Neues aus der Neutrinophysik

Ein Überblick

Raoul Zimmermann

raoul.zimmermann@desy.de

Universität Hamburg

Gliederung

- Einleitung
- Geschichte der Neutrinophysik
- Neutrinoquellen + Anomalien
- Neutrinooszillation
- Bestehende Experimente
- Zukünftige Neutrinoeinrichtungen

Einleitung

Standardmodell der Elementarteilchen:

	1. Generation	2. Generation	3. Generation	Ladung
Quarks	u	c	t	+2/3
	d	s	b	-1/3
Leptonen	e^-	μ^-	τ^-	-1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	

momentan grösster Wissensgewinn in der Neutrinophysik

Neutrinos von fundamentalem Interesse:

- $m_\nu \neq 0$? (**Standardmodell** $\Rightarrow\; m_\nu = 0$)
- Umwandlung von Neutrinos ineinander ?
- ν, $\bar{\nu}$ identisch (Majorana) oder nicht (Dirac) ?
- Neutrinos stabil ?
- elektromagnetische Eigenschaften ?

Auskunft über Masse:

- Kinematische Bestimmung
- Neutrinooszillation
- ν–lose Doppel–β–Zerfälle

Die Postulierung der Neutrinos

Offener Brief an die Gruppe der
Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung
zu Tübingen

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastraße

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

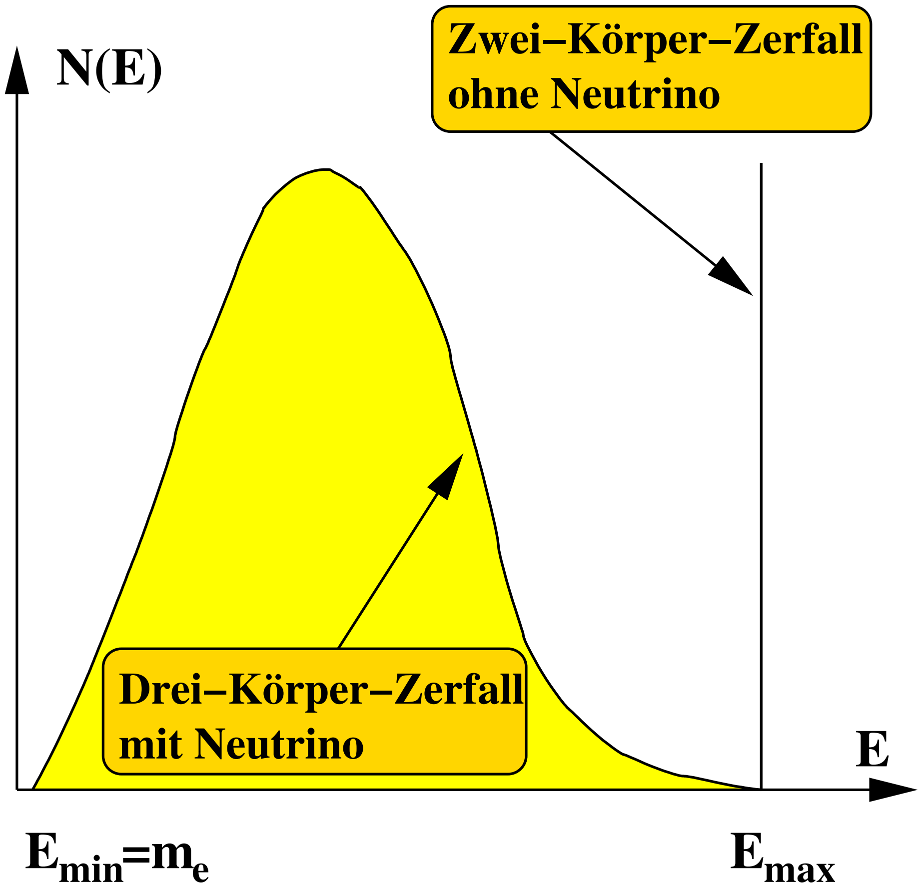
. . ...
. . ...
. . ...

Ich gebe zu, daß mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schön langst gesehen hatte. **Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation ....**

.....
.....

Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. Zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. .....

W. Pauli



β^-Zerfall:

$$B(A,Z) \longrightarrow C(A,Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

ohne Neutrino hat Elektron scharfe Energie

aber:

Beobachtung des kont. Spektrums durch Chadwick (1914)

Geschichte der Neutrinophysik

1930	W. Pauli postuliert neues Teilchen “Neutron” (Drei–Körper–Zerfall)
1932	Entdeckung des Neutrons (Chadwick) ”Neutron” $\rightarrow$ Neutrino (Fermi)
1956	Reines und Cowan: exp. Nachweis (inverser β–Zerfall)
1962	Steinberger, Lederman et al.: kein Zerfall $\mu \rightarrow e + \gamma \Rightarrow \nu_\mu \neq \nu_e$
1975	Entdeckung des τ–Leptons am SLAC
1987	ν–Nachweis von Supernova SN1987A (SuperKamiokande, ...)
2000	direkter Nachweis des τ–Neutrinos am Fermilab (DONUT)

Nobelpreise (Neutrinophysik):

1988 Lederman, Schwartz, Steinberger

1995 Cowan, Reines

2002 Davis, Koshiba

HOMESTAKE Kamiokande

Neutrinoflavour

Nach **1962**: mindestens **zwei** verschiedene **Neutrinoflavour** (ν_e und ν_μ).
Nach **1975**: mindestens **drei** verschiedene **Neutrinoflavour** (ν_e, ν_μ und ν_τ).

Wieviele Neutrinos gibt es???

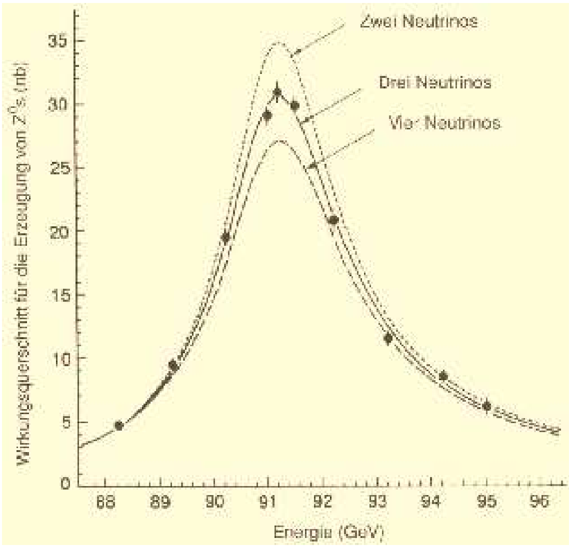
LEP (CERN) / SLC (Stanford): Breite des Zerfalls

$$Z^0 \to \nu_l + \bar{\nu}_l \ (l = e, \mu, \tau, ...)$$

ist proportional zur Anzahl der Neutrino–Flavours n_ν

Gemessen: $n_\nu = 2.994 \pm 0.012$

$\Rightarrow$ **3 Neutrinogenerationen:** ν_e, ν_μ und ν_τ.



