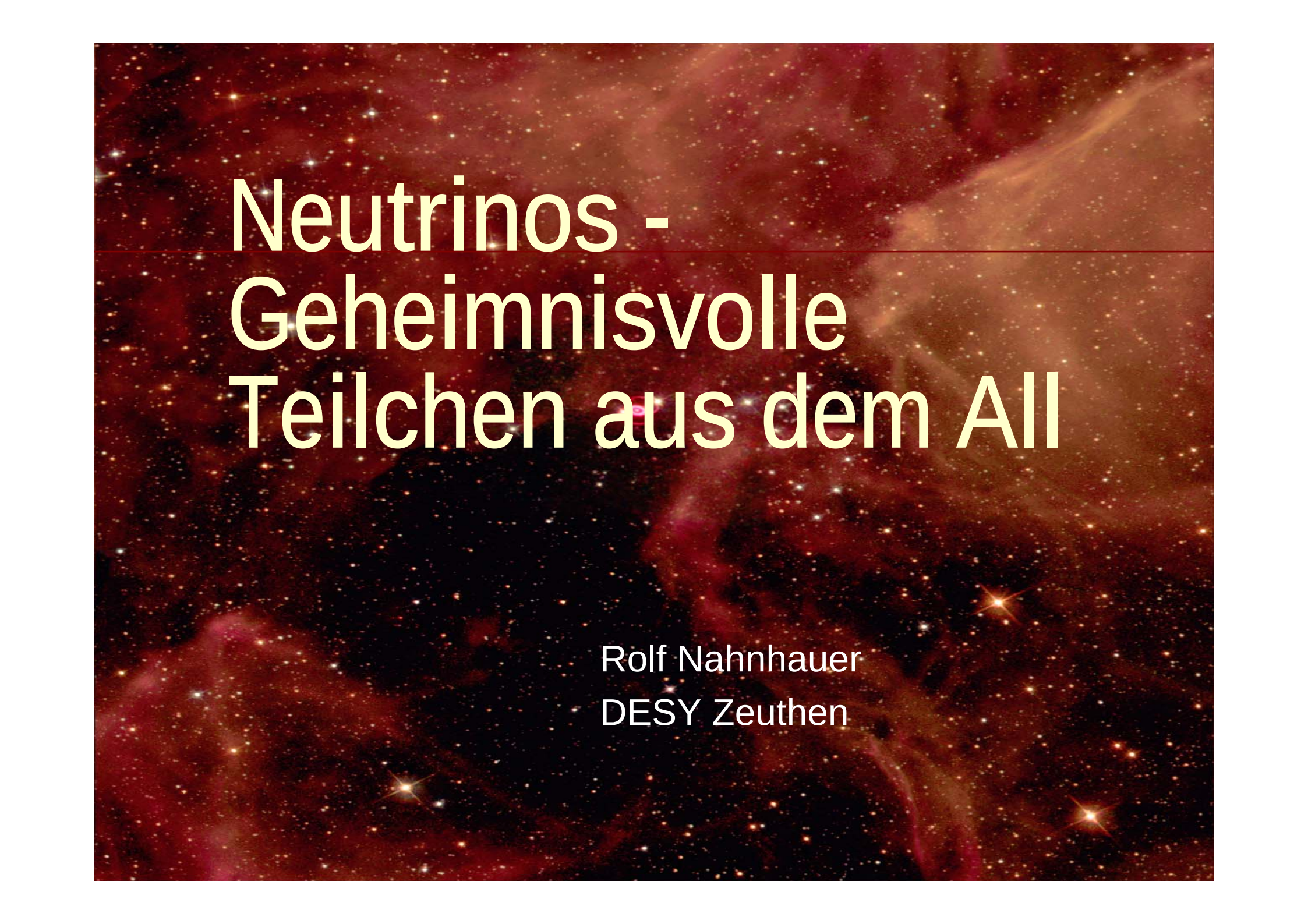


The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of stars of various magnitudes, some with prominent diffraction spikes. Interspersed among the stars are wispy, glowing clouds of interstellar dust and gas in shades of red, orange, and yellow, characteristic of a nebula or the cosmic microwave background. The overall color palette is dominated by dark reds and oranges, with bright white and yellow points of light from the stars.

# Neutrinos - Geheimnisvolle Teilchen aus dem All

Rolf Nahnauer  
DESY Zeuthen



The background is an abstract composition of warm, earthy tones—browns, oranges, and yellows. It features large, dark, angular shapes that resemble craggy rock formations or perhaps the folds of a heavy, textured material. A bright, glowing light source, possibly a window or a fire, is visible in the upper center, casting a strong, warm glow across the scene and creating a sense of depth and texture. The overall mood is mysterious and contemplative.

v

# DIE RÄTSELHAFTE SANFTE MATERIE

A silhouette of a person with their arms raised in a 'V' shape, set against a background of a sunset or sunrise with warm orange and yellow tones. The person's arms are extended horizontally, and their torso is visible in the center.

## 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

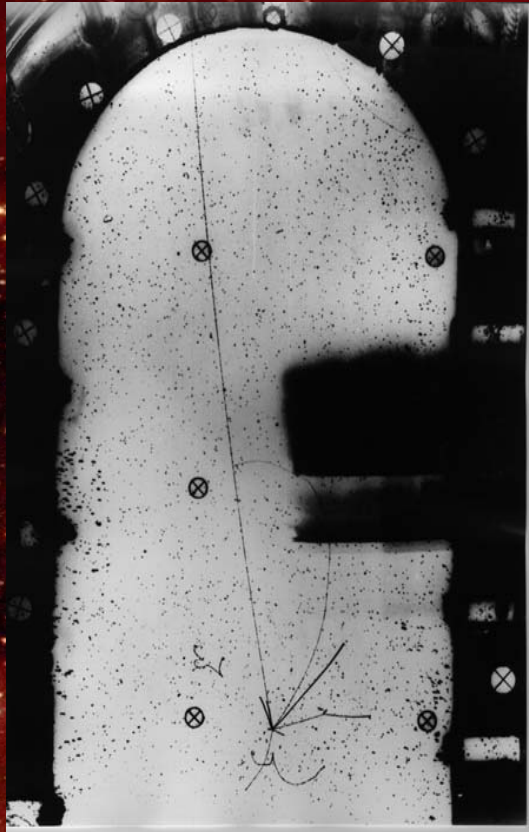


# Warum „sehen“ wir keine Neutrinos?

- 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

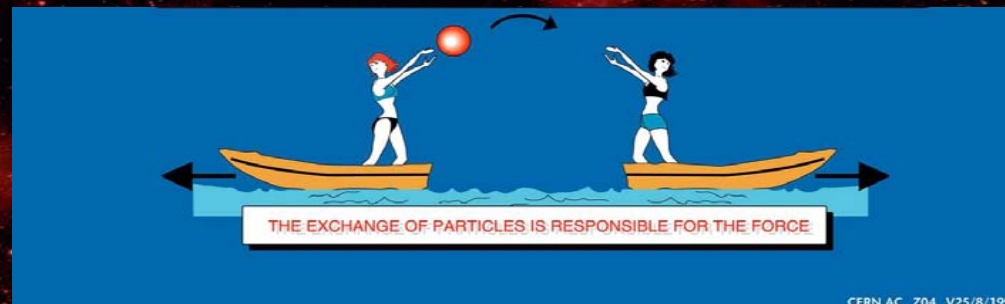
- Zerfälle in  
geladene  
Teilchen
- Erzeugung  
von  
geladenen  
Teilchen





# Wechselwirkungen von Materieteilchen

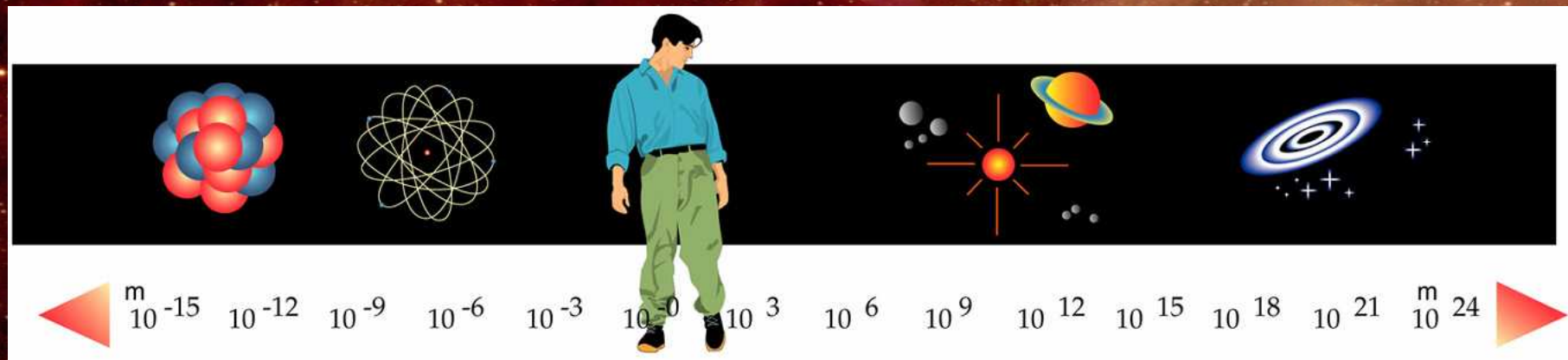
|                                                           | Stärke     | Reichweite    | Teilchen    |
|-----------------------------------------------------------|------------|---------------|-------------|
| ■ Kernkraft<br>bindet Nukleonen im Atomkern               | 1          | $10^{-12}$ cm |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

