



# Neutrinos - Geheimnisvolle Teilchen aus dem All

Rolf Nahnauer  
DESY Zeuthen





v

# DIE RÄTSELHAFTE SANFTE MATERIE



## NEUTRINOS VOM ANFANG DER WELT:

in jedem  $\text{cm}^3$  des Raumes befinden sich  $\sim 330$  Neutrinos aus dem Urknall vor 10-15 Milliarden Jahren

## UNSICHTBARER NEUTRINO REGEN:

jeder Mensch wird pro Sekunde von  $\sim 400000$  Milliarden Neutrinos von der Sonne durchquert

## NEUTRINOS - VERBINDUNG ZUM ENDE ALLER TAGE :

jeder Mensch erzeugt pro Sekunde  $\sim 4000$  Neutrinos, die in den Kosmos abgestrahlt werden

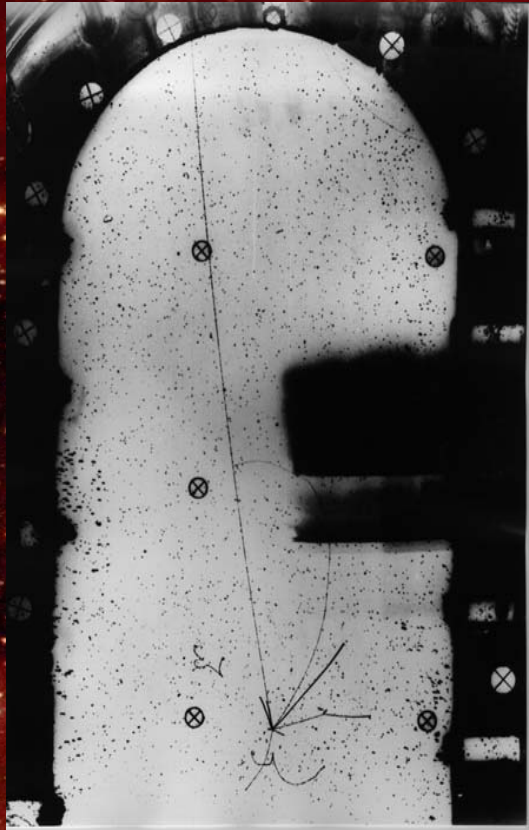


# Warum „sehen“ wir keine Neutrinos?

- Der menschliche Beobachtungsapparat ist entstanden, um die Überlebenschancen in der äußeren Welt zu verbessern, nicht um die Natur komplex zu erforschen
- Wir „sehen“ nur geladene Teilchen bzw. deren elektromagnetische Strahlung

Photo.: B.Koch - 19447 [www.fotos.online.de](http://www.fotos.online.de)

# Neutrinos „sichtbar“ gemacht :



Neutrale Teilchen  
nachweisbar durch

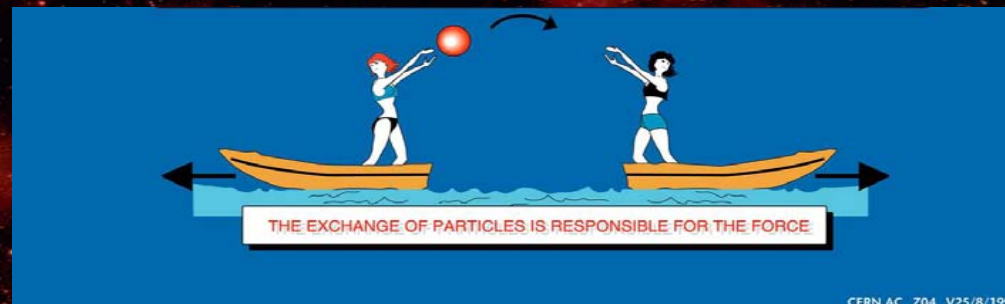
- Zerfälle in geladene Teilchen
- Erzeugung von geladenen Teilchen





# Wechselwirkungen von Materieteilchen

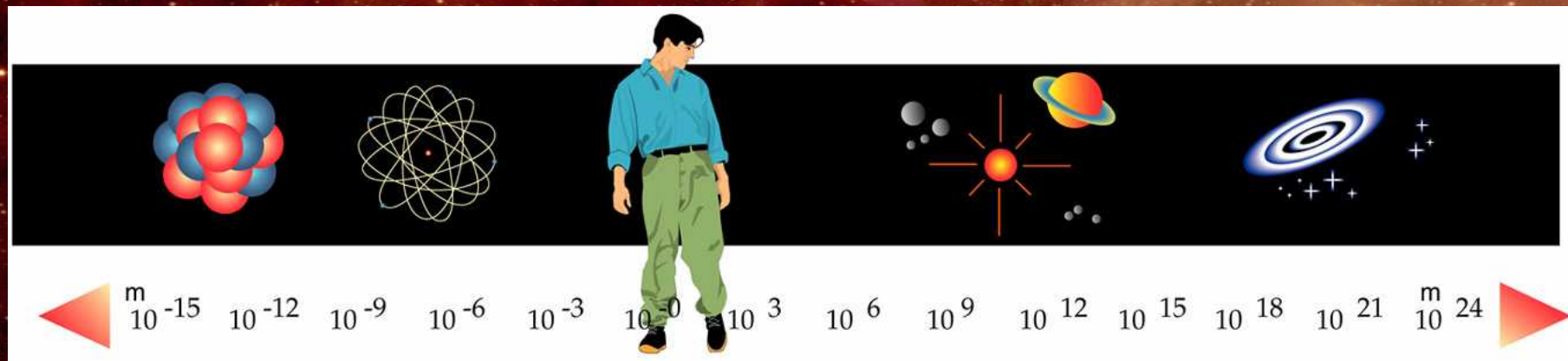
	Stärke	Reichweite	Teilchen
■ Kernkraft bindet Nukleonen im Atomkern	1	$10^{-12}$ cm	Gluonen
■ Elektromagnetismus „Haushaltsphysik“	$10^{-3}$	$1/r^2$	Photonen
■ schwache Wechselwirkung Radioaktivität, Neutrino-Ww.	$10^{-5}$	$10^{-15}$ cm	W,Z-Bosonen
■ Gravitation Newtons Apfel, Karussell	$10^{-38}$	$1/r^2$	Gravitonen





# Das Problem mit den vielen Nullen

## Dimensionen und Vorstellungsvermögen



80 Jahre =  $2.5 \cdot 10^9$  sec = 2.5 \* 1 000 000 000 sec = 2.5 Milliarden sec

Mensch :

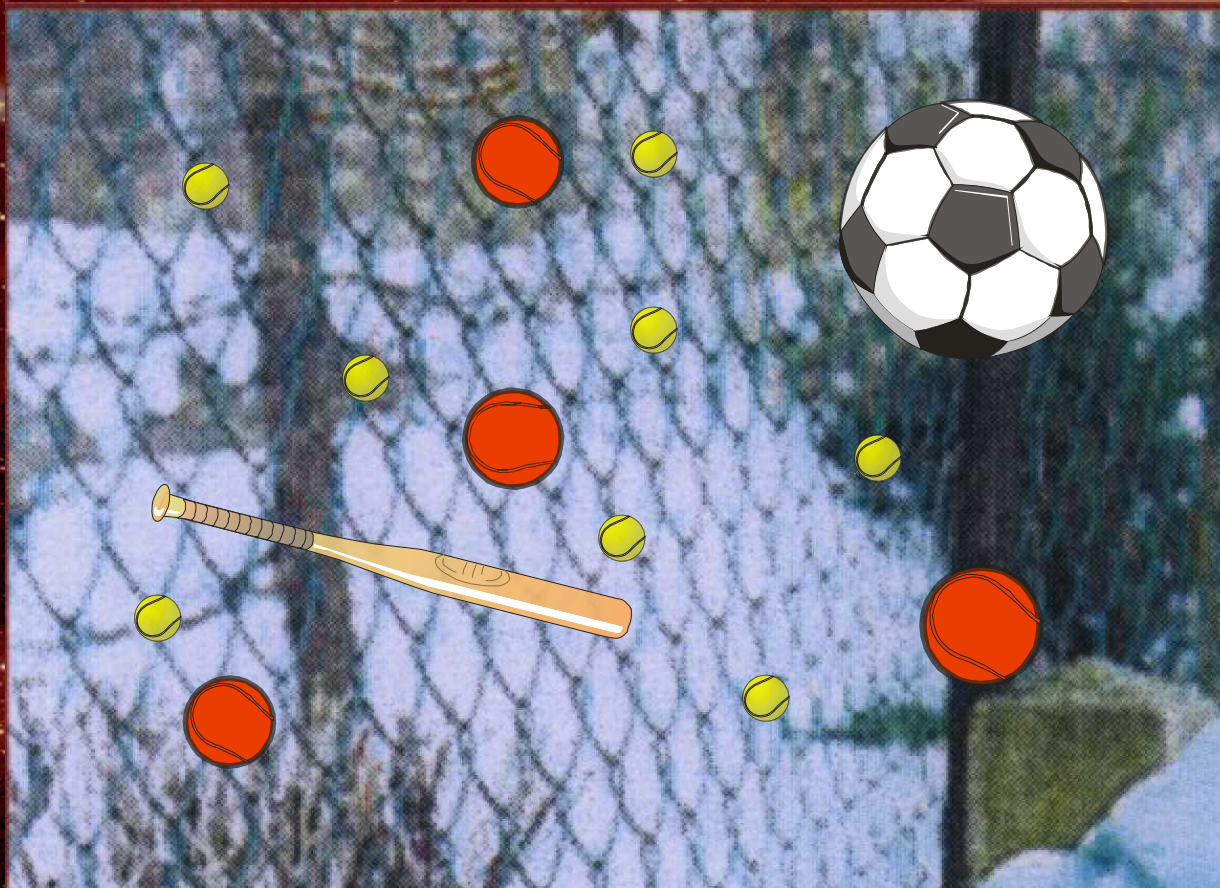
0.00001 m (Haar)  $\leftrightarrow$  100000 m (Bergsicht)

