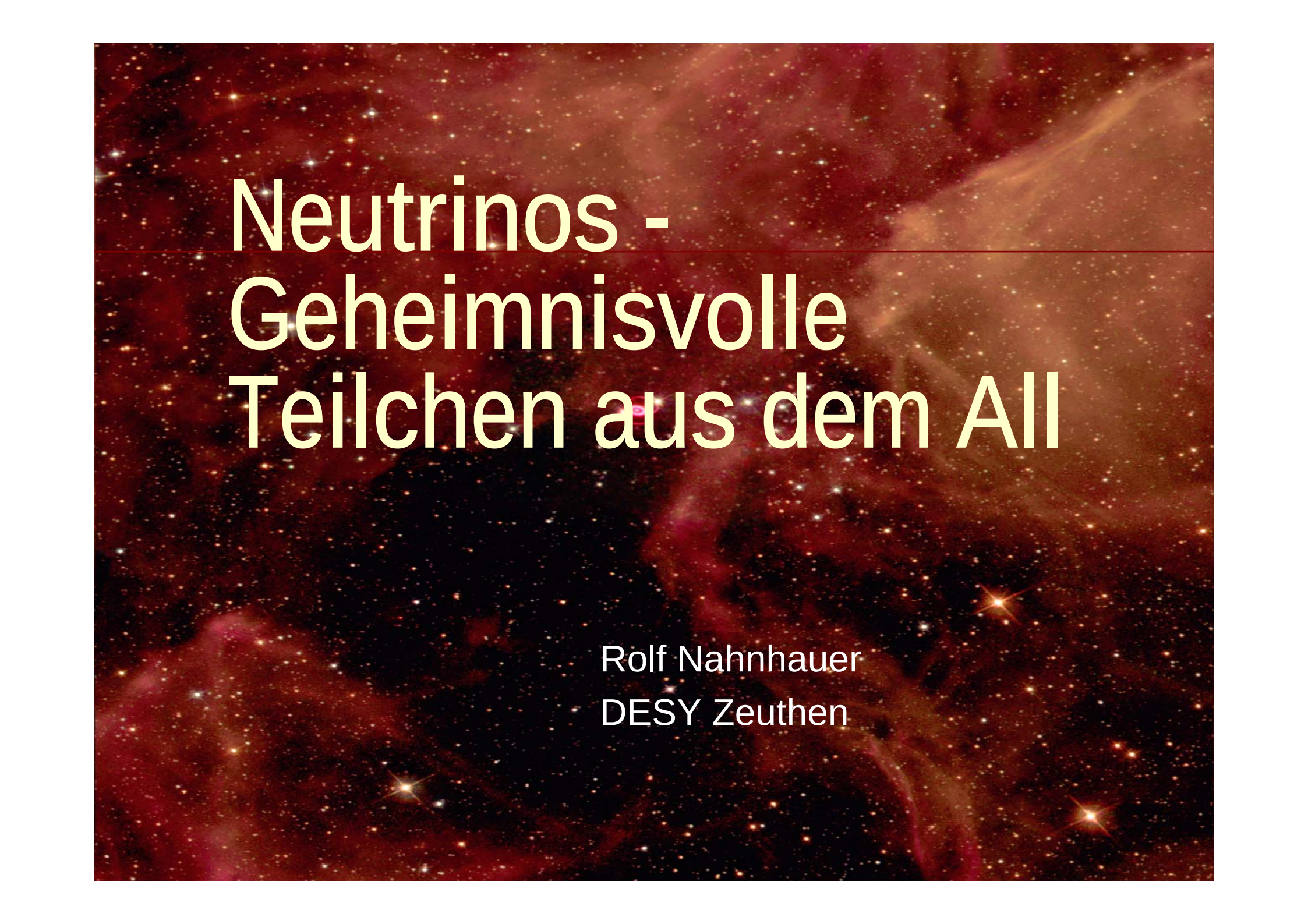


The background of the slide is a deep space image featuring a dense field of stars of various magnitudes, some with prominent diffraction spikes. Interspersed among the stars are wispy, glowing clouds of interstellar dust and gas in shades of red, orange, and yellow, characteristic of a nebula or the 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, irregular, block-like shapes that create a sense of depth and shadow, reminiscent of a desert landscape at sunset or a close-up of textured stone. The lighting is dramatic, with bright highlights and deep shadows.

v

DIE RÄTSELHAFTE SANFTE MATERIE



NEUTRINOS VOM ANFANG DER WELT:

in jedem cm^3 des Raumes befinden sich ~ 330 Neutrinos aus dem Urknall vor 10-15 Milliarden Jahren

UNSICHTBARER NEUTRINO REGEN:

jeder Mensch wird pro Sekunde von ~ 400000 Milliarden Neutrinos von der Sonne durchquert

NEUTRINOS - VERBINDUNG ZUM ENDE ALLER TAGE :

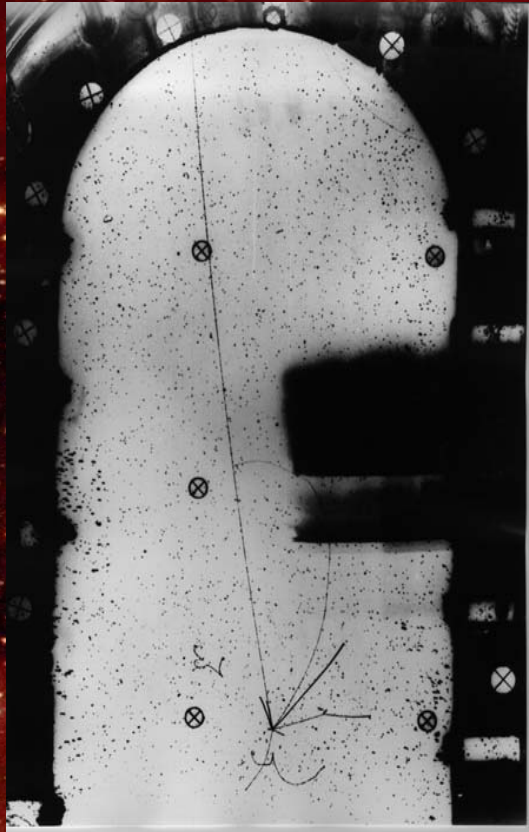
jeder Mensch erzeugt pro Sekunde ~ 4000 Neutrinos, die in den Kosmos abgestrahlt werden

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

Neutrinos „sichtbar“ gemacht :



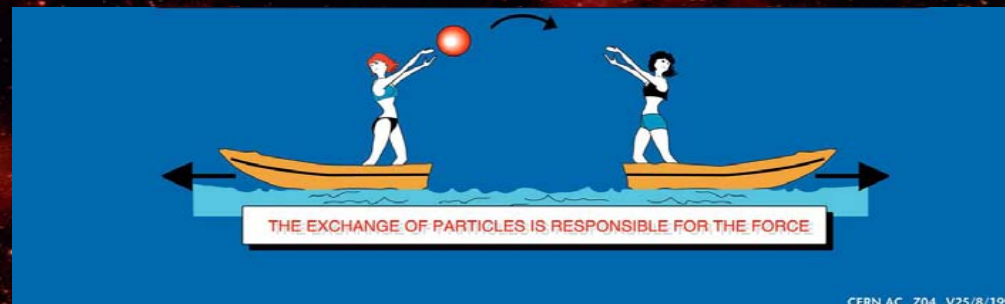
Neutrale Teilchen
nachweisbar durch

- Zerfälle in
geladene
Teilchen
- Erzeugung
von
geladenen
Teilchen



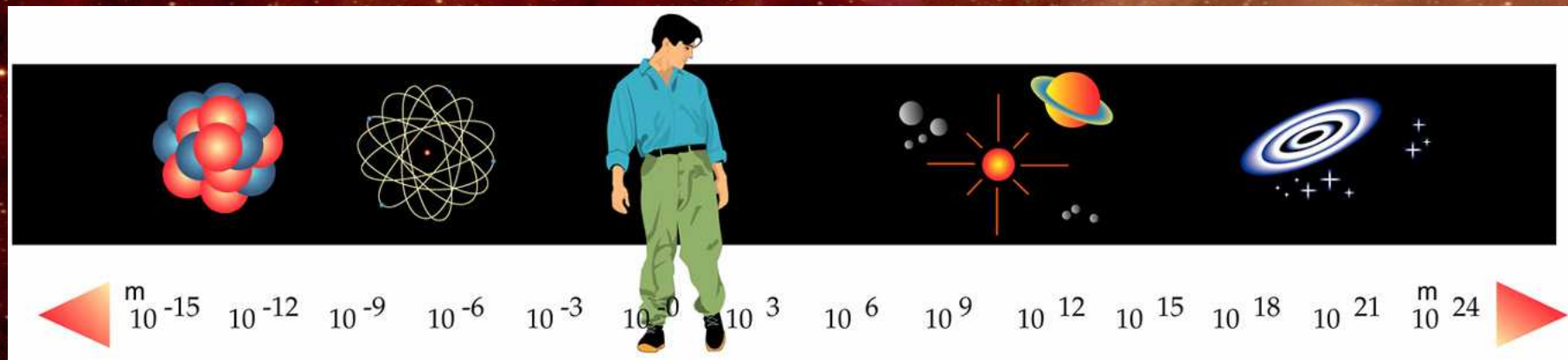
Wechselwirkungen von Materieteilchen

	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 = $2.5 \cdot 1\,000\,000\,000$ sec = 2.5 Milliarden sec

