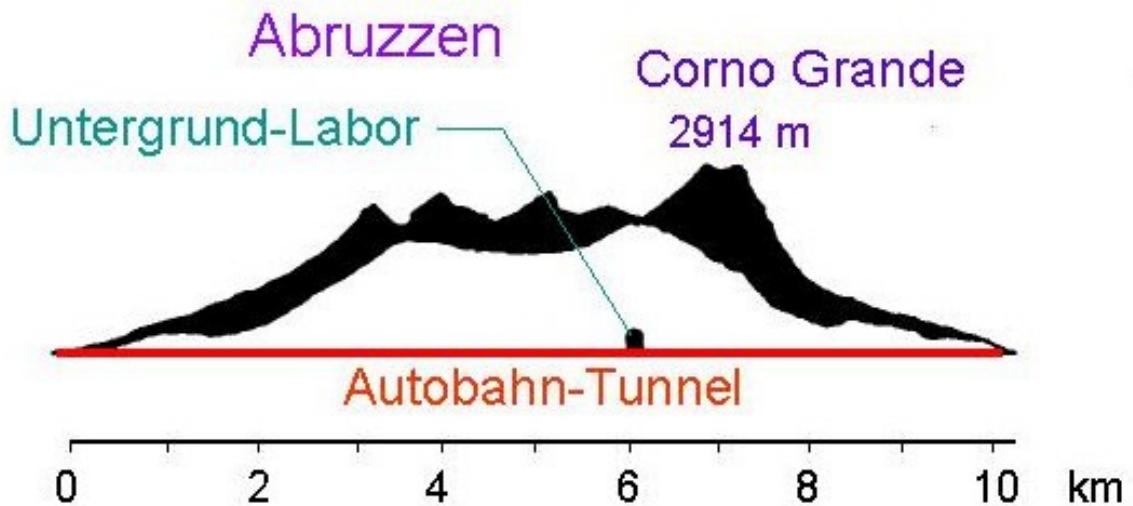
~ 1 Reaktion pro Tag !

Nachweis von ${}^{71}\text{Ge}$ -Atomen: durch ihren
radioaktiven Zerfall (Halbwertszeit 11.4 Tage)