0.001 sec  $\leftrightarrow$   $2.5 \cdot 1\,000\,000\,000$  sec



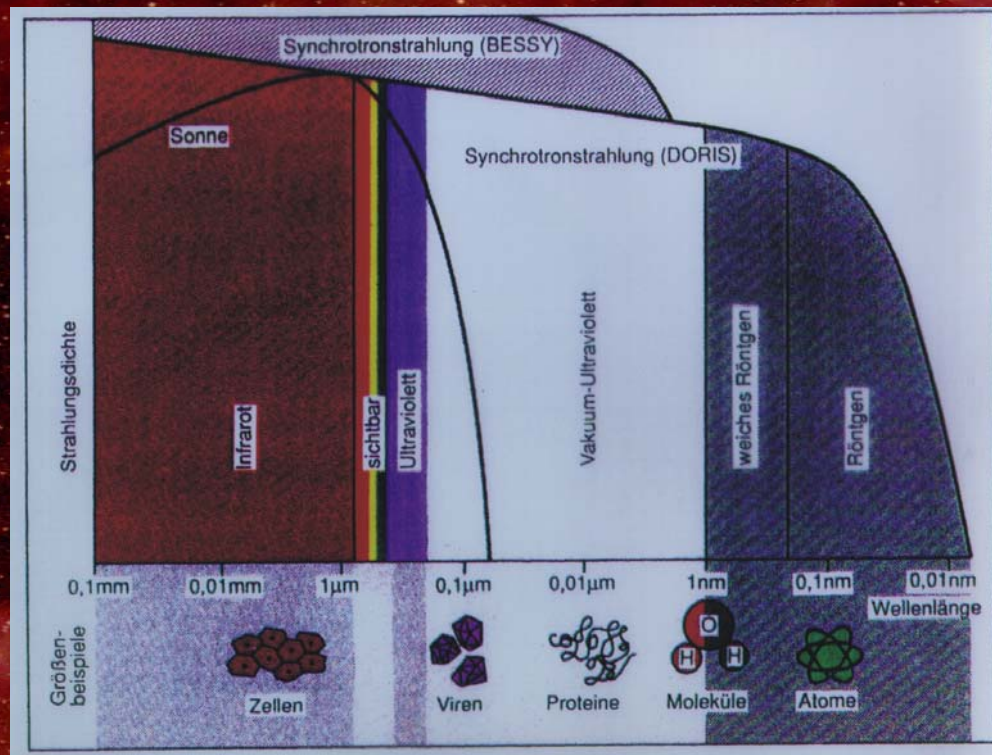
# „Das Maschendraht-Experiment“

Messen mit dem richtigen Maßstab





# Welche Auflösung brauchen wir ?



- Sichtbares Licht  
 $\lambda = 400 - 1000 \text{ nm}$

- $\lambda = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm} / E$

E : Energie

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$$



# Ungewohnte Maßeinheiten :

- Energie :

$$1 \text{ eV} = 1.6 * 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$60 \text{ Watt} = 60 \text{ Joule/sec}$$

- Masse :

$$1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 * 10^{-36} \text{ kg}$$

$$1 \text{ Gramm} = 5.6 * 10^{32} \text{ eV}/c^2$$



# Erster Blick in's Innere der Materie: Wilhelm Conrad Röntgen 1895



1. Nobelpreis für Physik



Materie unterschiedlicher Dichte absorbiert „unsichtbares“ Licht unterschiedlich



# Ein neues Phänomen :

Radioaktivität Henry Bequerel 1896



- Strahlen aus dem Atomkern

$\alpha, \beta, \gamma$



# Leere Atome :

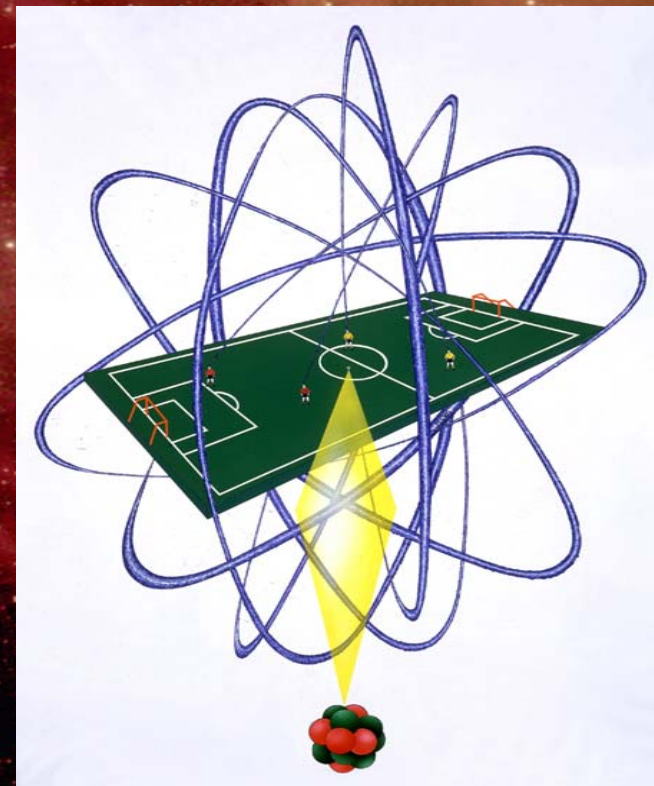
Ernest Rutherford 1911

- Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an Goldfolie
- kaum Ablenkung

## ATOMMODELL

- wirkliches Verhalten komplizierter

## QUANTEN- MECHANIK





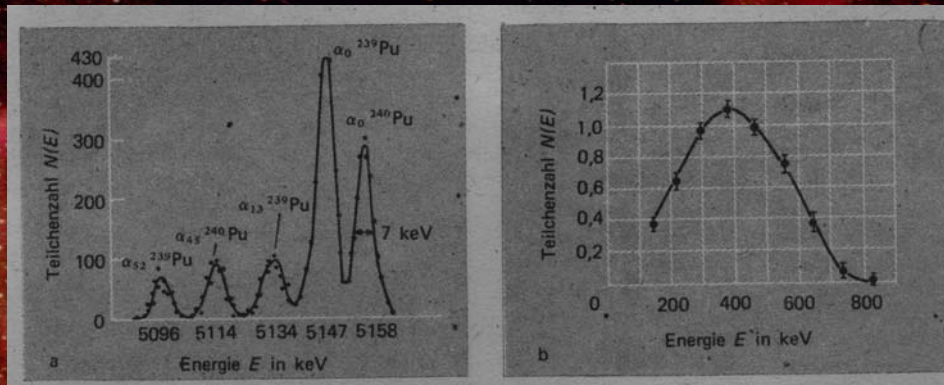
# Die Energie Krise :

1926-1930

- Radioaktiver Zerfall :



$\alpha: X = {}^4\text{He}_2, \beta: X = e^- \quad ???$





# Die Erfindung des Neutrinos I : Wolfgang Pauli 1930



$\nu$  - Eigenschaften

$$Q = 0, \mu_\nu = 0$$

$$D_\nu = 10 D_\gamma$$

$$0 < m_\nu < m_e$$

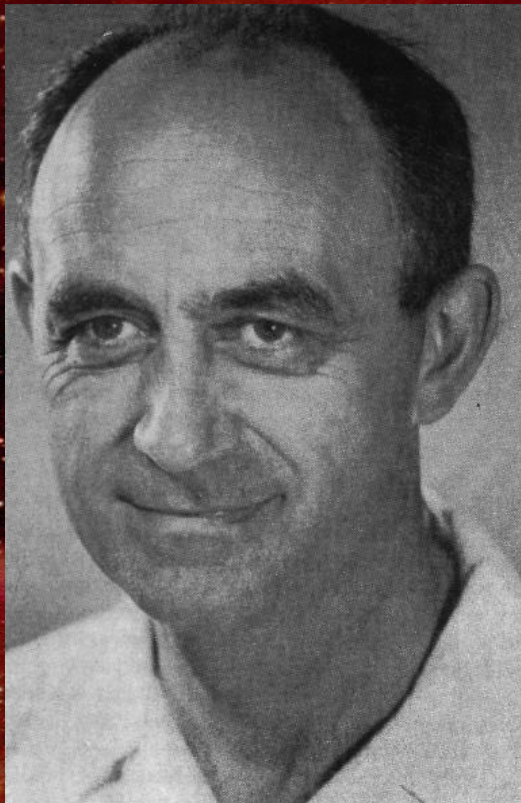
$$s_\nu = 1/2$$

$$N_\nu = 1$$



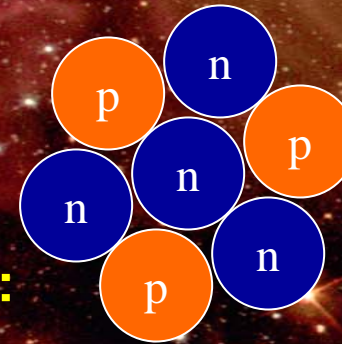
# Die Erfindung des Neutrinos II :

