

Kerne und Teilchen

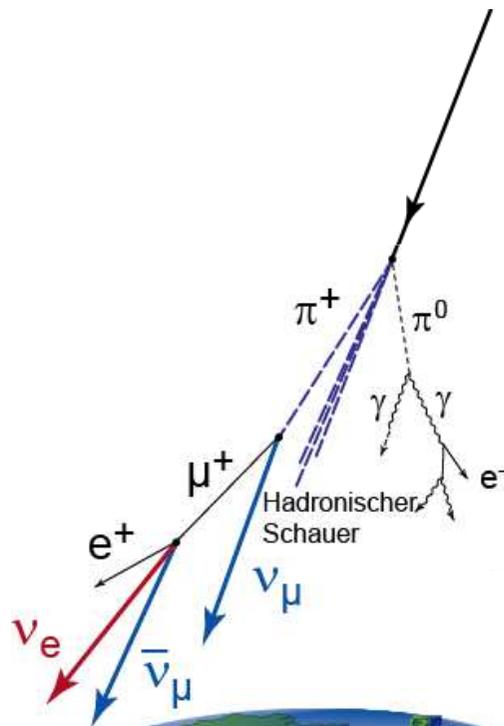
Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 21

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Neutrinos

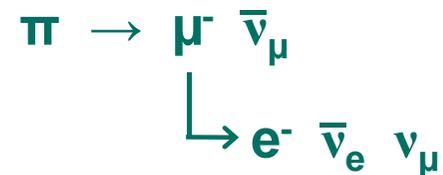
Neutrino – Quellen

- 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:

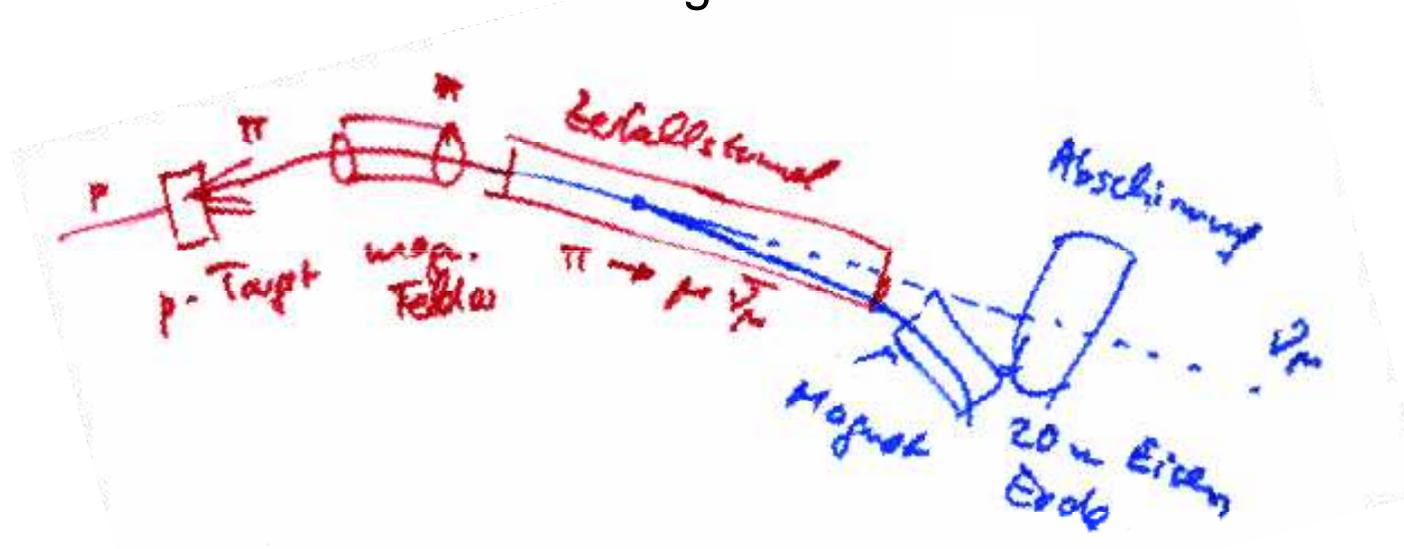
⇒ es entstehen viele π - Mesonen



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 ν 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 ν 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