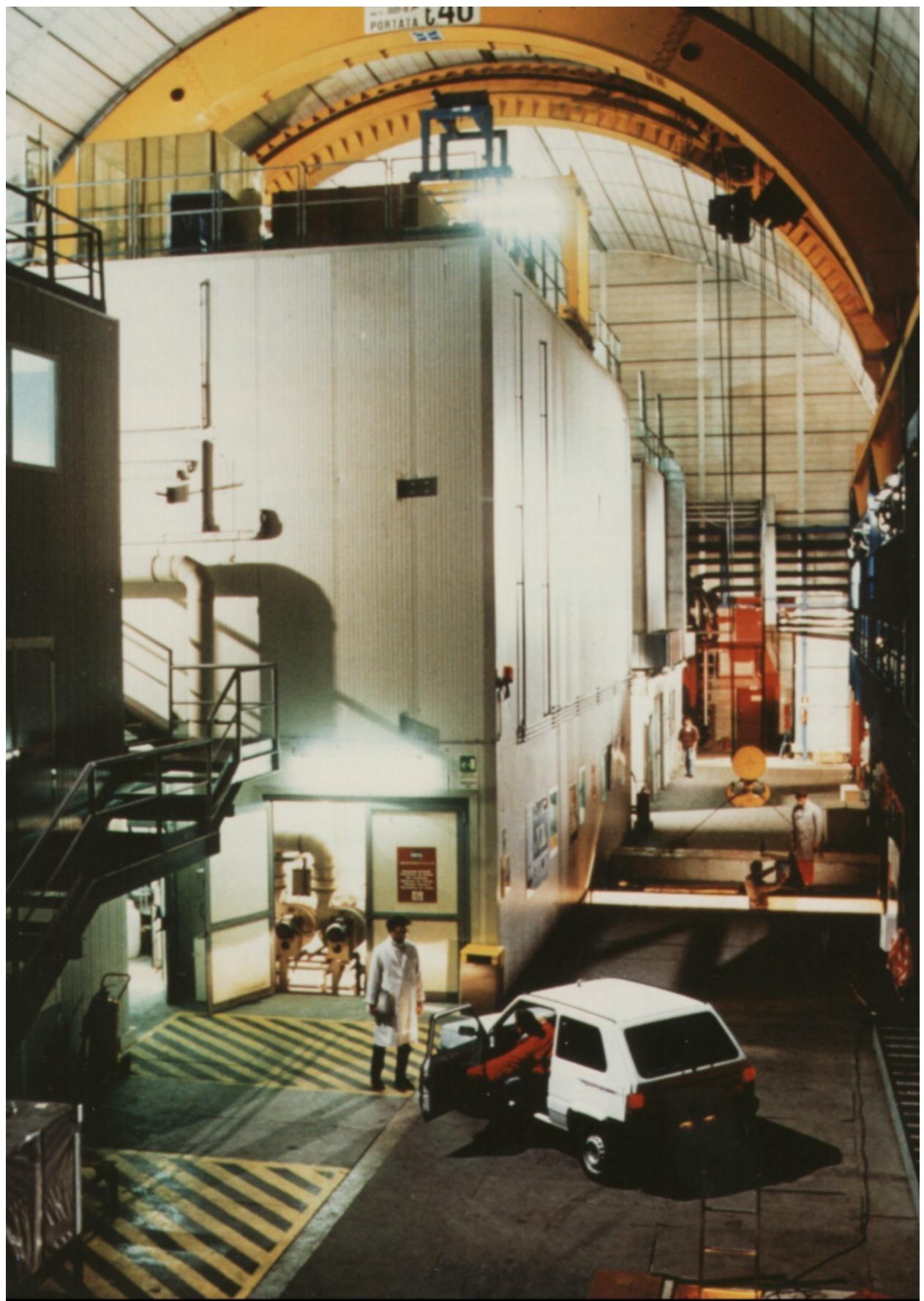


- Extraktion von wenigen Ge-Atomen aus 30 Tonnen Gallium
- Nachweis einzelner ${}^{71}\text{Ge}$ -Atome durch Messung ihres radioaktiven Zerfalls

