

Neutrinoeigenschaften

Seminarvortrag zur Astro- und Teilchenphysik WS 07/ 08

Sandy Peterhänsel

Betreuer: Prof. Dr. G. Anton / Prof. Dr. K. Rith

14.01.2008

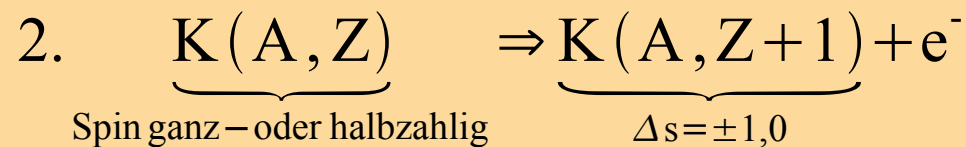
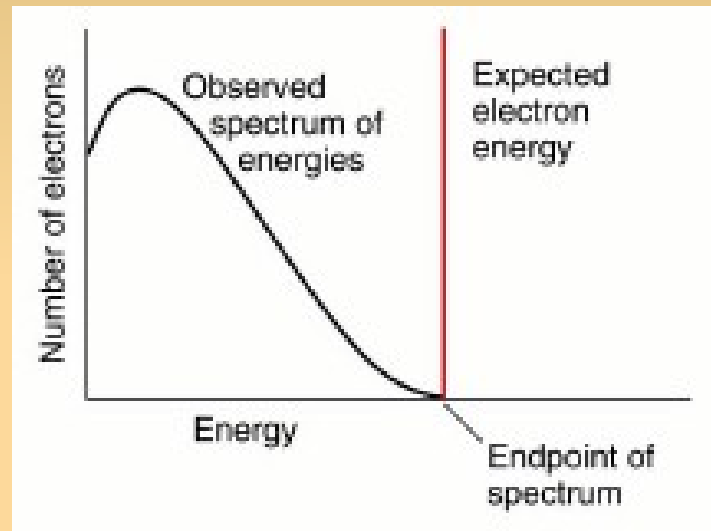
Outline

- Historie und allgemeine Eigenschaften
- Direkte Massenbestimmung
- Indirekte Massenbestimmung –
Neutrinooszillation
- Fazit und Ausblick

Entdeckung des Neutrinos

~1920: β -Zerfall

1. Spektrum ist kontinuierlich



→ Spinerhaltung verletzt

Entdeckung des Neutrinos

1930: Pauli postuliert das "Neutron" um das Spektrum des β -Zerfalls zu erklären

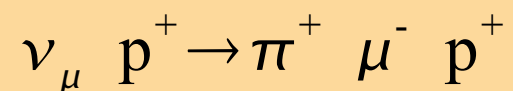
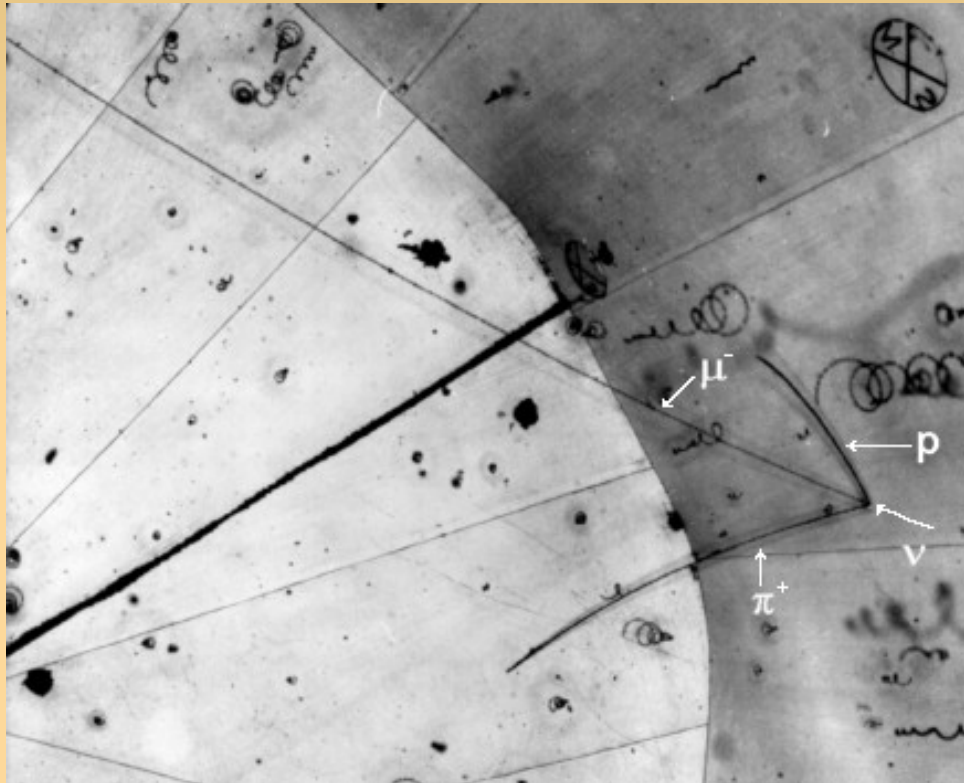
Eigenschaften:

- Nahezu masselos
- elektrisch neutral
- Spin $\frac{1}{2}$
- Sehr kleiner Wirkungsquerschnitt