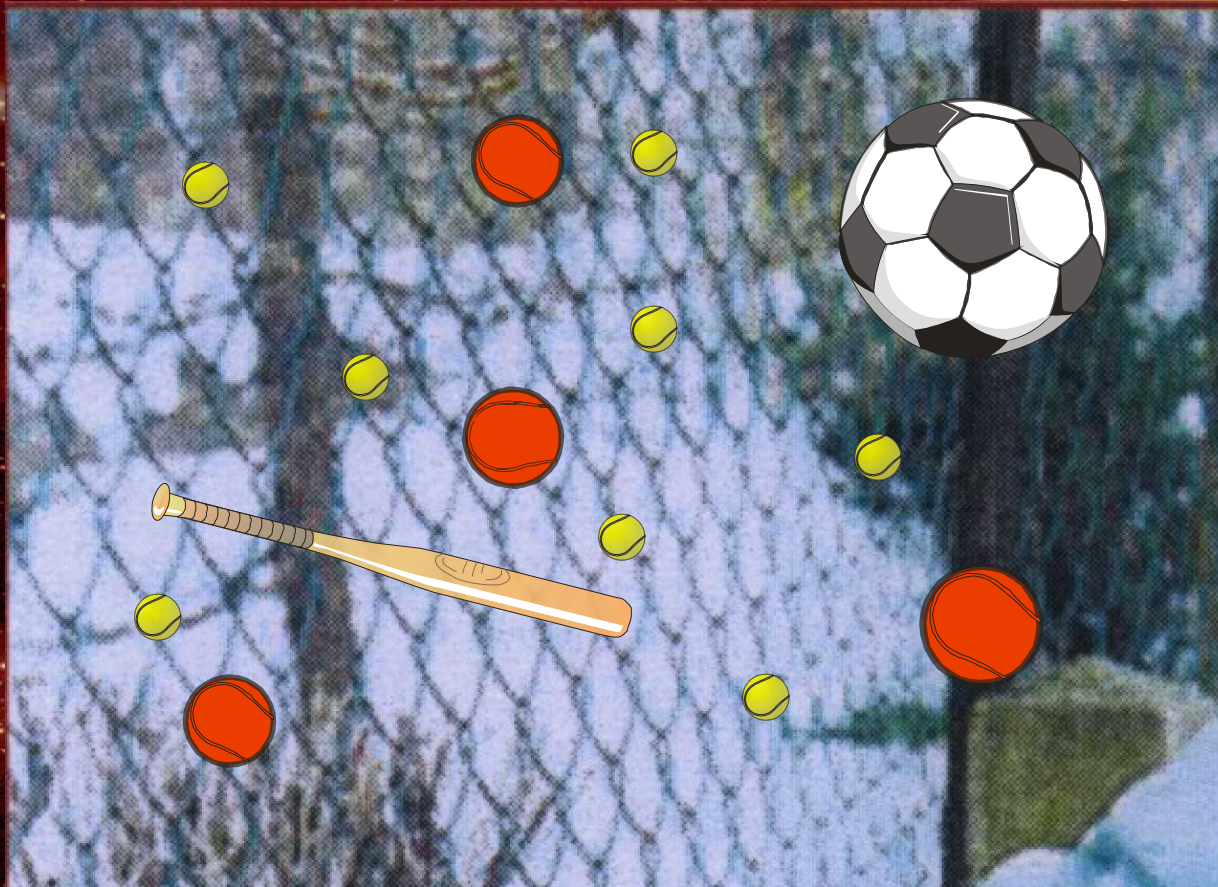
■ Mensch :

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

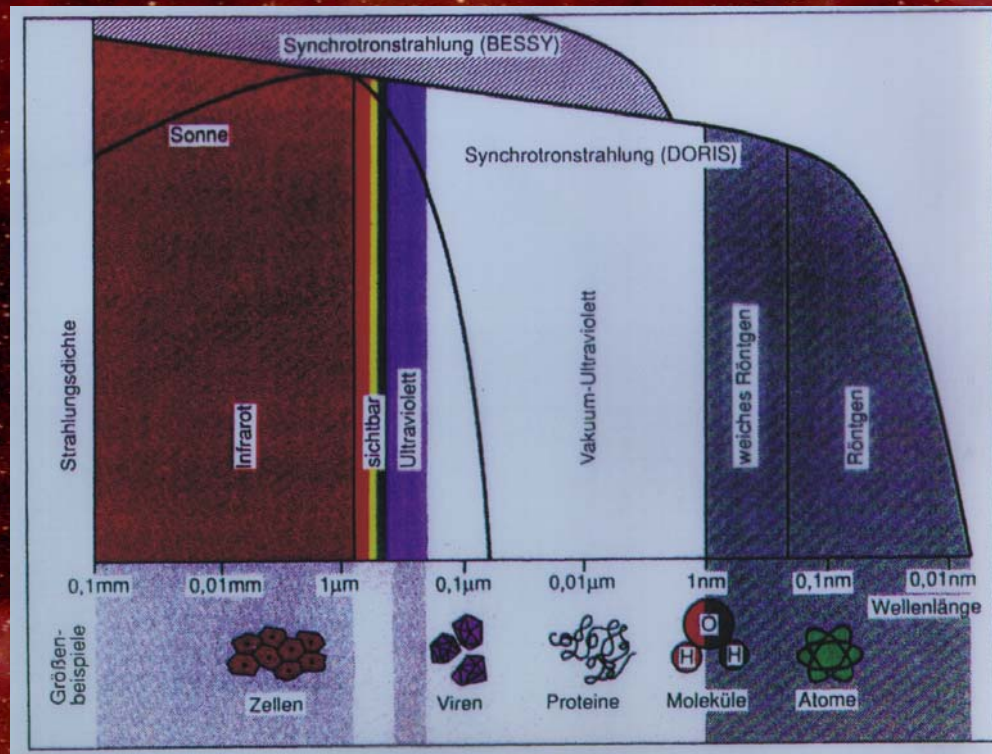
0.001 sec $\longleftrightarrow$ $2.5 \cdot 1\,000\,000\,000$ sec

„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

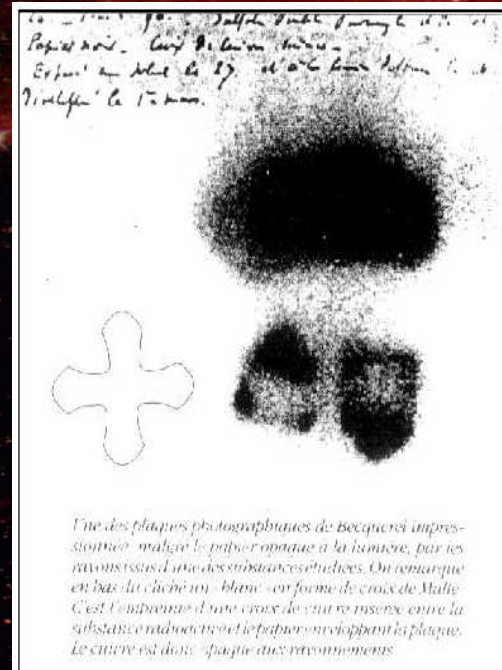


1. Nobelpreis für Physik



Materie unterschiedlicher Dichte absorbiert „unsichtbares“ Licht unterschiedlich

Radioaktivität Henry Bequerel 1896



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

Leere Atome :

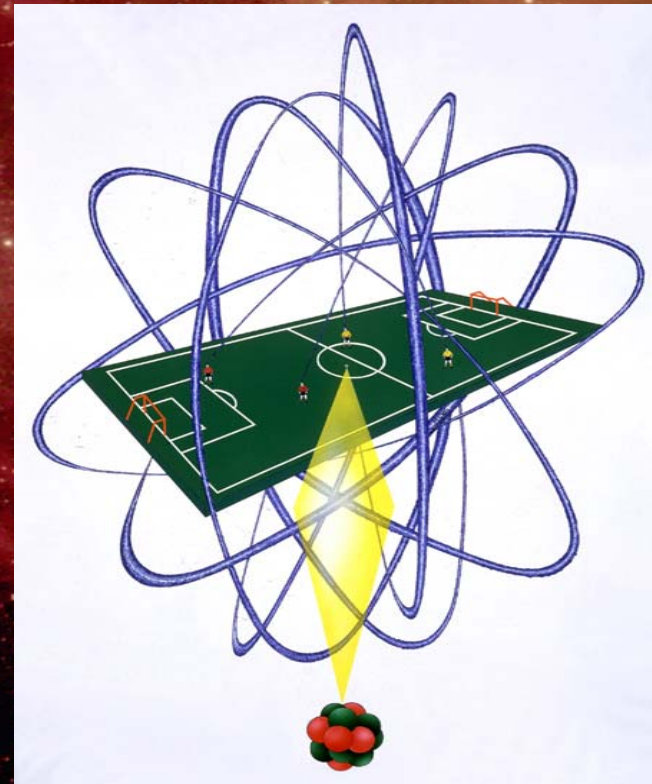
Ernest Rutherford 1911

- Streuung von α -Teilchen an Goldfolie
- kaum Ablenkung

ATOMMODELL

- wirkliches Verhalten komplizierter

QUANTEN- MECHANIK

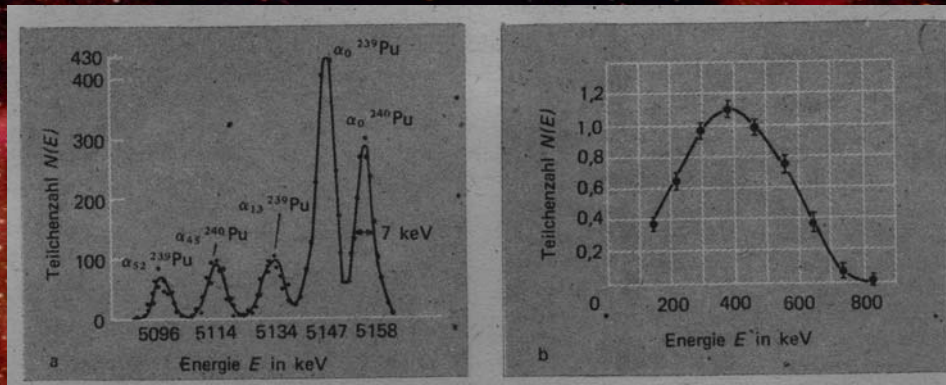


Die Energie Krise :