Das Gran-Sasso-Untergrundlabor

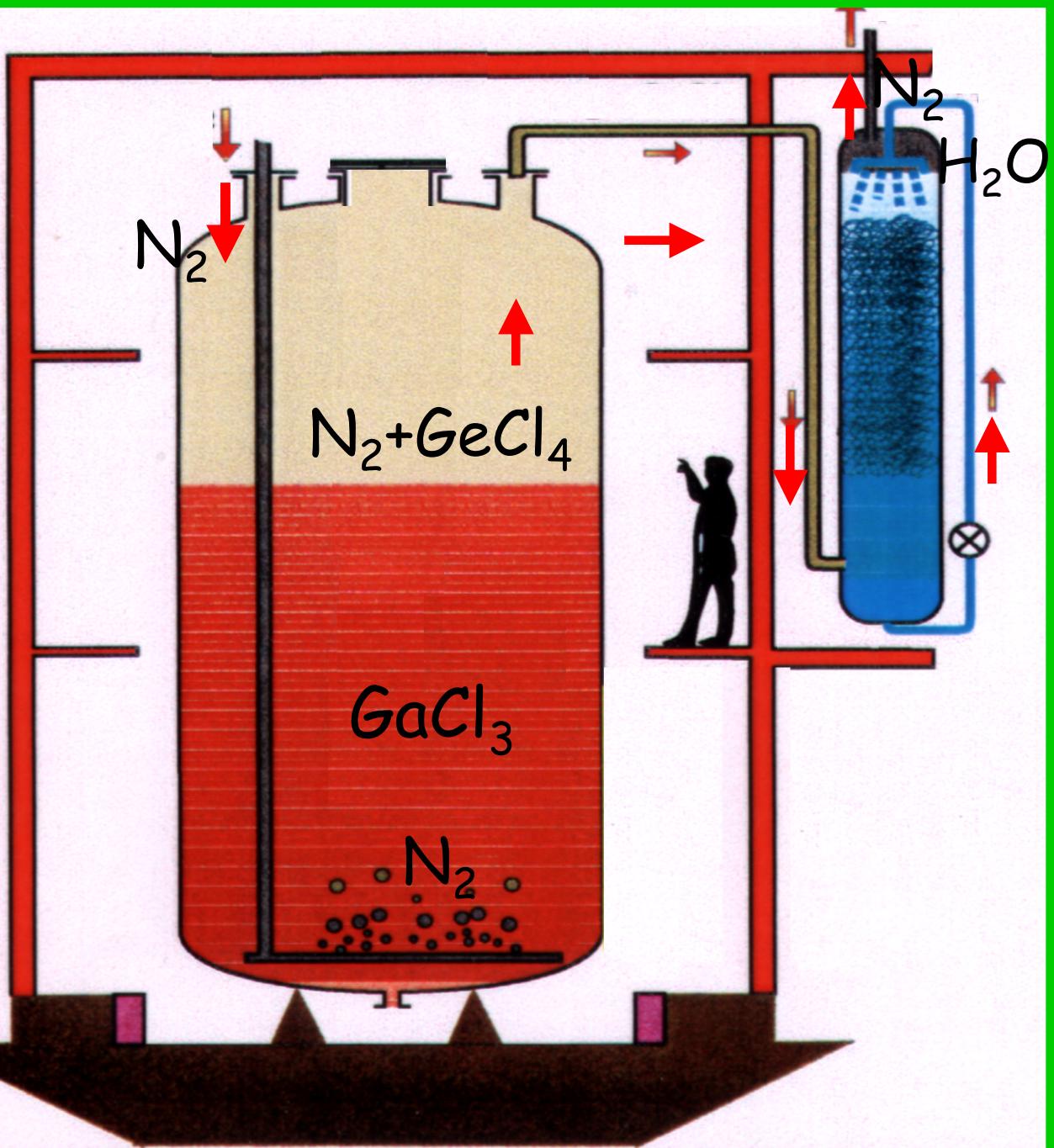


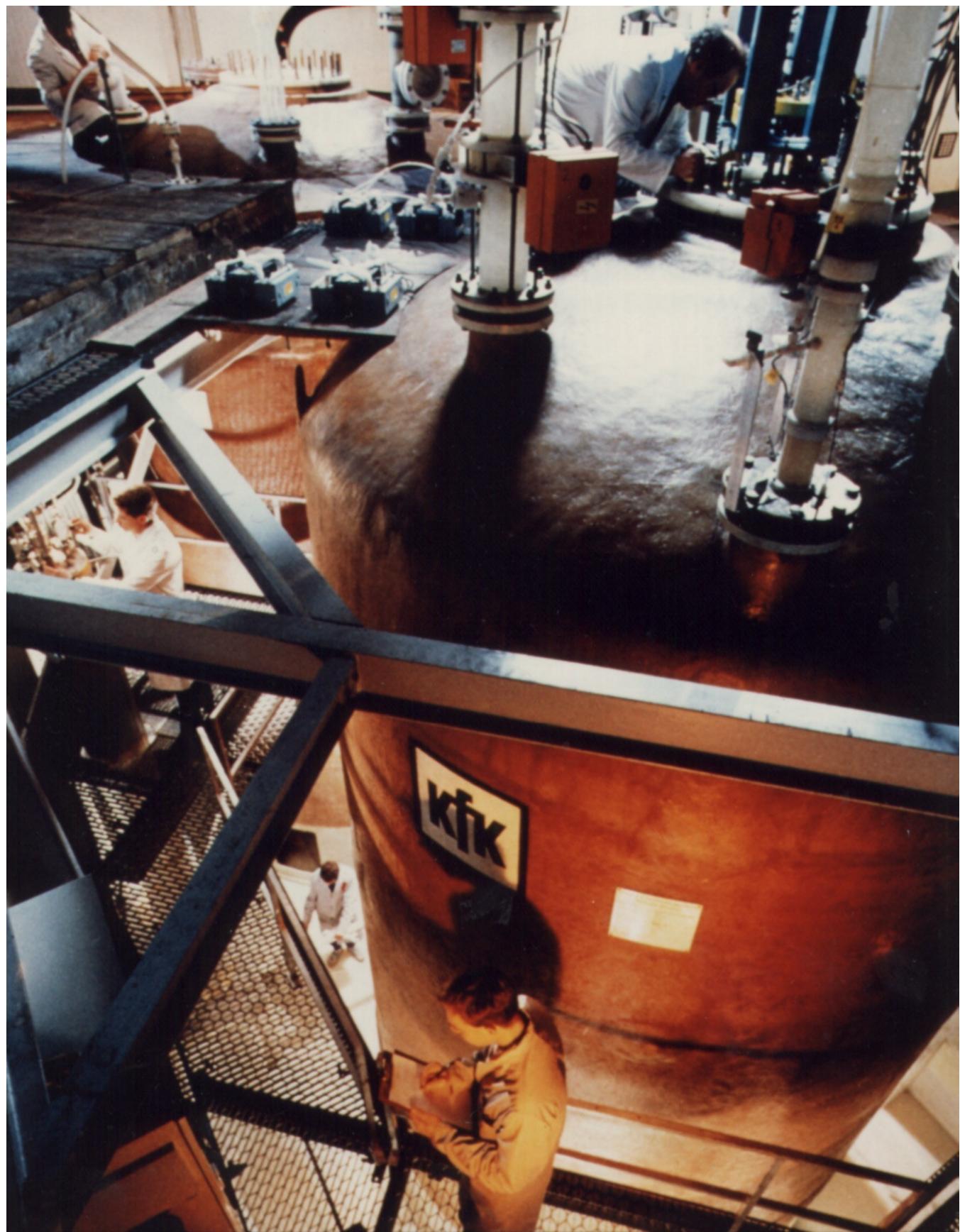