1956: Experimenteller Nachweis durch Cowan und Reines in Reaktorversuchen

Entdeckung des Neutrinos

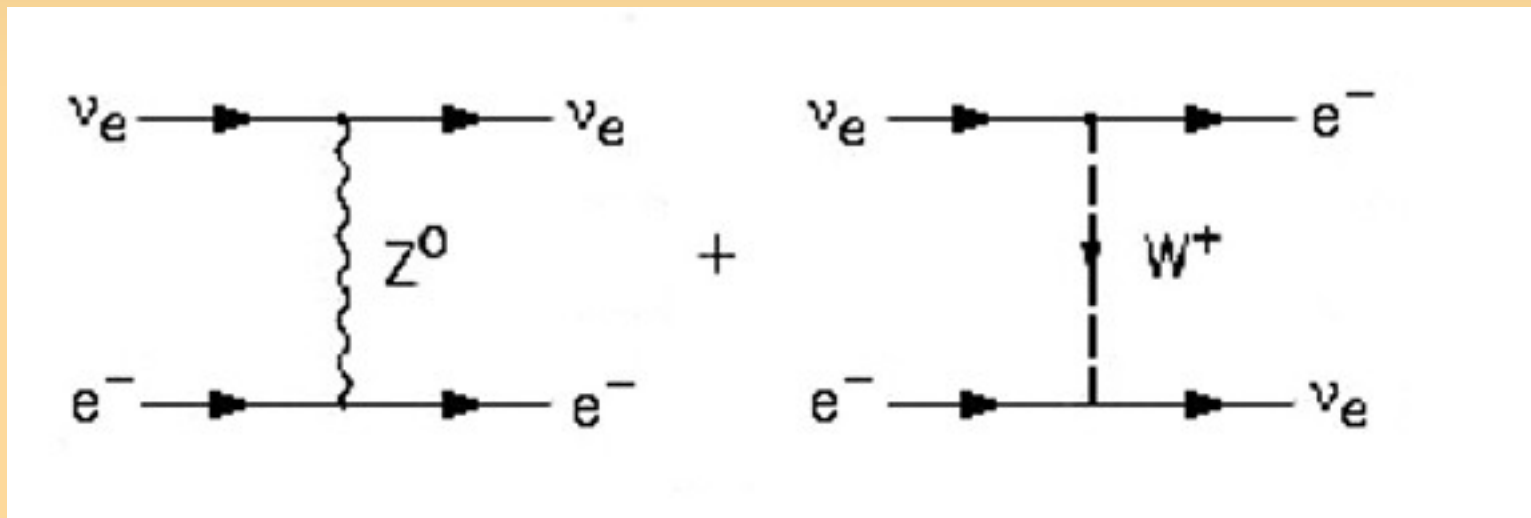
1970: erste Aufnahme eines Neutrinos in einer Blasenkammer



Typische Reaktion

$$\sigma = 9.49 \cdot 10^{-42} \text{ cm}^2 \cdot \frac{E_\nu}{\text{GeV}}$$

⇒ extrem klein

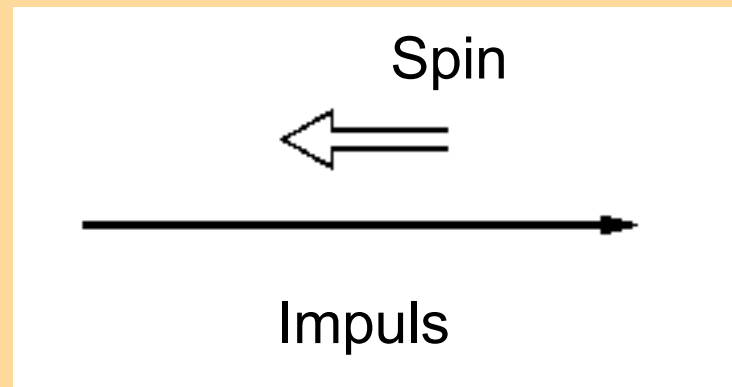


Allgemeine Eigenschaften

Leptonenfamilien:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

⇒ Paritätsverletzung ⇒ Sind immer linkshändig



Allgemeine Eigenschaften

Leptonenfamilien:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}_L$$

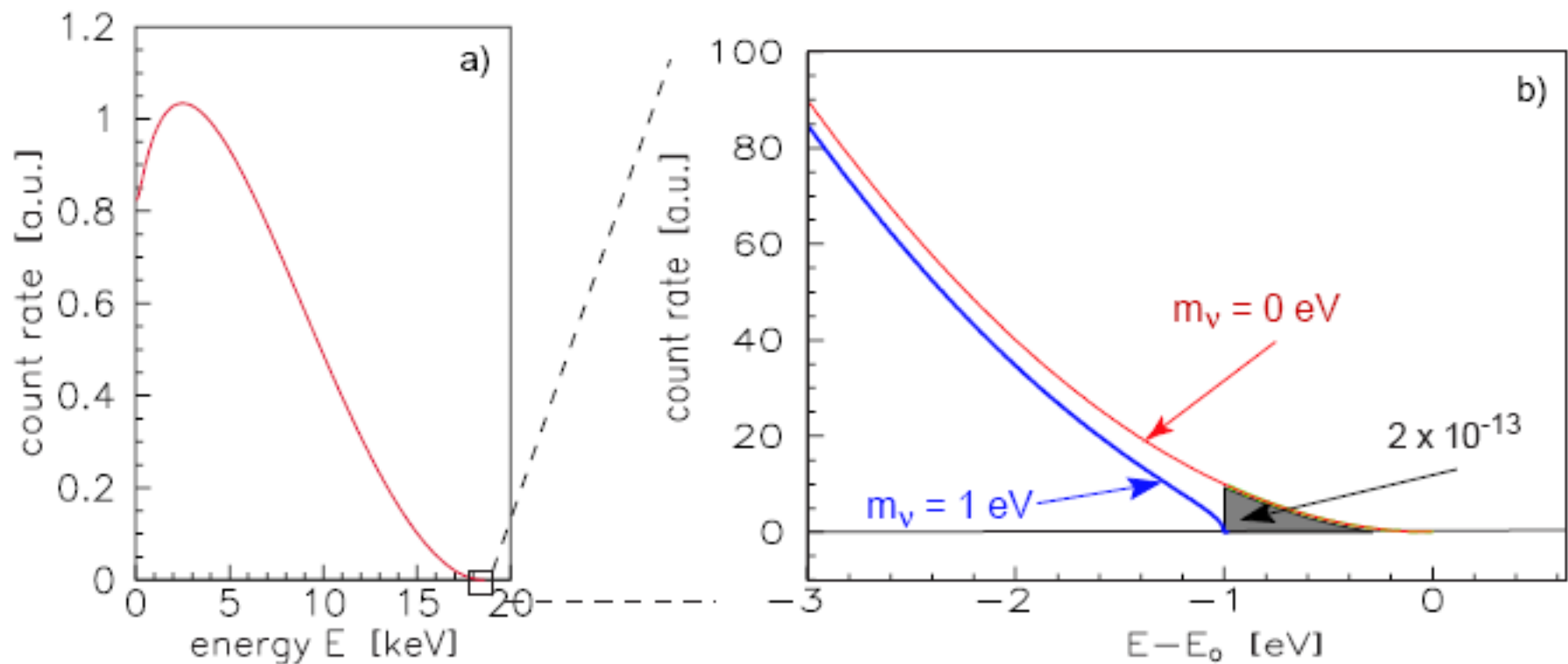
Analog findet man, dass die Antiteilchen alle rechtshändig sind