## Enrico Fermi Theorie des $\beta$ -Zerfalls 1934



1932 Entdeckung des Neutrons durch Chadwick

Atomkern:



$\beta$ -Zerfall :



$$G_F = 10^{-5}/m_p^2$$







# Der Neutrino Nachweis :

## Cowan, Reines 1955

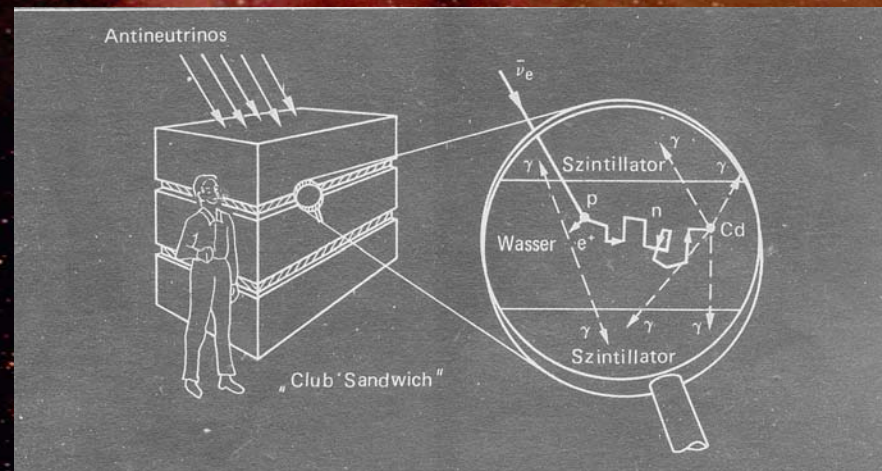
- Savannah River Reaktor USA:  
 $10^{13} \nu_e^a/\text{cm}^2\text{sec}$  in alle Richtungen
- Detektor: Club-Sandwich

2x200 l  $\text{H}_2\text{O}$   
 + 40kg  $\text{CdCl}_2$

3x1400l  
 Flüssigszintillator

- $\nu_e^a p \rightarrow n e^+$
- $e^+e^- \rightarrow \gamma \gamma$
- $n\text{Cd} \rightarrow m \gamma$

- $3.0 \pm 0.2$  Ereignisse/Stunde





# Der Teilchen Zoo :

- 1935 :  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ ,  $n$
- 1955 :  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$ ,  $n$   
+  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $K$ ,  $p^{\text{anti}}$ ,  $\nu_e^{\text{anti}}$
- 1965 :  
~ 200 Elementarteilchen
- Ordnungsprinzip

## QUARKS



# Mehr als ein Neutrino ?

- $\pi \rightarrow \mu \nu_{(\mu?)}$   
 $\nu_{(\mu?)}\bar{n} \rightarrow \mu p$

- künstlicher Strahl

$$10^7(\nu_{(\mu?)}) + \nu_{(\mu?)}$$

- beobachtet:

29  $\mu$ -Ereignisse  
6 e-Ereignisse

- $\nu_{\mu} \neq \nu_e$

**Pontecorvo 1959**

**Schwartz, Steinberger, Lederman 1960/61**





# Die dritte Familie :

- 1977 : das  $\tau$  - Lepton wird entdeckt :

gibt es ein  $\nu_\tau$  ???

- Nachweis bisher nur indirekt

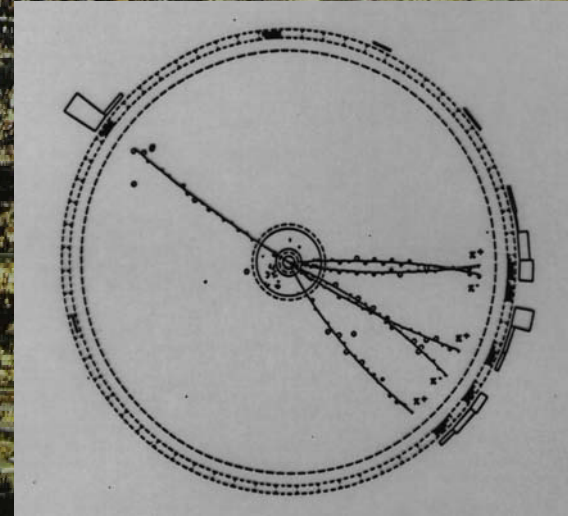
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow 5\pi\nu_\tau e\nu_\tau\nu_e^a \quad (\text{ARGUS})$$

- Direkter Nachweis versucht in

Beam Dump Experimenten (DONUT)

Oszillations Experimenten (später)

- Bisher kein Ereignis berichtet





# Wie groß ist der Neutrino-Clan?

- Viele Methoden benutzt

Kosmologie  $\text{He}^4$ ,  $\text{Li}^7/\text{H}$

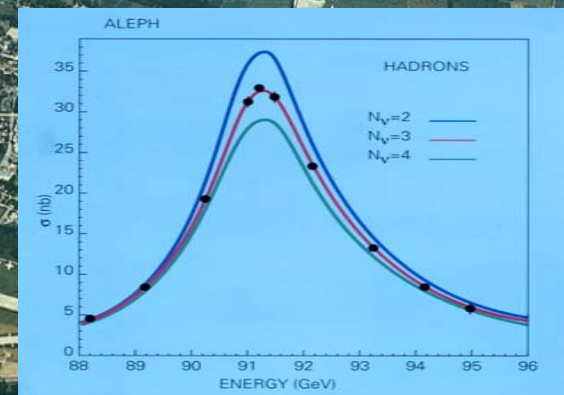
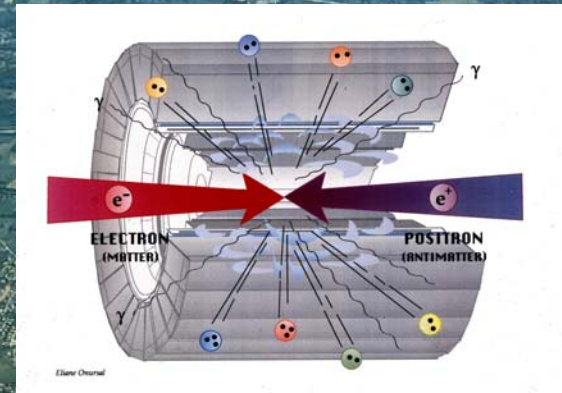
Astrophysik SN 1987A

Beschleuniger-Physik

- Genauester Wert heute

LEP:

$$N_\nu = 2.994 \pm 0.012$$





# Teilchen ohne Masse ?

## Relativitätstheorie Einstein 1905

- $E = mc^2 = \gamma m_0 c^2 = \sqrt{((pc)^2 + (m_0 c^2)^2)}$

$$p = m_0 \gamma v \quad \gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$$

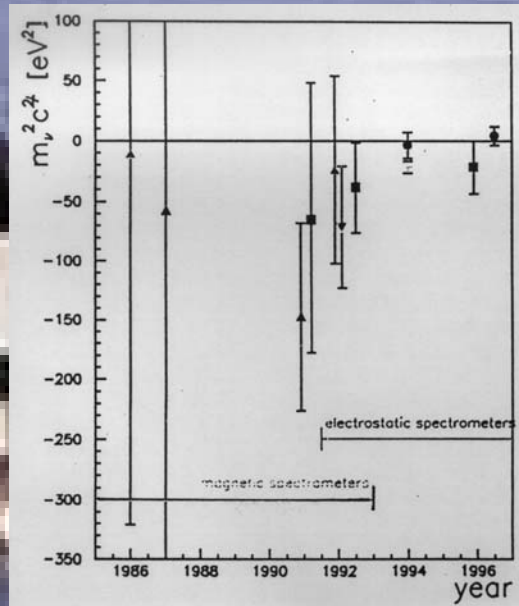
E : Energie    m : bewegte Masse     $m_0$  : Ruhmasse

p : Impuls    v : Geschwindigkeit    c : Lichtgeschwindigkeit

wenn  $m_0 = 0$      $\rightarrow$   $v = c$



# Die Masse der Neutrinos :



- $\nu_e$  : Endpunkt des  $\beta$ -Spektrums von Tritium

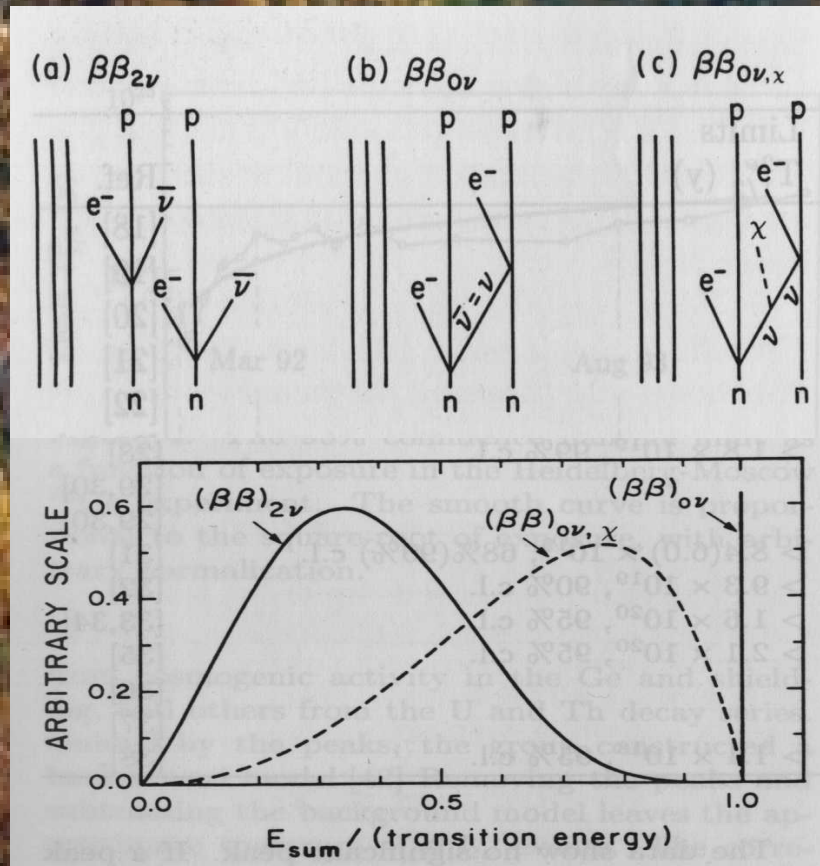
$$E_n = m_p + E_e^{\max} + m_\nu$$

$$m_\nu < 15 \text{ eV} \quad (3 \text{ eV})$$

- $\nu_\mu$  :  $m_\nu < 170 \text{ keV}$
- $\nu_\tau$  :  $m_\nu < 18 \text{ MeV}$