1926-1930

■ Radioaktiver Zerfall : $\text{K1} \rightarrow \text{K2} + \text{X}$

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



Die Erfindung des Neutrinos I : Wolfgang Pauli 1930



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

ν - Eigenschaften

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

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

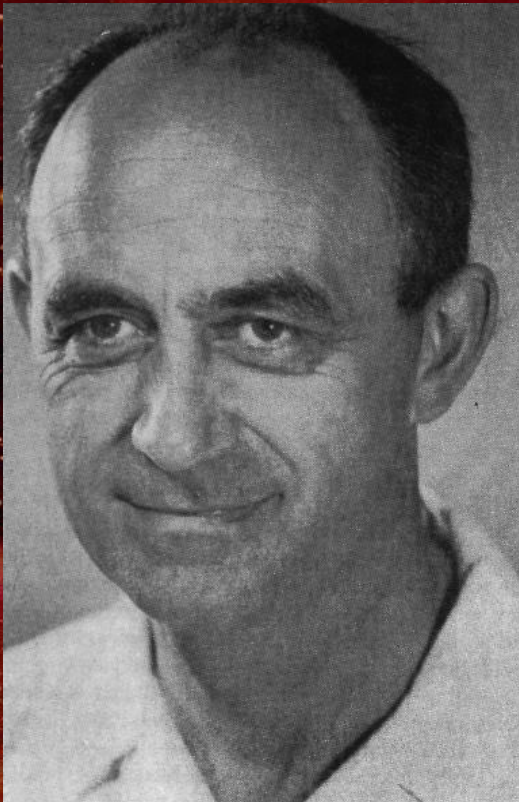
$$0 < m_\nu < m_e$$

$$s_\nu = 1/2$$

$$N_\nu = 1$$

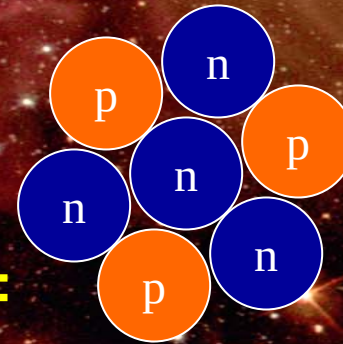
Die Erfindung des Neutrinos II :

Enrico Fermi Theorie des β -Zerfalls 1934



1932 Entdeckung des
Neutrons durch Chadwick

Atomkern:



β -Zerfall :



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

Neutrino-Durchdringungsvermögen

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

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

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

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

σ : Wechselwirkungsstärke

N_{TD} : Teilchen im Detektor

Φ_ν : Neutrino Fluß

N_{av} : Avogadro-Zahl

ρ : Dichte

λ_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

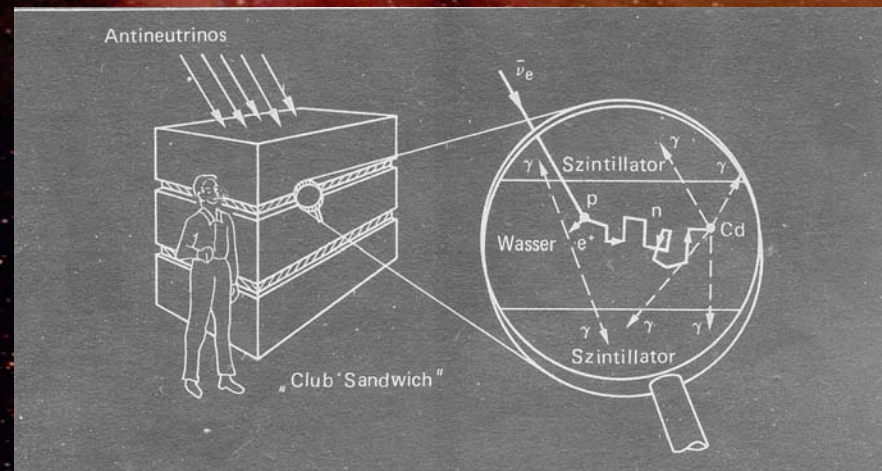
- Savannah River Reaktor USA:
 $10^{13} \nu_e^a / \text{cm}^2 \text{sec}$ in alle Richtungen
- Detektor: Club-Sandwich

2x200 l H_2O
 + 40kg CdCl_2

3x1400l
 Flüssigszintillator

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

- 3.0 ± 0.2 Ereignisse/Stunde



Der Teilchen Zoo :

- 1935 : γ , e^- , e^+ , p , n
- 1955 : γ , e^- , e^+ , p , n
+ μ , π , K , p^{anti} , ν_e^{anti}
- 1965 :
~ 200 Elementarteilchen
- Ordnungsprinzip

QUARKS

Mehr als ein Neutrino ?

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

- künstlicher Strahl

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

- beobachtet:

29 μ -Ereignisse
6 e-Ereignisse

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

Pontecorvo 1959

Schwartz, Steinberger, Lederman 1960/61



Die dritte Familie :

- 1977 : das τ - Lepton wird entdeckt :

gibt es ein ν_τ ???

- Nachweis bisher nur indirekt

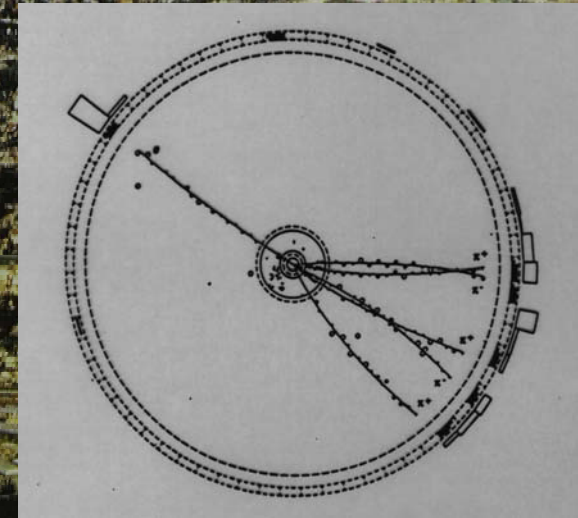
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow 5\pi\nu_\tau \quad e\nu_\tau\nu_e^a \quad (\text{ARGUS})$$

- 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 He^4 , Li^7/H

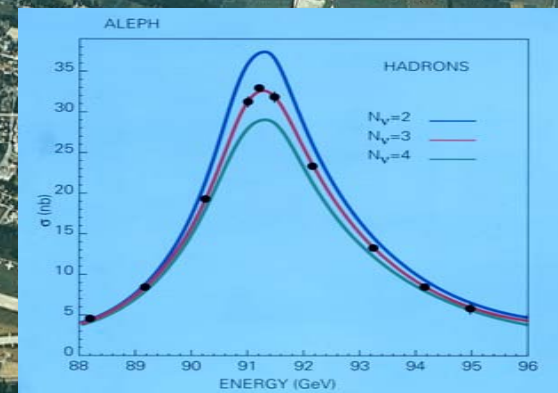
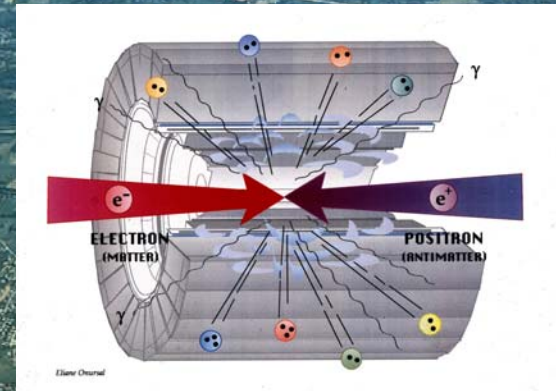
Astrophysik SN 1987A

Beschleuniger-Physik

- Genauester Wert heute

LEP:

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



Teilchen ohne Masse ?