Neutrinoquellen – Anomalien

Kernreaktoren

- entstehende Spaltprodukte zerfallen meist weiter durch β–Zerfall

  (Cowan/Reines, 1956)

Beschleuniger

- hochenergetischer p–Strahl $\rightarrow$ Target $\Rightarrow$ $\pi^{\pm}$, K$^{\pm}$ $\rightarrow$ ν's (Zerfallstunnel)
  $\Rightarrow$ hoher, steuerbarer Fluss
  $\Rightarrow$ hohe, variable Energie

atmosphärische Neutrinos

- durch Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit Atmosphäre

solare Neutrinos

- Sonnen–Standardmodell: Energieerzeugung in der Sonne hauptsächlich durch pp-Kette:

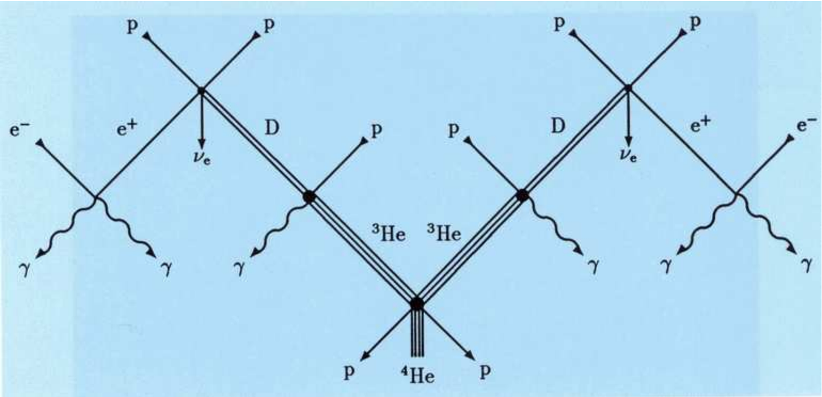
$$4p \rightarrow \, ^4He + 2e^+ + 2\nu_e$$

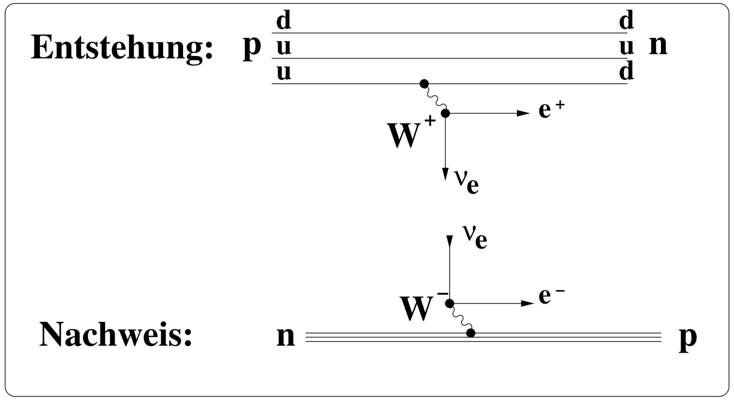
- Vorhersage des ν–Flusses und Spektrums mit $\pm 5\%$ Genauigkeit

Neutrinos aus Supernovae

- prompte Neutrinos (alle Flavour), Tests von theoretischen Supernova–Modellen

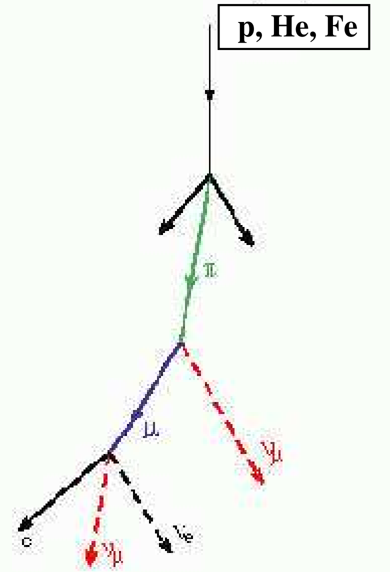
Neutrinos von der Sonne

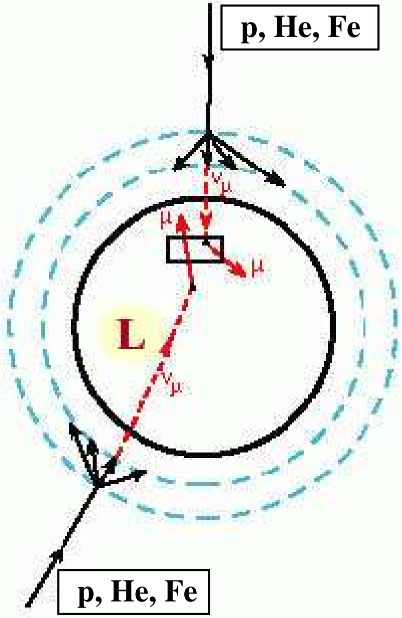


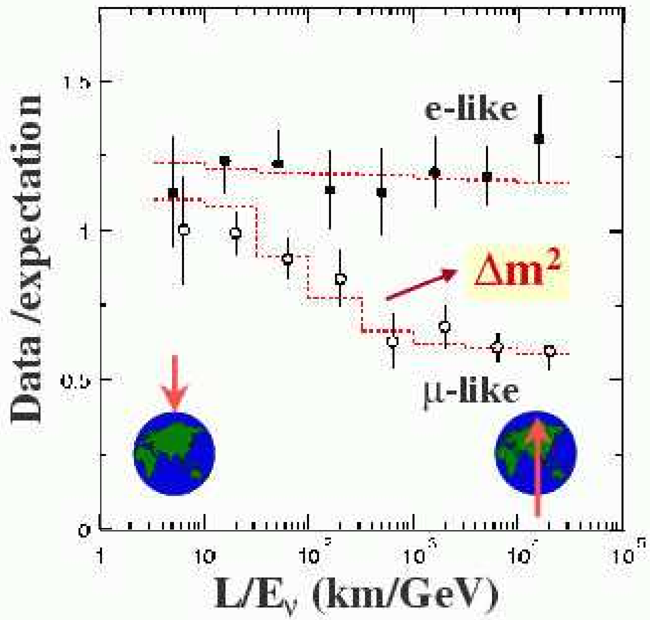


Experiment	Result/theory	
Homestake ^{8}B	0.33 ± 0.029	$^{37}Cl^{17} \rightarrow ^{37} Ar^{18}$
GALLEX pp	0.60 ± 0.06	$^{71}Ga^{31} \rightarrow ^{71} Ge^{32}$
SAGE pp	0.52 ± 0.06	
Kamiokande ^{8}B	0.54 ± 0.07	
S-Kamiokande ^{8}B	0.474 ± 0.020	
	Neutrino–Defizit	

atmosphärische Neutrinos



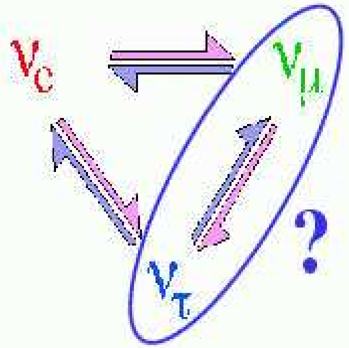




Verhältnis

ν_μ : ν_e

2 : 1



ν_μ – Defizit erhöht sich mit wachsendem L

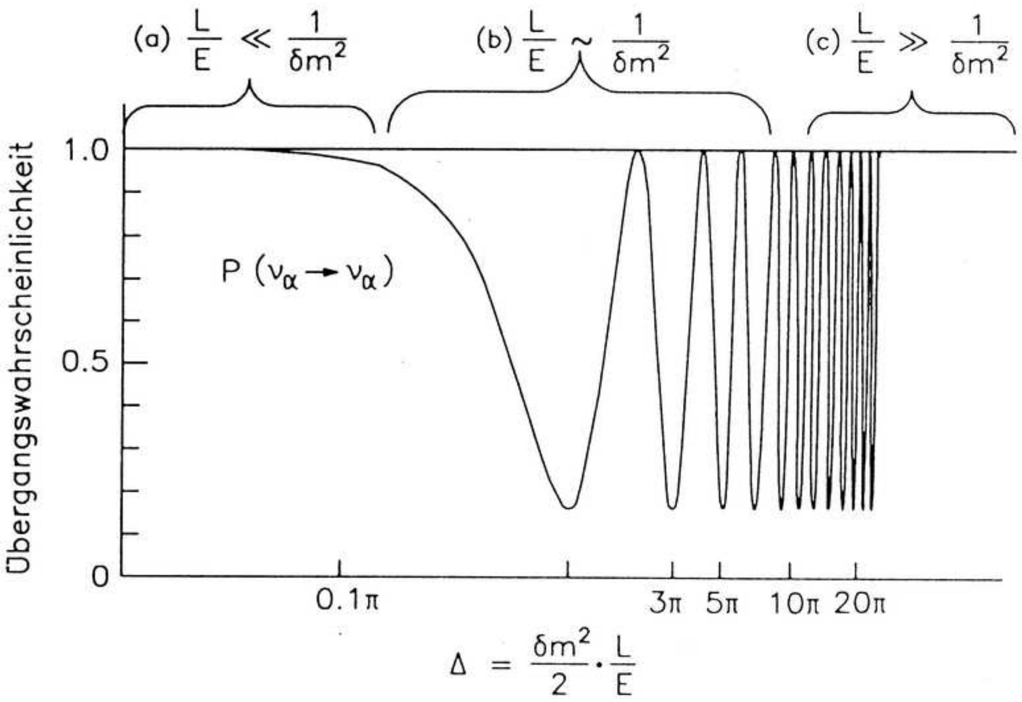
keine Anomalie für ν_e : $\nu_\mu \not\longrightarrow \nu_e$