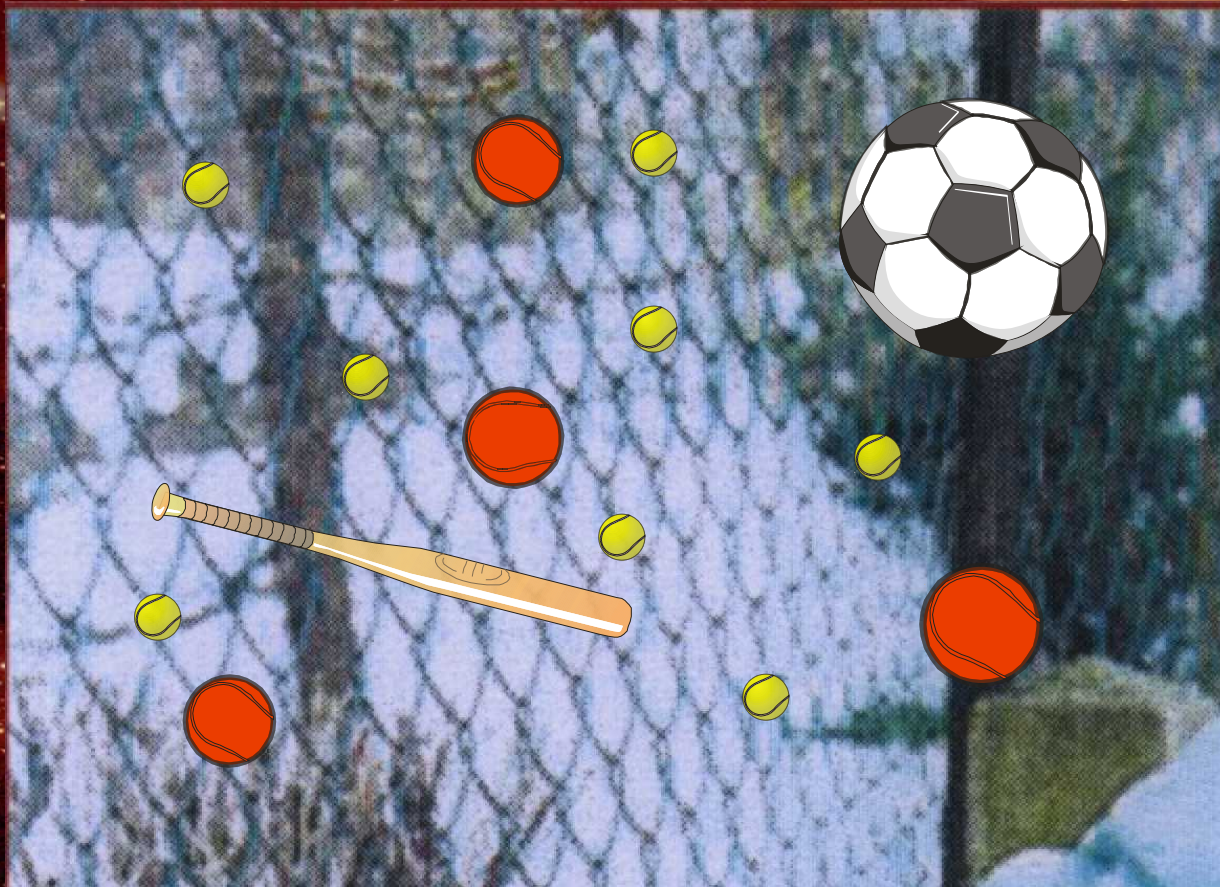
0.00001 m (Haar)  $\longleftrightarrow$  100000 m (Bergsicht)

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



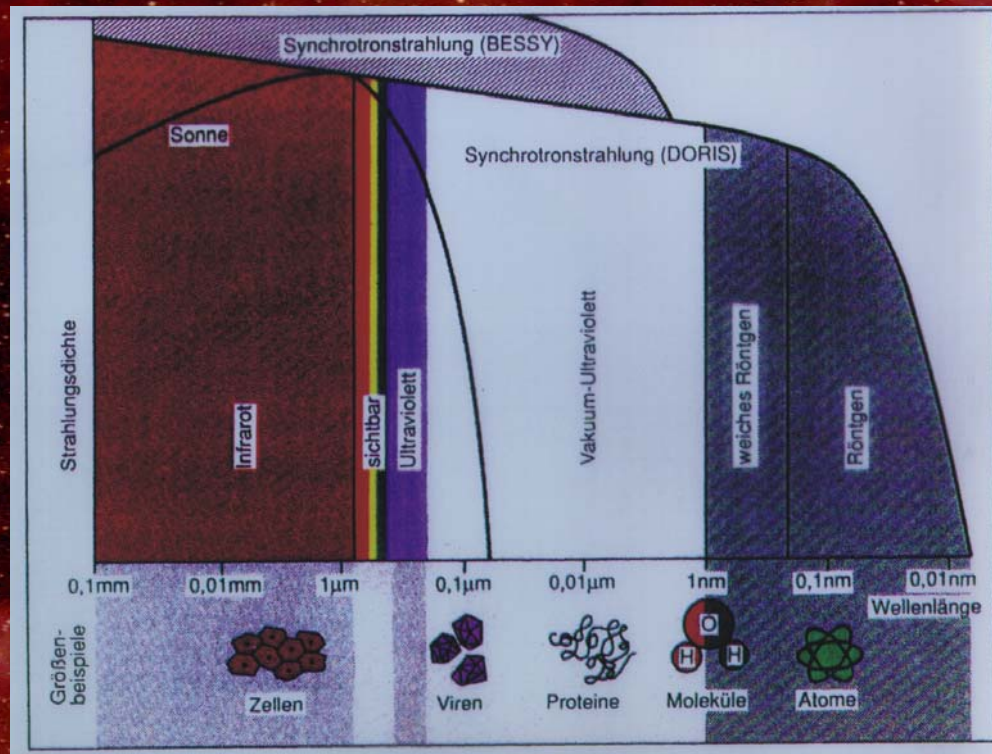
# „Das Maschendraht-Experiment“

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

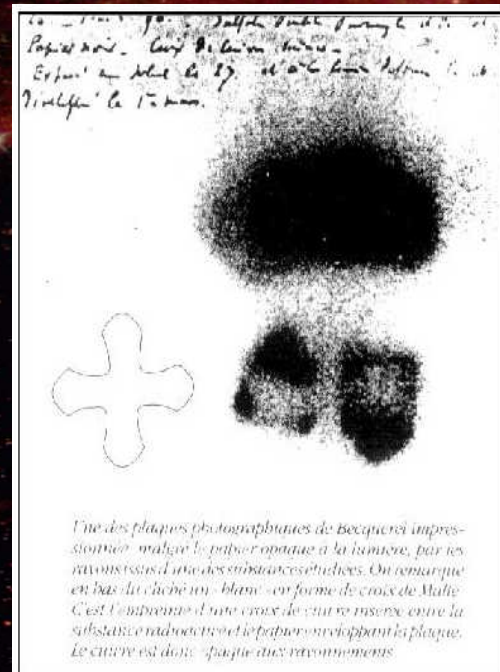


Materie unterschiedlicher Dichte absorbiert „unsichtbares“ Licht unterschiedlich



# Ein neues Phänomen :

Radioaktivität      Henry Bequerel      1896



- Strahlen aus dem Atomkern

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$



# Leere Atome :

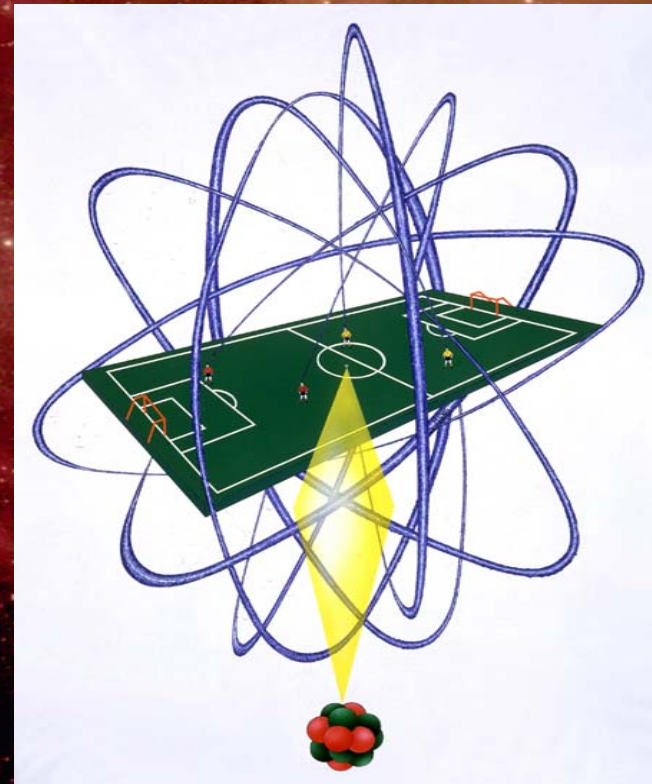
## Ernest Rutherford 1911

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

### ATOMMODELL

- wirkliches Verhalten komplizierter

### QUANTEN- MECHANIK





# Die Energie Krise :

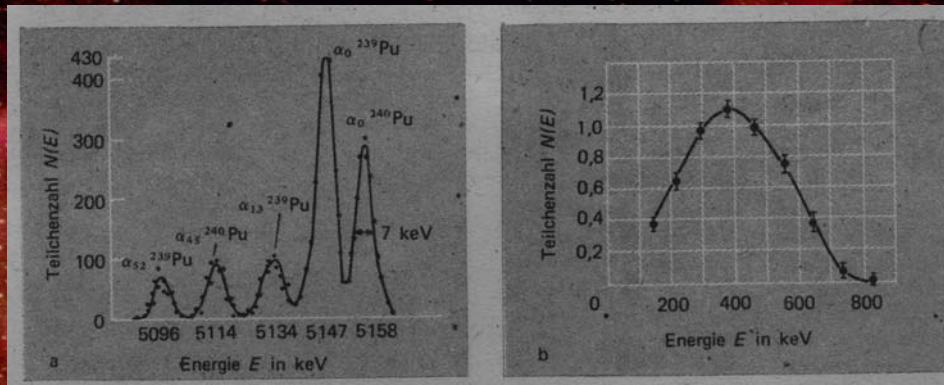
1926-1930

- Radioaktiver Zerfall :