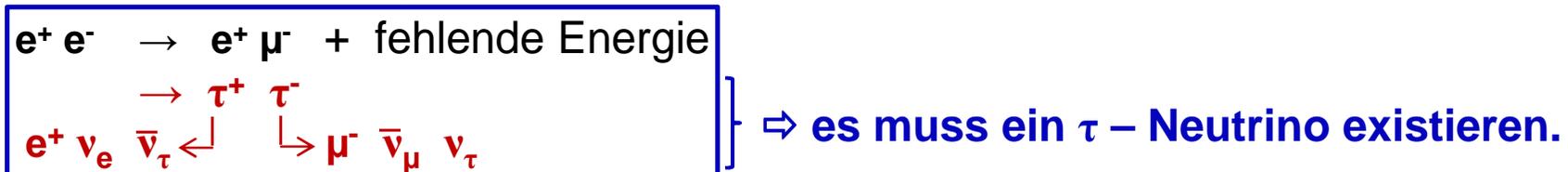
\uparrow
 (Sonne-Erde:
 $150 \cdot 10^6 \text{ km}$)

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

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

Nobelpreis 1989: Ledermann, Schwartz, Steinberger

- 1975 wurde τ – Lepton entdeckt: Martin Pearl (Nobelpreis)



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

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

Methode:

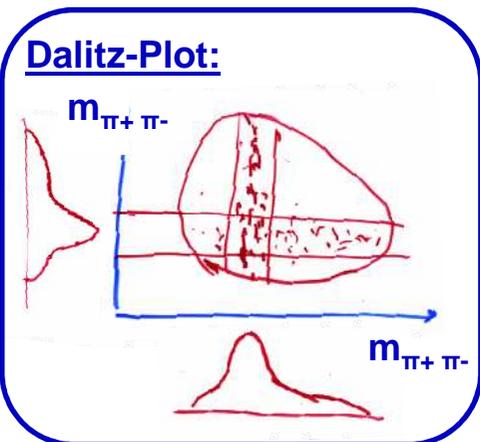
$\tau^- \rightarrow \nu_\tau W^-$

$\tau^- \begin{cases} \nu_\tau \\ W^- \end{cases} \begin{cases} e^- \mu^- \bar{u} \\ \bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu d \end{cases}$

$\bar{u} \rightarrow \rho^- \quad 1^- \rightarrow \pi \pi$
 $d \rightarrow a_1^- \quad 1^+ \rightarrow 3 \pi$
 $\quad \quad \quad \rightarrow 4 \pi$
 $\quad \quad \quad \rightarrow 5 \pi$

$\tau^- \rightarrow \nu_\tau a_1^- \leftarrow 1$
 $\hookrightarrow \rho_0 \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$
 $\hookrightarrow \pi^- \rho_0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$

PCAC
 Partially Conserved
 Axial Currents



Bose – Symmetrie zwischen π_1^- und π_2^- :

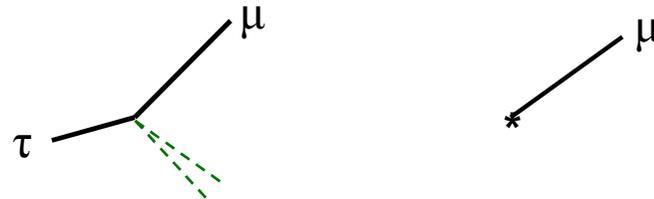
$$|\rho_1 \pi_2^- + \rho_2 \pi_1^-|^2 = |\rho_1 \pi_2^-|^2 + |\rho_2 \pi_1^-|^2 + 2\Re[(\rho_1 \pi_2^-)^* \rho_2 \pi_1^-]$$