# Wie neutral sind Neutrinos ?

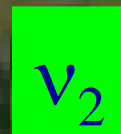


- Ladung :  $Q = 0$ 
  - $\beta$ -Zerfall :  $Q < 10^{-19} e$
  - SN 1987 :  $Q < 10^{-17} e$
- Strenge Neutralität :
  - Teilchen = Antiteilchen
  - $\nu_L = \nu_L^a$      $\nu_R = \nu_R^a$
- bisher nicht positiv nachgewiesen :
  - $Z \rightarrow Z-2 + 2e^- + 0\nu$

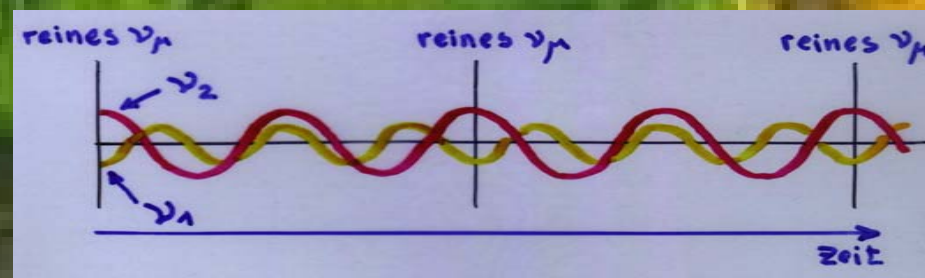


# Chamäleon Neutrino

- Massenzustände Wechselwirkungszustände



Mischung ändert sich in Raum und Zeit

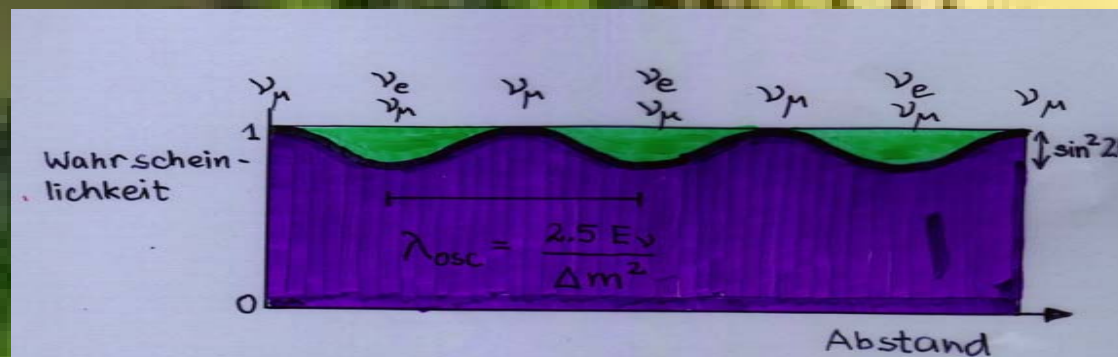


## Neutrino Oszillationen



# Wer ist wo und wann, was?

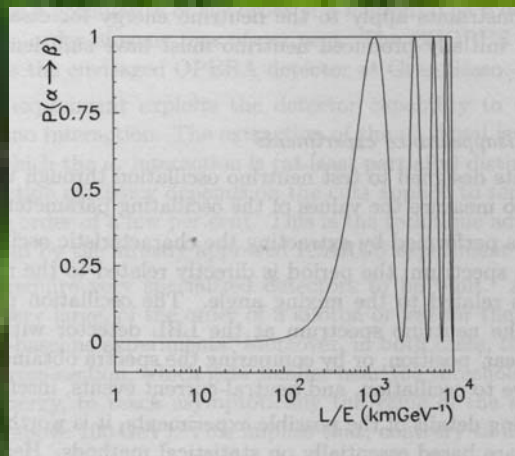
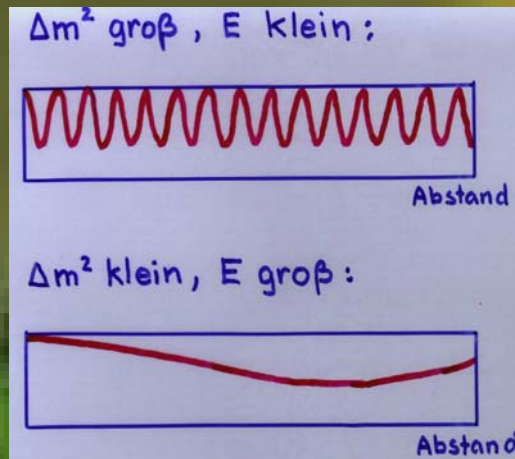
- $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$



- $\theta$  : Mischungswinkel
- $\Delta m^2$  :  $m(\nu_1)^2 - m(\nu_2)^2$ , **Oszillationen nur für  $m_\nu \neq 0$  !!!**
- $L/E$  : Abstand zur Quelle/Energie



# Was sagen die Parameter sonst ?



- Oszillationslänge:

$$\lambda = 2.5 E/\Delta m^2$$

- wenn  $\Delta m^2$  klein :

Effekt nur bei  
großem L  
und/oder  
kleinem E



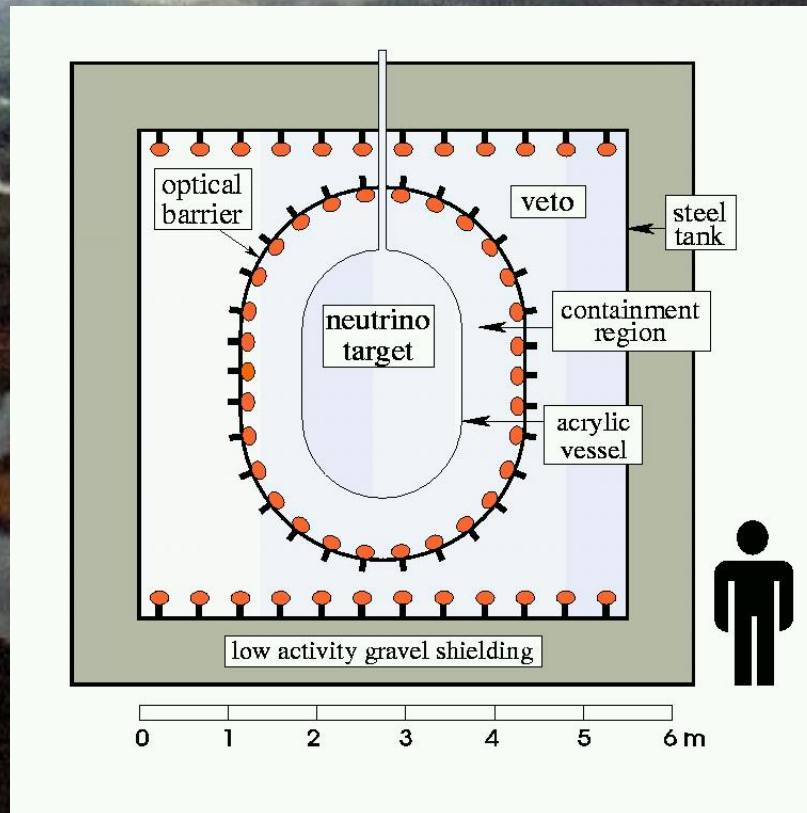
# Wo nachschauen :

Quelle	$E_{\min}/\text{MeV}$	$L_{\max}/\text{m}$	$\Delta m^2/\text{eV}^2$
Sonne	$10^{-1}$	$10^{11}$	$10^{-11}$
Atmosphäre	$10^3$	$10^4 - 10^7$	$10^{-3}$
Reaktor	1	$10^2 - 10^3$	$10^{-1}$
Beschleuniger	$10^3$	$10^3 - 10^6$	$10^{-2}$

- Formalismus komplizierter für 3 Neutrinos
- Oszillationen in Materie :  
Komplikationen durch unterschiedliche Wechselwirkungen der Neutrino-Sorten