+ X

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





# Die Erfindung des Neutrinos I : Wolfgang Pauli 1930



$$\blacksquare \quad X \rightarrow e^- + \nu$$

$\nu$  - Eigenschaften

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

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

$$0 < m_\nu < m_e$$

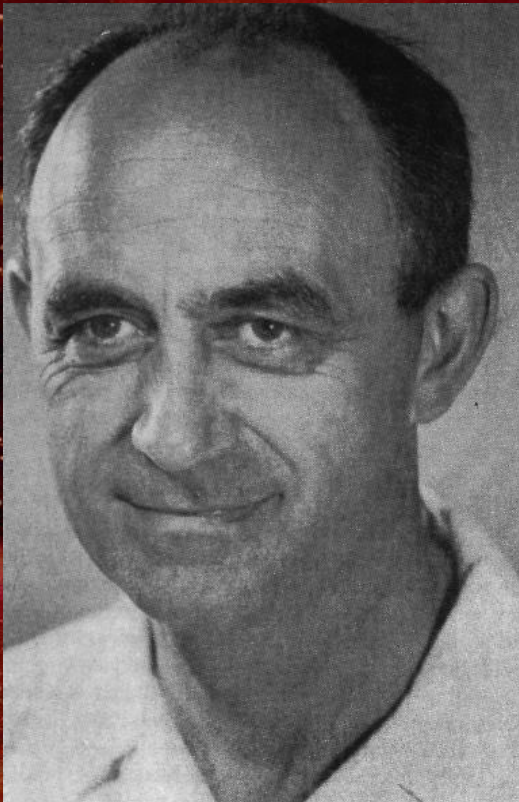
$$s_\nu = 1/2$$

$$N_\nu = 1$$



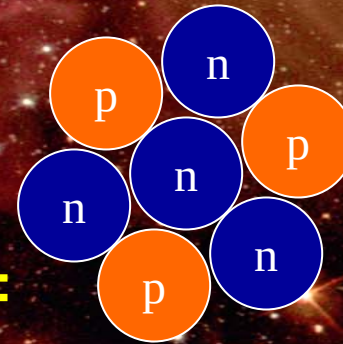
# Die Erfindung des Neutrinos II :

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



1932 Entdeckung des  
Neutrons durch Chadwick

Atomkern:



$\beta$ -Zerfall :



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



# Neutrino-Durchdringungsvermögen

$$N_{\text{beob}} = \sigma N_{\text{TD}} \Phi_v$$

$$\lambda_w = 1/N_{av} \rho \sigma$$

$$\sigma(\nu n \rightarrow pe^-) \rightarrow 6.4 \cdot 10^{-44} (E/\text{MeV})^2 \text{cm}^2$$

$$\sigma (\nu N \rightarrow \mu^- X) \rightarrow 0.7 \cdot 10^{-38} (E/\text{GeV}) \text{cm}^2$$

**$\sigma$  : Wechselwirkungsstärke**

**$N_{TD}$  : Teilchen im Detektor**

## $\Phi_\nu$ : Neutrino Fluß

**$N_{av}$  : Avogadro-Zahl**

$\rho$  : Dichte

**$\lambda_w$  : Wechselwirkungslänge**

**Q=Sonne, D=Erde :  $\lambda_w = 1.9 \cdot 10^{13} \text{ km} \cong 2 \text{ Lichtjahre} \cong 1.6 \text{ Milliarden Erdkugeln}$**





# Der Neutrino Nachweis :

## Cowan, Reines 1955

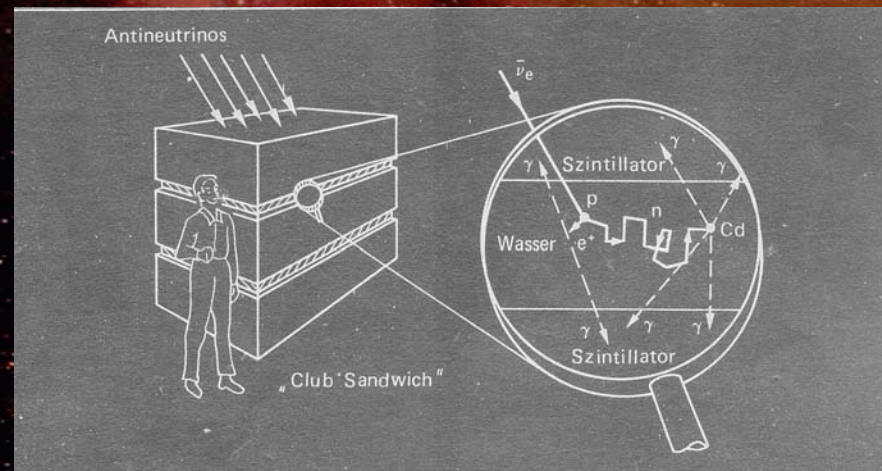
- Savannah River Reaktor USA:  
 $10^{13} \nu_e^a / \text{cm}^2 \text{sec}$  in alle Richtungen
- Detektor: Club-Sandwich

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 ?

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

- künstlicher Strahl

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

- 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

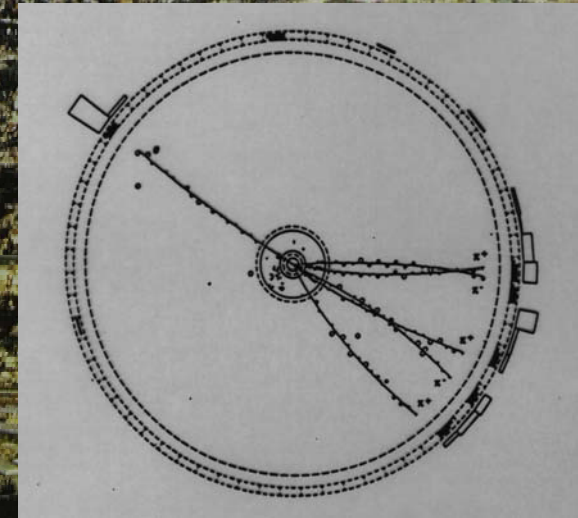
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow 5\pi\nu_\tau \quad e\nu_\tau\nu_e^a \quad (\text{ARGUS})$$

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

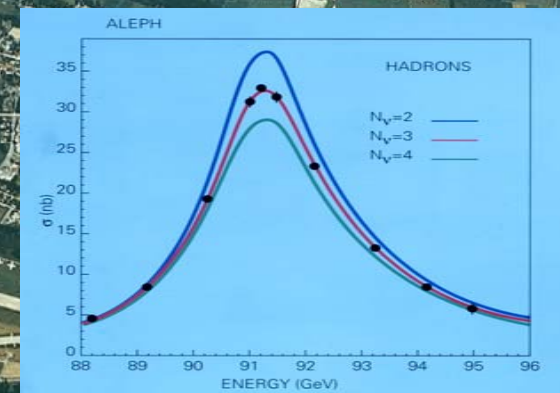
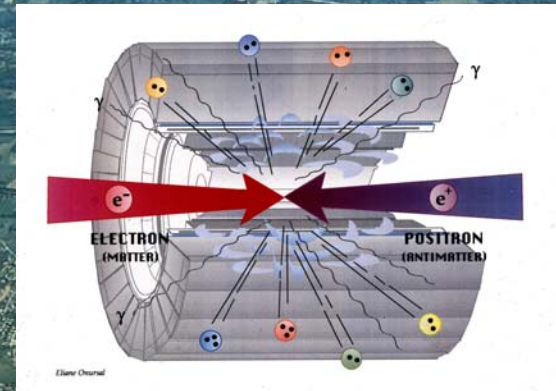
Astrophysik SN 1987A

Beschleuniger-Physik

- Genauester Wert heute

LEP:

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





# Teilchen ohne Masse ?

## Relativitätstheorie Einstein 1905

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

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

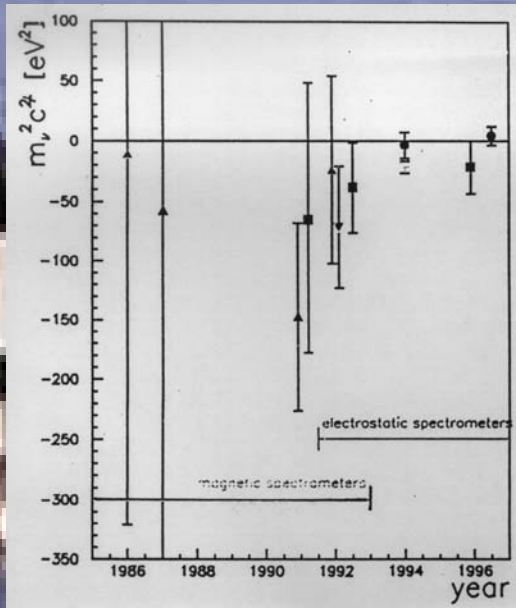
E : Energie    m : bewegte Masse     $m_0$  : Ruhmasse

p : Impuls    v : Geschwindigkeit    c : Lichtgeschwindigkeit

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



# Die Masse der Neutrinos :



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

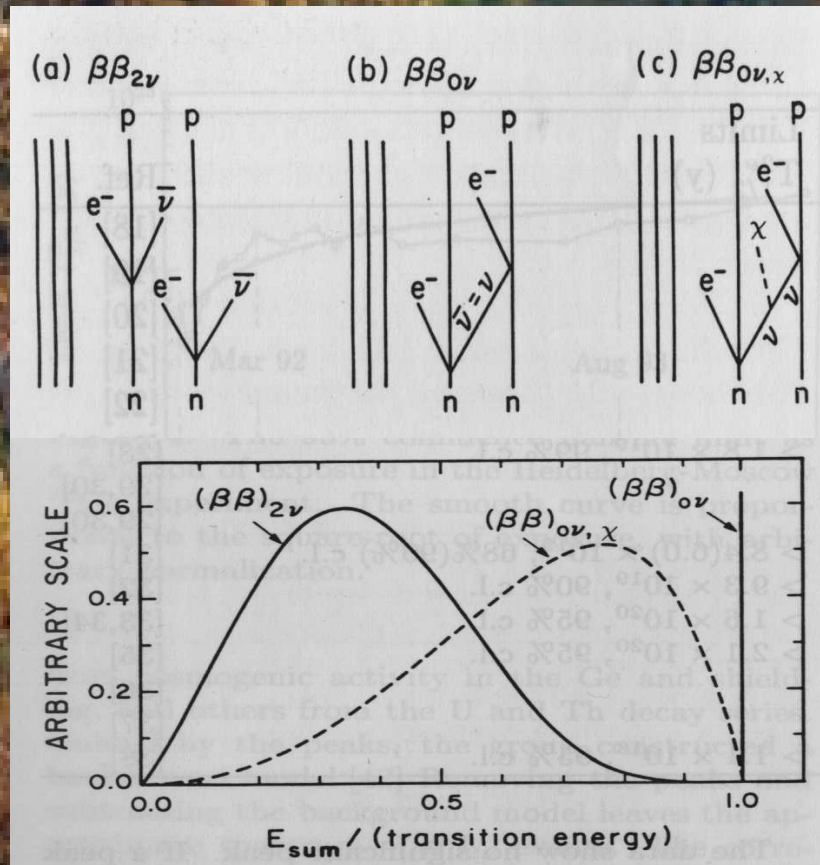
$$E_n = m_p + E_e^{\text{max}} + m_\nu$$

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

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



# Wie neutral sind Neutrinos ?



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



# Chamäleon Neutrino

- Massenzustände      Wechselwirkungszustände

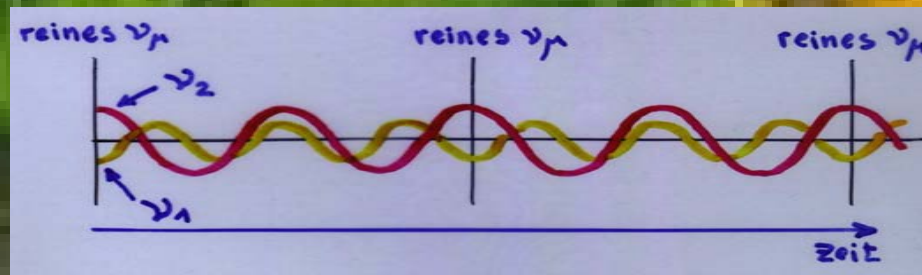
$\nu_1$

$\nu_2$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

Mischung ändert sich in Raum und Zeit

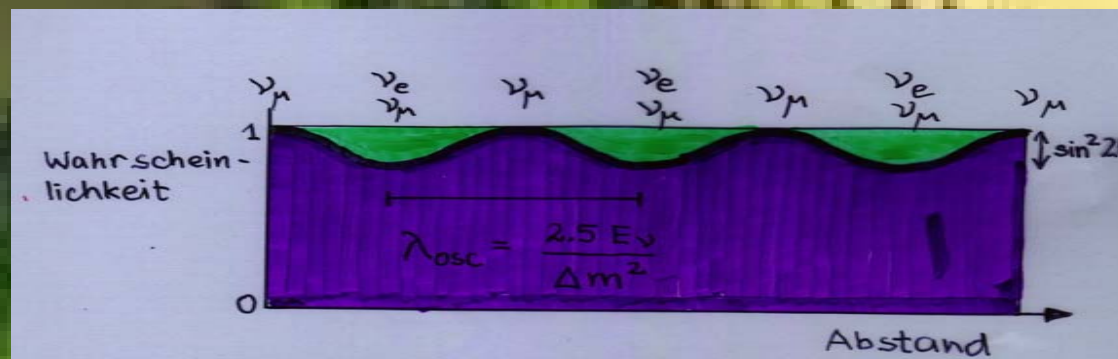


■ Neutrino Oszillationen



# Wer ist wo und wann, was?

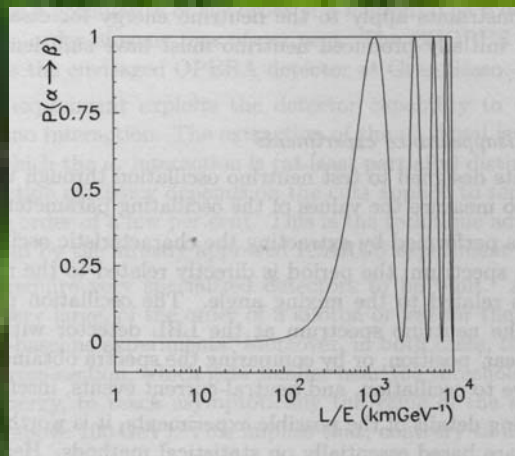
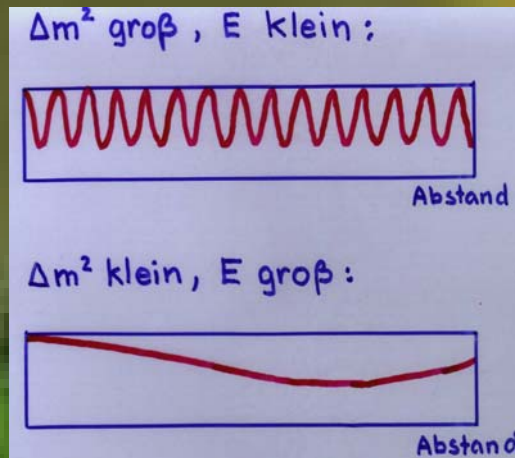
- $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$



- $\theta$  : 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 :

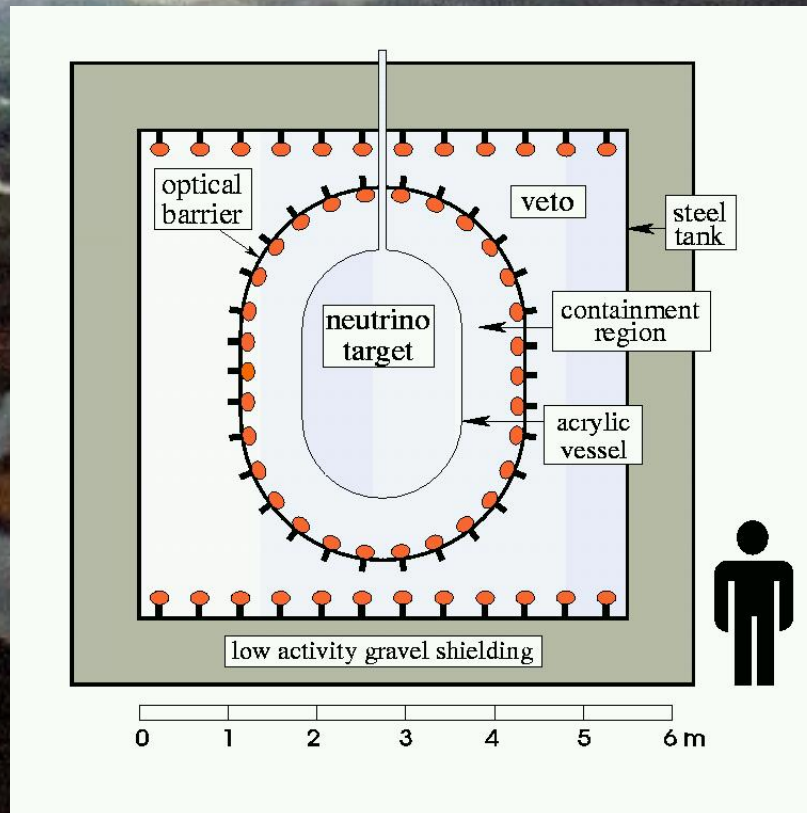
| Quelle        | $E_{\min}/\text{MeV}$ | $L_{\max}/\text{m}$ | $\Delta m^2/\text{eV}^2$ |
|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Sonne         | $10^{-1}$             | $10^{11}$           | $10^{-11}$               |
| Atmosphäre    | $10^3$   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

