

# Kerne und Teilchen

**Moderne Experimentalphysik III**

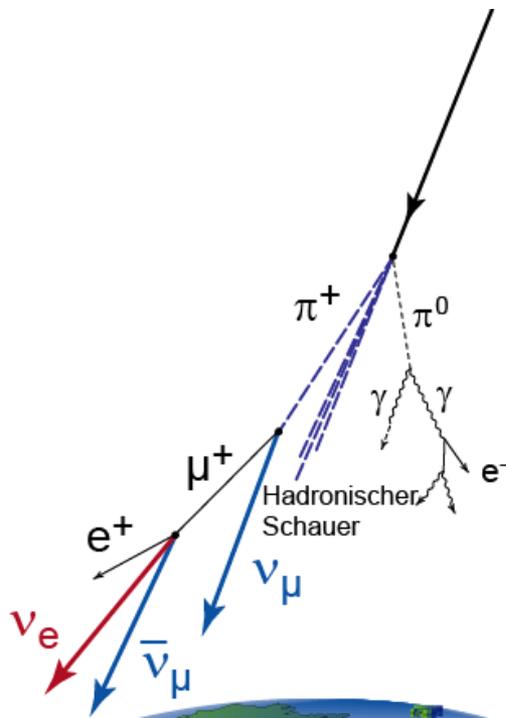
**Vorlesung 21**

MICHAEL FEINDT & THOMAS KUHR  
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

## Neutrinos

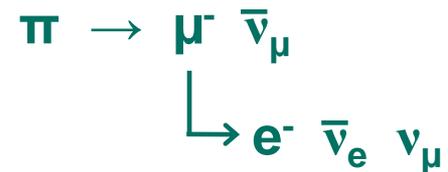
# Neutrino – Quellen

- solare Neutrinos:  $6 \cdot 10^{10} \nu / \text{cm}^2 \text{ Erdoberfläche / Sekunde}$
- atmosphärische Neutrinos: durch hadronische Schauer hochenergetischer kosmischer Strahlung in der Atmosphäre:



## hadronischer Schauer:

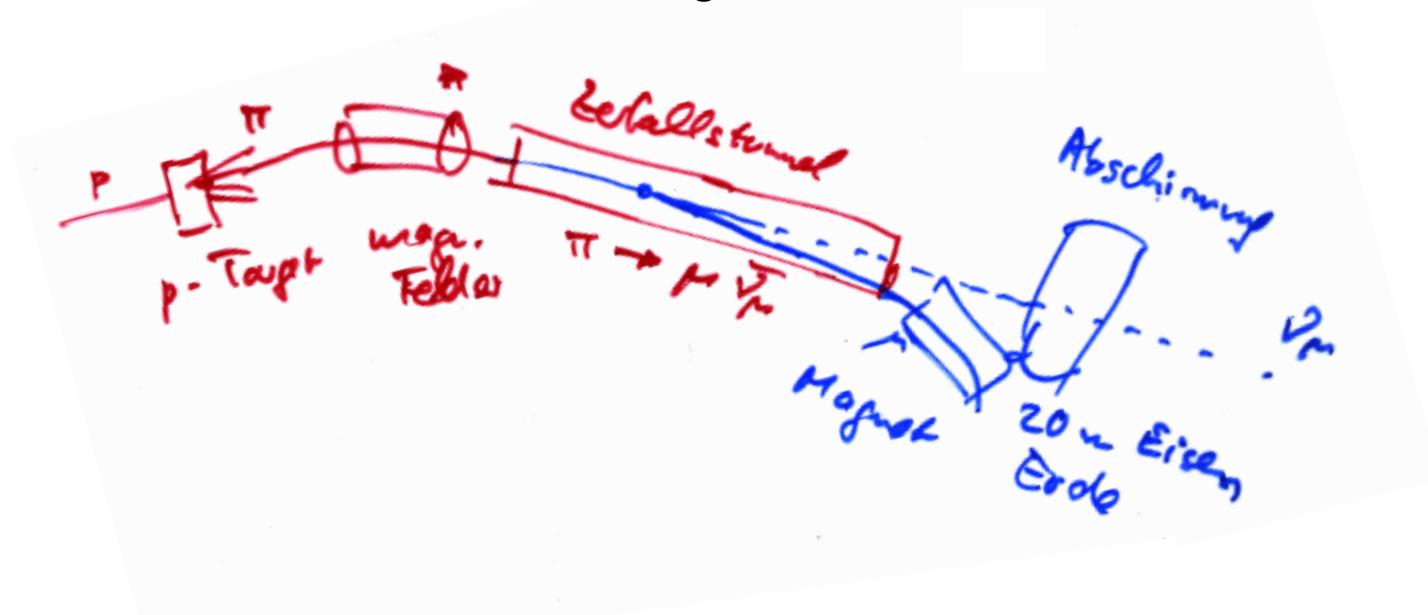
⇒ es entstehen viele  $\pi$  - Mesonen



erwarte:  $\nu_\mu / \nu_e = 2:1$

# Neutrino – Quellen

- Supernova **SN 1987A** :  $10^{58}$   $\nu$  **dominante Energiefreisetzung**
- Kernkraftwerke :  $10^{20}$   $\nu_e$  /s
- Neutrinostrahlen am Beschleuniger:



- Urknall: Dichte im Universum ist heute  $300 \nu / \text{cm}^3$

$$\frac{\nu}{p+n} \approx 10^9$$

# Neutrinomasse und -Helizität

## Standardmodell:

- Neutrinos sind **masselos** (aber neue Resultate sprechen für kleine Massen!)
- nur linkshändige Leptonen nehmen an der schwachen WW teil.  
**Es gibt keine rechtshändigen Neutrinos.** (→Paritätsverletzung)

**linkshändige Teilchen:** SU(2) – Dubletts  
 (speziell unitäre Gruppe)

$$\begin{pmatrix} e_L^- \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu_L^- \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau_L^- \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix}$$

**rechtshändige Teilchen:** SU(2) – Singletts

$$e_R^-, \quad \mu_R^-, \quad \tau_R^-$$

Wenn  $\nu$  masselos ist, dann ist die Geschwindigkeit  $v$  gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , in jedem Bezugssystem:

⇒ Es gibt keine Lorentztransformation, die aus einem linkshändigen ein rechtshändiges Neutrino machen kann.

**Aber: Wenn  $\nu$  eine kleine Masse haben, dann existieren auch rechtshändige Neutrinos.**

# erste Neutrinoexperimente

- Neutrinoexperimente sind schwierig, weil ihr WQ sehr klein ist:

$$\sigma_{\nu n} (\approx 1 \text{ MeV}) \approx 10^{-43} \text{ cm}^2$$

$\Rightarrow$  mittlere freie Weglänge in Wasser:  $10^7 \cdot d_{SE}$   
 $\Rightarrow$  sehr hoher Neutrinofluss  
 $\Rightarrow$  sehr große Detektoren  
 $\Rightarrow$  viel Zeit

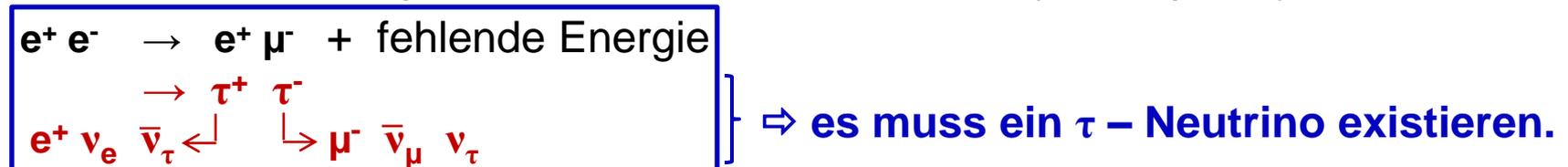
(Sonne-Erde:  
 $150 \cdot 10^6 \text{ km}$ )

$\sigma_{\nu p} \propto E_\nu$  : hochenergetische Neutrinos sind besser nachzuweisen

- erste Neutrinos ( $\nu_e$ ) in der Nähe von Kernreaktoren (ca. 1950)
- Anfang 60er Jahre: erster  $\mu$  – Neutrinostrahl in Brookhaven:  
 $10^{14}$  Neutrinos: 51 Reaktionen in Funkenkammer  
 $\Rightarrow$  alles  $\mu$ , kein e  
 $\Rightarrow$  **Beweis, dass es 2 Arten von Neutrinos gibt**

Nobelpreis 1989: Ledermann, Schwartz, Steinberger

- 1975 wurde  $\tau$  – Lepton entdeckt: Martin Pearl (Nobelpreis)

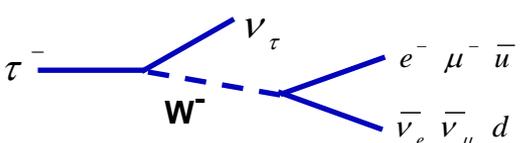


- 1991: Kühn und Wagner      Vorschlag
- Feindt                      Übersetzung
- ARGUS-Kollaboration    Monte-Carlo-Simulation

⇒ das  $\tau$  – Neutrino  $\nu_\tau$  ist linkshändig und das Anti –  $\tau$  – Neutrino  $\bar{\nu}_\tau$  rechtshändig

Methode:

$\tau^- \rightarrow \nu_\tau W^-$



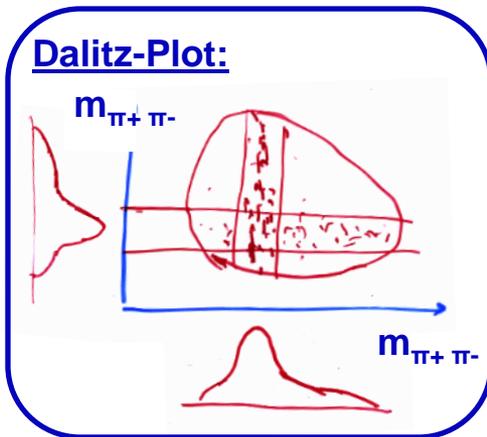
$\bar{u}$	$\rightarrow$	$\rho^-$	$1^-$	$\rightarrow$	$\pi^+ \pi^-$
$d$	$\rightarrow$	$a_1^-$	$1^+$	$\rightarrow$	<b>3 <math>\pi</math></b>
				$\rightarrow$	4 $\pi$
				$\rightarrow$	5 $\pi$

$\tau^- \rightarrow \nu_\tau a_1^-$

↳  $\rho_0 \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$

↳  $\pi^- \rho_0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$

Dalitz-Plot:



Bose – Symmetrie zwischen  $\pi_1^-$  und  $\pi_2^-$  :

$$|\rho_1 \pi_2^- + \rho_2 \pi_1^-|^2 = |\rho_1 \pi_2^-|^2 + |\rho_2 \pi_1^-|^2 + 2\Re e[(\rho_1 \pi_2^-)^* \rho_2 \pi_1^-]$$

man kann zwischen Hel. +1 und -1 des  $a_1$  unterscheiden!