# Neutrino Fallen I : an Atomreaktoren

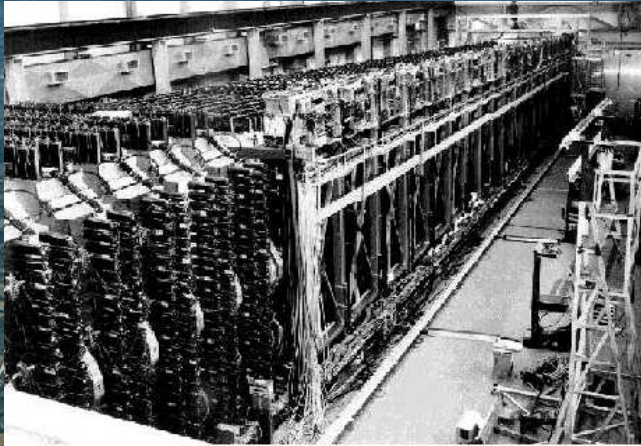


- CHOOZ :  $E=3\text{MeV}$
- Detektor :  $L=1\text{km}$   
Szintillator + Gd  
Tiefe: 300 mwe  
 $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$   
verzögerte Koinzidenz
- finden  $98 \pm 4\%$  von  $\Phi_\nu$   
 $\Delta m^2 < 10^{-3} \text{ eV}^2$



# Neutrino Fallen II

## an Beschleunigern



### ■ CHARM II

800 t Glastarget

$$\nu_{\mu} e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} e^{-}$$

„prüfen“

Standardmodell

### ■ CHORUS + NOMAD

Suche nach  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

bisher kein  $\nu_{\tau}$  gefunden

$\sin^2 2\theta < 10^{-3}$ , wenn  $\Delta m^2$  groß



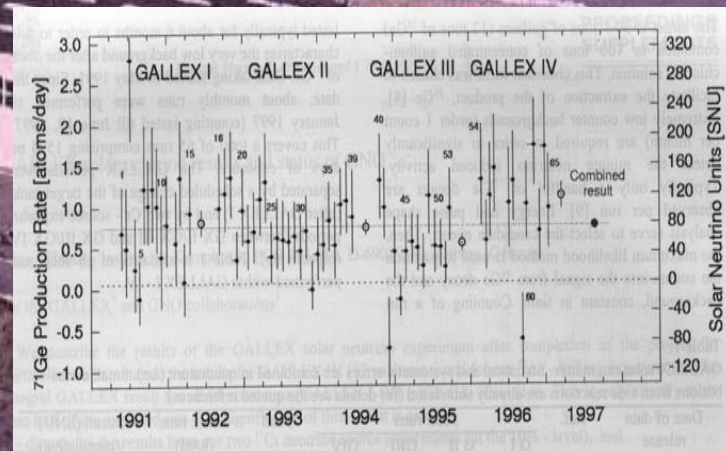
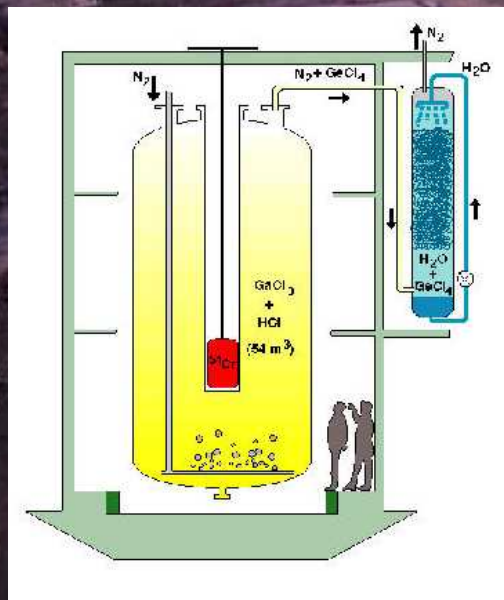
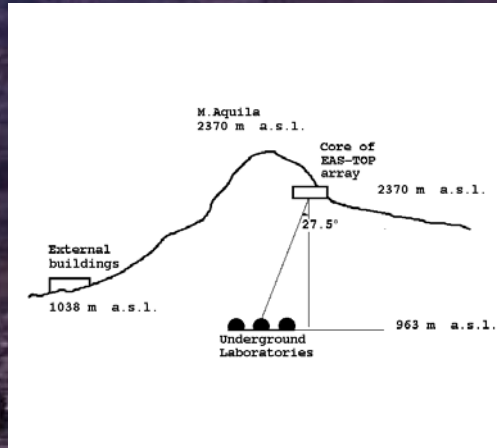
# Neutrino Fallen III

für die Sonne

■ GALLEX (30-60t)



➔ Atome zählen





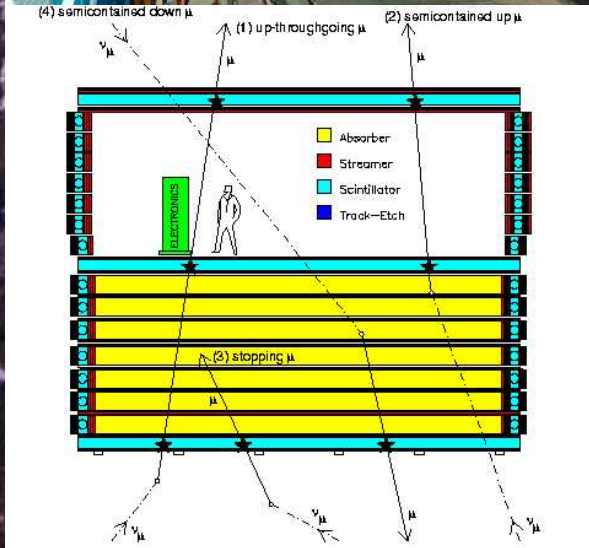
# Neutrino Fallen IV

für die Atmosphäre

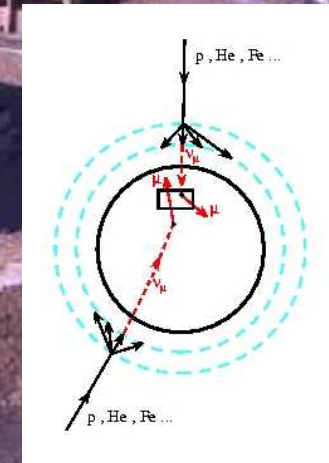


## ■ MACRO

76.6 m x 12 m x 9.3 m  
Tiefe: 3150 mwe



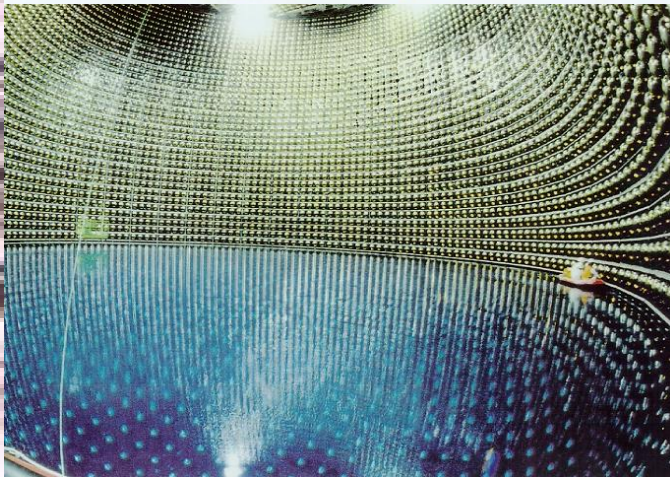
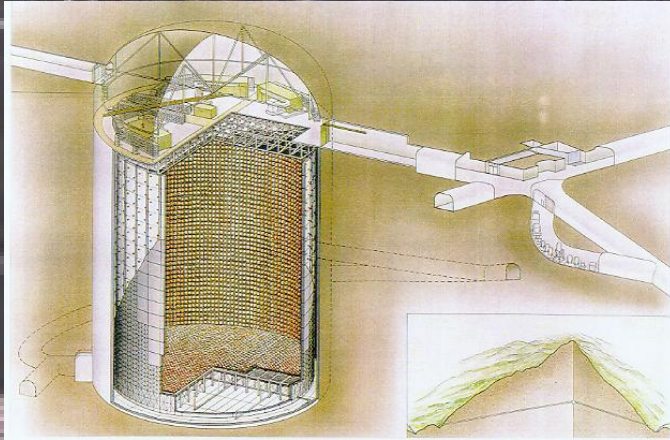
Suche nach  
Spuren  
von der  
anderen  
Seite  
der Erde





# Die Neutrino Superfalle

## SUPERKAMIOKANDE



- Tank mit 50 000 t H<sub>2</sub>O

Tiefe: 2700 mwe

11146 SEV's (50cm)

1885 SEV's (20cm)

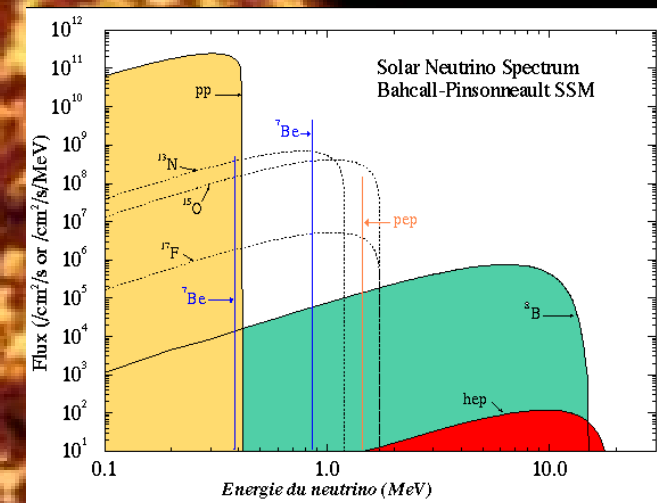
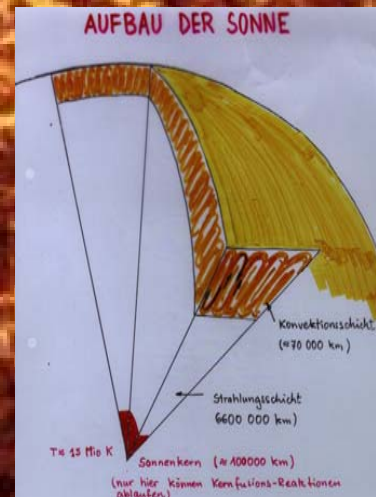
- e<sup>-</sup>, μ<sup>-</sup>: Cerenkov-Strahlung
- Sonnenneutrinos E<sub>e</sub> > 6 MeV  
messen Einfallsrichtung
- Atmosphären Neutrinos