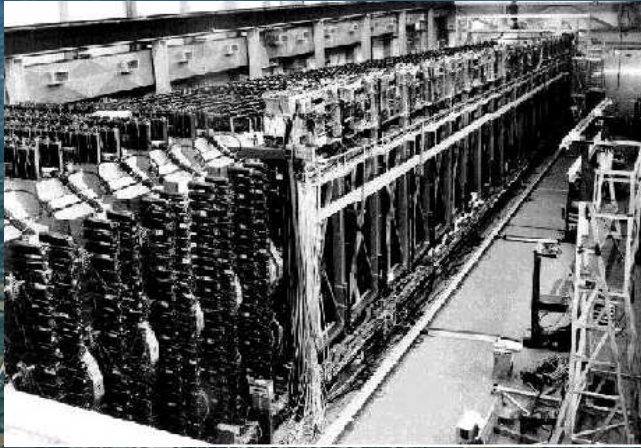


- CHOOZ :  $E=3\text{MeV}$
- Detektor :  $L=1\text{km}$   
Szintillator + Gd  
Tiefe: 300 mwe  
 $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$   
verzögerte Koinzidenz
- finden  $98 \pm 4\%$  von  $\Phi_\nu$   
 $\Delta m^2 < 10^{-3} \text{ eV}^2$



# 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

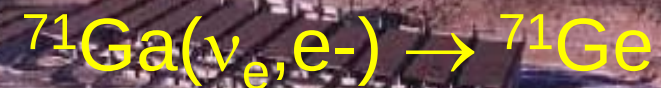
$\sin^2 2\theta < 10^{-3}$ , wenn  $\Delta m^2$  groß



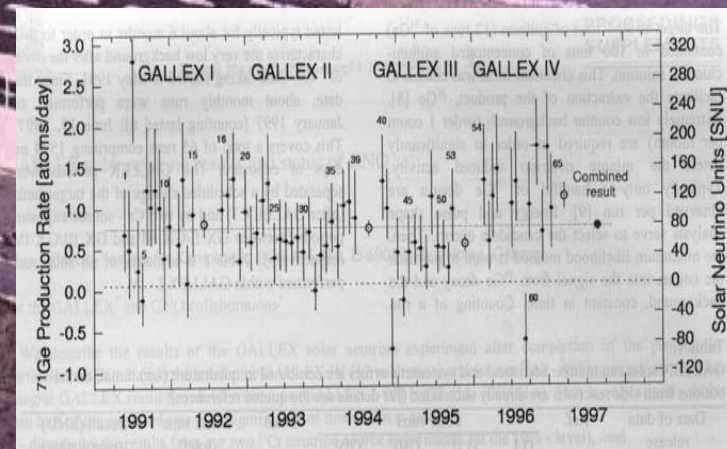
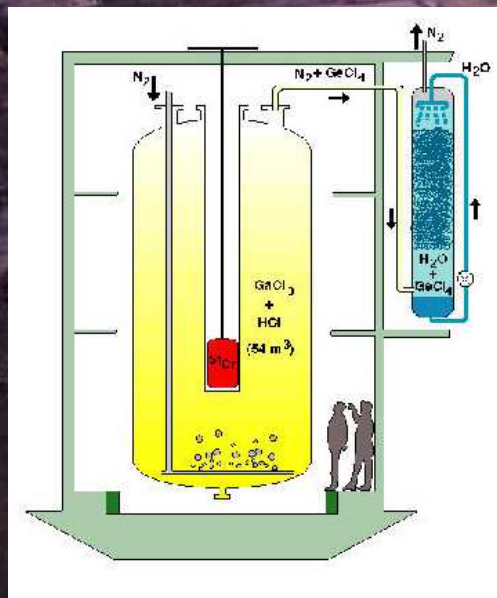
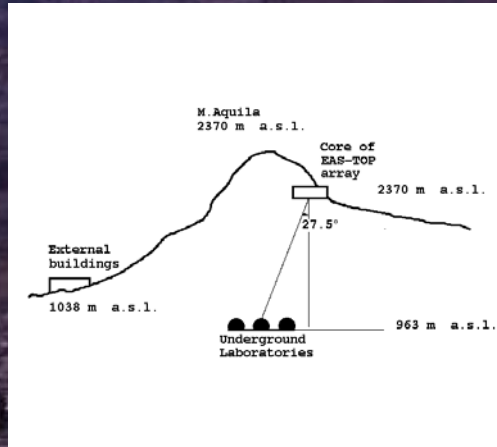
# Neutrino Fallen III

für die Sonne

■ GALLEX (30-60t)



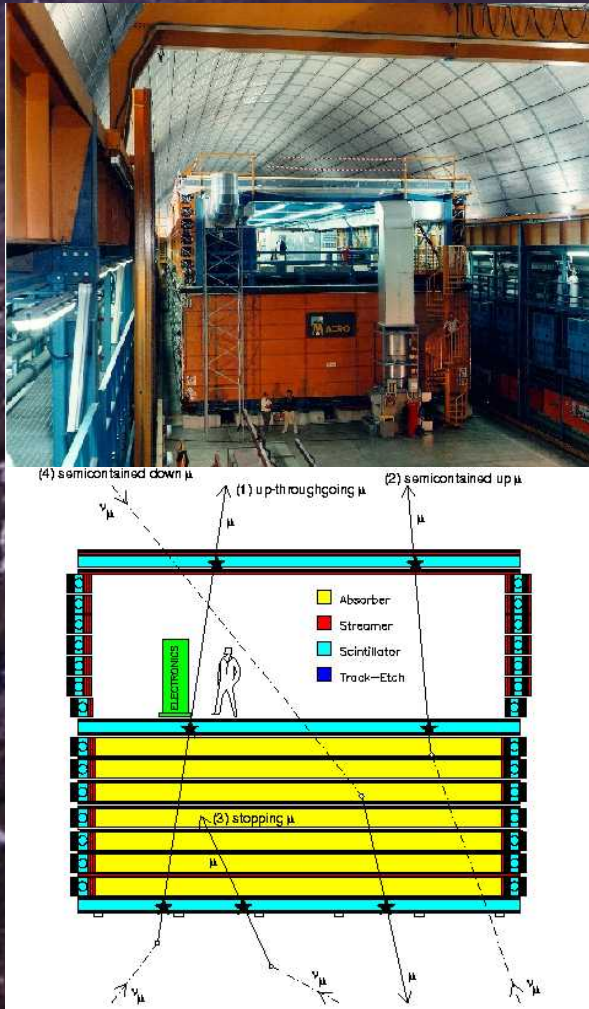
➔ Atome zählen





# Neutrino Fallen IV

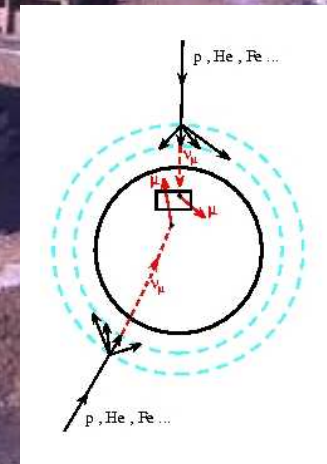
für die Atmosphäre



## ■ MACRO

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

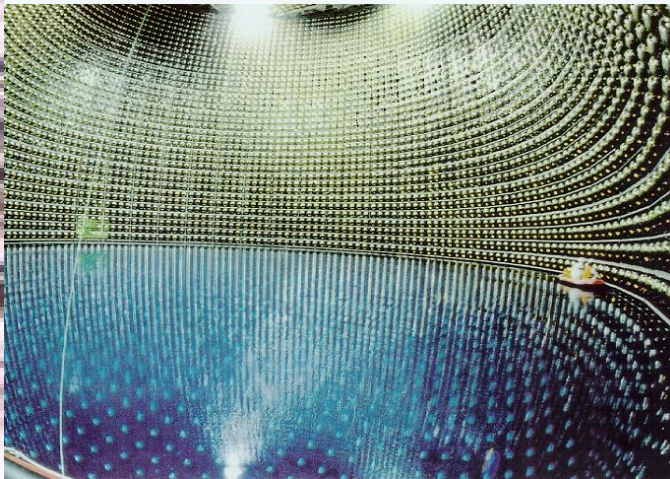
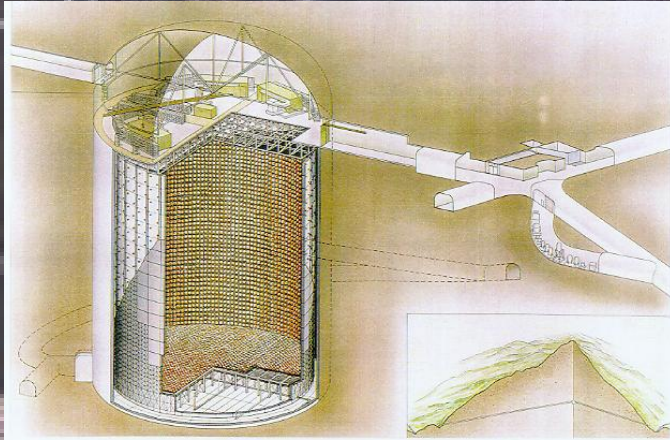
Suche  
nach  
Spuren  
von der  
anderen  
Seite  
der Erde