Gallium-Sonnenneutrino-Detektor

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







GALLEX/GNO-Proportional-Zählrohr

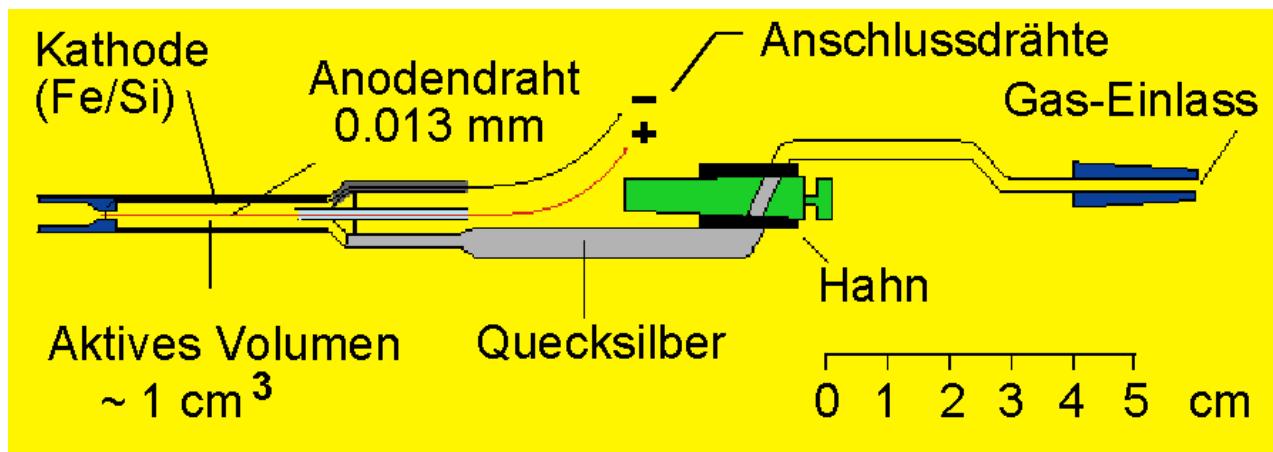
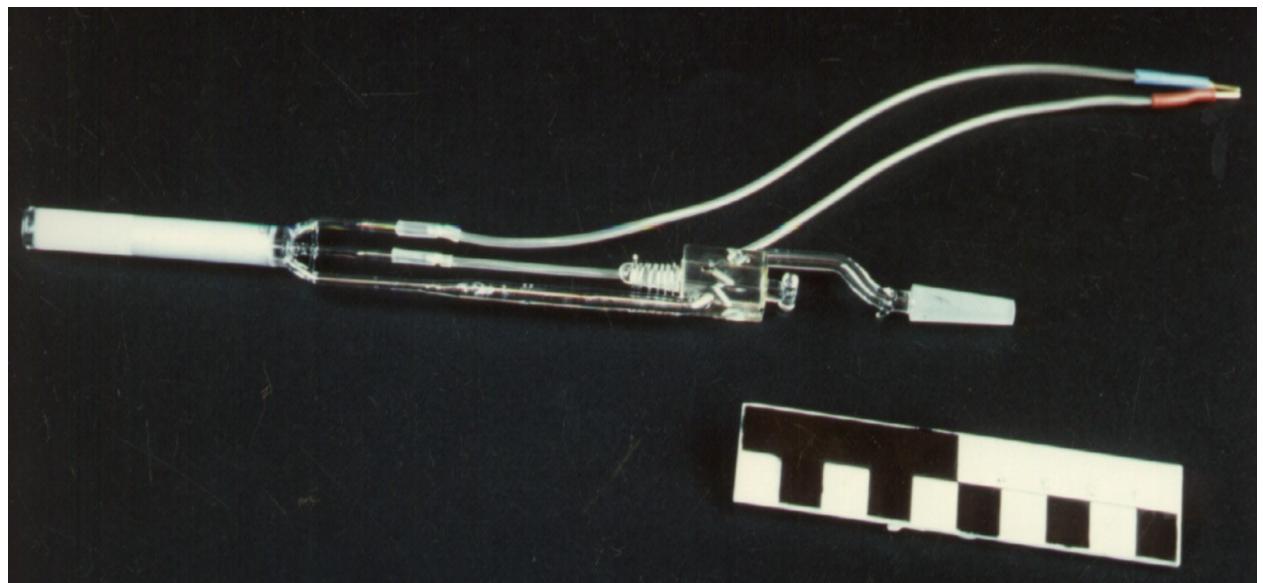
Normales Zählrohr: ~ 3 Pulse / Minute