⇒ Links-Rechts – Asymmetrie beobachtbar

⇒ Helizität des  $a_1$  – Mesons

⇒ Helizität des  $\tau$  – Neutrino

# Tau-Neutrino

- 2000: DONUT – Experiment Fermilab
  - hochenergetischer  $\nu$  – Strahl, der auch viele  $\nu_\tau$  enthält
  - Suche in Emulsionstarget nach kurzen Spuren, die von einem  $\tau$  – Lepton herrühren, und Zerfallsprodukte vom  $\tau$ .  
(Knick durch  $\tau \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$ )



⇒ **Existenz und Unterscheidbarkeit des 3. Neutrinos nachgewiesen**

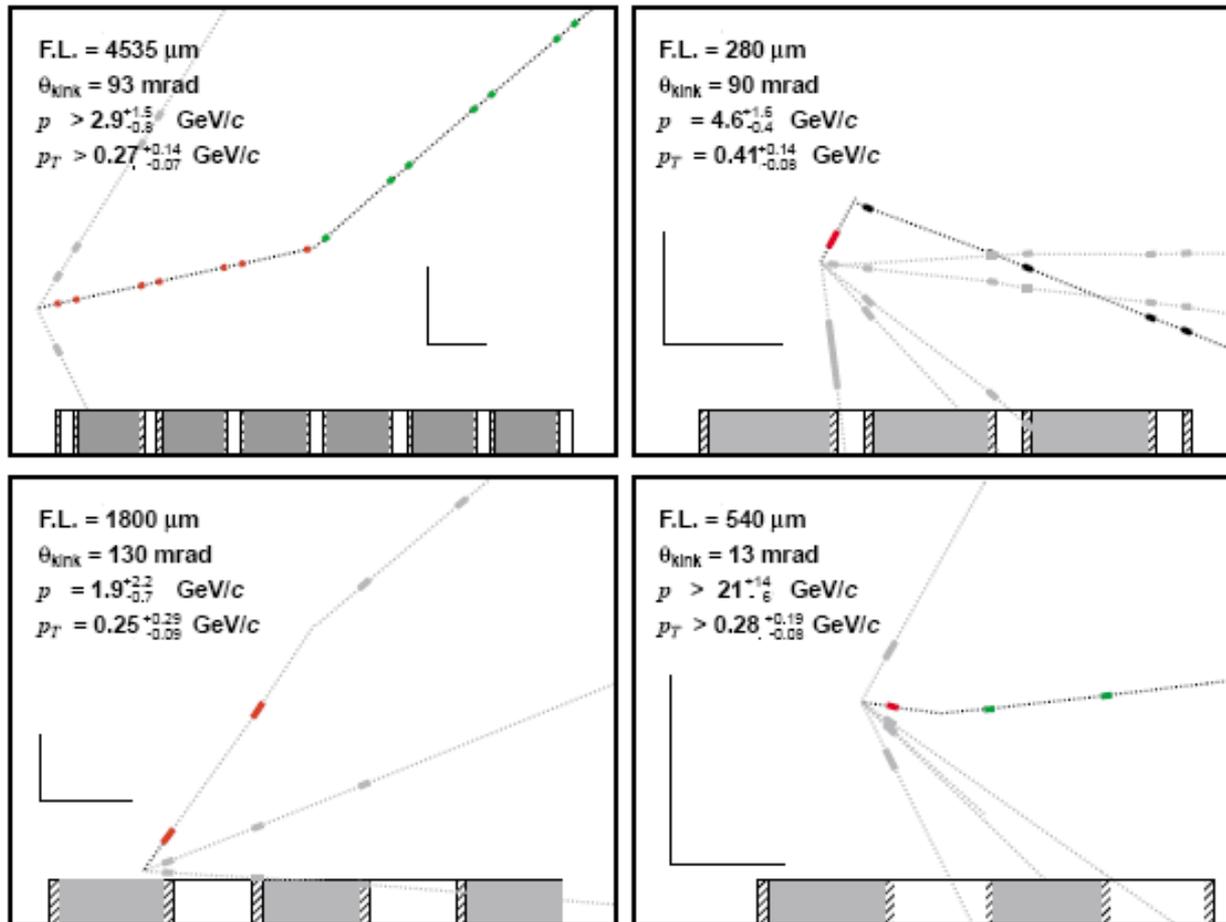


Figure 3: The four  $\nu_\tau$  CC interaction events. (top left) 3024-30175 (top right) 3039-01910, (bottom left) 3263-25102, (bottom right) 3333-17665. The neutrinos are incident from the left. The scale is given by the perpendicular lines with the vertical line representing 0.1 mm and the horizontal 1.0 mm. The target material is shown by the bar at the bottom of each part of the figure representing steel (shaded), emulsion (cross-hatched) and plastic (no shading).