$\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$ **Oszillation ?**

ν–Oszillationen

Oszillationswahrscheinlichkeit:

$$P = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left[\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] \cdot L[\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right]$$



zwei notwendige **Bedingungen** für Oszillation:

- nicht alle Neutrinos gleiche Masse
- L$_\alpha$ nicht streng erhalten

$\Rightarrow$ Neutrinos mischen ineinander

Standardmodell: $m_\nu = 0$, L$_\alpha$ erhalten

$\Downarrow$

keine Oszillation

aber für Neutrinos kein Prinzip, daß $m_\nu = 0$ sein muß

$\Downarrow$

Erweiterung des Standardmodells

HOMESTAKE

Cl–Ar–Methode

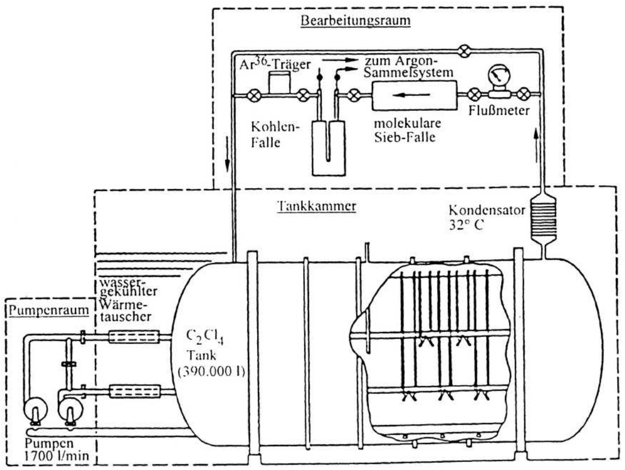
$$\nu_e + Cl^{37} \longrightarrow Ar^{37} + e^-$$

$\longrightarrow$ ***Extraktion des*** $Ar^{37} (T_H = 35d)$

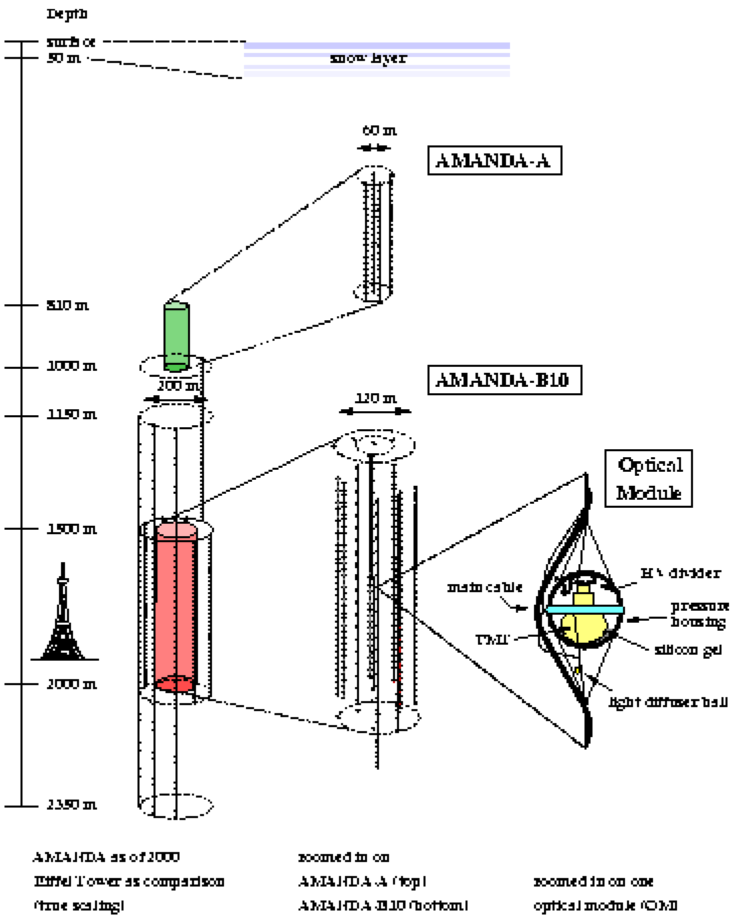
$Ar^{37} + CH_4$ ***in Proportionalzählrohr***

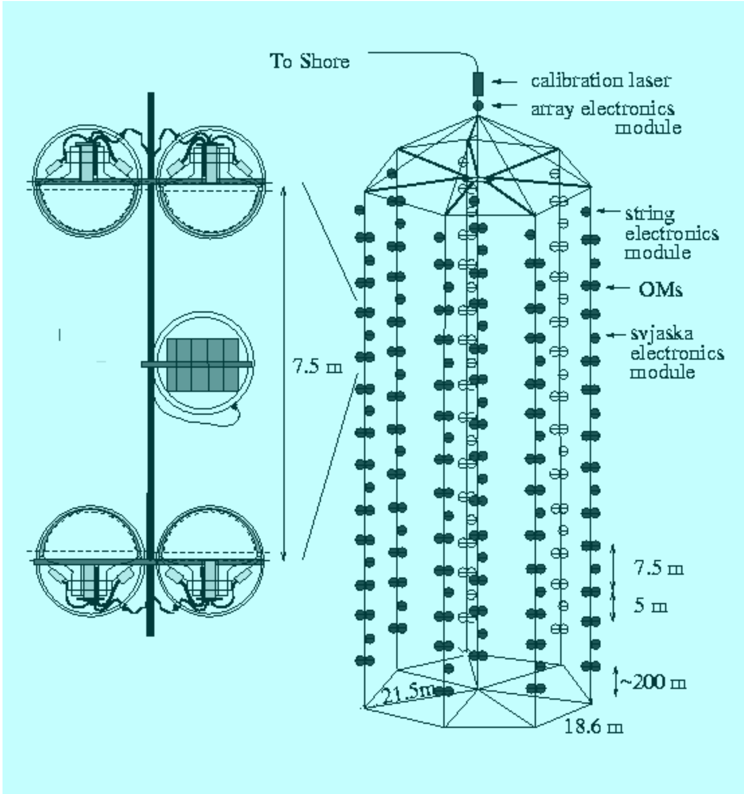
Zählen der Zerfälle:

$$Ar^{37} + e^- \longrightarrow \nu_e + Cl^{37} + \gamma$$



Unterwasserdetektoren

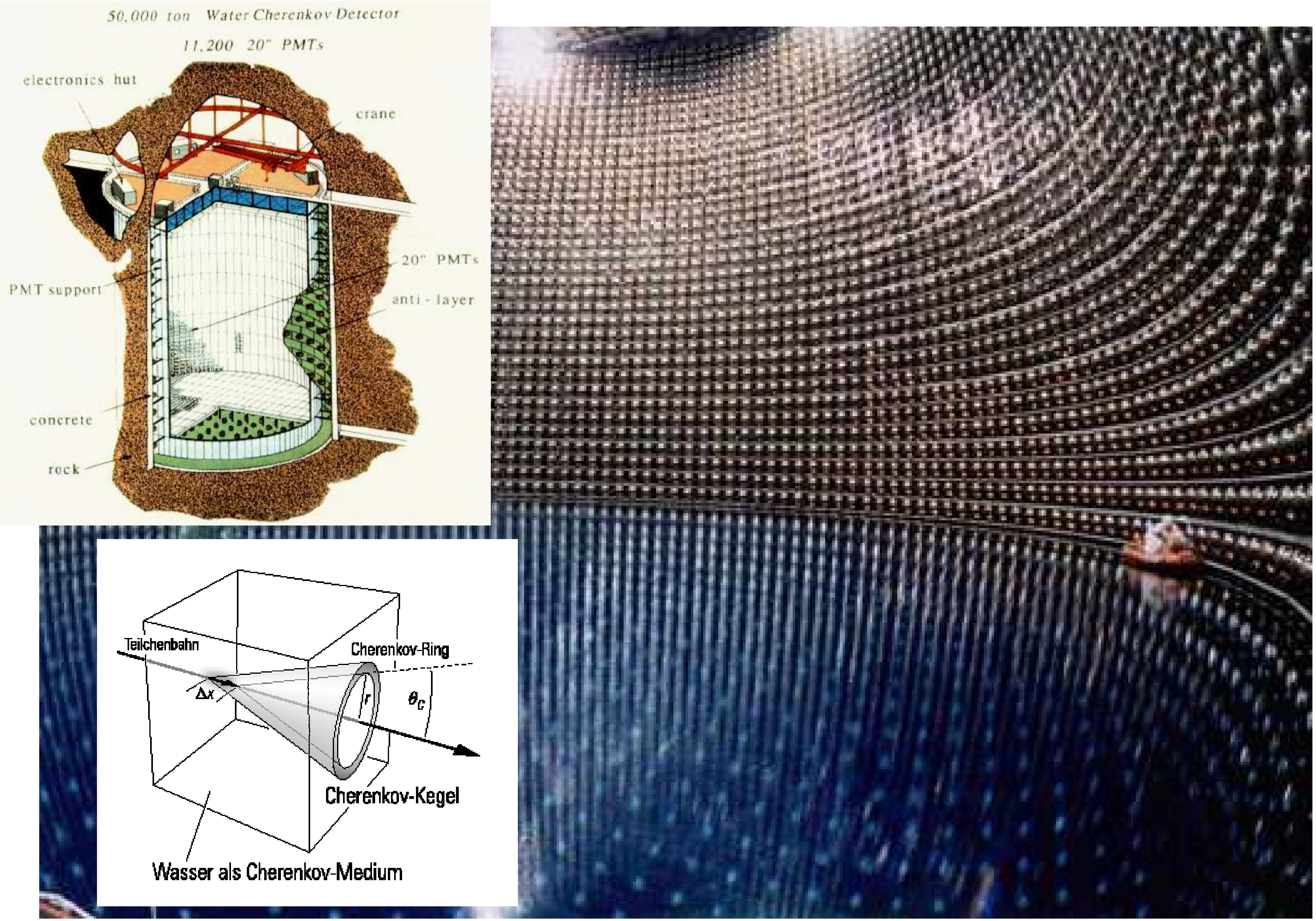




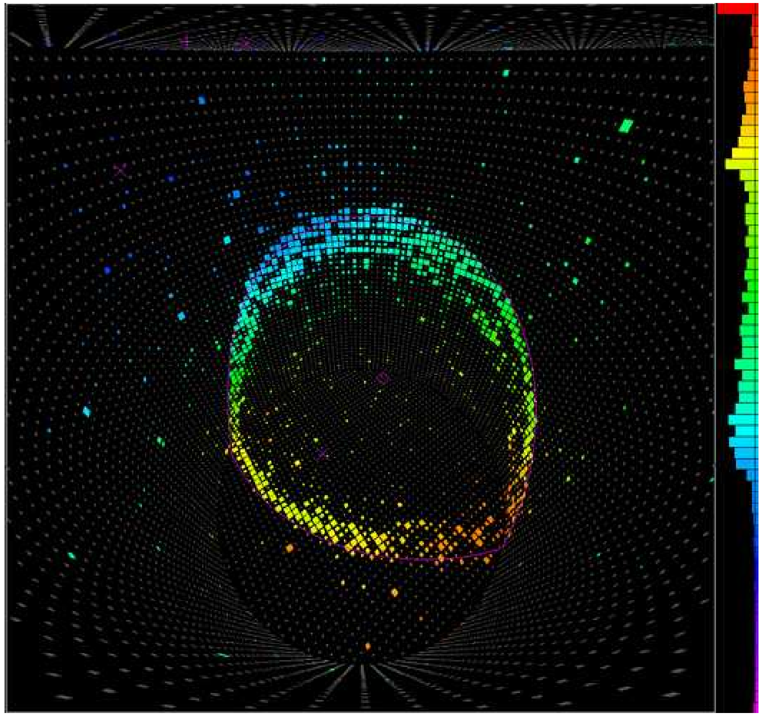
AMANDA

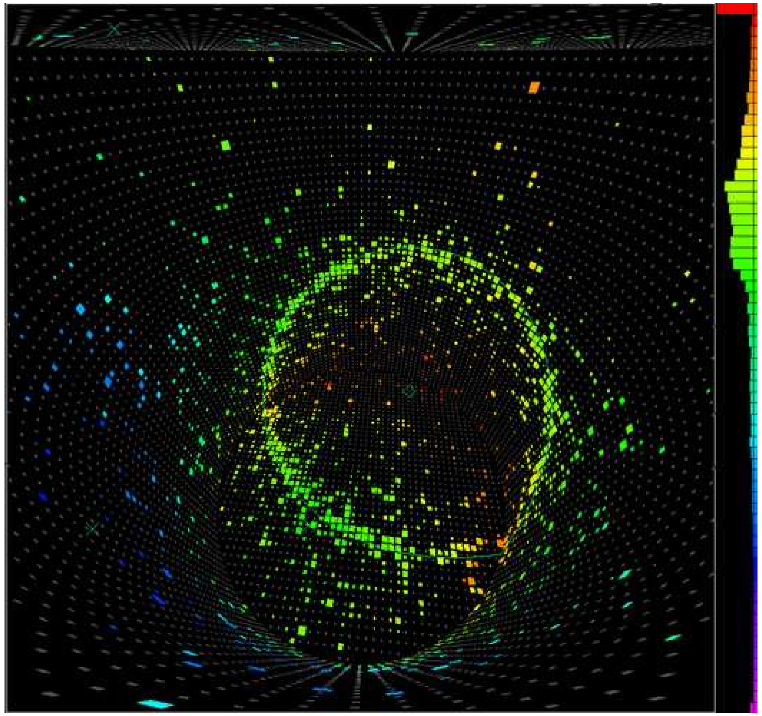
Baikal

Superkamiokande

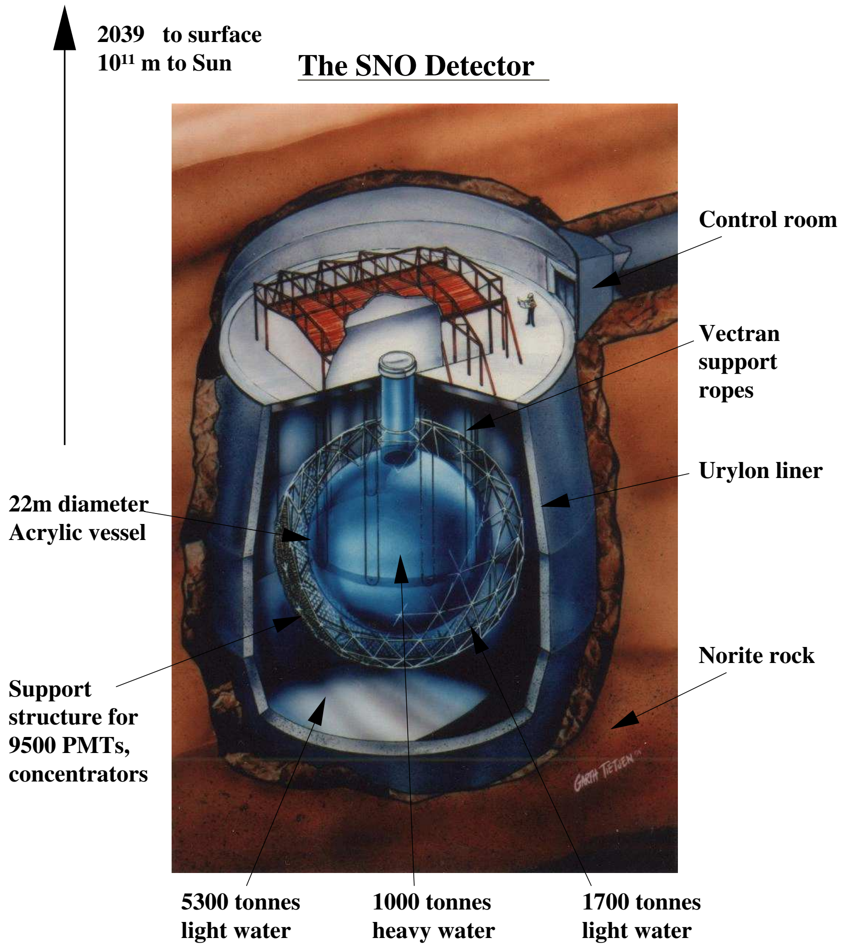


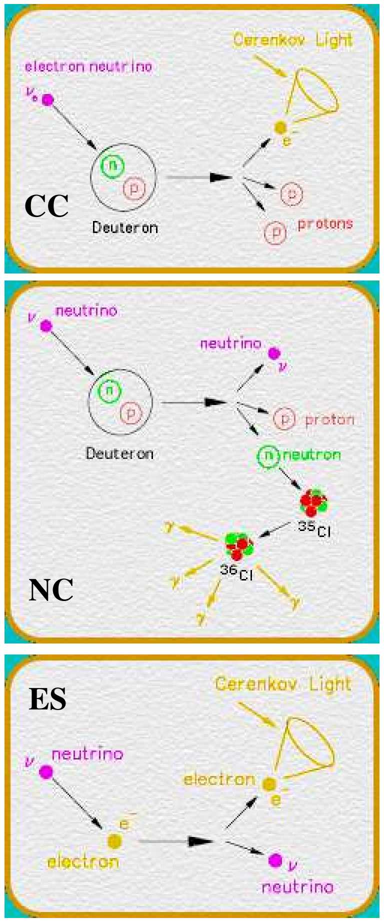
μ and e event in SK





SNO





Φ_ν in 10^6 cm^{-2}s^{-1}:

$$\Phi^{CC}_{\nu_e} = 1.76 \pm 0.15$$
$$\Phi^{NC}_{\nu_x} = 5.09 \pm 0.90$$
$$\Phi^{ES}_{\nu_x} = 2.39 \pm 0.36$$