# Neutrinos aus dem Sonnenkern

- Kernfusion im Sonnenzentrum bei 15 Millionen K

$pp \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	
${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	85%
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15%
$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	
${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He}$	
$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.02%
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	
${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2{}^4\text{He}$	

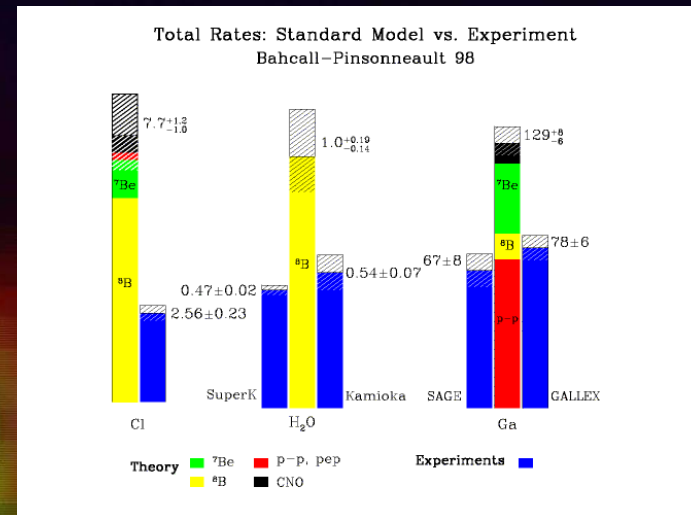


- ausgestrahlt werden :  $2 \cdot 10^{38}$   $\nu$ 's/sec
- auf der Erde treffen nach  $\sim 7.5$  min ein :  $40 \cdot 10^9$   $\nu$ 's/cm<sup>2</sup>sec



# Wo bleiben die Sonnenneutrinos ?

- „Sehen“ den  
Neutrino-Sonnenschein  
unter hunderten von  
Metern von Gestein



- Aber in allen Experimenten scheint diese  
Sonne zu dunkel
  - ➔ stimmt unser Sonnen-Modell ?
  - ➔ sind Neutrino-Oszillationen im Spiel ?



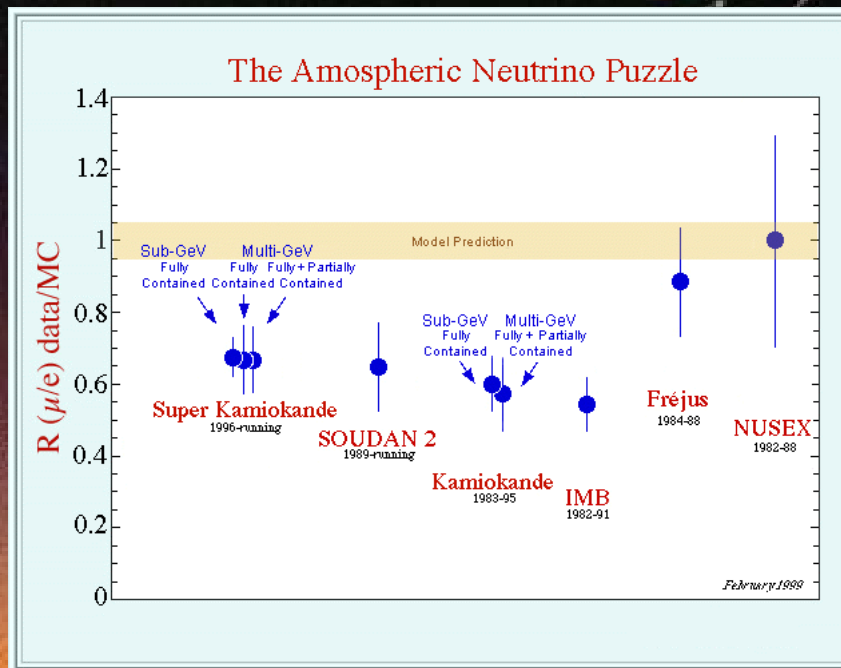


# Neutrinos aus der Atmosphäre :

- In die Erde eindringen können  $\nu$ 's und  $\mu$ 's
- Quellen der Primärstrahlung sind nicht völlig geklärt



# Wo sind die atmosphärischen $\nu$ 's ?



- erwarten :  
 $\Phi(\nu_\mu) = 2\Phi(\nu_e)$
- finden nur die Hälfte der  $\nu_\mu$ ,
- wo ist der Rest ?  
→  $\nu$ -Oszillationen ?



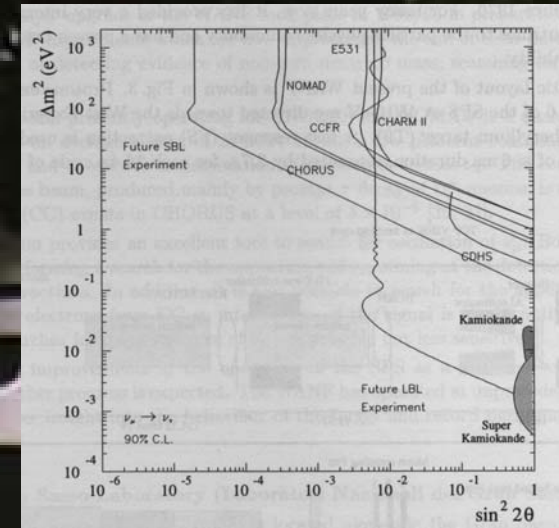
# Neutrino-Oszillationen nachgewiesen?

■ „ $\nu$  - 98 “ Takayama, Japan

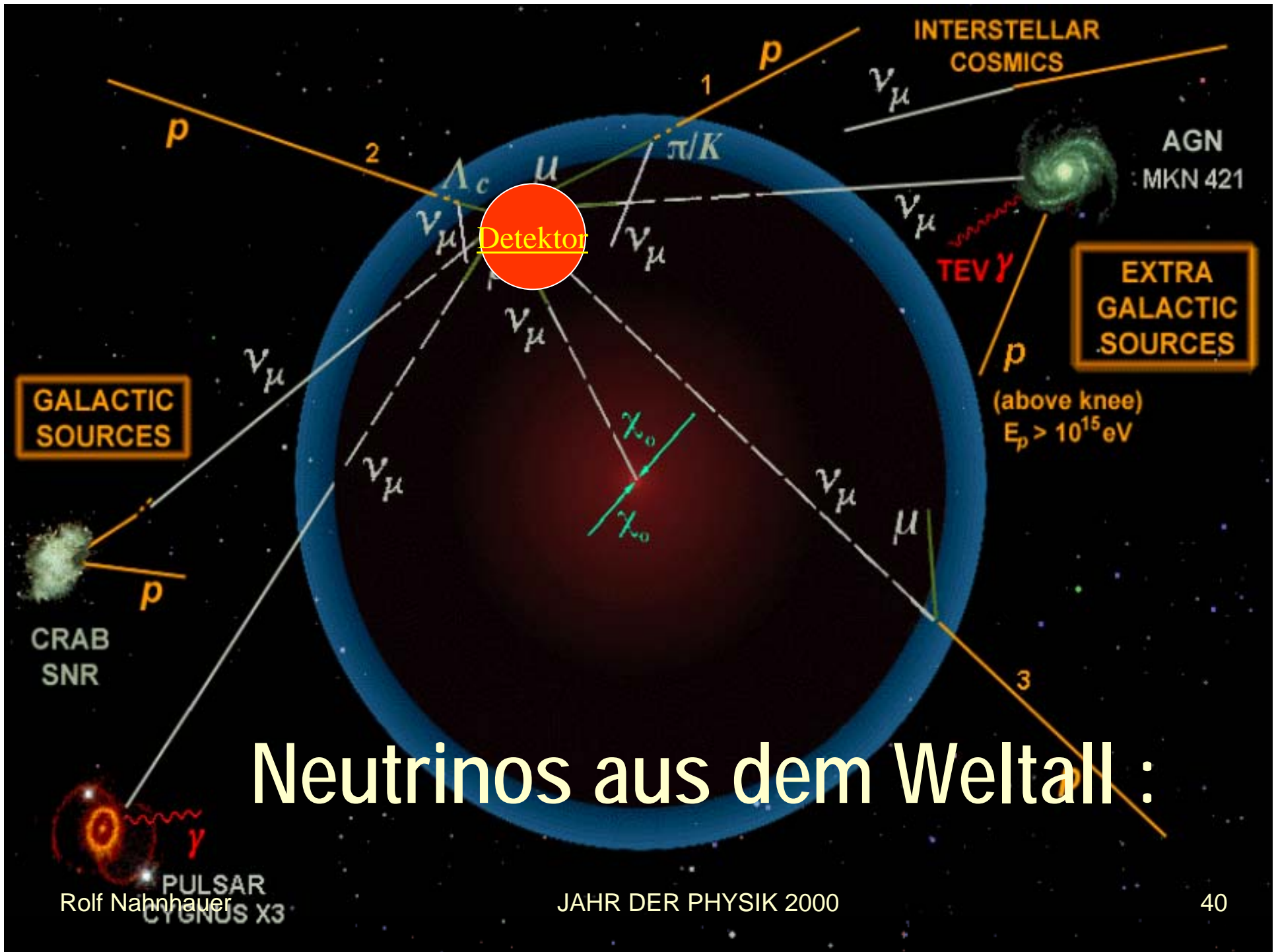
Superkamiokande gibt die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen bekannt