# Die Neutrino Superfalle

## SUPERKAMIOKANDE



- Tank mit 50 000 t  $\text{H}_2\text{O}$

Tiefe: 2700 mwe

11146 SEV's (50cm)

1885 SEV's (20cm)

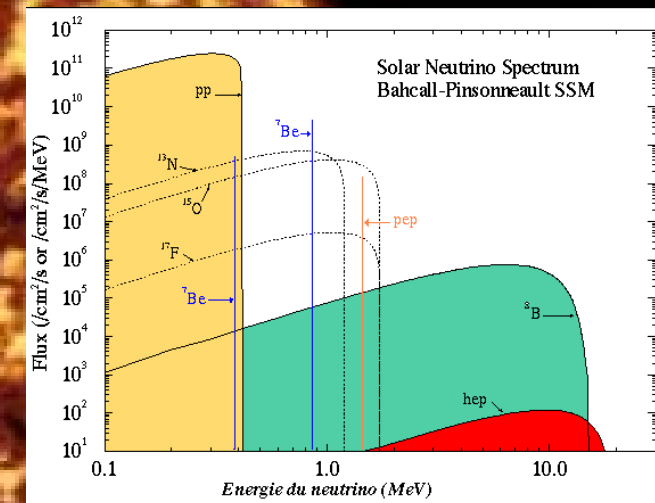
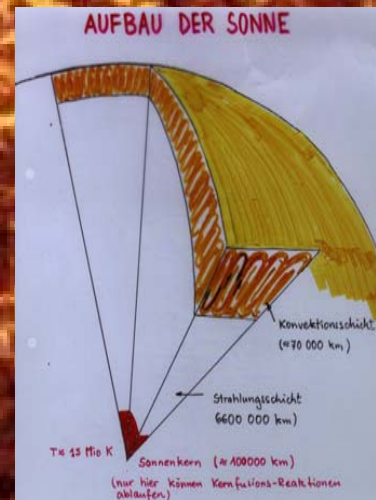
- $e^-$ ,  $\mu^-$  : Cerenkov-Strahlung
- Sonnenneutrinos  $E_e > 6 \text{ MeV}$   
messen Einfallsrichtung
- Atmosphären Neutrinos



# 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% |
| ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$           |       |
| ${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2{}^4\text{He}$                       |       |

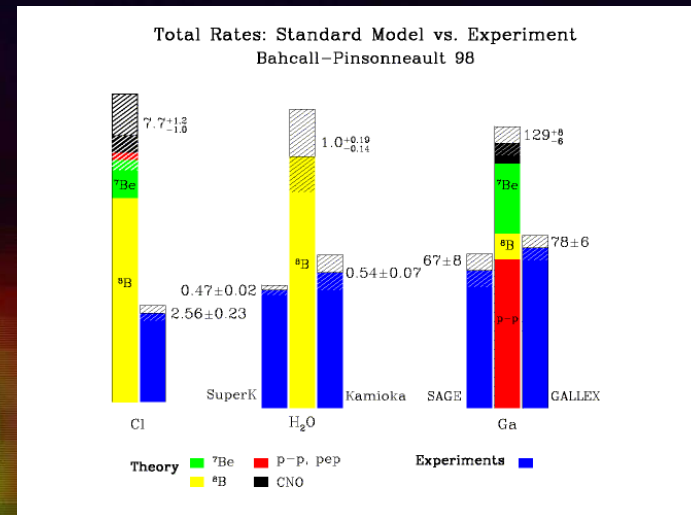


- ausgestrahlt werden :  $2 \cdot 10^{38} \text{ } \nu \text{'s/sec}$
- auf der Erde treffen nach  $\sim 7.5 \text{ min}$  ein :  $40 \cdot 10^9 \text{ } \nu \text{'s/cm}^2 \text{sec}$



# 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 ?



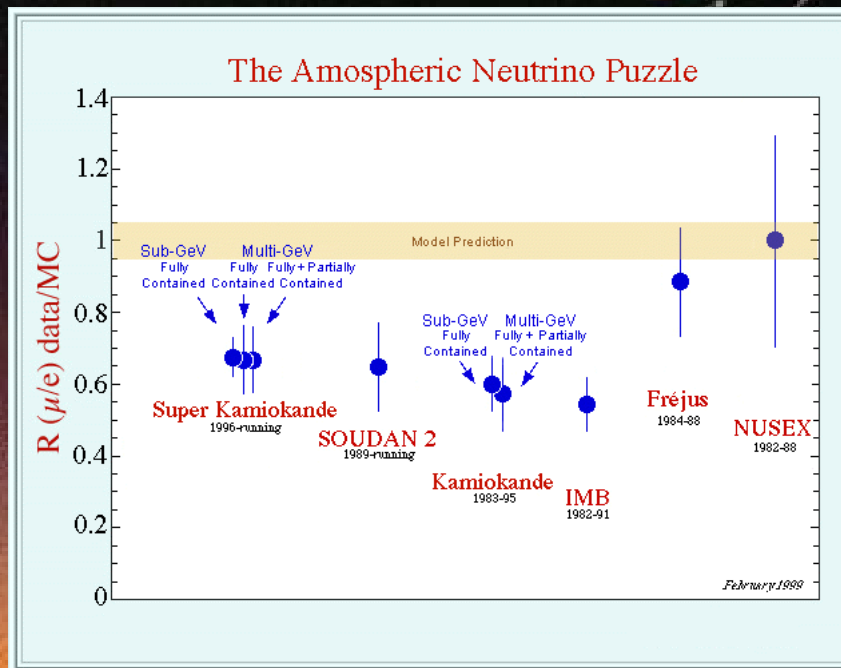


## Neutrinos aus der Atmosphäre :

- 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?

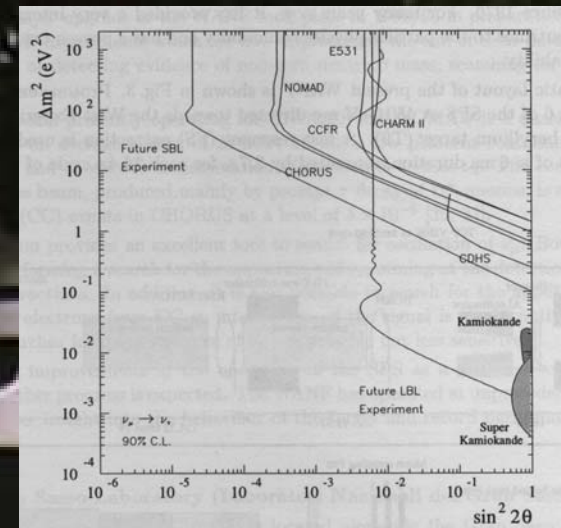
■ „ $\nu$  - 98 “ Takayama, Japan

Superkamiokande gibt die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen bekannt

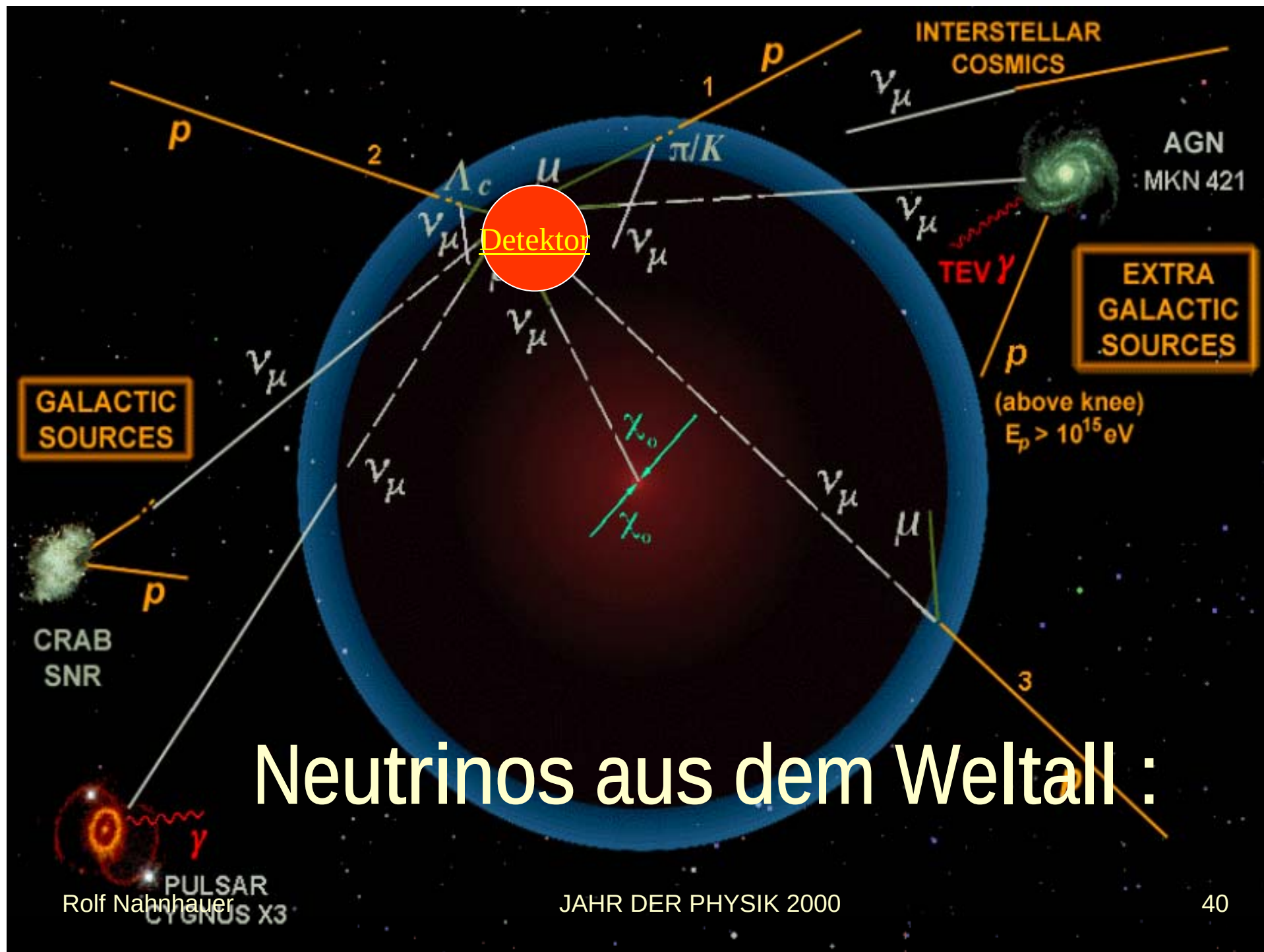
Defizit von  $\nu_\mu$  von jenseits der Erde