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}_R \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}_R$$

MAINZ

Das MAINZ-Experiment

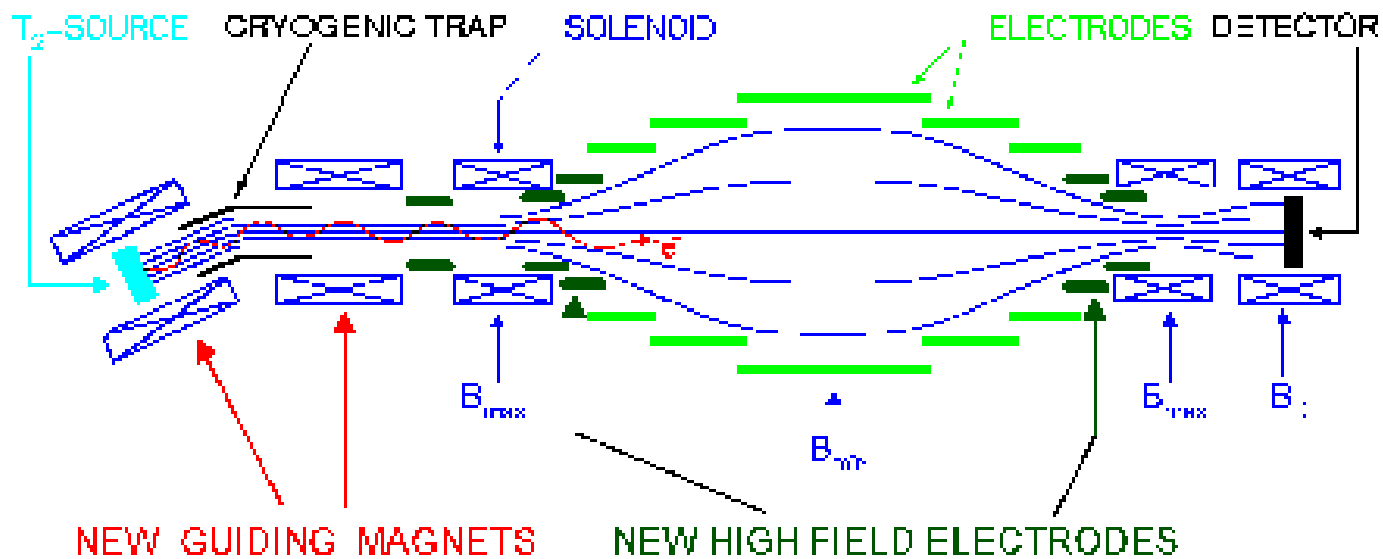
- Vermessung der Endpunktenergie des Tritium β Zerfalls



MAINZ

Messung:

The Mainz setup since 1997



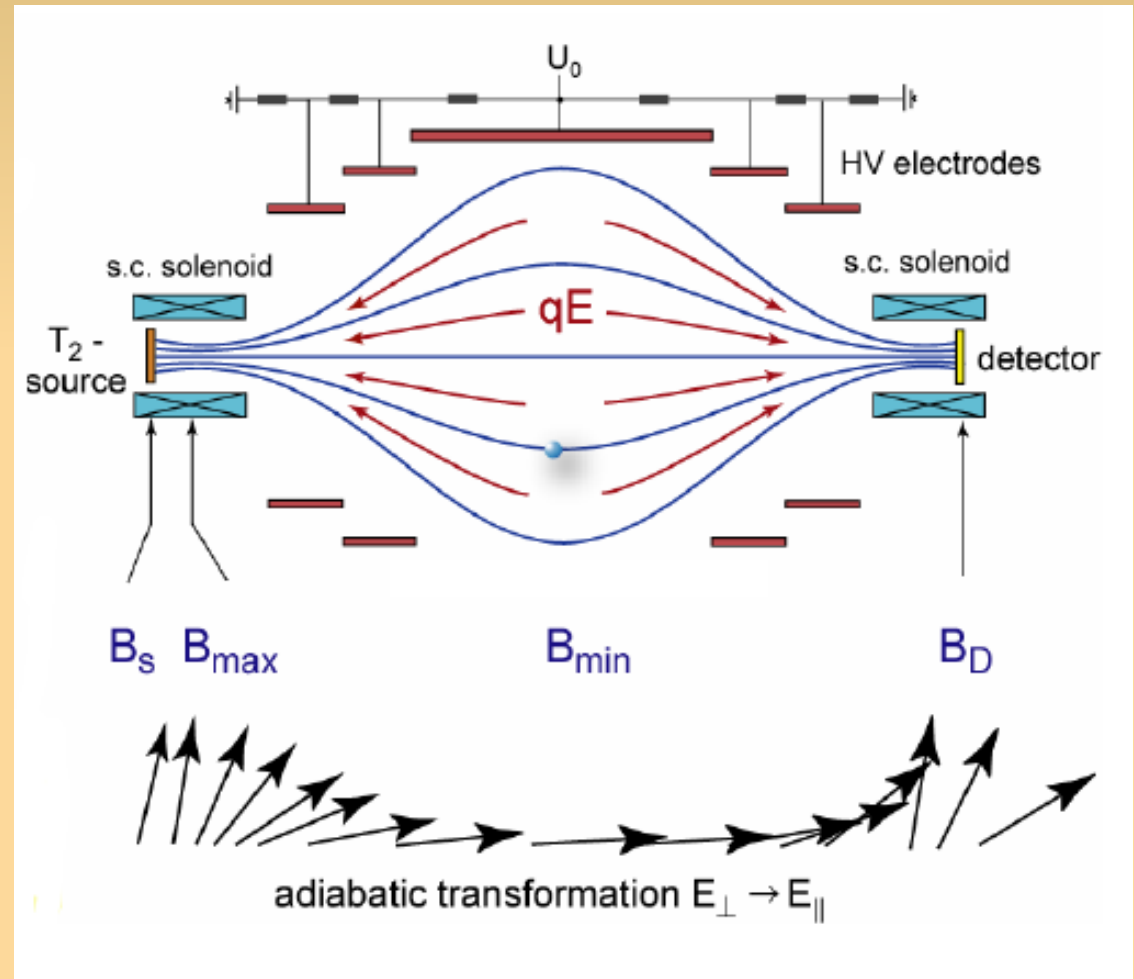
MAINZ

MAC-E: (Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter)