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

⇒ Links-Rechts – Asymmetrie beobachtbar

- ⇒ Helizität des a_1 – Mesons
- ⇒ Helizität des τ – Neutrino

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



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

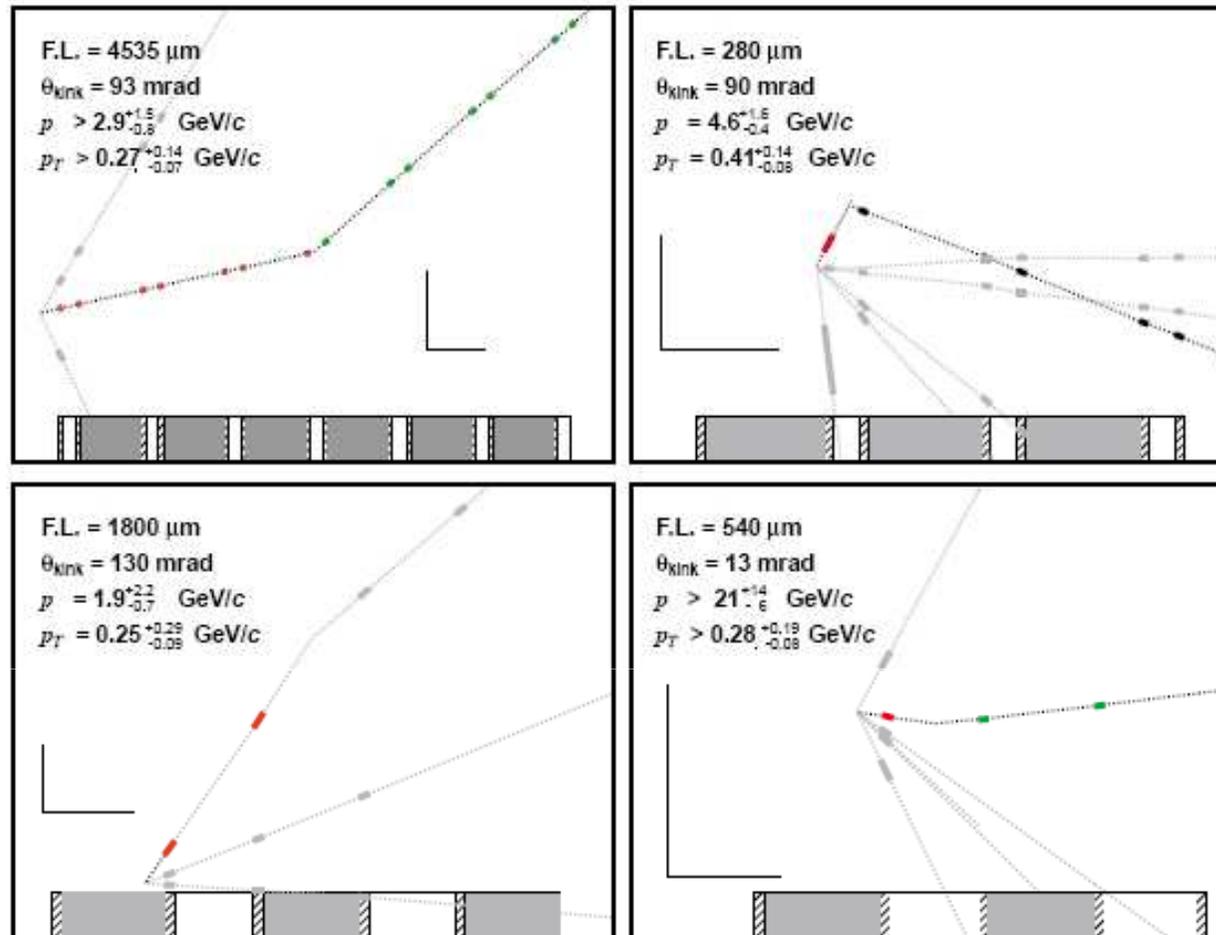


Figure 3: The four ν_τ CC interaction events. (top left) 3024-30175 (top right) 3039-01910, (bottom left) 3263-25102, (bottom right) 3333-17665. The neutrinos are incident from the left. The scale is given by the perpendicular lines with the vertical line representing 0.1 mm and the horizontal 1.0 mm. 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 ν_e, ν_μ, ν_τ 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