Defizit von  $\nu_{\mu}$  von jenseits der Erde

wahrscheinlich :



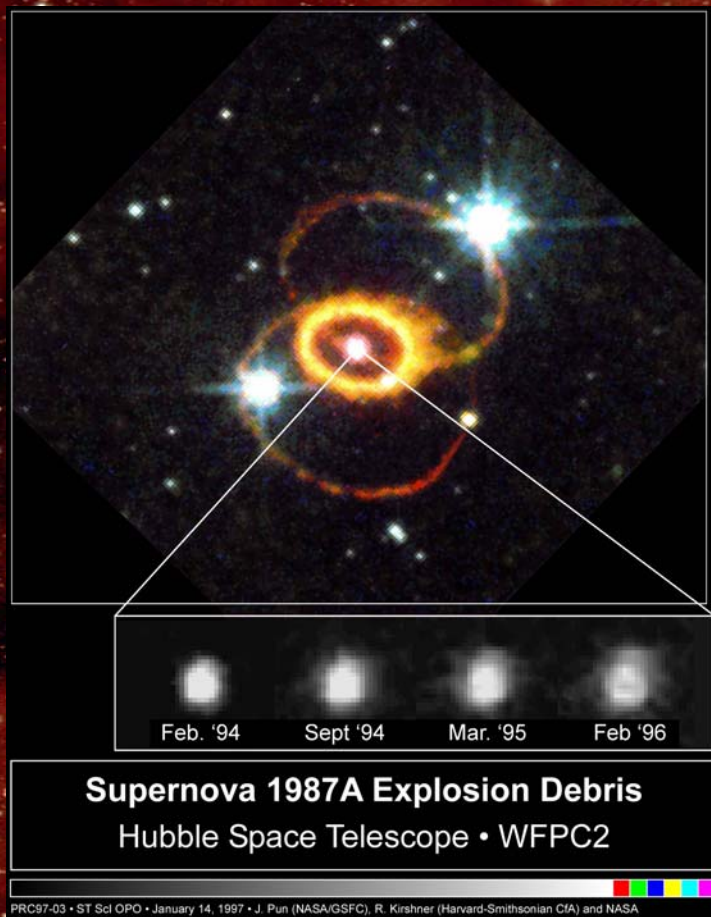




# Neutrinos aus dem Weltall :



# Die Supernova 1987A :



■ Optische Beobachtung :

23.2.1987 10:37

Australien

■ Neutrino Beobachtung

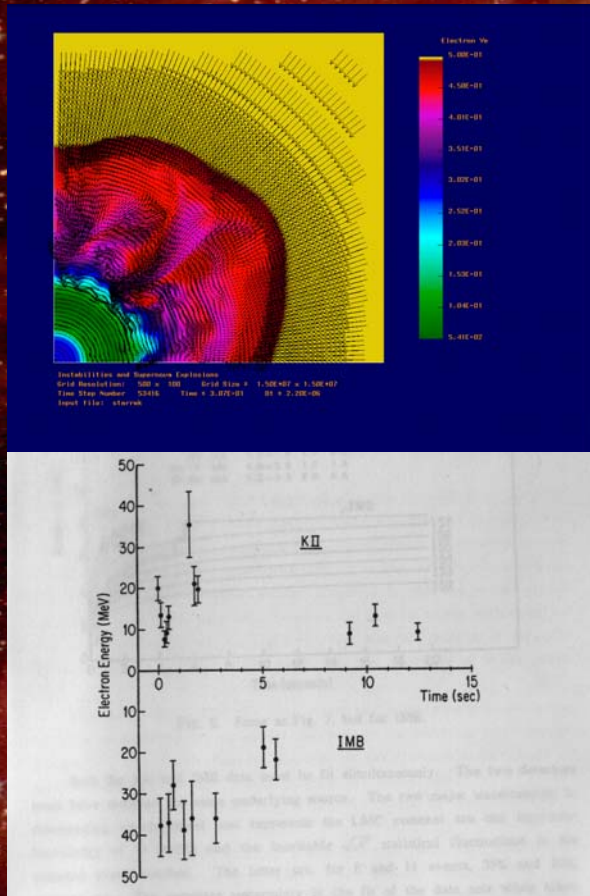
23.2.1987 7:25 + ...

KAMIOKANDE, IMB,  
BAKSAN, Mt.BLANC

~ 25 Ereignisse



# Neuigkeiten von SN1987A

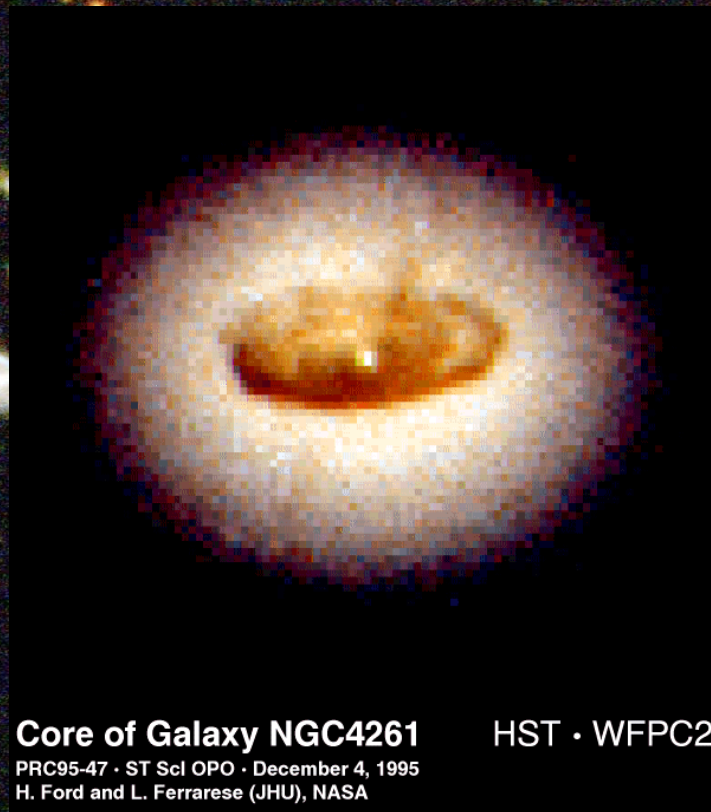


- Astrophysik :  
Sternentwicklung, z.B.  
  - $T \sim 40$  Mio K im Neutronenstern

- Teilchenphysik :  
  - $m(\nu_e) < 23$  eV
  - $\tau(\nu_e) / m(\nu_e) > 6 \cdot 10^5$  sec/eV
  - $|c_\nu - c_\gamma| / c_\gamma < 2 \cdot 10^{-9}$
  - $\mu_\nu < 10^{-12} \mu_B$
  - $Q_\nu < 10^{-17} e$



# Neutrinos aus schwarzen Löchern



Core of Galaxy NGC4261

PRC95-47 · ST ScI OPO · December 4, 1995  
H. Ford and L. Ferrarese (JHU), NASA

HST · WFPC2

- $E_{\nu} > 10^{16} \text{ eV}$   
wenige Ereignisse pro  
 $\text{km}^2$  und Jahr