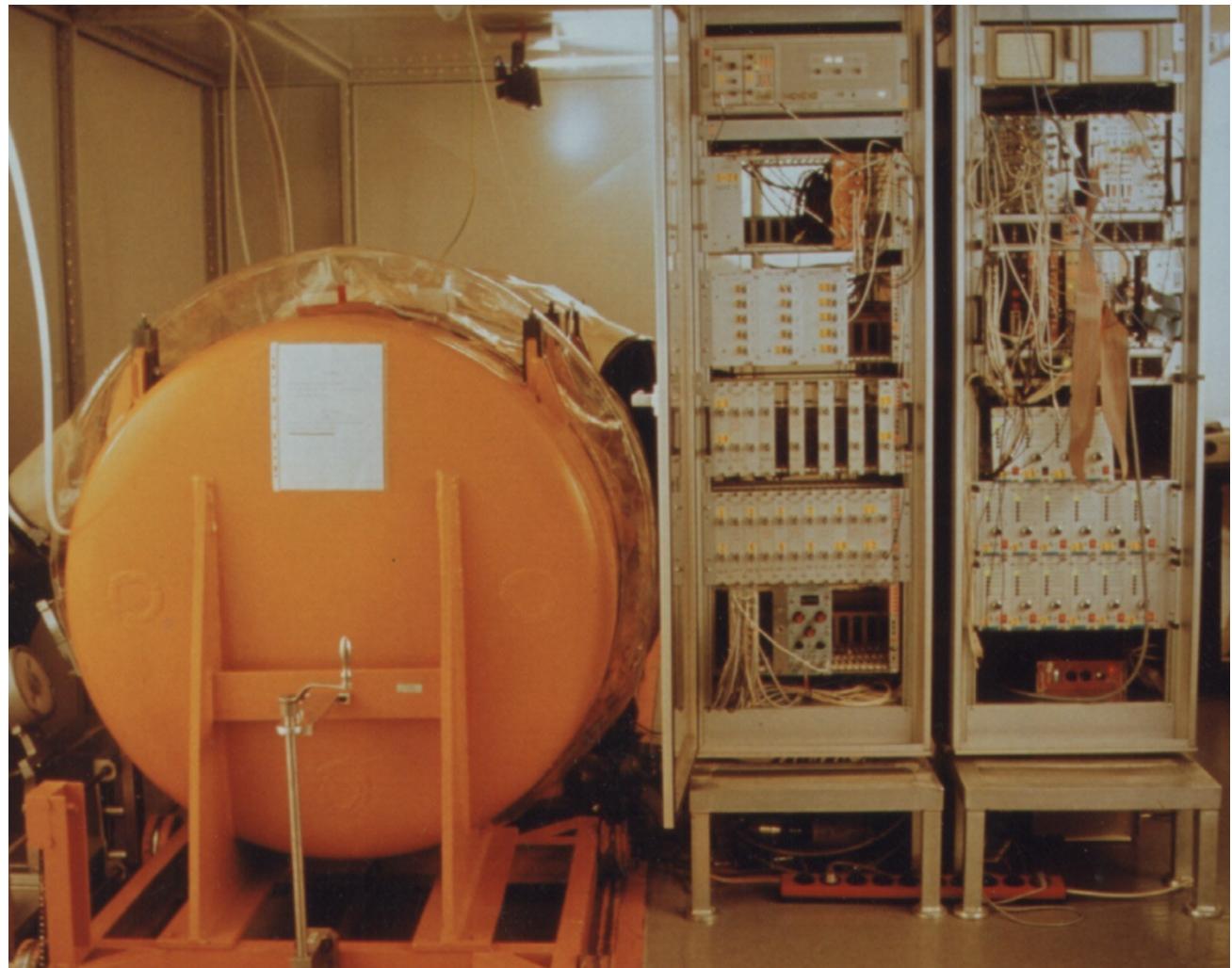
GALLEX/GNO-Zählrohr: ~ 1 Puls / 3

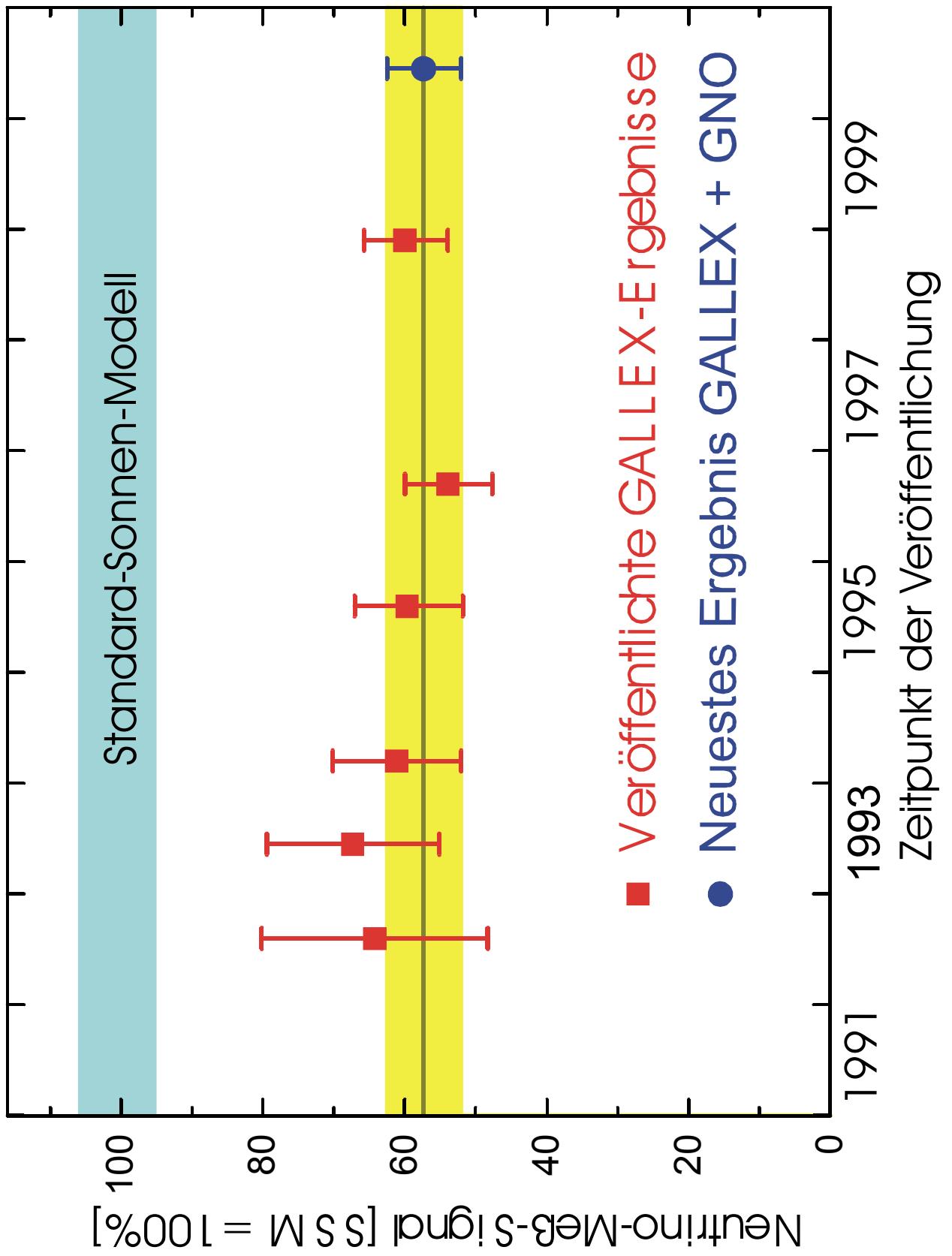
Wochen

→ Faktor 100.000 !