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

- 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)

$$\begin{aligned} \nu_e &= \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ \nu_\mu &= -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{aligned}$$

bei reinem ν_e – Strahl (z.B. Sonne)
mit Impuls p : nach Flugstrecke L wird
daraus eine Mischung aus ν_e und ν_μ

$$\begin{aligned} \nu_1(t) &= \nu_1(0) \cdot e^{-iE_1 t} \\ \nu_2(t) &= \nu_2(0) \cdot e^{-iE_2 t} \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} E_i &= \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + m_i^2 / 2p \\ \nu_e(0) &= 1 \quad ; \quad \nu_\mu(0) = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_e(t)}{I_e(0)} = \left| \frac{\nu_e(t)}{\nu_e(0)} \right|^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2}$$

$$\left. \begin{aligned} E_2 - E_1 &= (m_2^2 - m_1^2) / 2p = \Delta m^2 / 2p \\ t &= L/v = L \cdot E / p \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_e(t)}{I_e(0)} = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left(\Delta m^2 \frac{L}{4E} \right)$$

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 ν_e

es kommen zu wenig
Neutrinos (von der Sonne) an

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

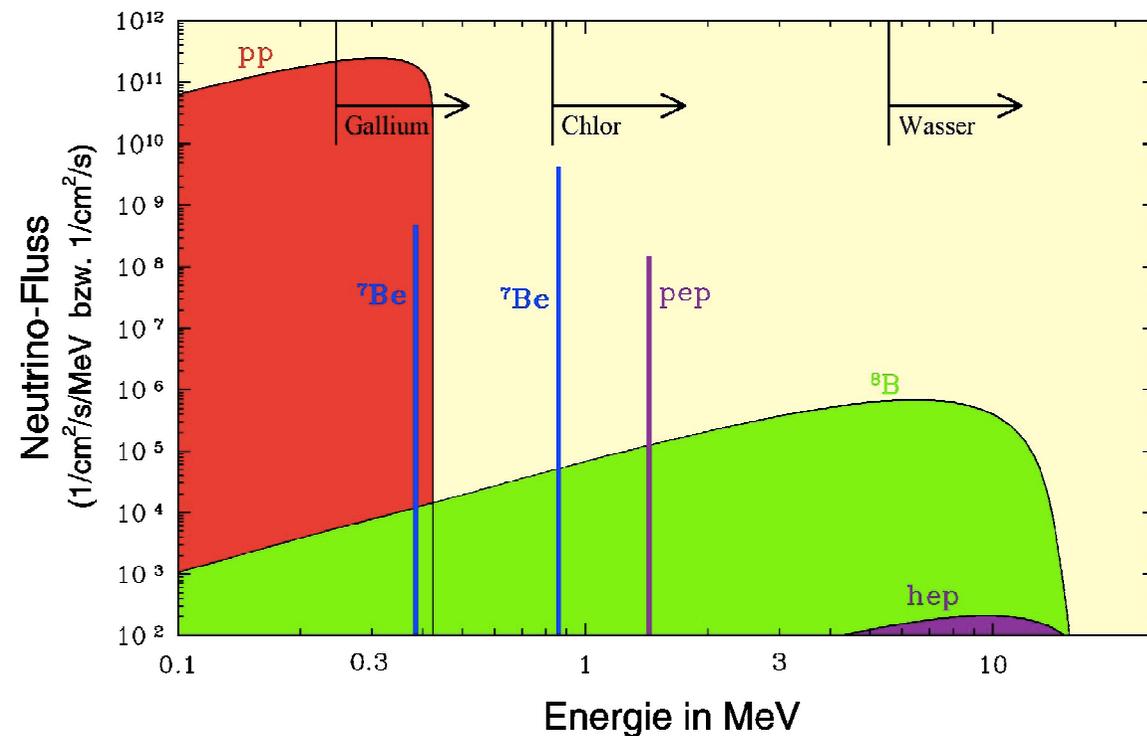
es werden Neutrinos
beobachtet, die nicht
erzeugt worden sind

Sonnen – Neutrinos

entstehen im Kernfusionszyklus in der Sonne

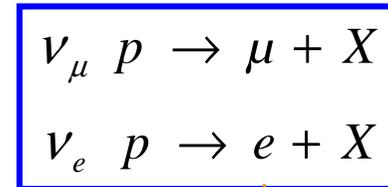


- ⇒ verschiedene Arten von Detektoren, die unterschiedliche E_ν -Nachweisschwellen haben.
- ⇒ über 30 Jahre hat sich die Evidenz verdichtet, dass zu wenig ν_e von der Sonne auch als ν_e auf der Erde ankommen (ca 1/3 bis 1/2).