Relativitätstheorie Einstein 1905

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

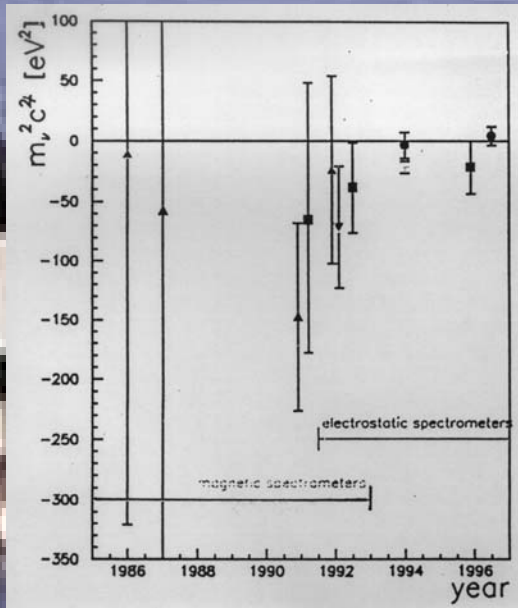
$$p = m_0 \gamma v \quad \gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$$

E : Energie m : bewegte Masse m_0 : Ruhmasse

p : Impuls v : Geschwindigkeit c : Lichtgeschwindigkeit

☞ wenn $m_0 = 0$ ➔ $v = c$

Die Masse der Neutrinos :



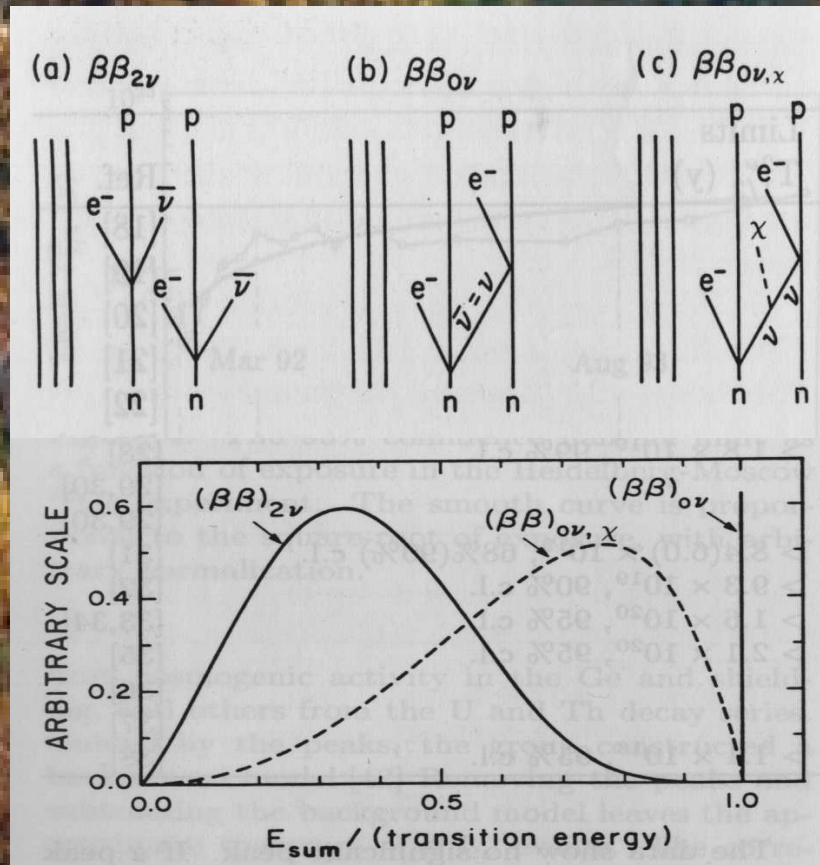
- ν_e : Endpunkt des β -Spektrums von Tritium

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

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

- ν_μ : $m_\nu < 170 \text{ keV}$
- ν_τ : $m_\nu < 18 \text{ MeV}$

Wie neutral sind Neutrinos ?



- Ladung : $Q = 0$
 β -Zerfall : $Q < 10^{-19} \text{ e}$
 SN 1987 : $Q < 10^{-17} \text{ e}$
- 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

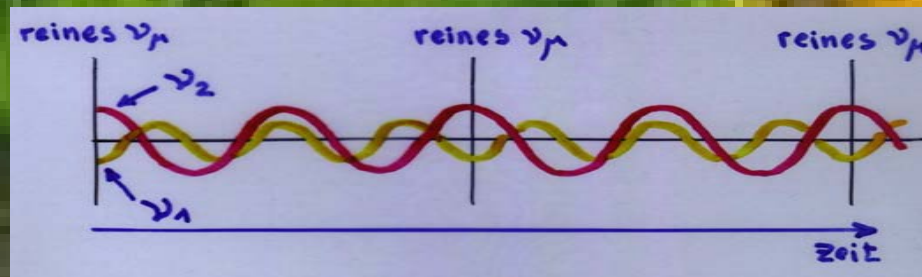
ν_1

ν_2

ν_e

ν_μ

Mischung ändert sich in Raum und Zeit

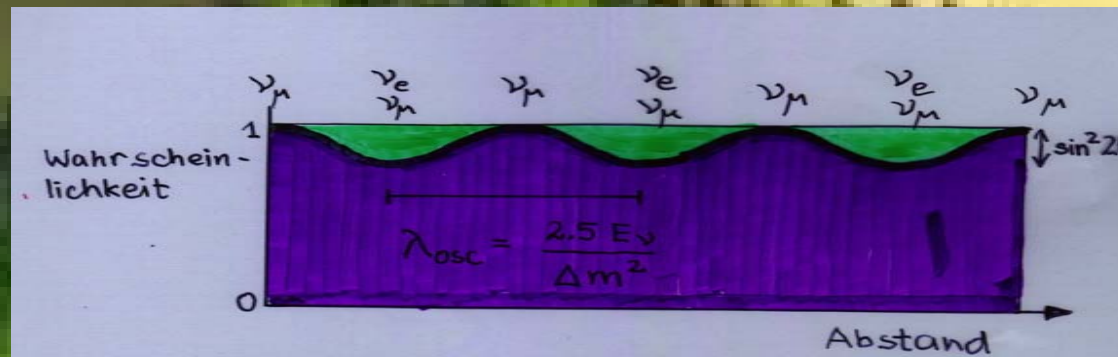


-

Neutrino Oszillationen

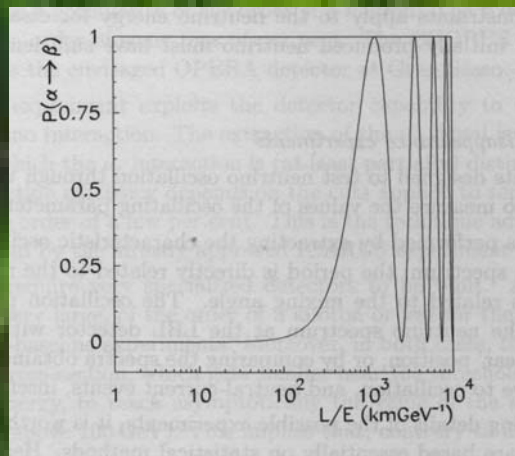
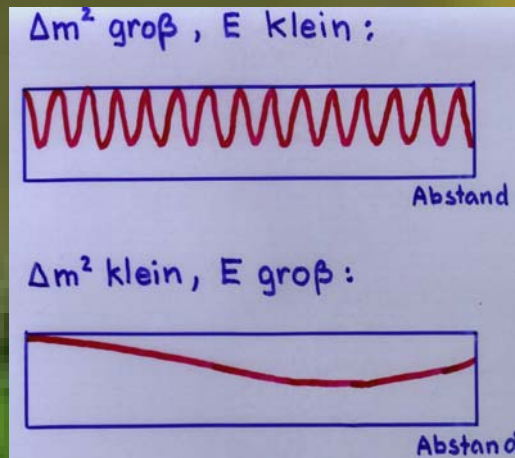
Wer ist wo und wann, was?

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



- θ : Mischungswinkel
- Δm^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 Δm^2 klein :

Effekt nur bei
großem L
und/oder
kleinem E

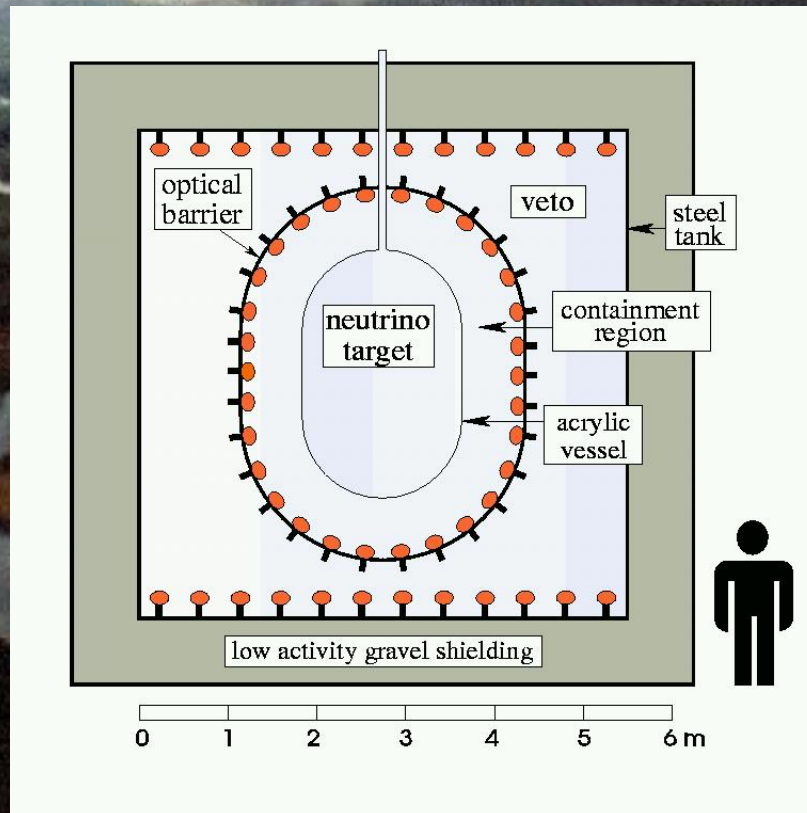
Wo nachschauen :