- Elektronen werden magnetisch in eine zyklische Bewegung um die Magnetfeldlinien geführt
- Variables E-Feld
→ Potentialschwelle
- Energieauflösung: $\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}}$

$$\vec{F} = (\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} + q\vec{E}$$

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const.}$$



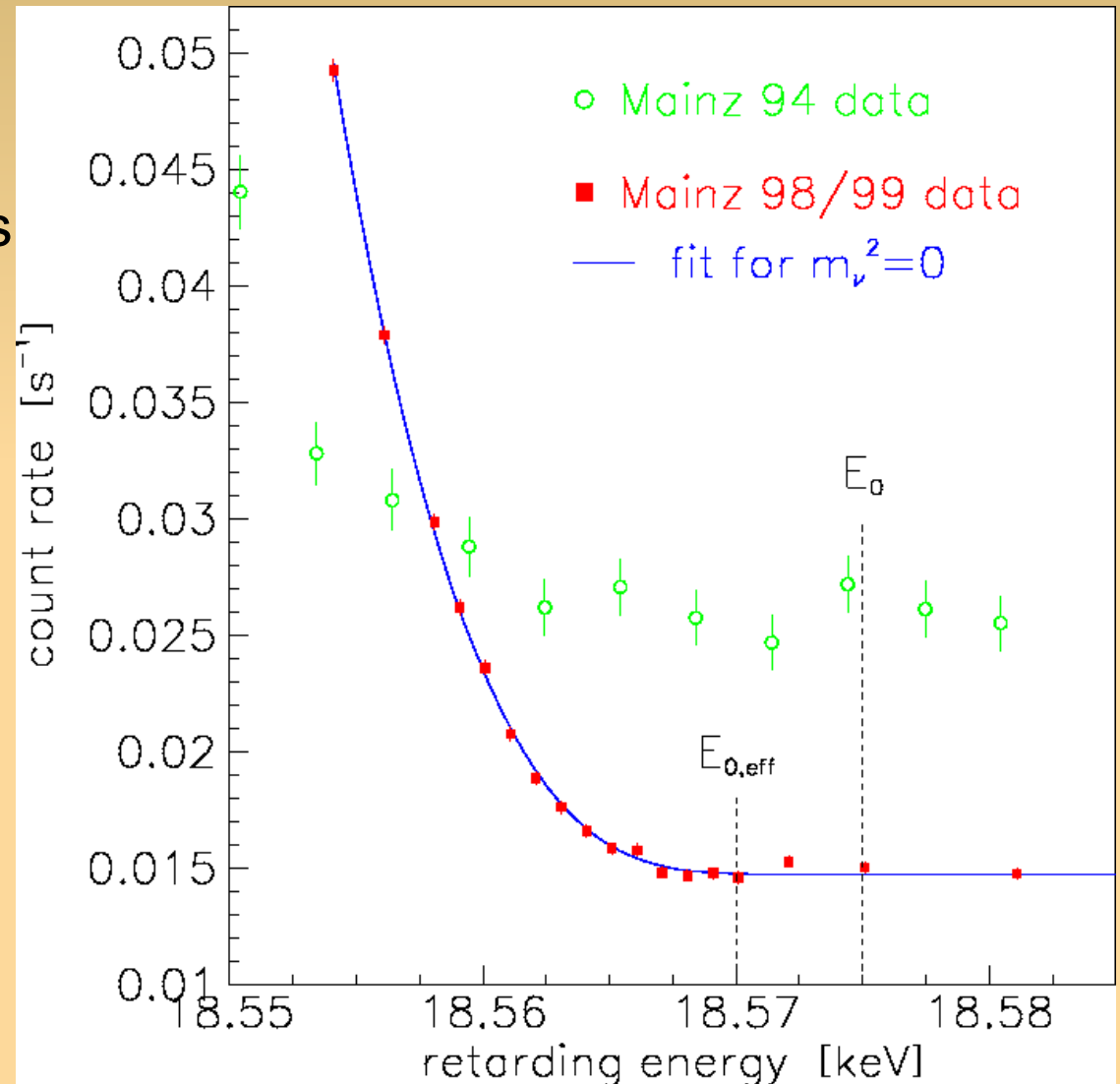
MAINZ

Ergebniss:

Berücksichtige nur die letzten
70 eV unterhalb des Endpunktes
des β Spektrums

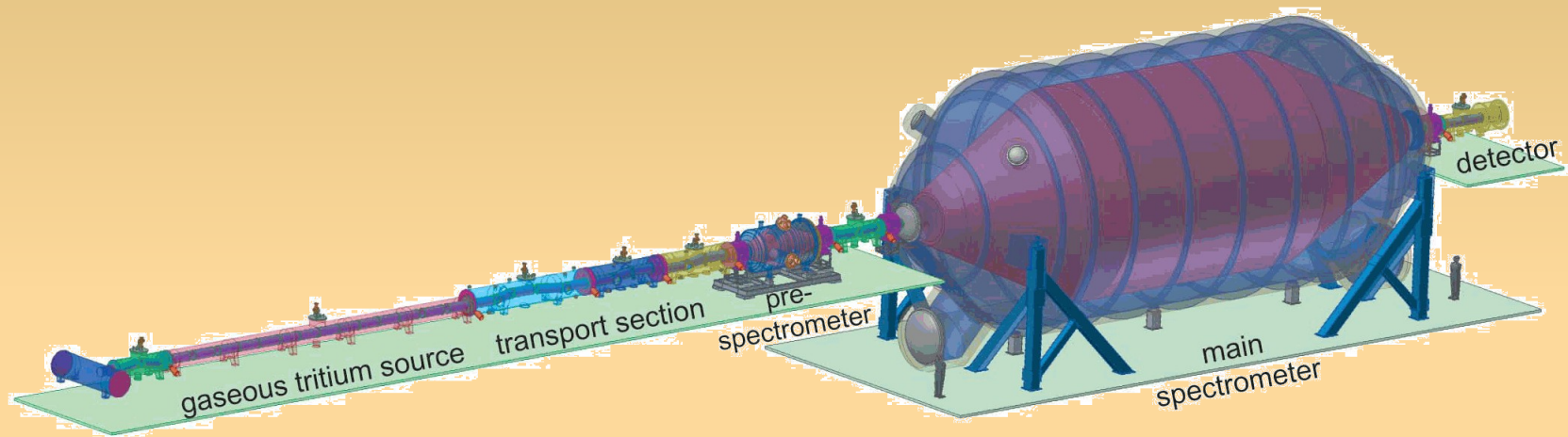
$$m_\nu^2 c^4 = -1.6 \pm 2.5_{\text{stat}} \pm 2.1_{\text{sys}} \text{ eV}^2$$

$$\Rightarrow m_\nu < 2.2 \text{ eV}/c^2 \quad (95\% \text{ CL})$$



KATRIN

KaTriN - Experiment:



- noch im Aufbau
- Windowless Gaseous Tritium Source 10 m lang, 70 mm Durchmesser
Gefüllt mit Tritiumgas konstanter Temperatur und damit
konstante Zerfallsrate ($9.5 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$)

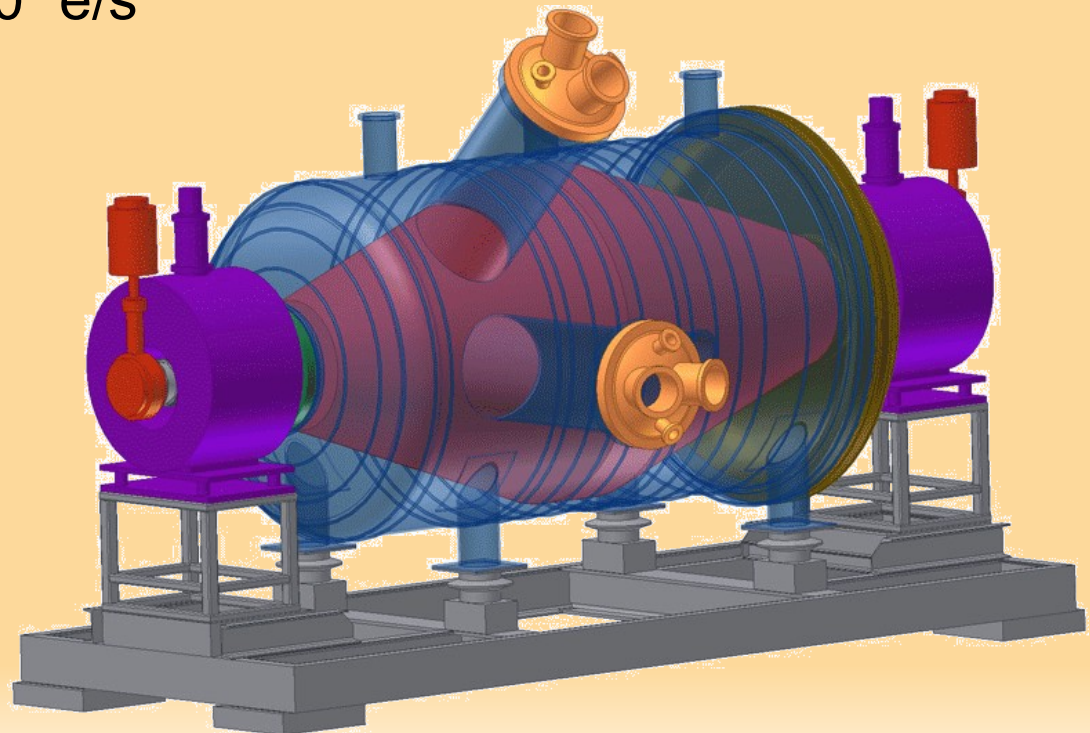
KATRIN

- Transport Sektion

Tritiumgasmoleküle und Elektronen trennen und Elektronen zum Spektrometer leiten (Pumpen und supraleitende Magnete)

- Pre-Spektrometer

Filtert Elektronen mit Energien < 18.4 keV heraus
 $\sim 5 \cdot 10^{10}$ e/s \rightarrow $\sim 10^3$ e/s



KATRIN



KATRIN



KATRIN

- Main Spektrometer

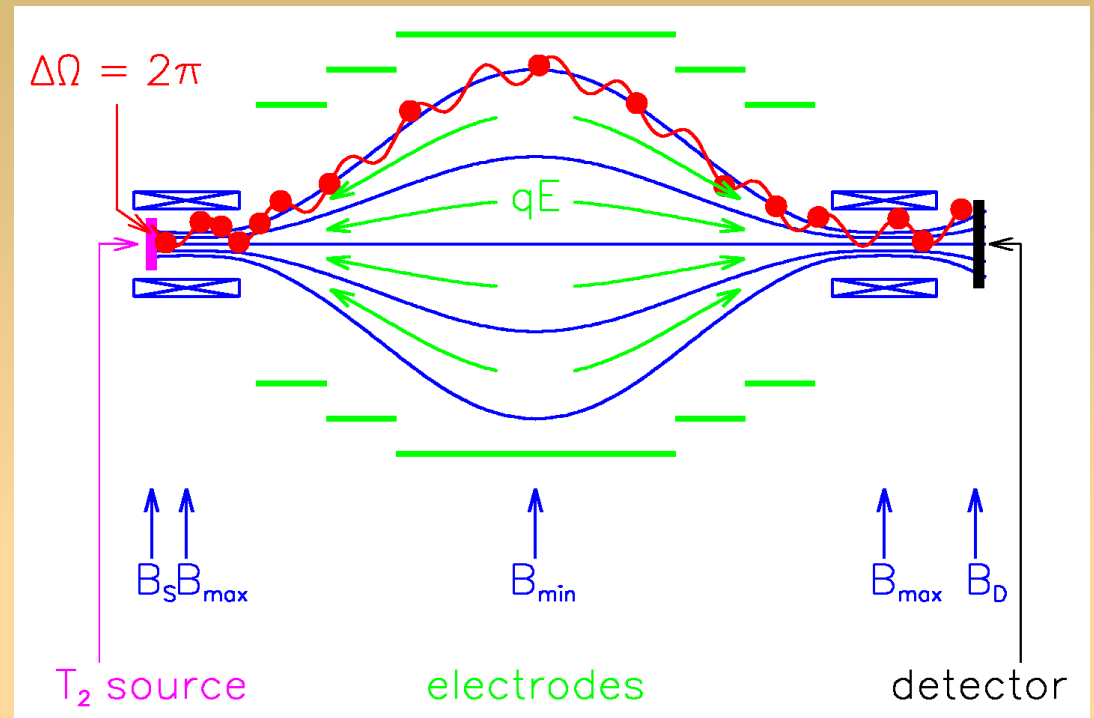
Länge: 23 m

Durchmesser: 9.8 m

Innendruck: 10^{-11} mbar

Betriebstemp.: -20°C

MAC – E Filter



- Detektor

Detektion der höchstenergetischen Elektronen mit Siliziumstreifendetektoren

Man erreicht eine Massensensitivität von bis zu 0.3 eV!!