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

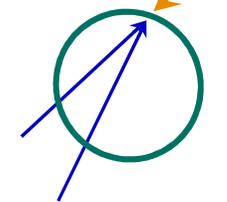
⇒ μ und e – Spuren sind unterscheidbar

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

⇒ ν_{μ} verschwinden auch

⇒ Tag-Nacht – Effekt : "Winkelverteilung"

Super-Kamiokande
(Japan):



⇒ ν_{μ} / ν_e hängt von der durchquerten Materie ab

⇒ resonante $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ – Oszillationen in Materie: MSW – Effekt

(Mikheyev, Smirnov, Wolfenstein)

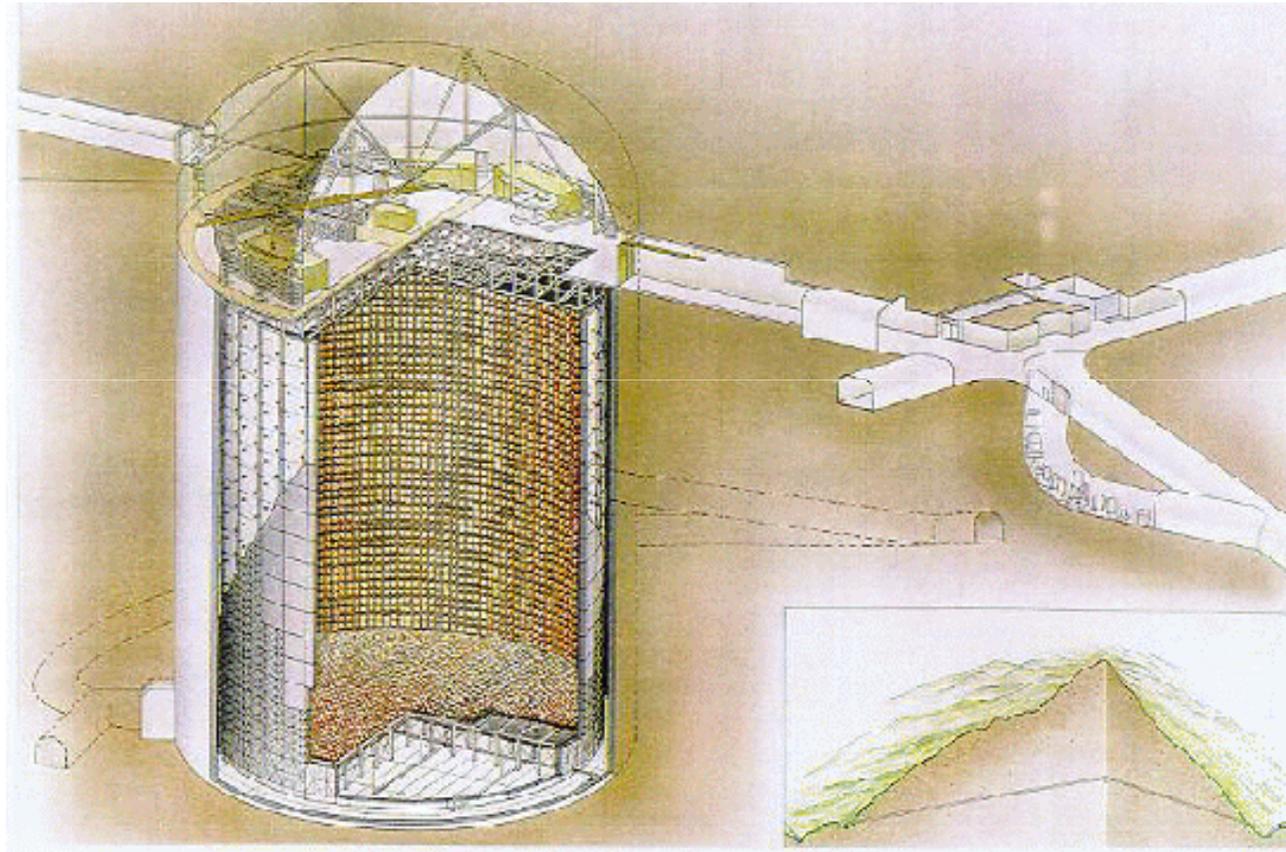
$$\sigma_{\nu_{\mu} p} \neq \sigma_{\nu_e p}$$