Quelle: DONUT Coll., Phys.Lett.B504:218-224,2001

# Neutrinomassen

- Wenn  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  unterschiedliche Massen haben, dann kann es zu Neutrinooszillationen  $\nu_e \rightarrow \nu_\tau, \nu_\mu \rightarrow \nu_e, \dots$  kommen (muss aber nicht).
- Direkte Massenmessungen waren bisher erfolglos, Grenzen auf

$$\begin{aligned}
 m(\nu_e) &< \approx \text{eV} \\
 m(\nu_\mu) &< \approx \text{keV} \\
 m(\nu_\tau) &< \approx \text{MeV}
 \end{aligned}$$

- Massive Neutrinos: die **Eigenzustände der schwachen WW sind** nicht die Eigenzustände des Massenoperators, sondern eine **Superposition der Massen-Eigenzustände**.

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

Eigenzustände der schwachen WW
3 x 3 Mischungs-  
matrix
Massen-Eigenzustände

(PMNS – Matrix)

# Neutrinoarten

## ■ Oszillationen bei 2 Neutrinoarten (Vereinfachung)

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

bei reinem  $\nu_e$  – Strahl (z.B. Sonne)  
mit Impuls  $p$ : nach Flugstrecke  $L$  wird  
daraus eine Mischung aus  $\nu_e$  und  $\nu_\mu$

$$\nu_1(t) = \nu_1(0) \cdot e^{-iE_1 t}$$

$$\nu_2(t) = \nu_2(0) \cdot e^{-iE_2 t}$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + m_i^2 / 2p$$

$$\nu_e(0) = 1 \quad ; \quad \nu_\mu(0) = 0$$

$$\Rightarrow \frac{I_e(t)}{I_e(0)} = \left| \frac{\nu_e(t)}{\nu_e(0)} \right|^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2}$$

$$E_2 - E_1 = (m_2^2 - m_1^2) / 2p = \Delta m^2 / 2p$$

$$t = L/v = L \cdot E / p$$

$$\Rightarrow \frac{I_e(t)}{I_e(0)} = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left( \Delta m^2 \frac{L}{4E} \right)$$

**Modellparameter:**  $\Delta m^2, \theta$

⇒ Wenn es  $\Delta m^2 > 0$  und  $\theta \neq 0$  zwischen irgendwelchen Neutrinosorten gibt, sollte es Oszillationen geben.

"Disappearance" – Experimente:  $\nu_e \rightarrow$  weniger  $\nu_e$

es kommen zu wenig  
Neutrinos (von der Sonne) an

"Appearance" – Experimente:  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$