$CC : \nu_e$

$NC : \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$

$ES : \nu_e + 0.154(\nu_\mu + \nu_\tau)$

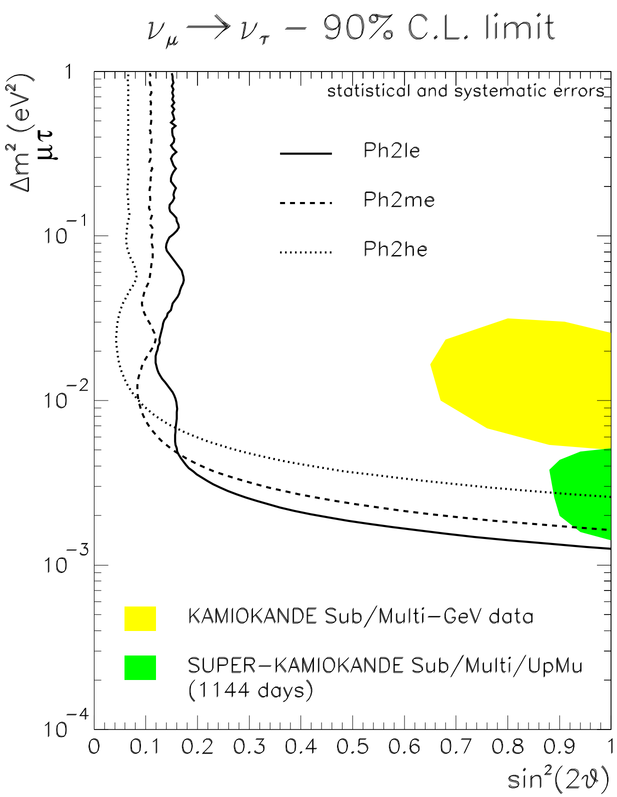
Sonne: $\Phi_{\nu_e} = \Phi_{\nu_x}$

Erde: $\Phi_{\nu_e} < \Phi_{\nu_x}$

$\Longrightarrow$ **Hinweis für**

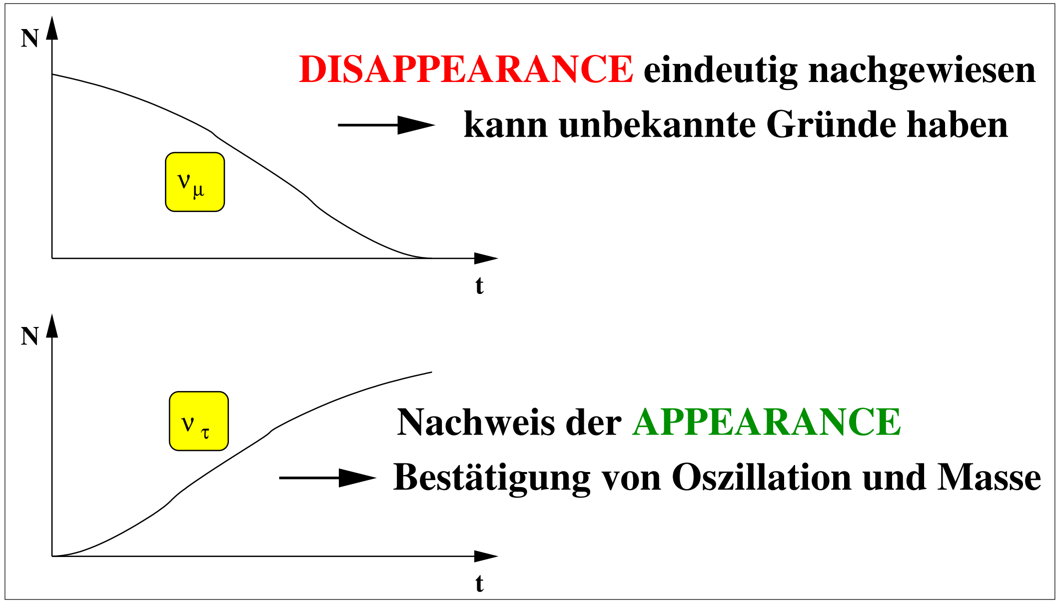
$\nu_e \to \nu_\mu$ **Oszillationen?**

Minos



Ziel: Bestätigung von Super–Kamiokande

disappearance – appearance



K2K, MINOS:	ν_μ–Disappearance	redundant
OPERA, ICARUS:	ν_τ–Appearance	entscheidend