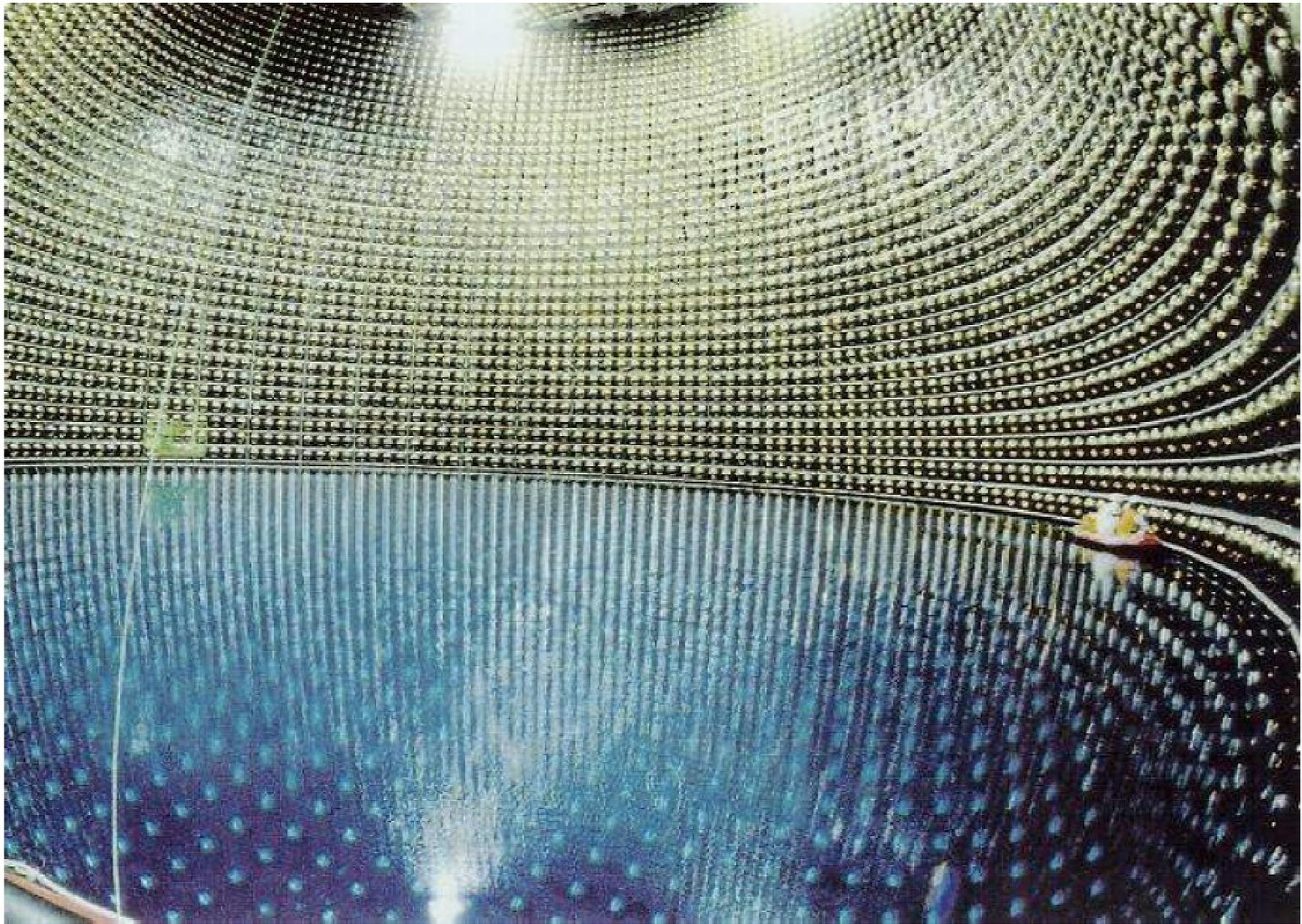


From the AIP-website:

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

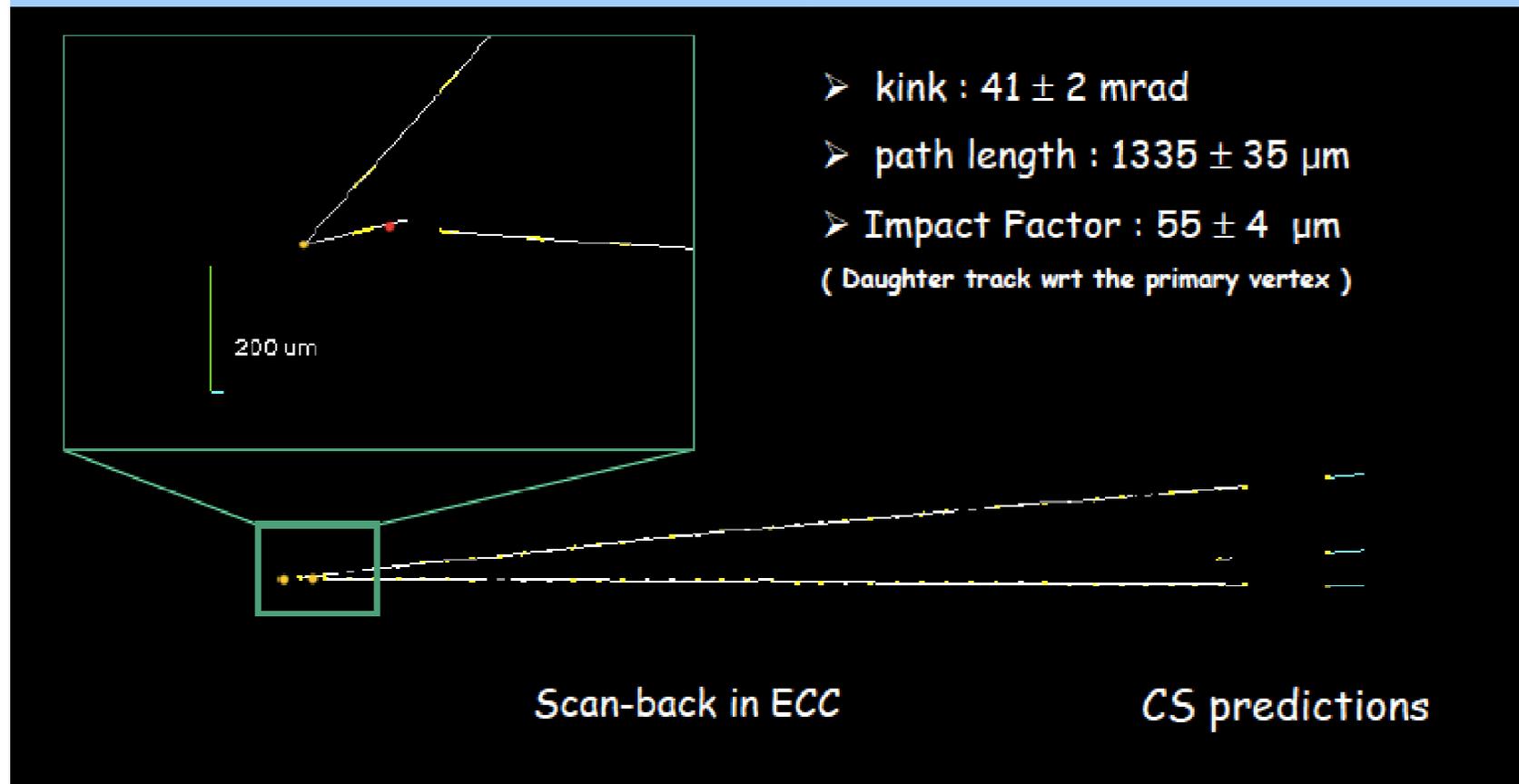
■ Long – Baseline – Experiment: K2K 250 km

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

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

Opera – Experiment

Secondary vertex found during the -scan back procedure



Das 4. Neutrino... ?