es werden Neutrinos  
beobachtet, die nicht  
erzeugt worden sind

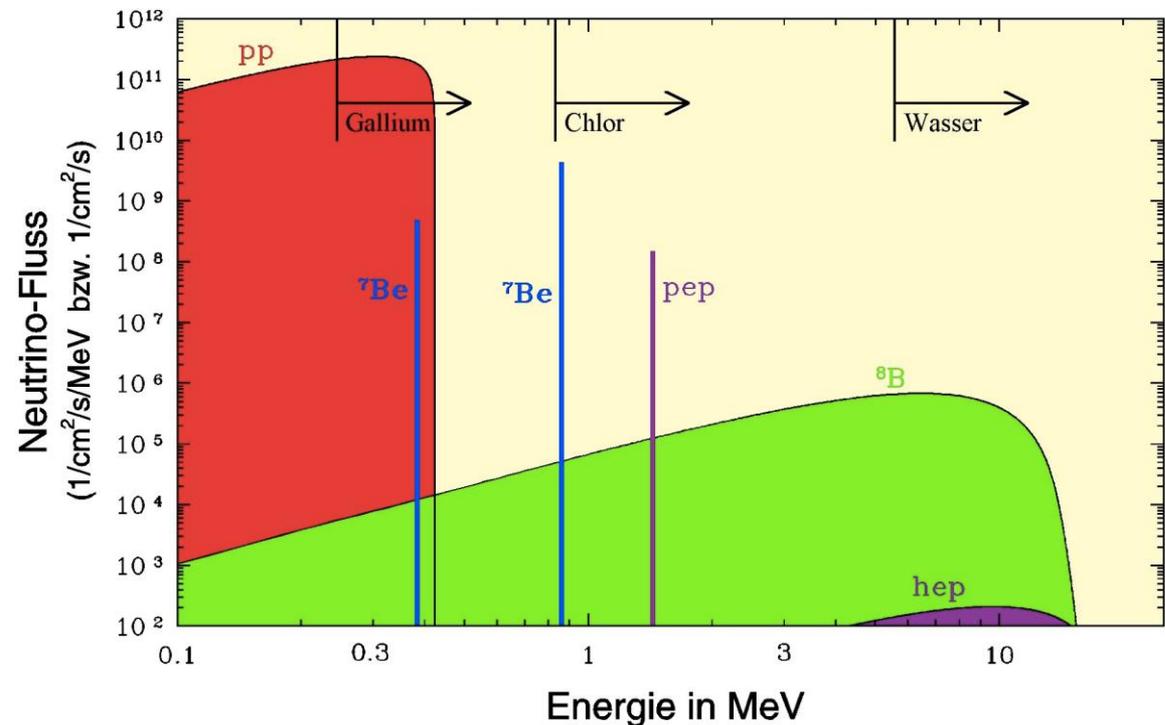
# Sonnen – Neutrinos

entstehen im Kernfusionszyklus in der Sonne



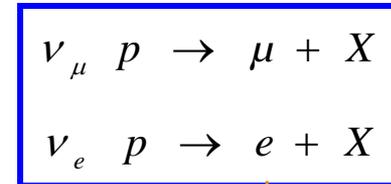
⇒ verschiedene Arten von Detektoren, die unterschiedliche  $E_\nu$ -Nachweisschwellen haben.

⇒ über 30 Jahre hat sich die Evidenz verdichtet, dass zu wenig  $\nu_e$  von der Sonne auch als  $\nu_e$  auf der Erde ankommen (ca 1/3 bis 1/2).



# Super – Kamiokande (Japan)

- detektiert atmosphärische Neutrinos
- erwarte:  $\nu_\mu / \nu_e = 2 : 1$
- 500 000 t Wasser – Tank



erzeugen Cherenkov – Licht

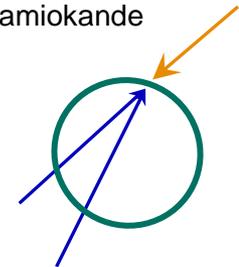
Lichtkegel werden durch riesiges Photomultiplier–Array aufgenommen  
 $\Rightarrow \mu$  und  $e$  – Spuren sind unterscheidbar

beobachtet:  $\nu_\mu / \nu_e \approx 1$

$\Rightarrow \nu_\mu$  verschwinden auch

$\Rightarrow$  Tag-Nacht – Effekt : "Winkelverteilung"

Super-Kamiokande  
(Japan):

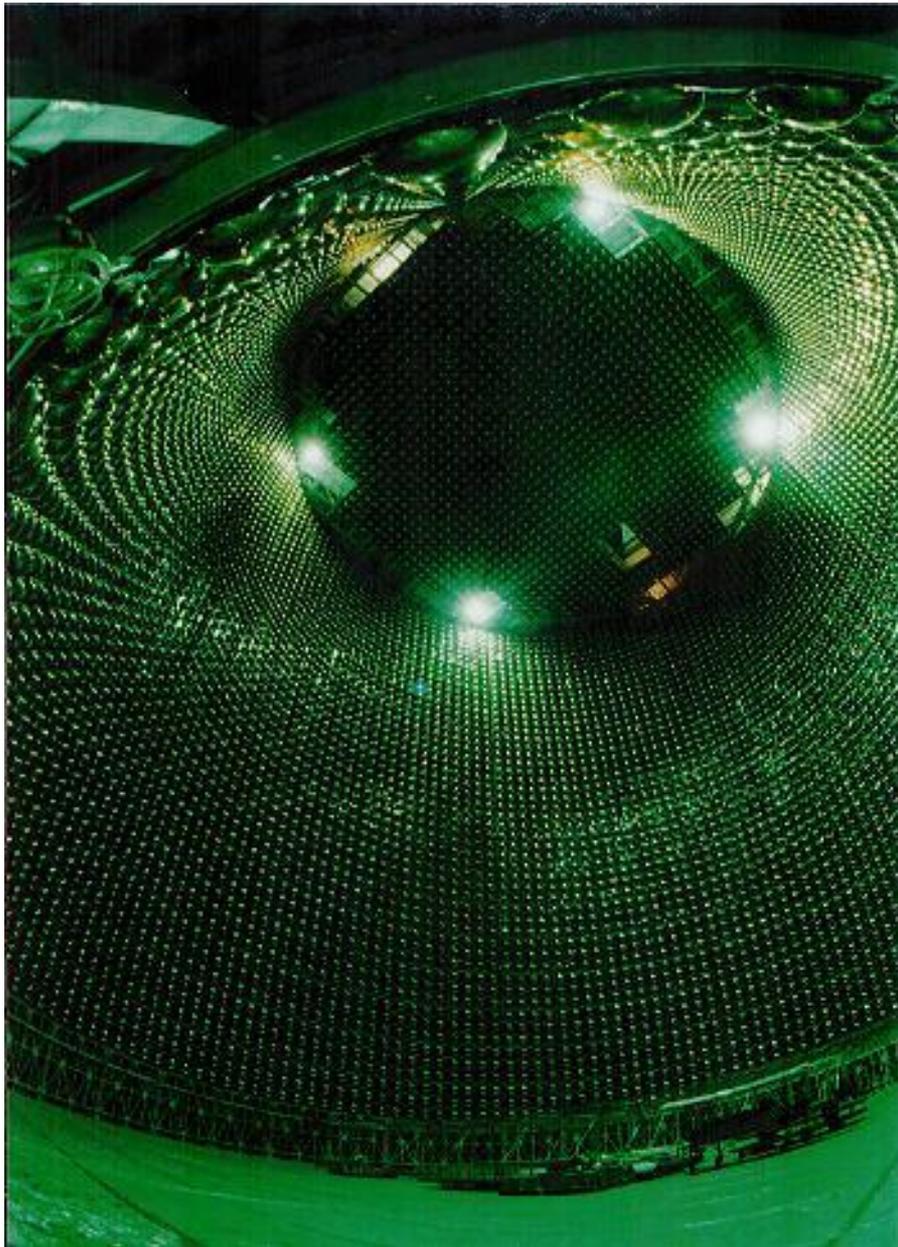


$\Rightarrow \nu_\mu / \nu_e$  hängt von der durchquerten Materie ab

$\Rightarrow$  resonante  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  – Oszillationen in Materie: MSW – Effekt