Massenbestimmung von ν_μ und ν_τ

Bestimmung aus Zerfällen:

$$\begin{array}{ll} m(\nu_\mu): \text{ Pion-Zerfälle:} & \pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \\ m(\nu_\tau): \text{ Hadronische } \tau\text{-Zerfälle:} & \tau^+ \rightarrow 5 \pi^+ \nu_\tau \end{array}$$

$$m(\nu_\mu) < 170 \text{ keV } 90 \% \text{ CL}$$

$$m(\nu_\tau) < 18 \text{ MeV } 90 \% \text{ CL}$$

Indirekte Massenbestimmung

Bisher:

Betrachtete Flavoureigenzustände sind auch Masseneigenzustände

Jetzt:

Flavoureigenzustände sind Überlagerung der Masseneigenzustände
Flavoureigenzustände können ineinander übergehen

Nur möglich, wenn: - nicht alle Neutrinos die gleiche Masse haben,
insbesondere nicht alle masselos (δm^2)
- Leptonflavorzahl nicht streng erhalten



Nicht mit dem bisherigen Standardmodell vereinbar

Indirekte Massenbestimmung

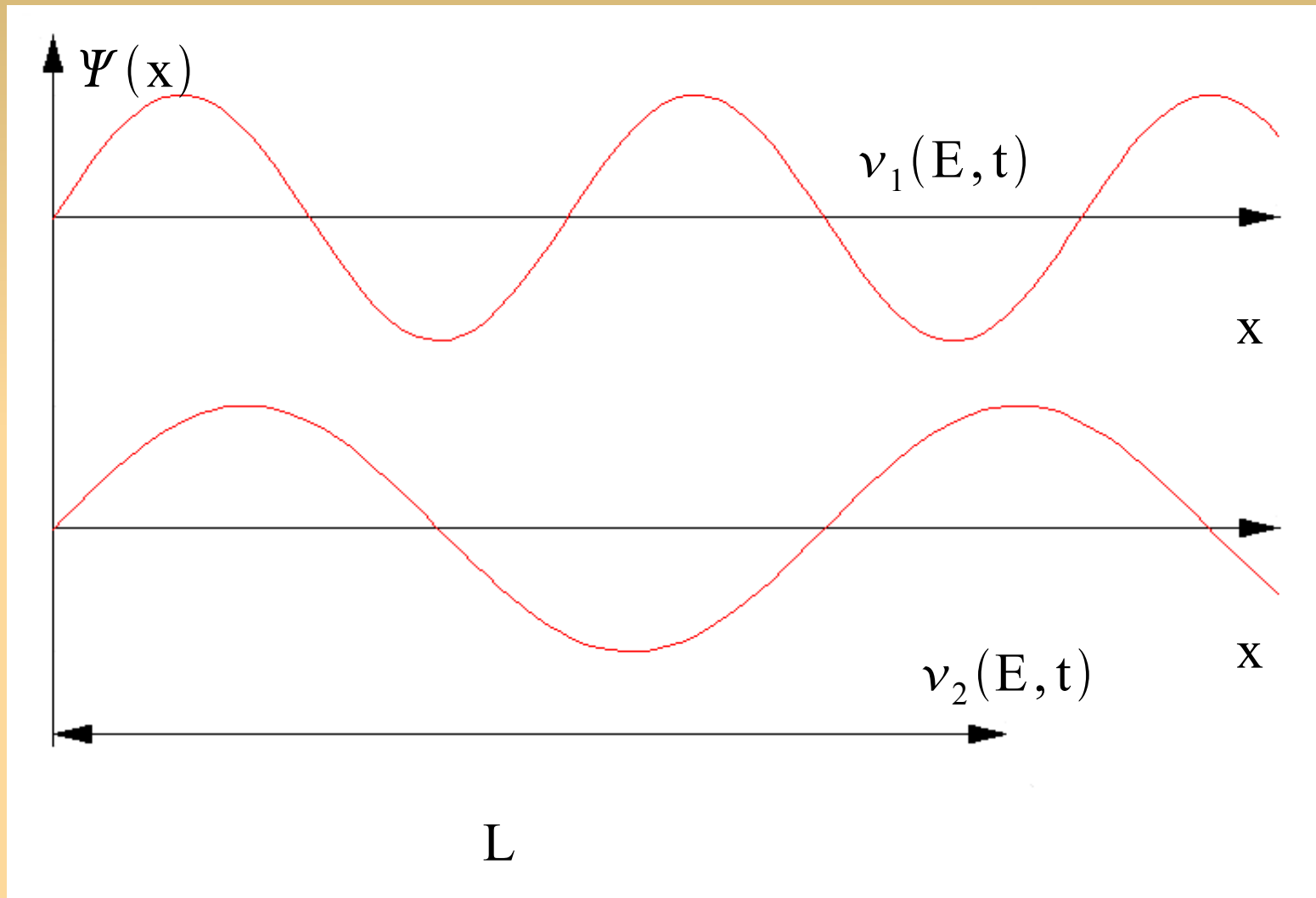
Flavoureigenzustände: Zustände, die in Reaktionen der schwachen WW entstehen

$$e^- + p^+ \rightarrow n + \nu_e \quad L_a |\nu_b\rangle = \delta_{ab} |\nu_b\rangle$$

Masseneigenzustände: Propagieren im Raum mit wellenförmiger Wahrscheinlichkeitsamplitude

$$|\nu_i(\mathbf{x}, t)\rangle = e^{i(\mathbf{p}\cdot\mathbf{x} - E\cdot t)} |\nu_i\rangle \quad \langle \nu_i | M | \nu_j \rangle = \delta_{ij} m_i$$

Indirekte Massenbestimmung



Phasenunterschied nach Propagationslänge L

Indirekte Massenbestimmung

- Flavour- und Masseneigenzustände sind durch unitäre Transformationen miteinander verknüpft
- analog zur CKM Matrix erhält man die PMNS-Matrix:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- Flavourzustände können ineinander übergehen:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle$$