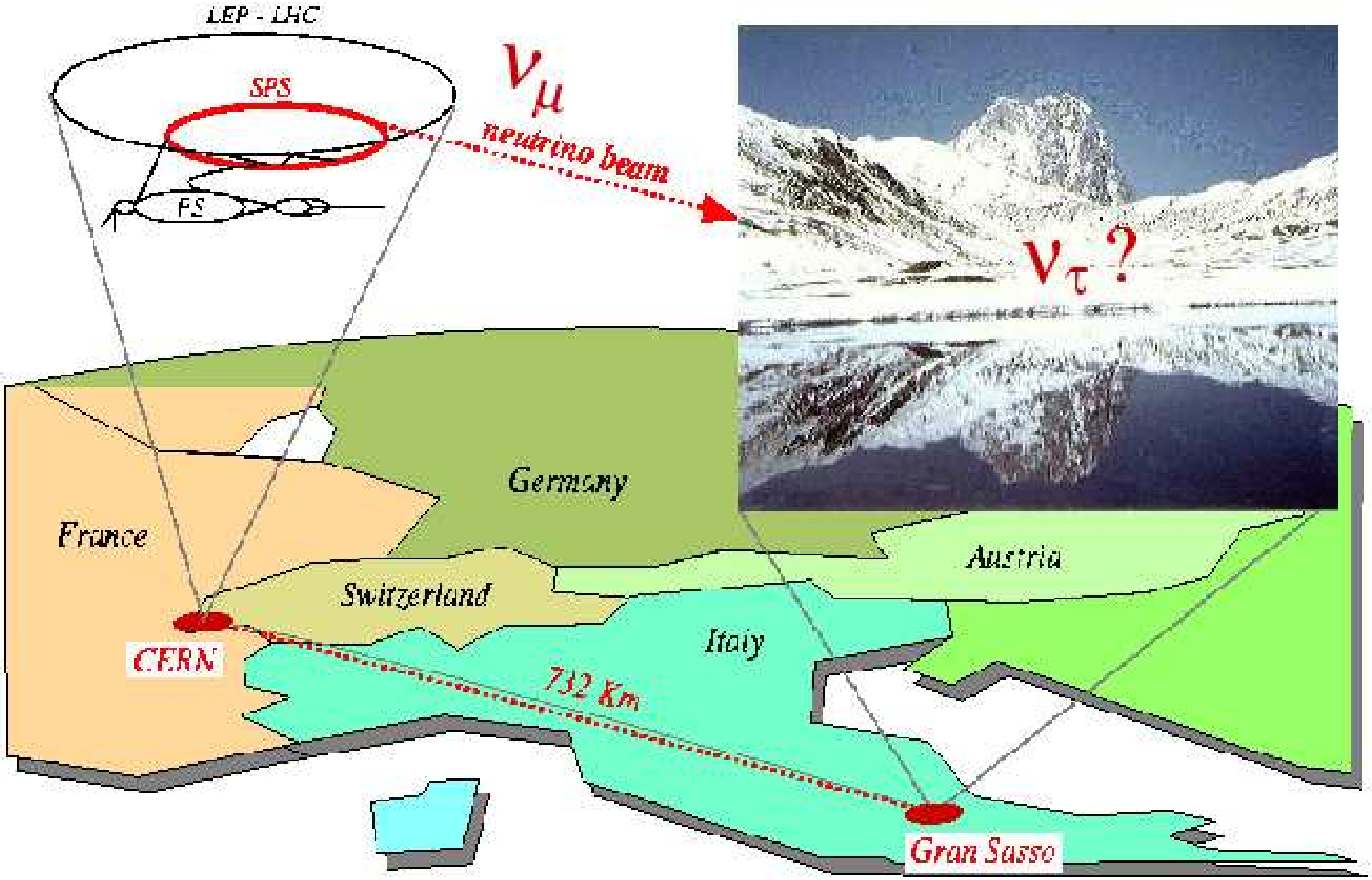
Wenn OPERA 3 $\nu_\mu \to \nu_\tau$ events detektiert

$\Downarrow$

$\boxed{\text{Oszillation nachgewiesen}}$

Der CNGS–Neutrino–Strahl

CERN to Gran Sasso Neutrino Beam

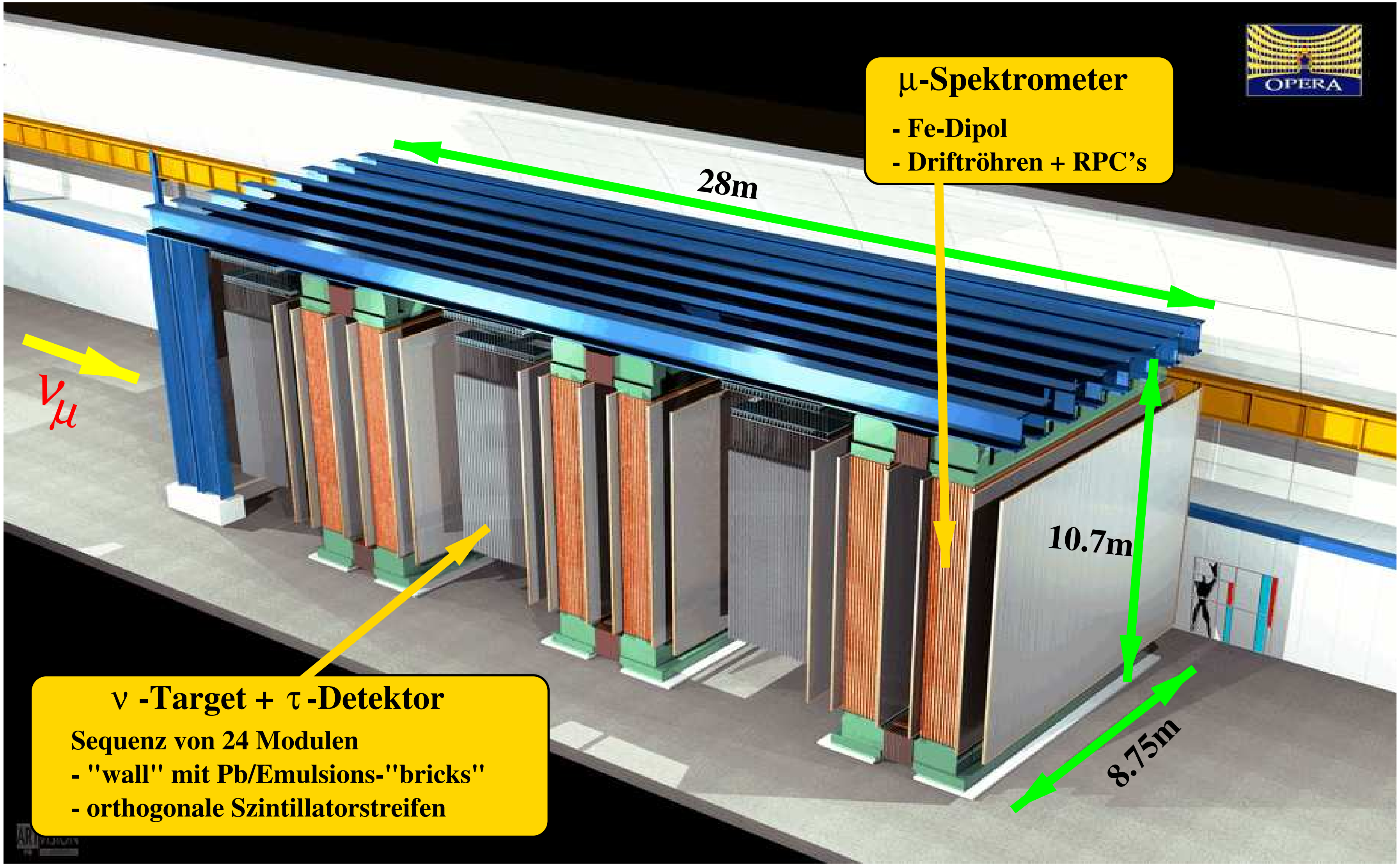


Flüssing Argon Driftkammer (5x600t = 3kt)