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 :

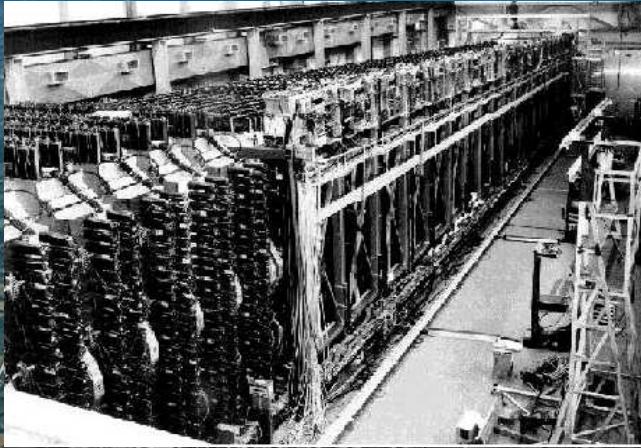
an Atomreaktoren



- 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 Φ_ν
 $\Delta m^2 < 10^{-3} \text{ eV}^2$

Neutrino Fallen II

an Beschleunigern



■ CHARM II

800 t Glastarget

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

„prüfen“

Standardmodell

■ CHORUS + NOMAD

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

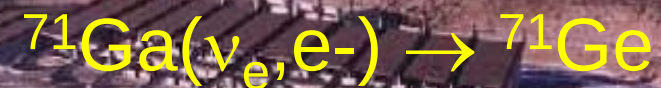
bisher kein ν_{τ} gefunden

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

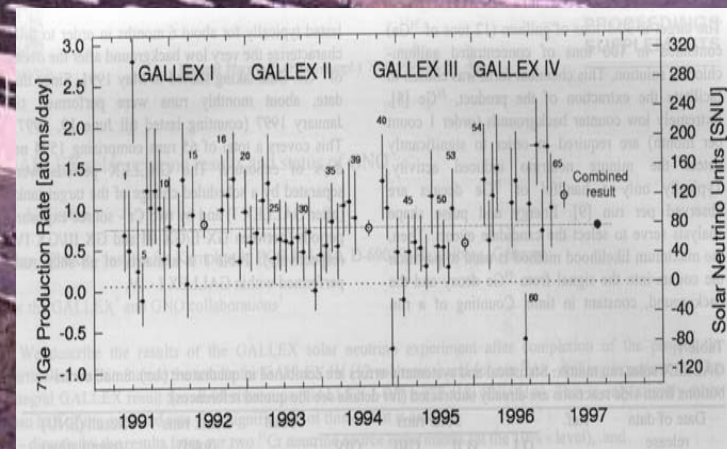
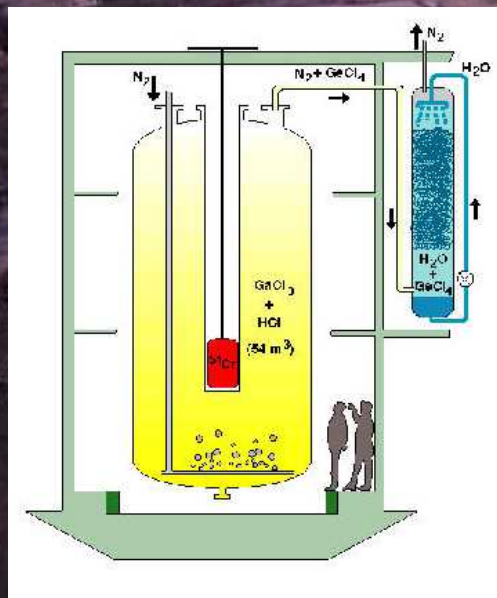
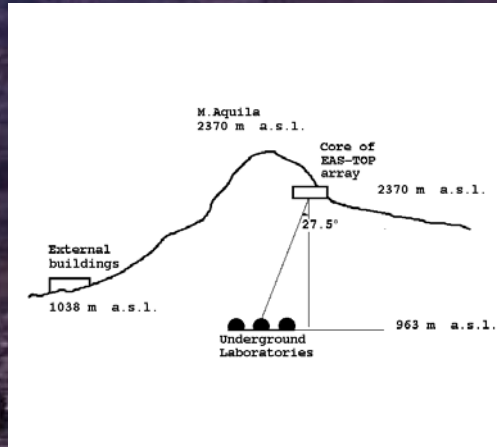
Neutrino Fallen III

für die Sonne

■ GALLEX (30-60t)

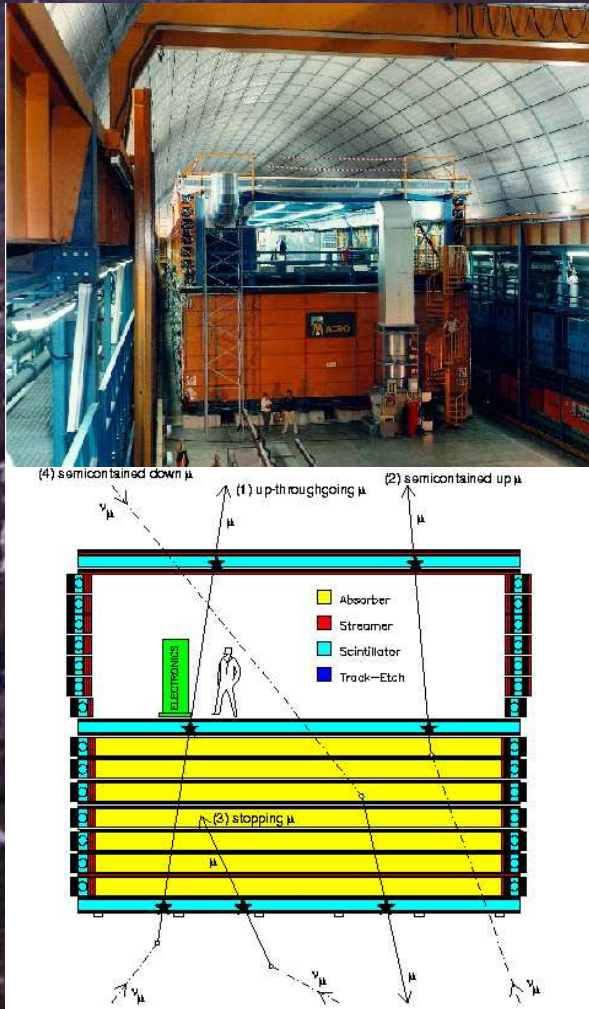


➔ Atome zählen



Neutrino Fallen IV

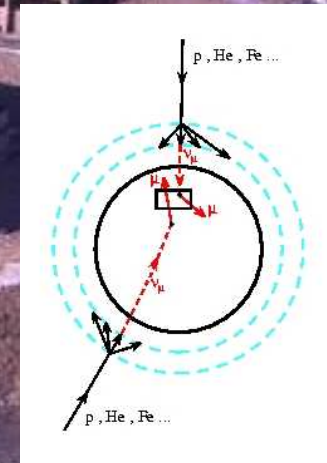
für die Atmosphäre



■ MACRO

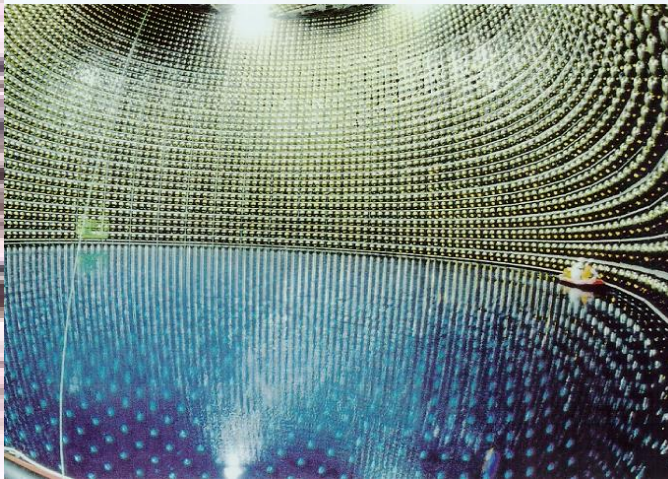
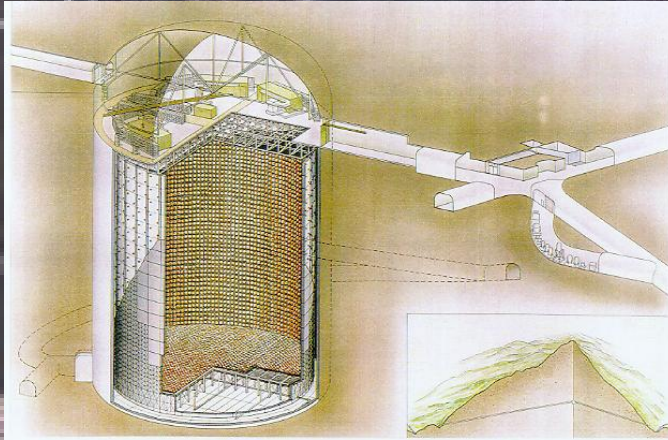
76.6 m x 12 m x 9.3 m
Tiefe: 3150 mwe