(Mikheyev, Smirnov, Wolfenstein)

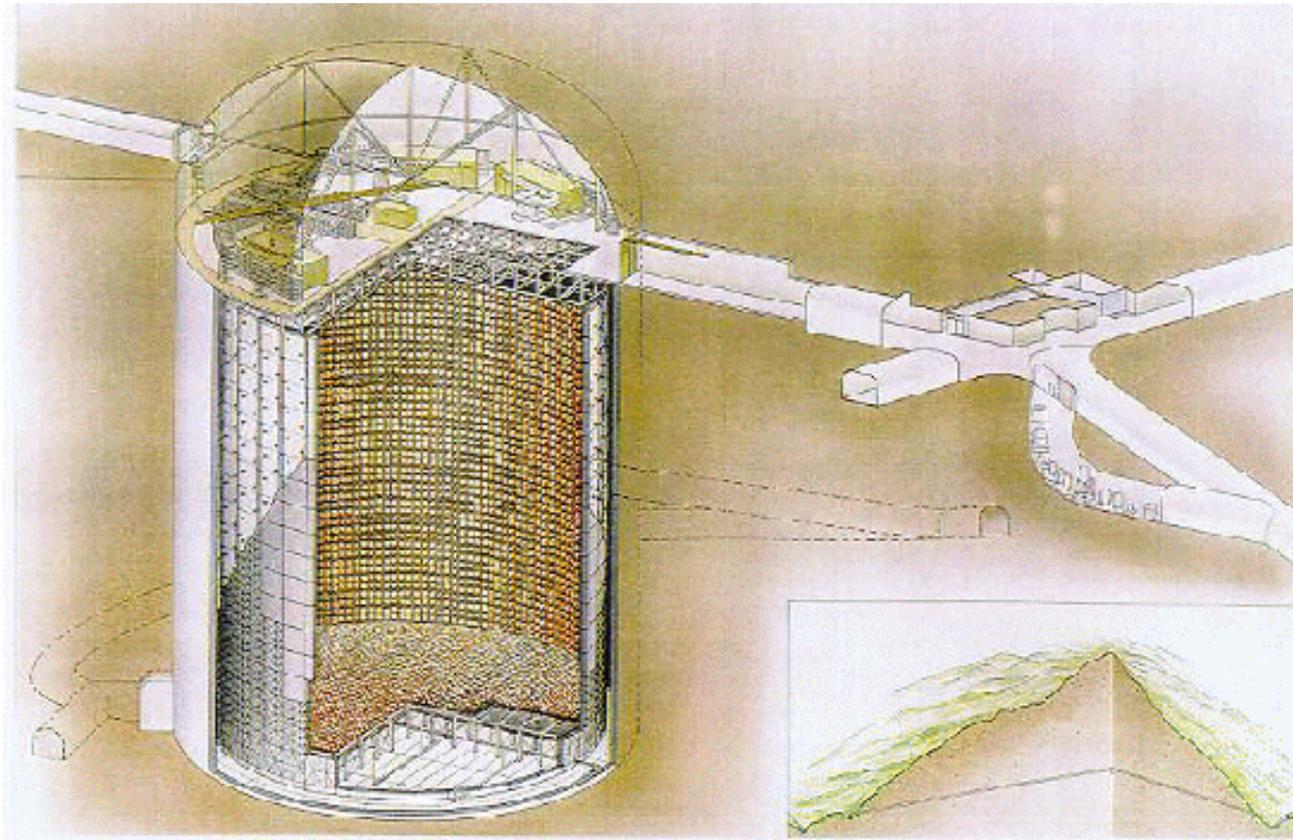
$$\sigma_{\nu_\mu p} \neq \sigma_{\nu_e p}$$