wahrscheinlich :

$$\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$$

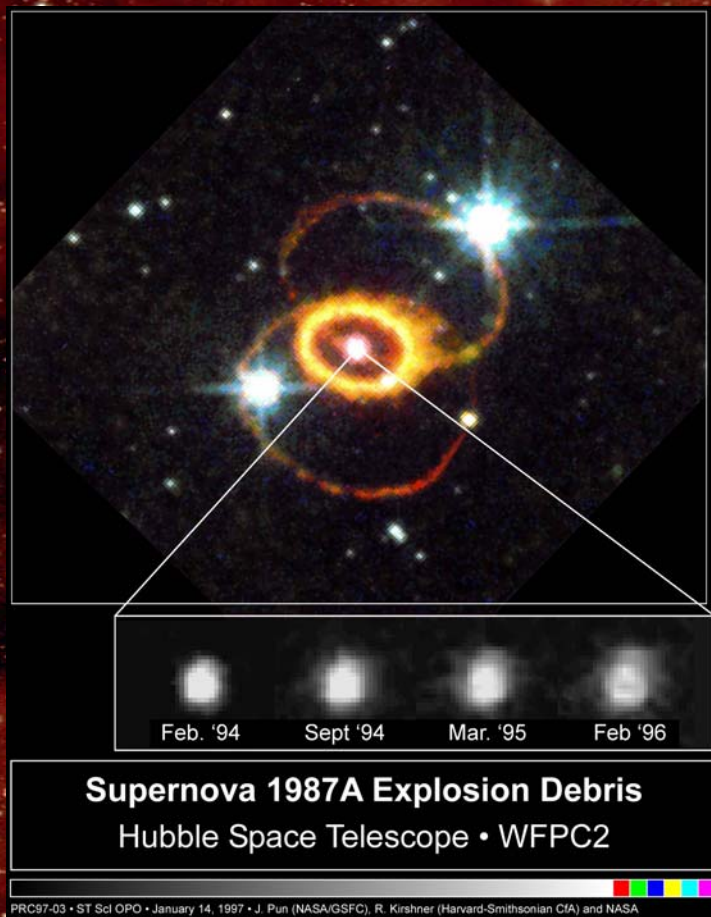








# Die Supernova 1987A :



■ Optische Beobachtung :

23.2.1987 10:37

Australien

■ Neutrino Beobachtung

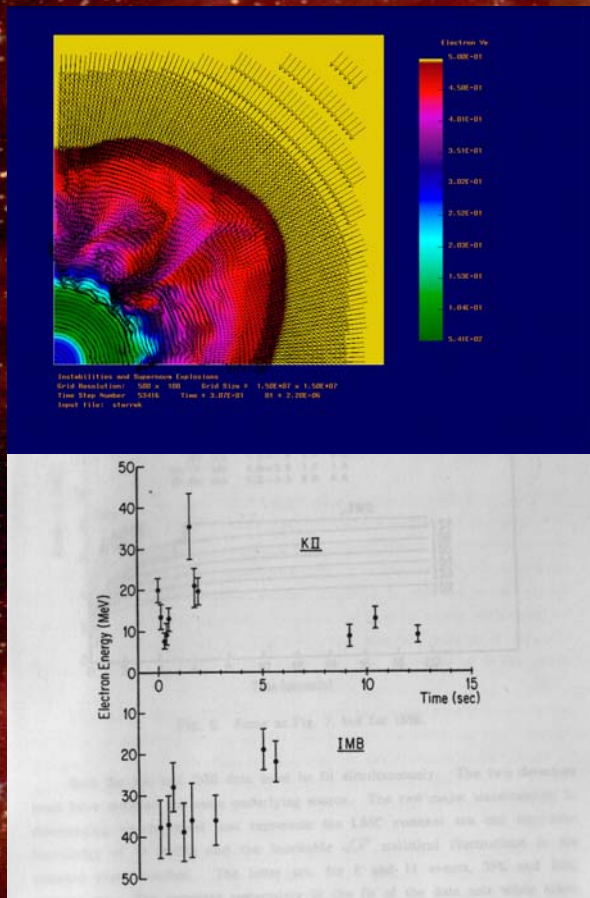
23.2.1987 7:25 + ...

KAMIOKANDE, IMB,  
BAKSAN, Mt.BLANC

~ 25 Ereignisse



# Neuigkeiten von SN1987A

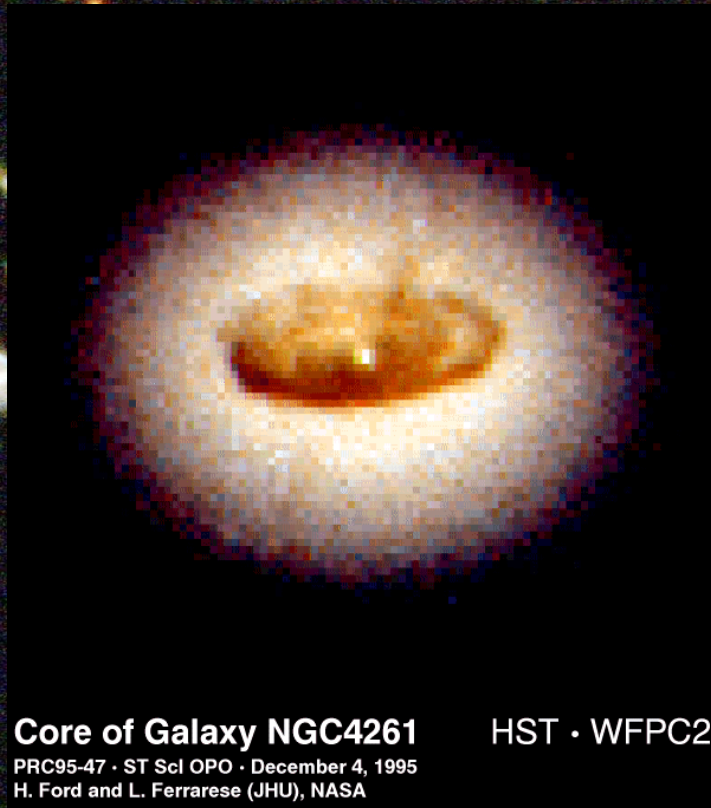


- Astrophysik :  
Sternentwicklung, z.B.  
 $T \sim 40 \text{ Mio K}$  im Neutronenstern