Suche
nach
Spuren
von der
anderen
Seite
der Erde



Die Neutrino Superfalle

SUPERKAMIOKANDE



- Tank mit 50 000 t H_2O

Tiefe: 2700 mwe

11146 SEV's (50cm)

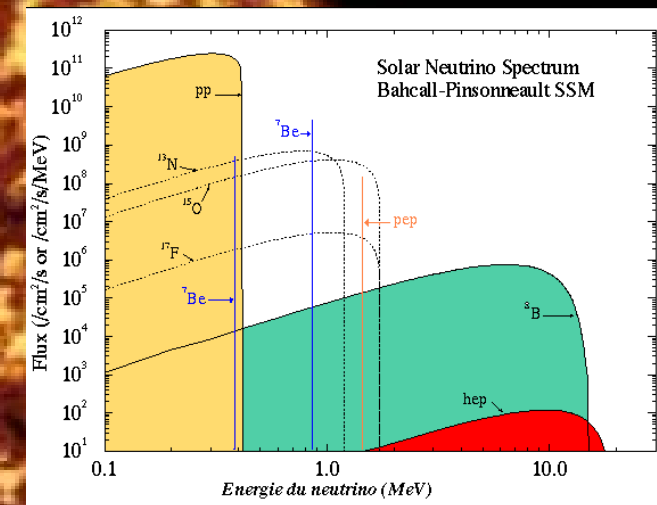
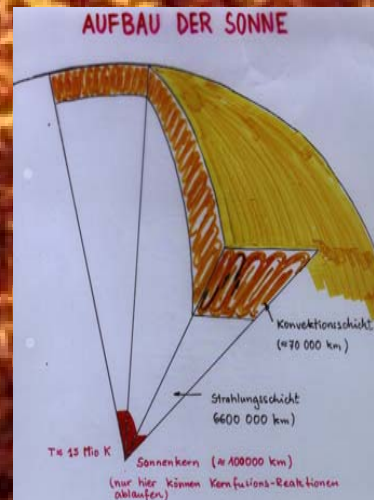
1885 SEV's (20cm)

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

Neutrinos aus dem Sonnenkern

- Kernfusion im Sonnenzentrum bei 15 Millionen K

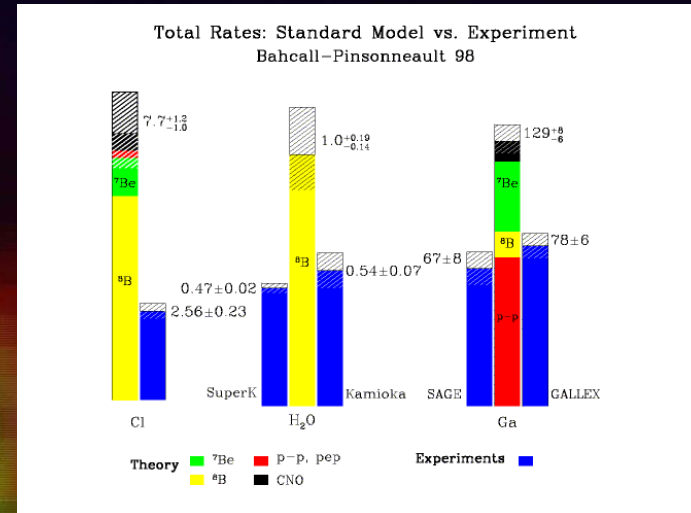
$pp \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	
${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	
${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	85%
${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15%
$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	
${}^7\text{Li}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

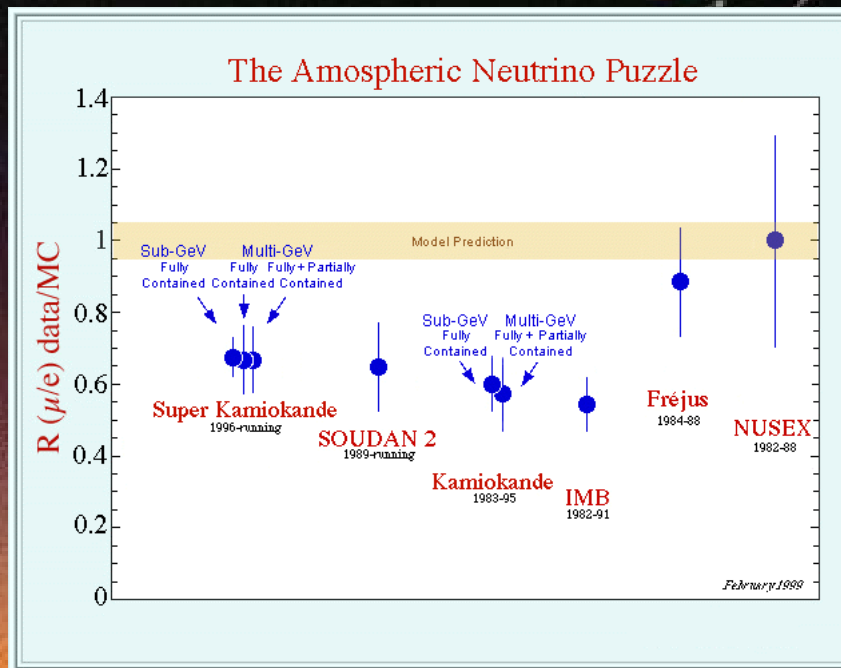
- „Sehen“ den
Neutrino-Sonnenschein
unter hunderten von
Metern von Gestein



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



Wo sind die atmosphärischen ν 's ?



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

→ ν -Oszillationen ?

Neutrino-Oszillationen nachgewiesen?

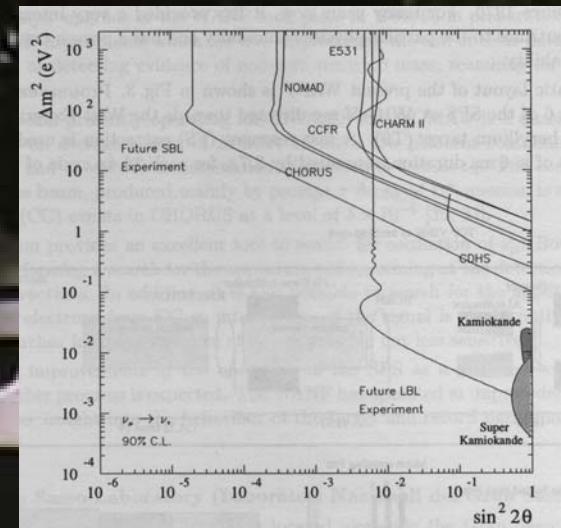
■ „ ν - 98 “ Takayama, Japan

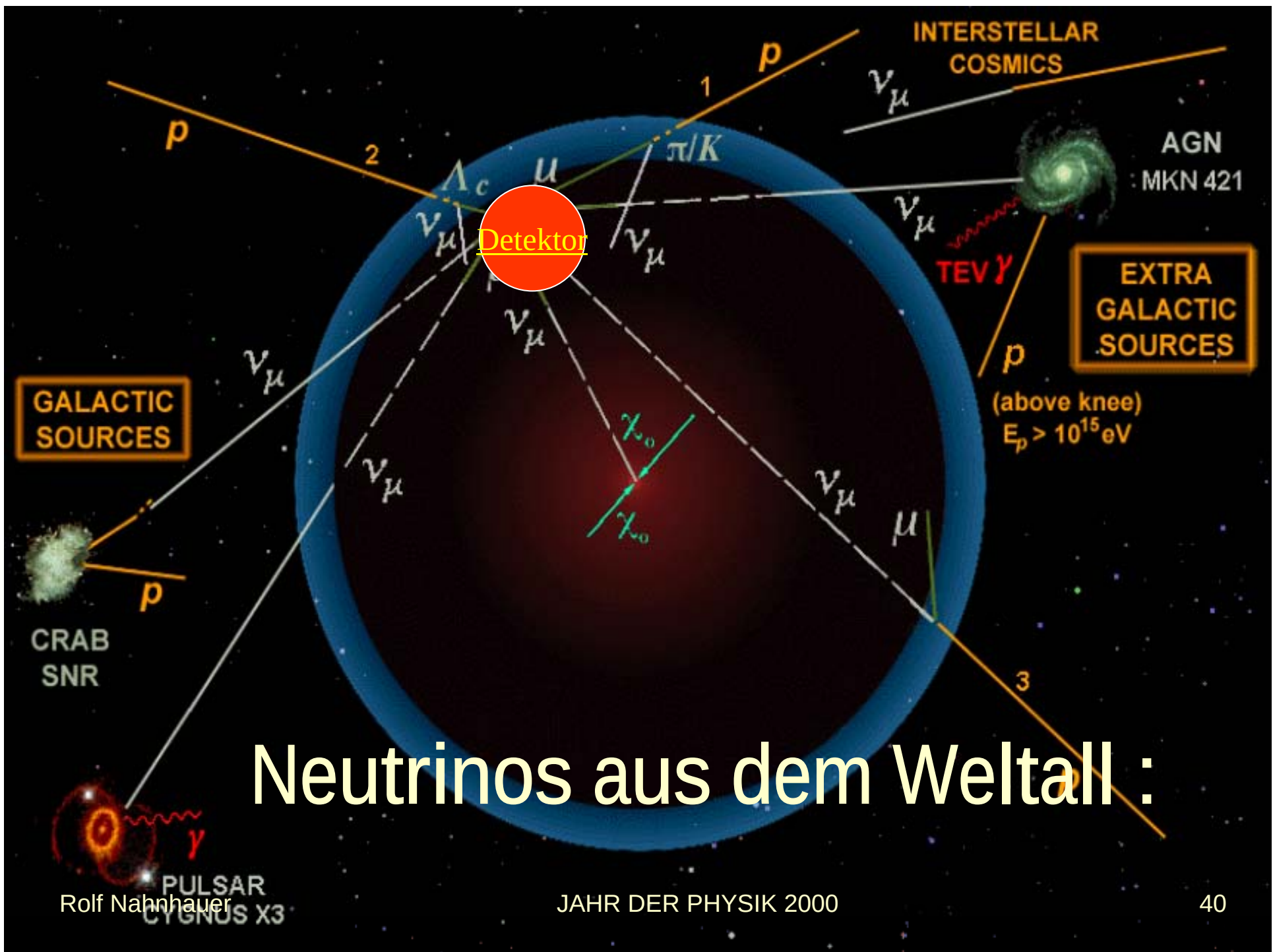
Superkamiokande gibt die Entdeckung von Neutrino-Oszillationen bekannt