Indirekte Massenbestimmung

Vereinfachtes Beispiel für 2 Eigenzustände:

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

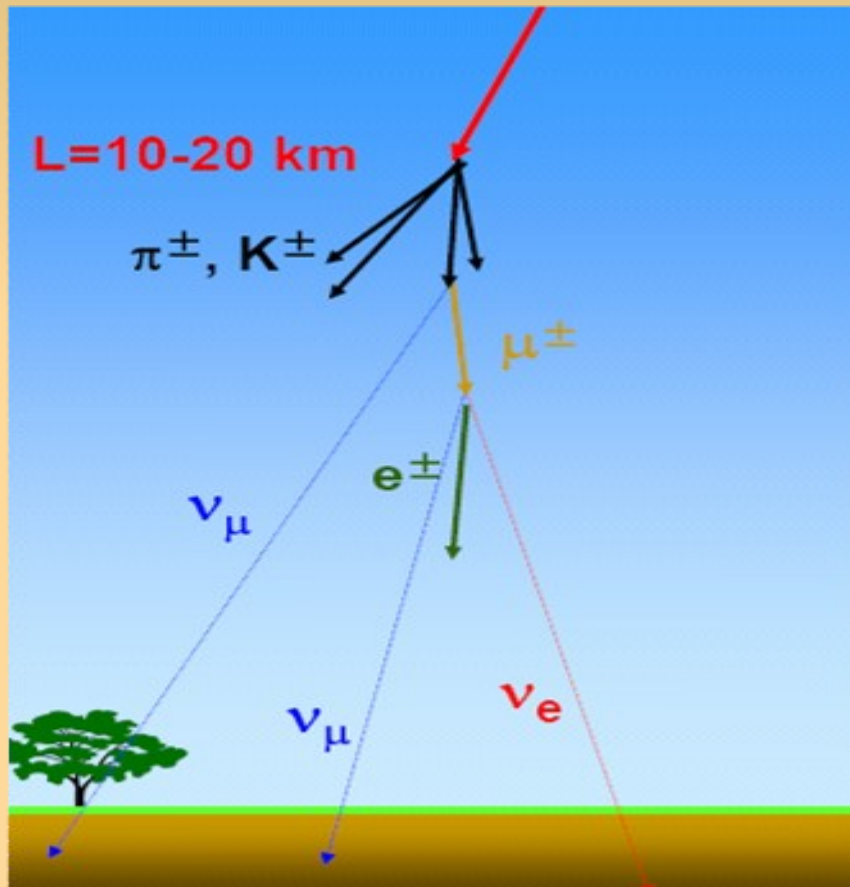
Übergangswahrscheinlichkeit $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \left| \langle \nu_e | \nu_\mu \rangle \right|^2 = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2 \left(\frac{|m_1^2 - m_2^2| c^3 L}{4 E_\nu \hbar} \right)$$

durch Messung von $\Delta m_{ij}^2 := |m_i^2 - m_j^2|$ und θ
lassen sich Ausschlussdiagramme erstellen

Atmosphärische Neutrinos

1998: Erster Hinweis auf Neutrinooszillation durch atmosphärische Neutrinos



Zerfälle der kosmischen Strahlung

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \\ &\rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e\end{aligned}$$

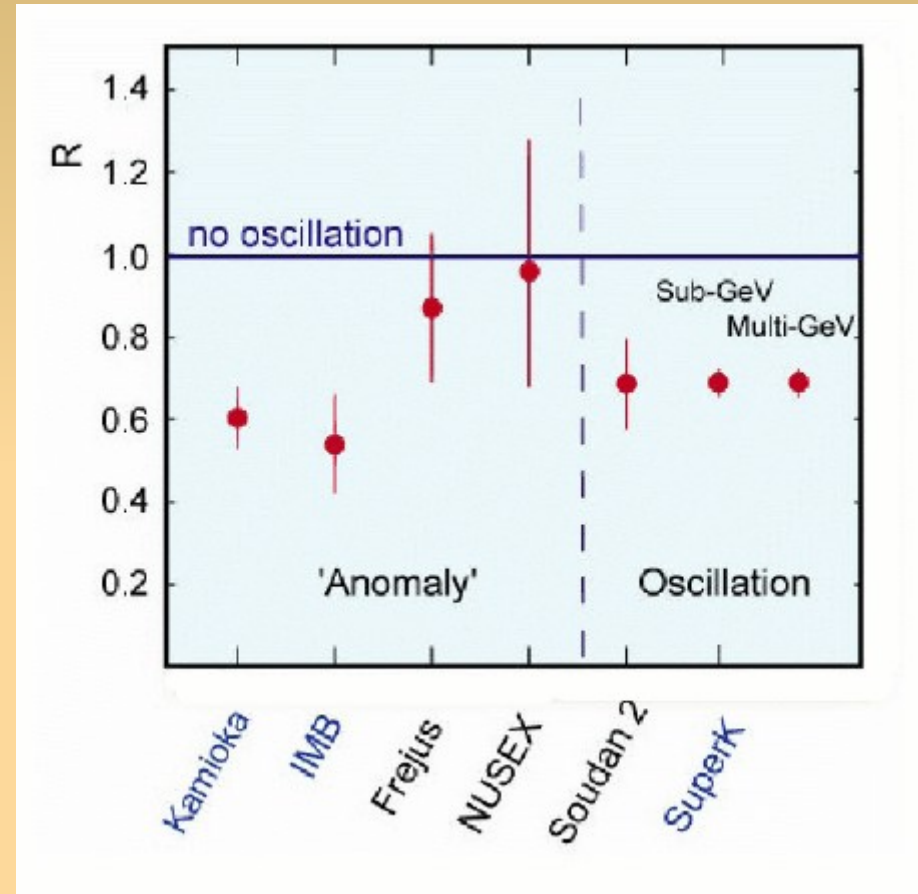
$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- \nu_\mu \\ &\rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\#\nu_\mu}{\#\nu_e} \approx 2$$