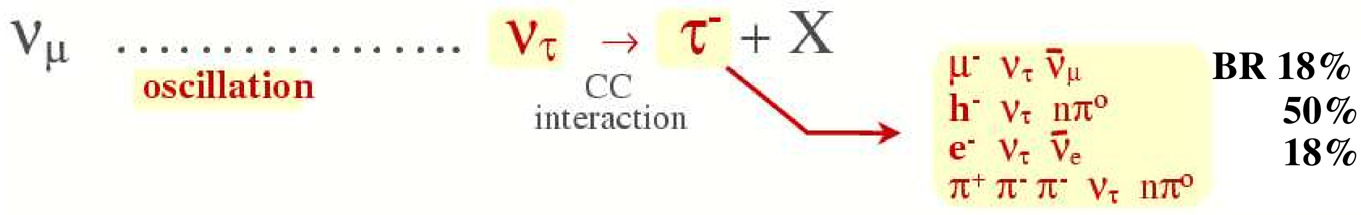
Signal–Drähte **HV–Elektroden**

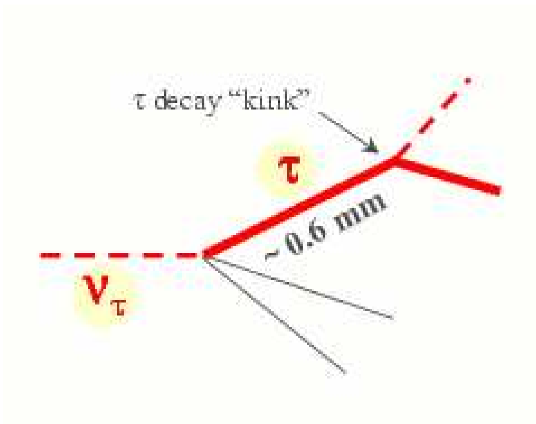
τ–Nachweis kinematisch, statistisch

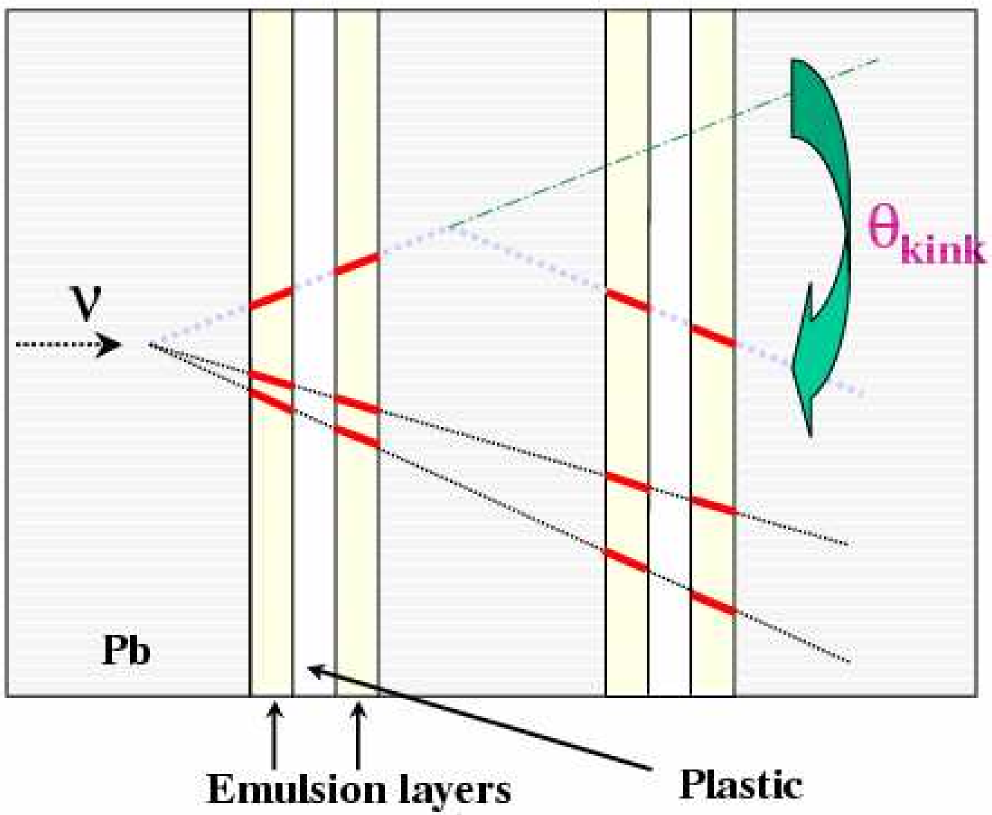
Der OPERA–Detektor



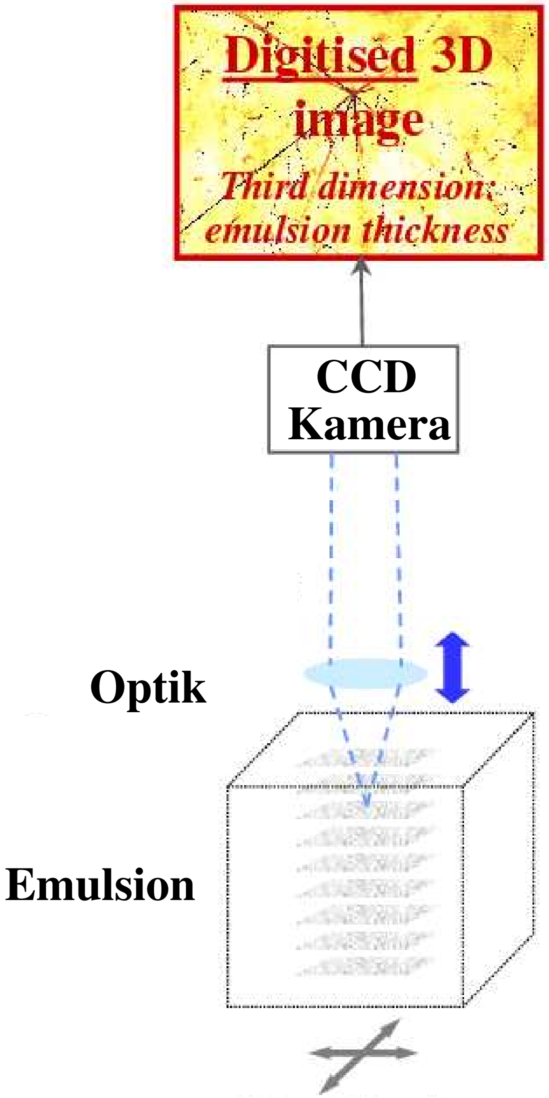
τ–Nachweis als ν_τ–Signal



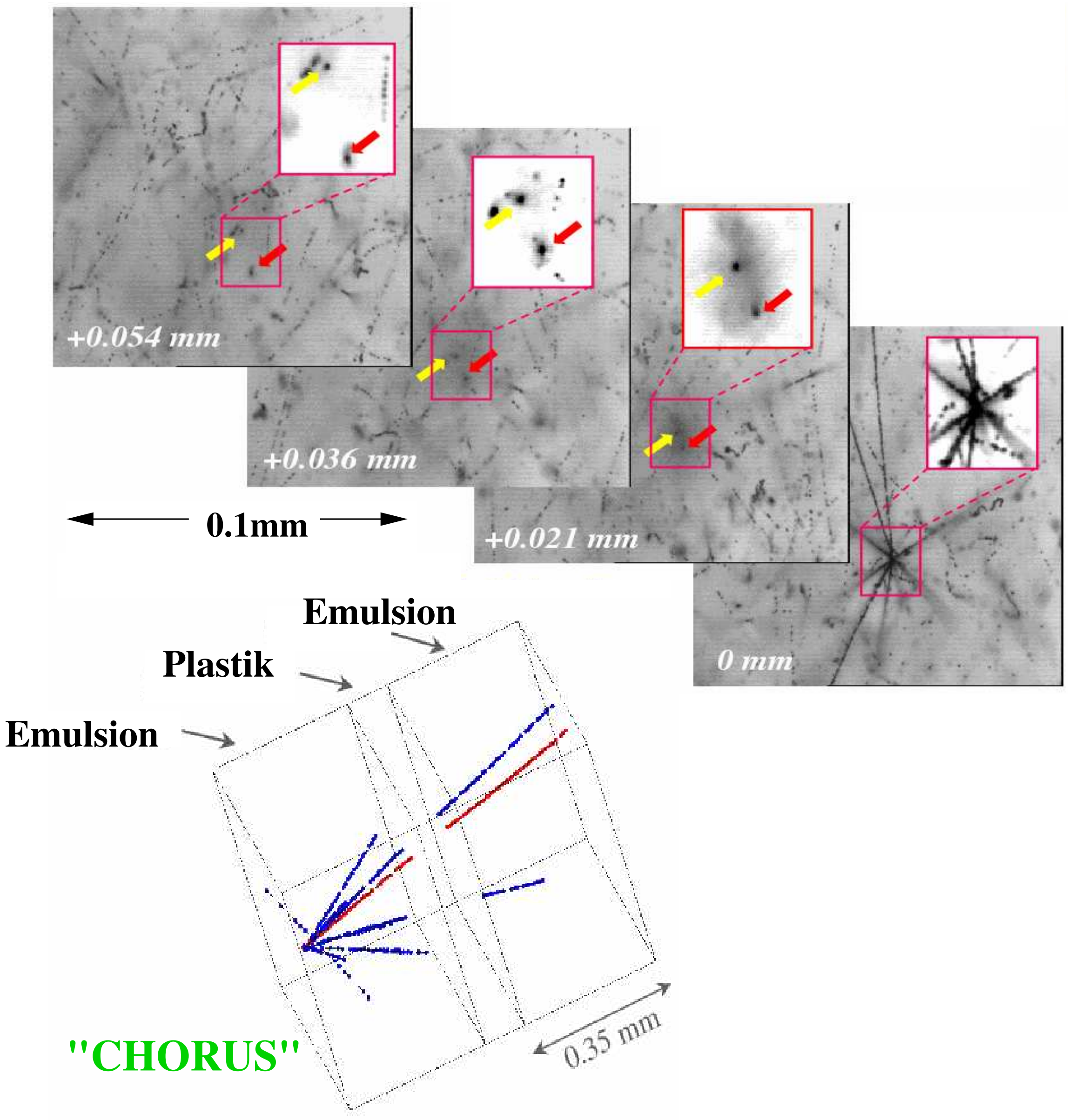




Scanning



Digitised 3D image
Third dimension: emulsion thickness
CCD Kamera
Optik
Emulsion



+0.054 mm
+0.036 mm
+0.021 mm
0 mm
0.1mm
Emulsion
Plastik
Emulsion
"CHORUS"
0.35 mm

Zukünftige Neutrino–Einrichtungen