Defizit von ν_μ von jenseits der Erde

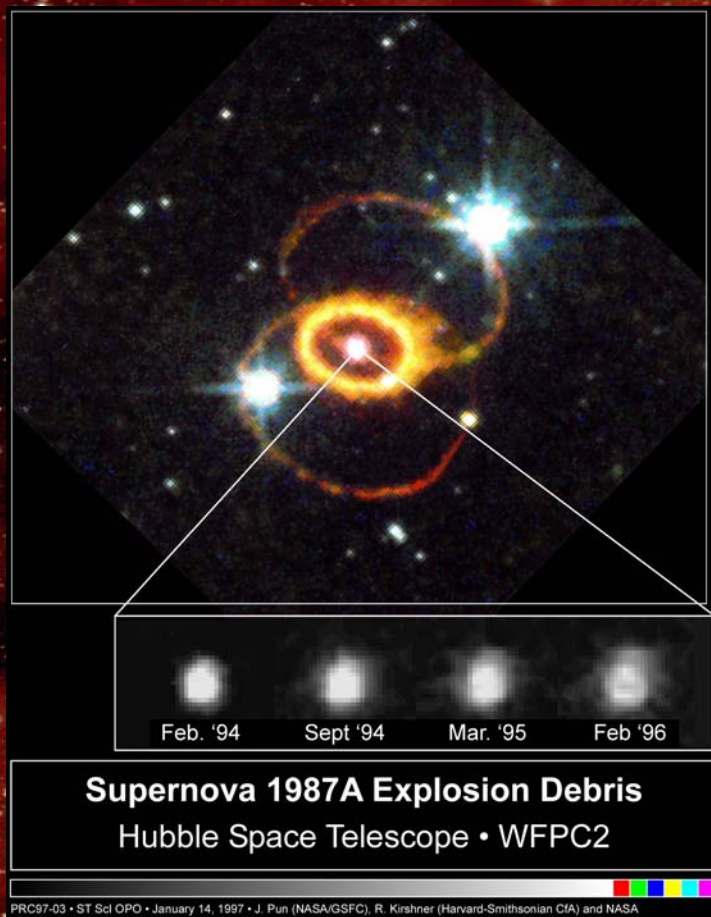
wahrscheinlich :

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





Die Supernova 1987A :



■ Optische Beobachtung :

23.2.1987 10:37

Australien

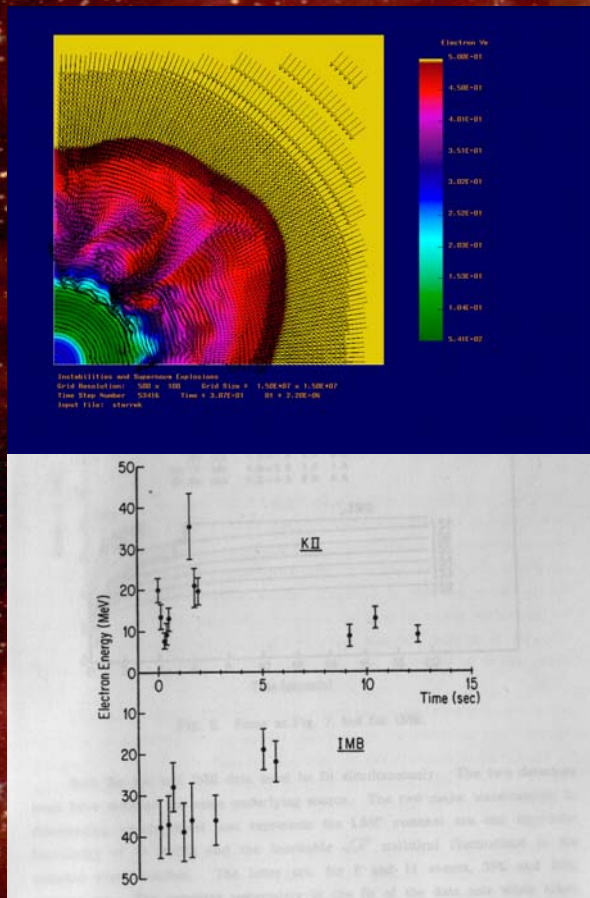
■ Neutrino Beobachtung

23.2.1987 7:25 + ...

KAMIOKANDE, IMB,
BAKSAN, Mt.BLANC

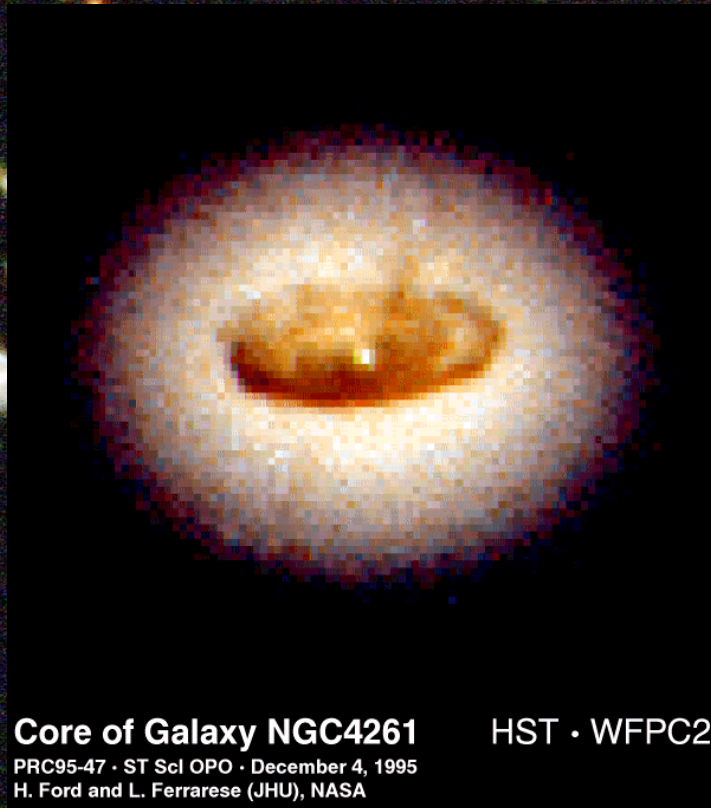
~ 25 Ereignisse

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



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
 km^2 und Jahr

- brauchen
Riesenteleskope

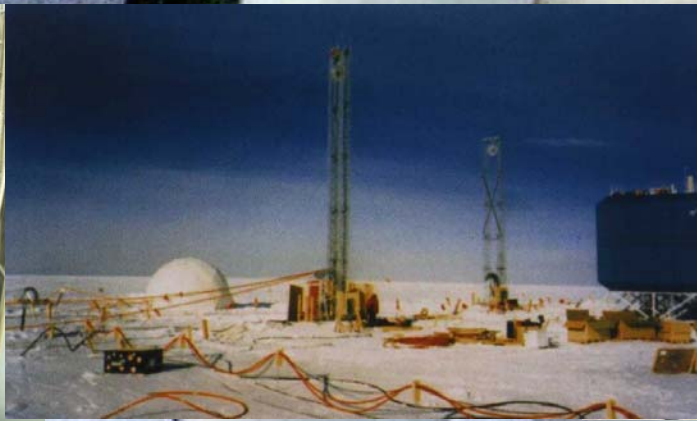
im Wasser :