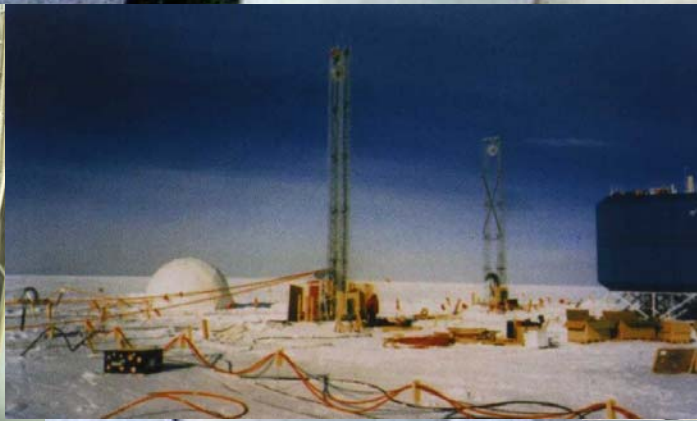
- brauchen  
Riesenteleskope

im Wasser :      BAIKAL  
                         NESTOR  
                         ANTARES

im Eis            :      AMANDA  
                         ICECUBE

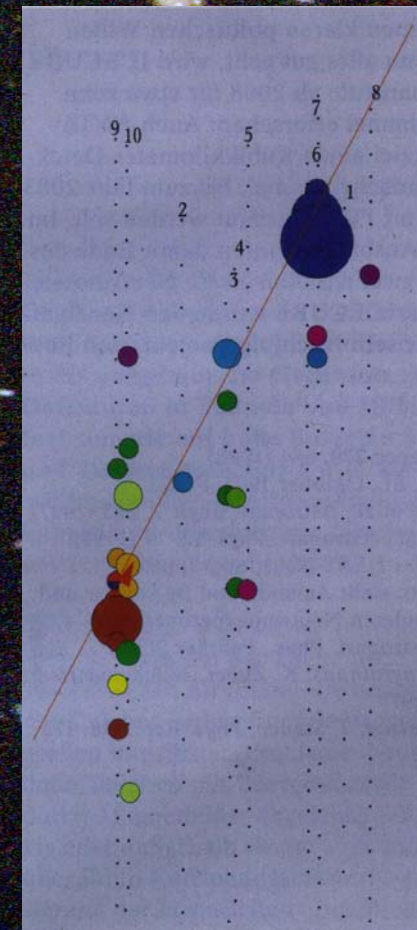
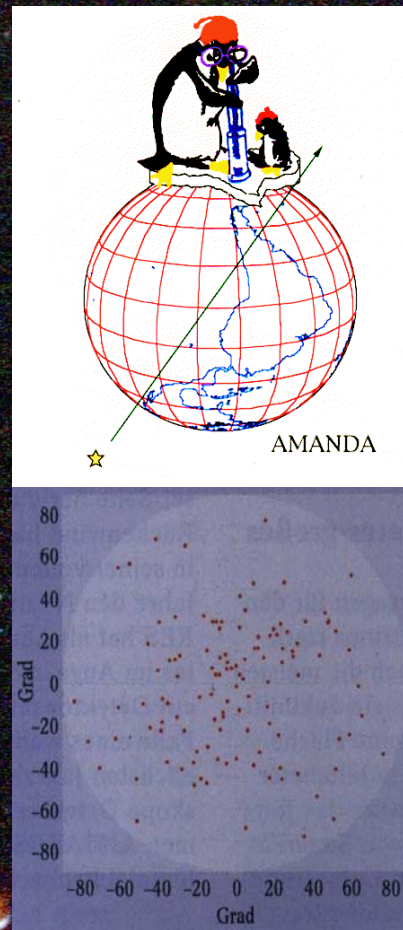
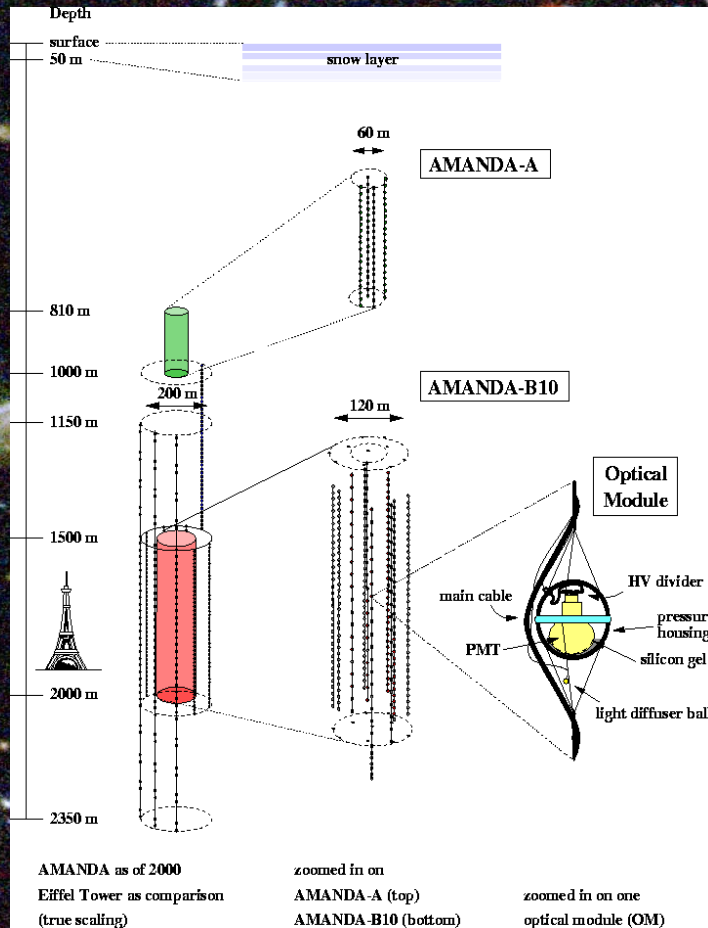


# AMANDA : Pinguine und Neutrinos





# AMANDAS erste Neutrinos :





# Neutrinos „röntgen“ die Erde

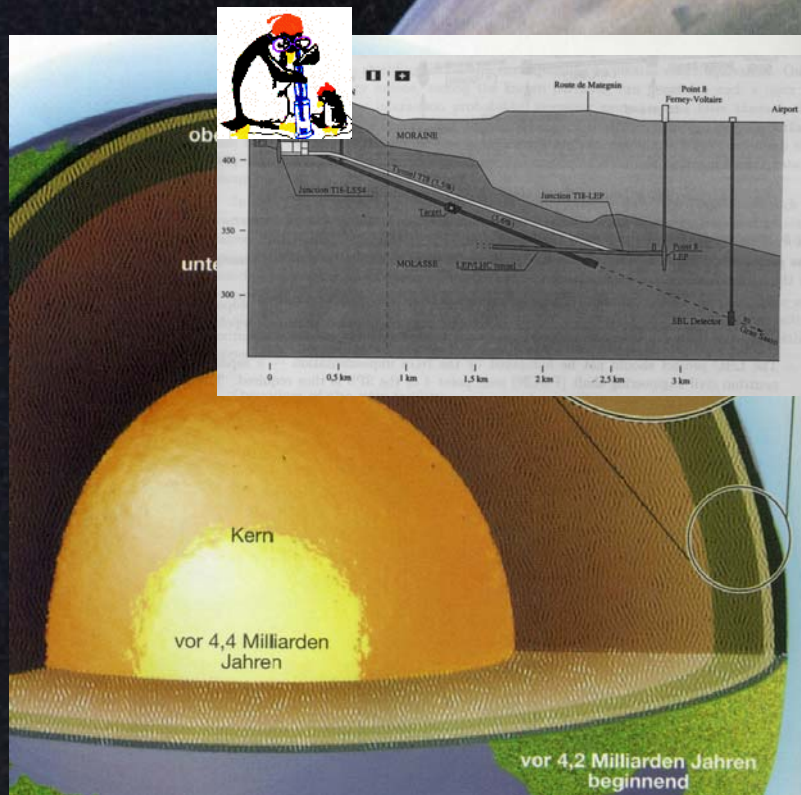
- 1980 : Nedyalkov

## Notes on Neutrino Tomography

- Erkundung von

→ Erdaufbau

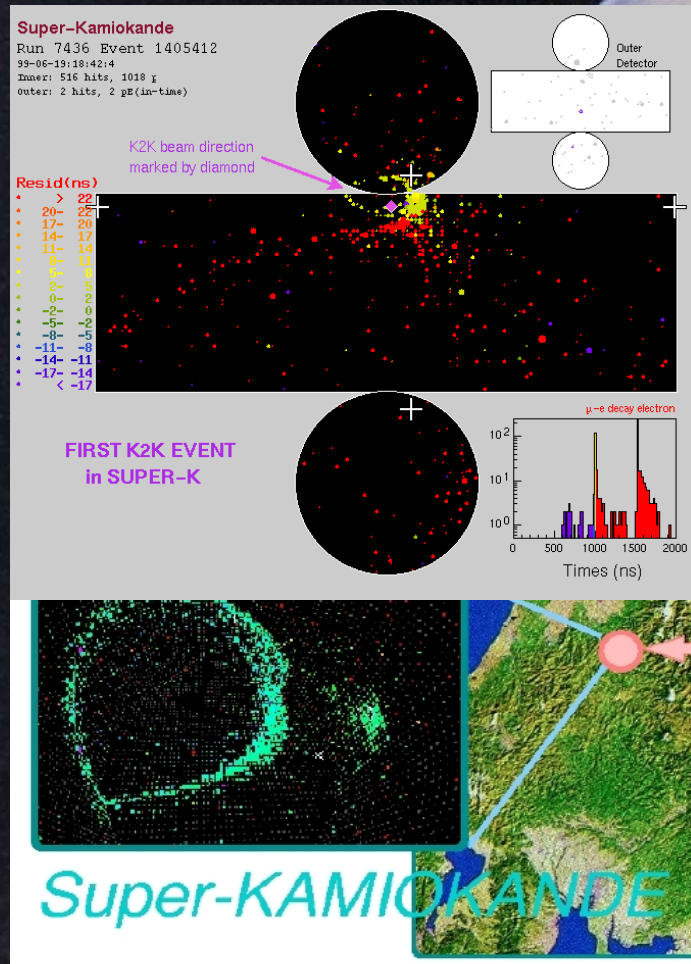
→ Lagerstätten





# Erste $\nu$ - Aufnahme gelungen !

- Weitere Projekte  
CERN - Gran Sasso  
Chikago - Minnesota





# Wissenschaft, wie weiter?

## DIE SUPPE AM KOCHEN HALTEN



VV VV VV



Dank an DESY Zeuthen (Computing,  
Exp. Support), CERN Photo, [www.xxx.yy](http://www.xxx.yy)