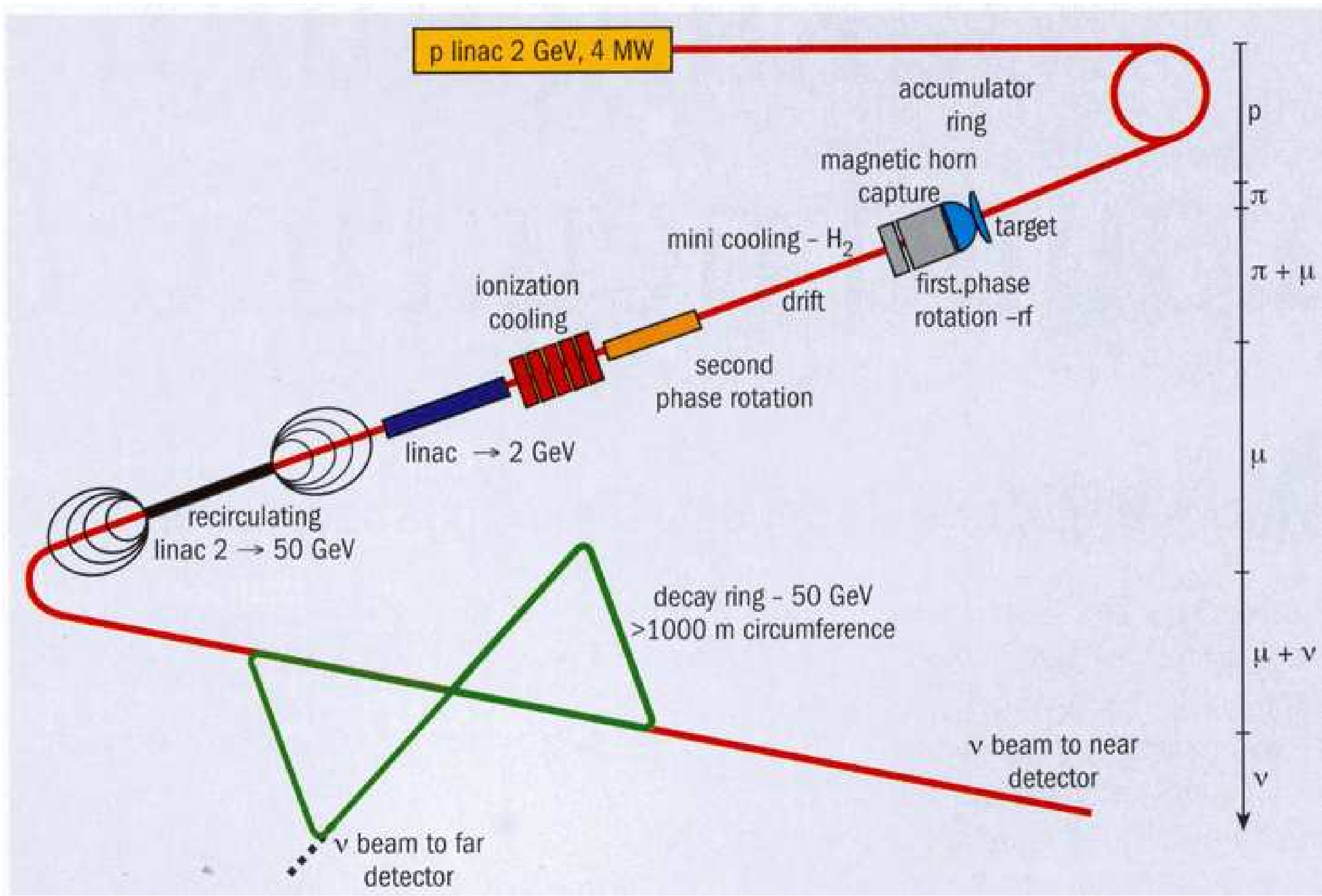
1. “SUPERBEAM”

Konventionell, Intensität x 10	
z.B. CERN:	
Target und Fokus (HARP)	1.2
Zerfallstunnel 1000m $\rightarrow$ 2200m	2.2
Leistung des p-Strahls 0.4MW $\rightarrow$ 2MW	5.0
$\Rightarrow$	10

2. “NEUTRINO FACTORY”

Myon Speicherring

Neutrino Factory



$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu$ **oscillations:** $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$

$\nu_\mu \xrightarrow{W} \mu^-$

$\bar{\nu}_\mu \xrightarrow{W} \mu^+$

Magnetic Detector