BAIKAL
NESTOR
ANTARES

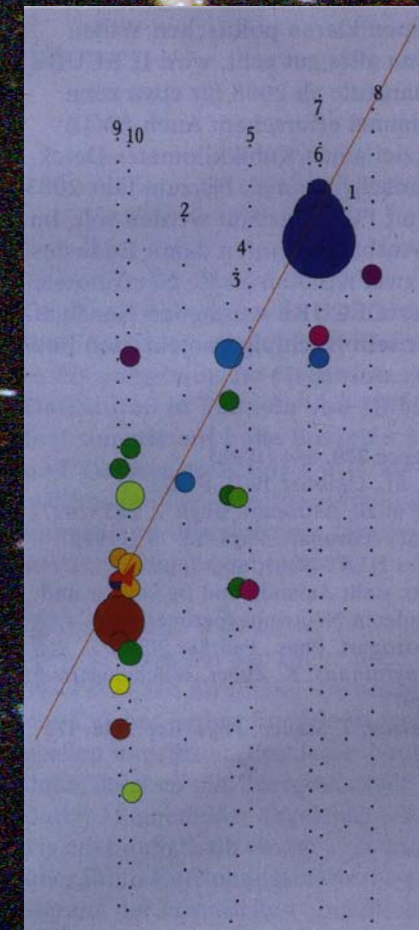
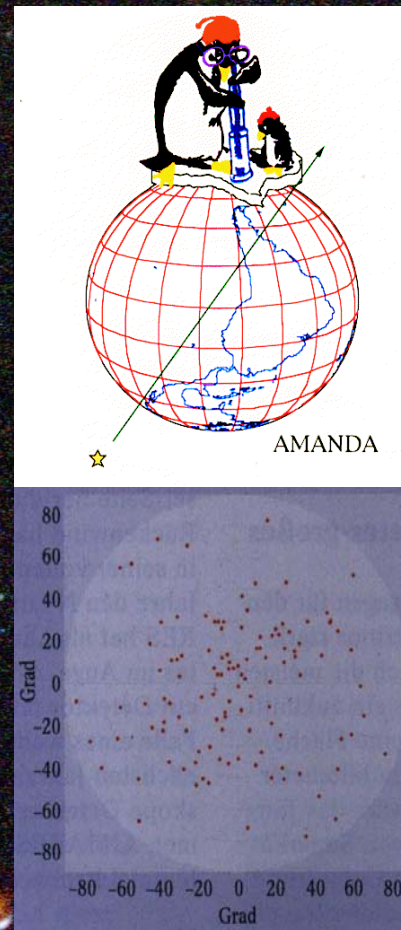
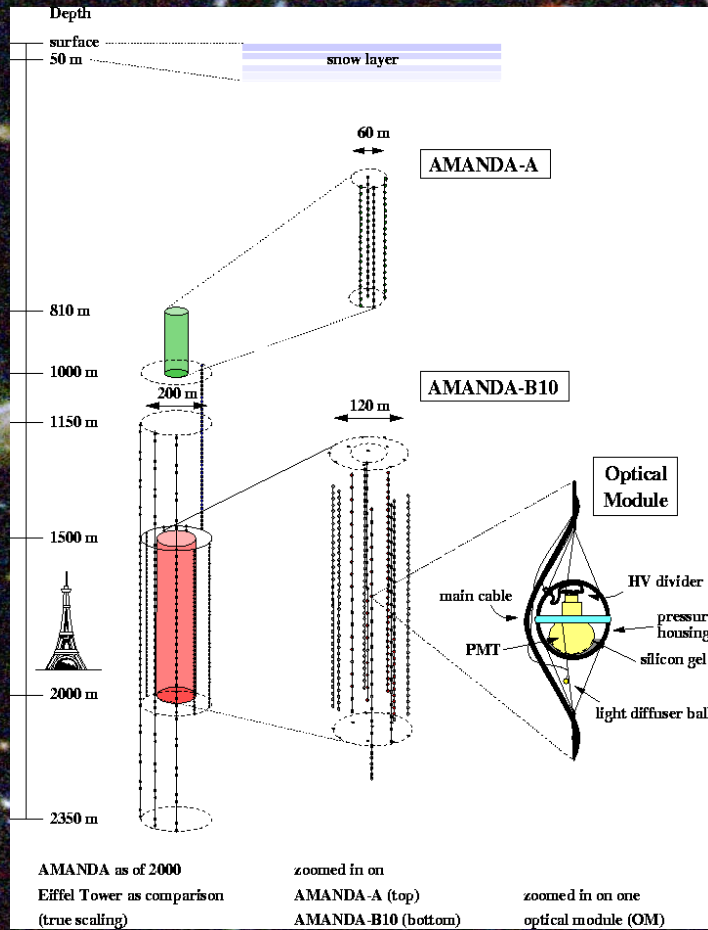
im Eis :

AMANDA
ICECUBE

AMANDA : Pinguine und Neutrinos



AMANDAS erste Neutrinos :



Neutrinos „röntgen“ die Erde

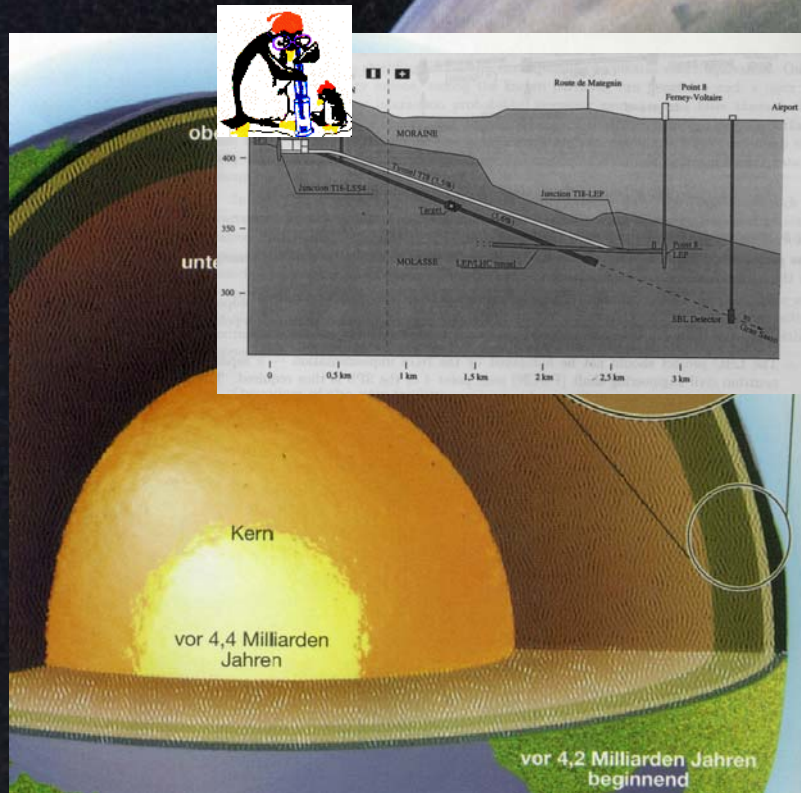
- 1980 : Nedyalkov

Notes on Neutrino Tomography

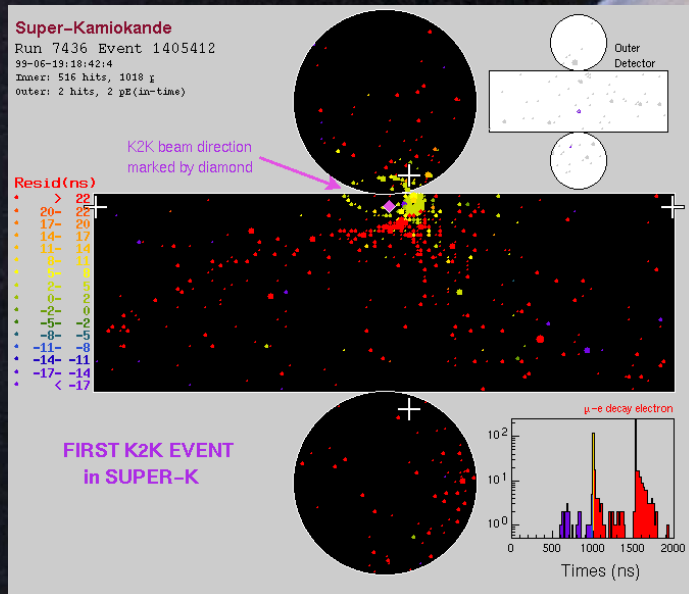
- Erkundung von

→ Erdaufbau

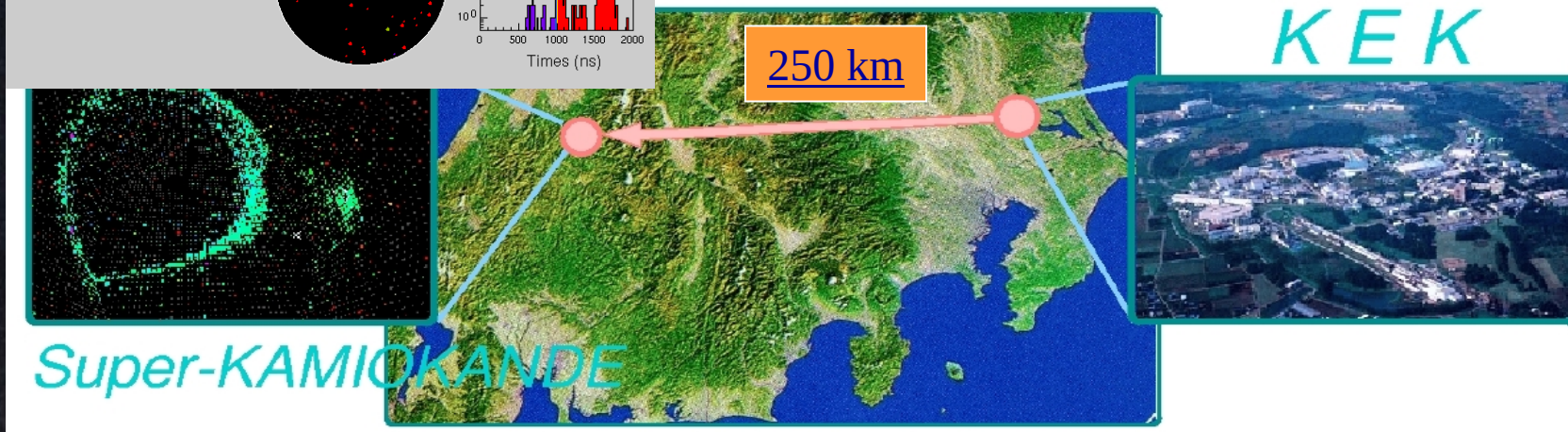
→ Lagerstätten



Erste ν - 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