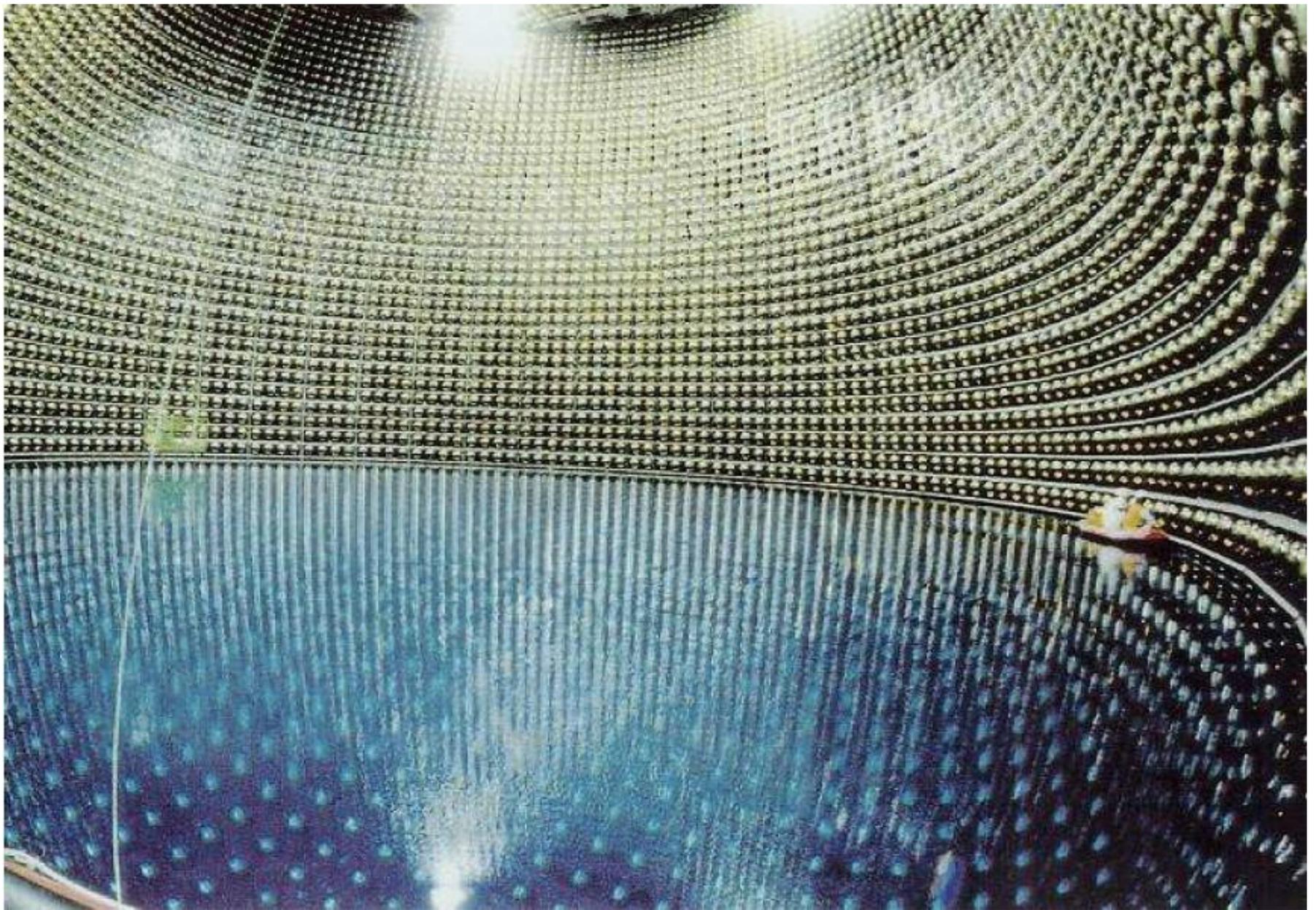


*From the AIP-website:*

*Located in Japan, Super-Kamiokande is a detector that studies the elusive particles known as neutrinos. This is a picture of the detector wall and top with about 9000 photomultiplier tubes which help detect the neutrinos*

# Super – Kamiokande: Aufbau





# weitere Experimente

## ■ CHORUS, NOMAD (CERN)

- suchen nach  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  Transformationen auf einer Strecke von 600 m

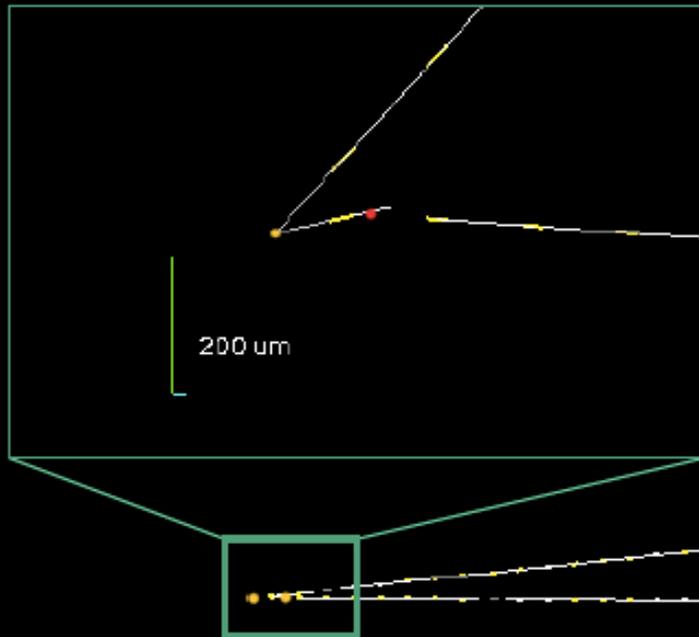
## ■ Long – Baseline – Experimente: K2K (250 km), LBNE (1300 km),

## ■ Opera – Experiment (CERN – Gran Sasso 2010):

- erstes Ereignis, das  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  – Oszillationen beweist
- $\nu_\mu$  wurde am CERN erzeugt,  $\nu_\tau$  im Gran Sasso-Tunnel (Italien) nach 730 km nachgewiesen

# Opera – Experiment

## Secondary vertex found during the -scan back procedure



- kink :  $41 \pm 2$  mrad
- path length :  $1335 \pm 35$  μm
- Impact Factor :  $55 \pm 4$  μm  
( Daughter track wrt the primary vertex )

Scan-back in ECC

CS predictions

# Das 4. Neutrino... ?

- Wenn **alle** Experimente richtig sind, müsste es ein 4. Neutrino geben (steriles Neutrino).