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



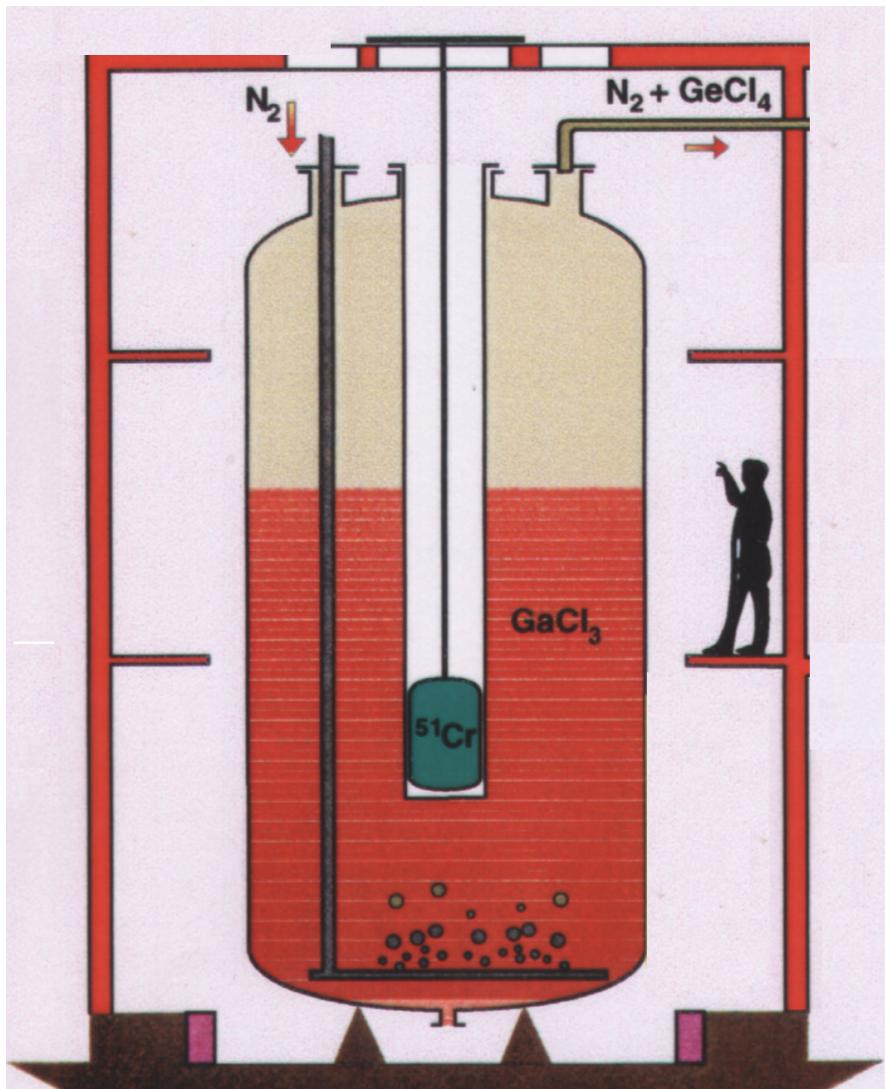




GALLEX ^{51}Cr -Quellexperiment



Stärkste jemals hergestellte künstliche
Neutrinoquelle (6×10^{16} Bequerel)



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



Drei prinzipielle Möglichkeiten zur Lösung des Sonnenneutrino-Problems

- Experimentelle Lösung:

Der GALLEX-Detektor mißt falsch:
Ausgeschlossen durch das Ergebnis der GALLEX-Quellexperimente

- Astrophysikalische Lösung:

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

- Teilchenphysikalische Lösung:

Neutrinos haben eine von Null verschiedene Ruhmasse und können sich deshalb auf dem Weg vom Sonnenzentrum zur Erde in andere Neutrino-Arten umwandeln, die der GALLEX-Detektor nicht messen kann:
sehr wahrscheinlich !!!

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



Messung des ^7Be -Sonnenneutrinoflusses durch
Elektron-Neutrino-Streuung in 100 Tonnen Szintillator-
Flüssigkeit mit Hilfe von 2000 Licht-Detektoren
(Photomultiplier)