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



# Neutrinos aus schwarzen Löchern



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

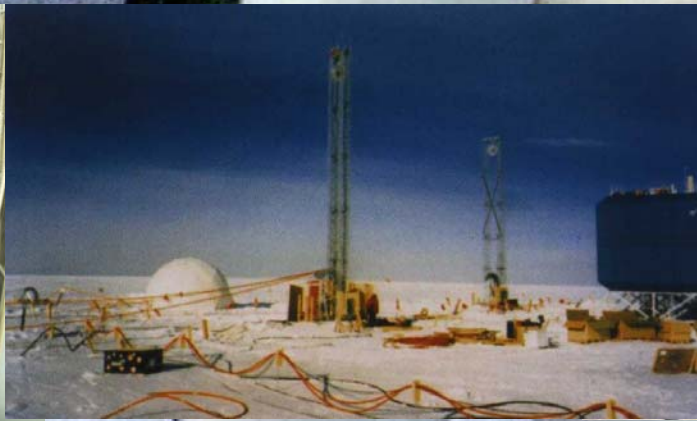
- brauchen  
Riesenteleskope

im Wasser :  
BAIKAL  
NESTOR  
ANTARES

im Eis :  
AMANDA  
ICECUBE

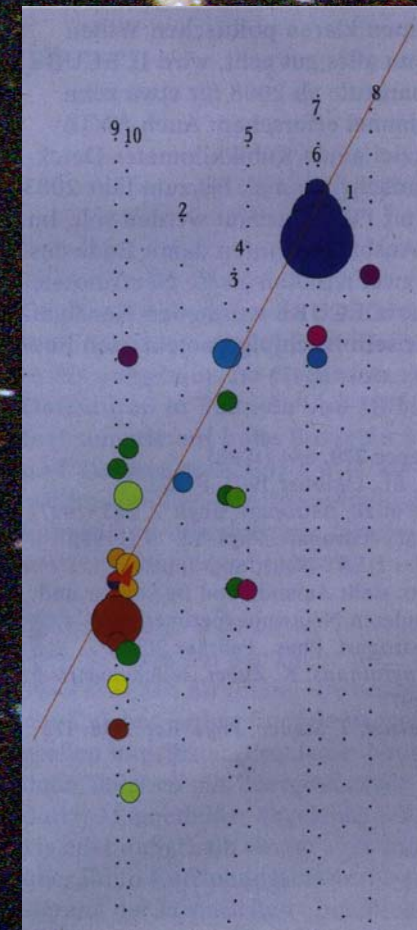
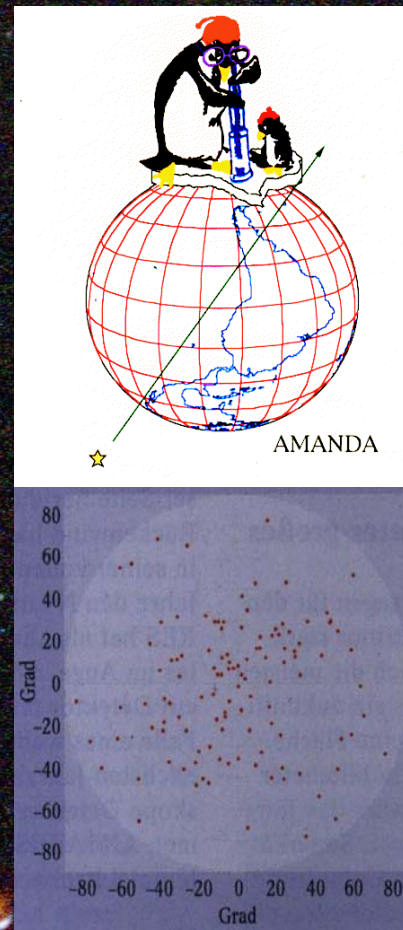
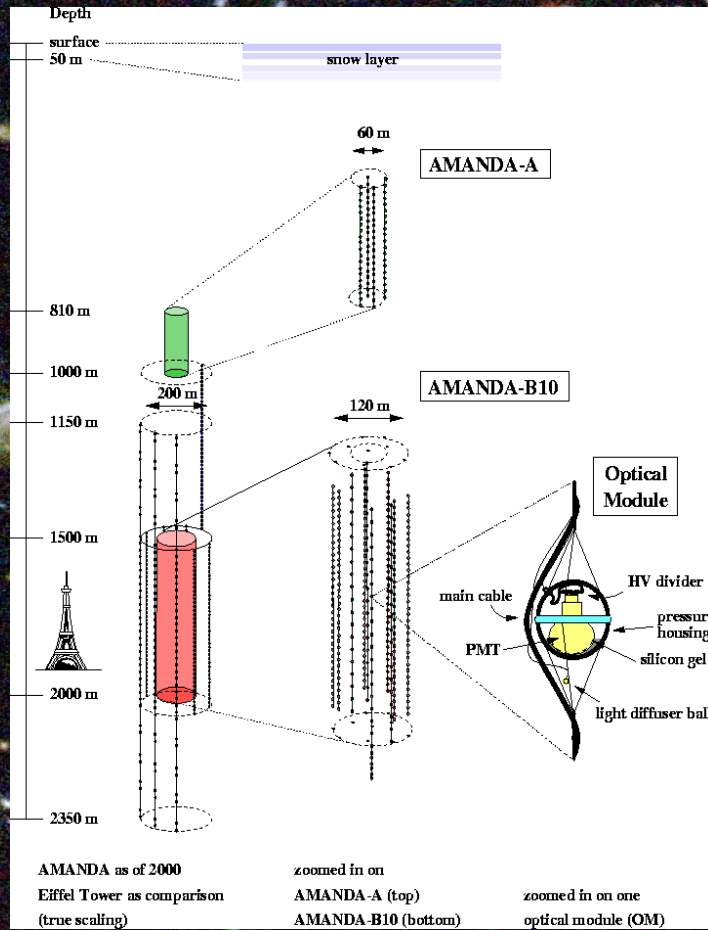


# AMANDA : Pinguine und Neutrinos





# AMANDAS erste Neutrinos :





# Neutrinos „röntgen“ die Erde

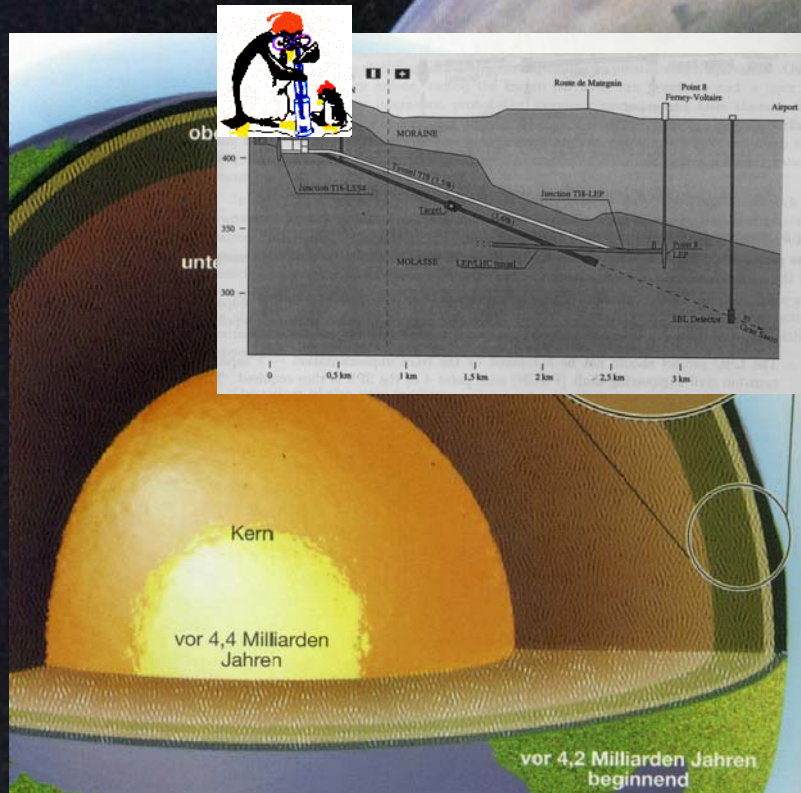
- 1980 : Nedyalkov

## Notes on Neutrino Tomography

- Erkundung von

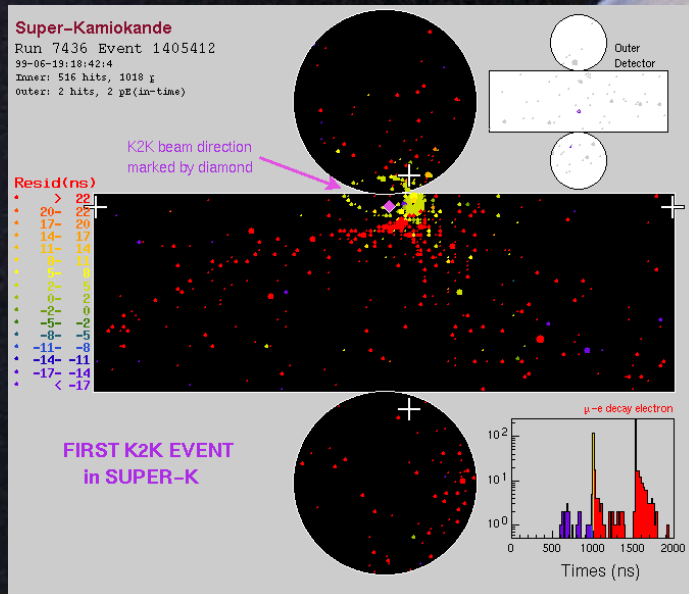
→ Erdaufbau

→ Lagerstätten

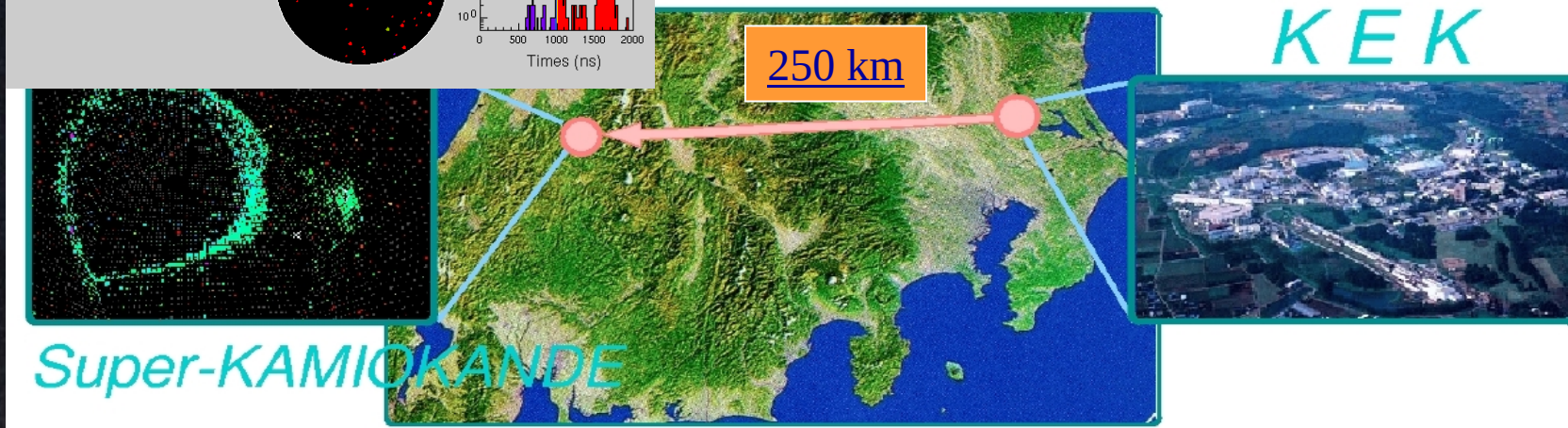




# Erste $\nu$ - Aufnahme gelungen !



- Weitere Projekte  
CERN - Gran Sasso  
Chicago - 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)