⇒ wahrscheinlich ist ein Experiment falsch (Kandidat: LNSD)

⇒ Haupteffekte  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$   
 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$

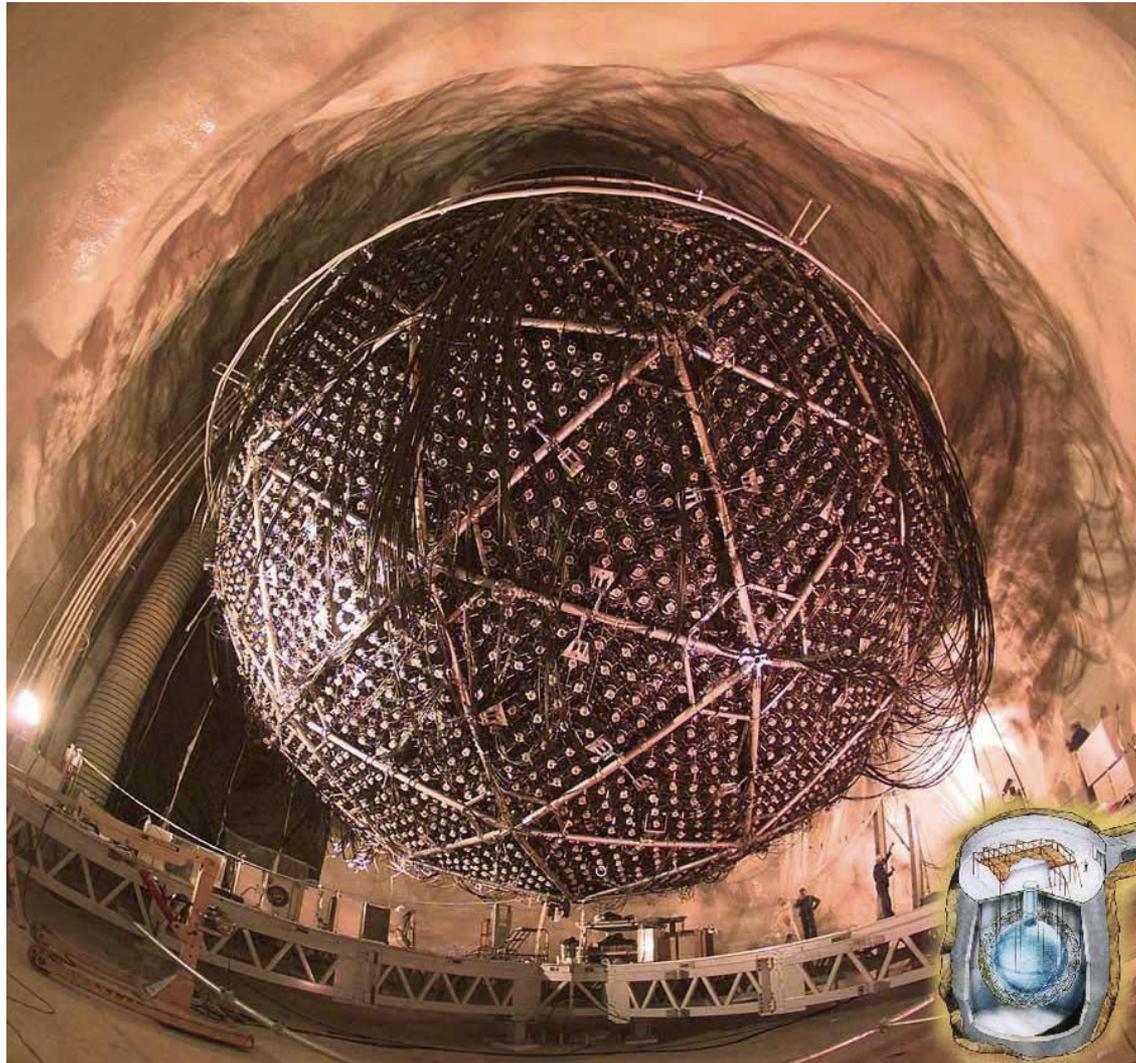
↓  
 Konkurrenz KARMEN  
 (Kampert)

- **SNO:** Sudbury Neutrino Observatory  
 misst Gesamtzahl von solaren Neutrinos mit D<sub>2</sub>O (schwerem Wasser)

- Neutrinoeinfang: nur  $\nu_e$
- Streuung am Elektron:  $\sigma(\nu_e) \gg \sigma(\nu_\mu, \nu_\tau)$
- Spaltung  $d \rightarrow p n$ :  $\sigma(\nu_e) = \sigma(\nu_\mu) \approx \sigma(\nu_\tau)$

Ergebnis: **totale  $\nu$  – Rate stimmt mit Theorie überein**

# SNO – Experiment



## Total Rates: Standard Model vs. Experiment

### Bahcall-Pinsonneault 2000