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

⇒ wahrscheinlich ist ein Experiment falsch (Kandidat: LNSD)

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

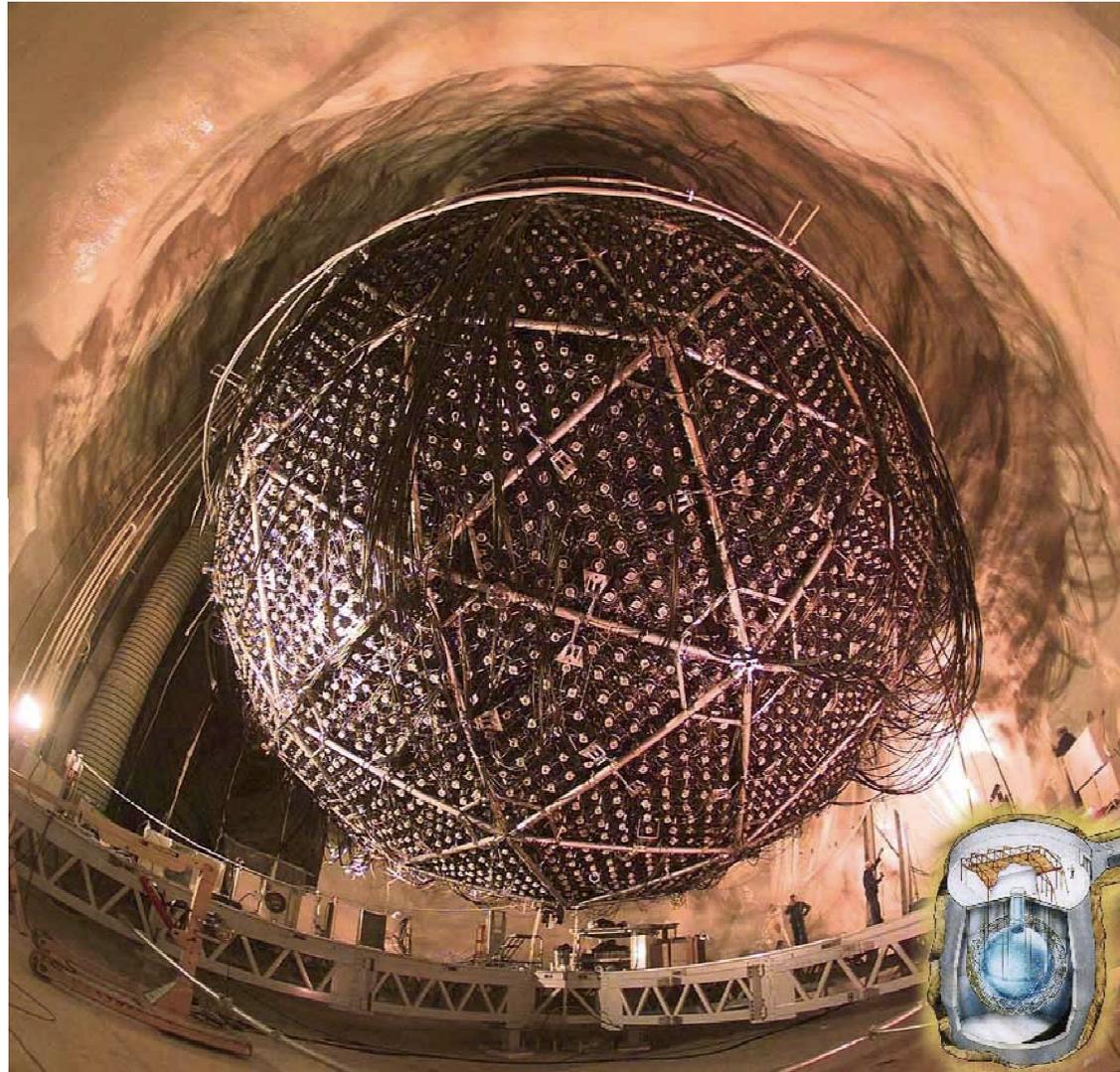
↓
 Konkurrenz KARMEN
 (Kampert)

- **SNO:** Sudbury Neutrino Observatory
 misst Gesamtzahl von solaren Neutrinos mit D₂O (schwerem Wasser)

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

erste Ergebnisse: **totale ν – Rate stimmt mit Theorie überein**

SNO – Experiment



Total Rates: Standard Model vs. Experiment Bahcall-Pinsonneault 2000