Atmosphärische Neutrinos

$$R = \frac{\text{gemessenes Verhältnis}}{\text{erwartetes Verhältnis}}$$

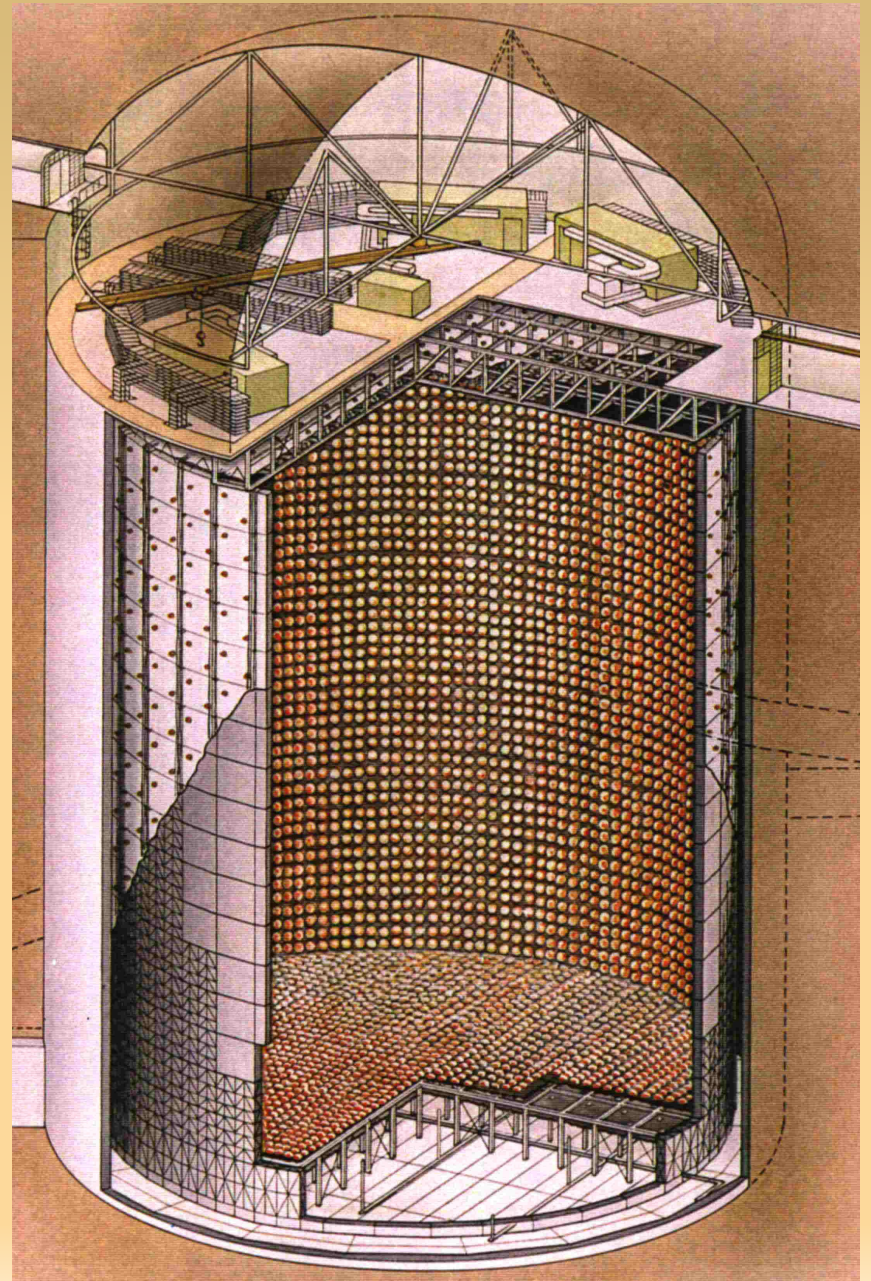
- zu große Abweichungen
ν's müssen verschwinden



Super-Kamiokande

Super-Kamiokande Experiment:

- 1 km unter der Oberfläche
- 50.000 t hochreines Wasser
- 11.200 Photomultiplier
- Detektion durch Čerenkovlicht
- Schwellenenergie 5 MeV



Super Kamiokande

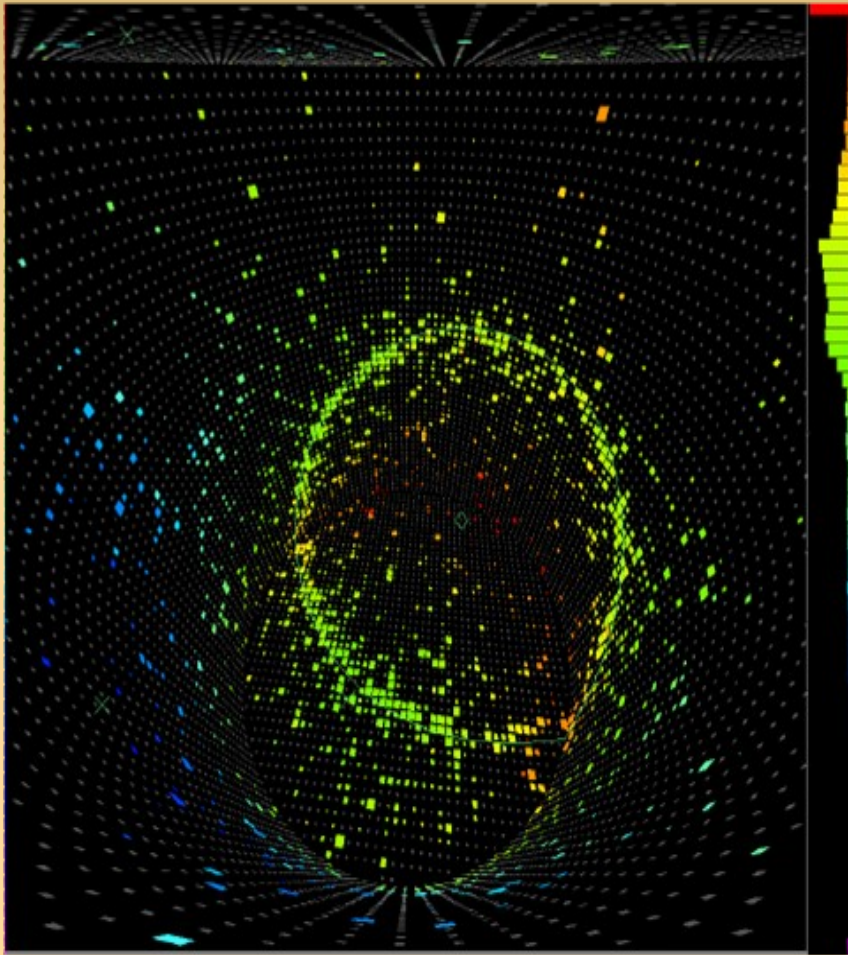
- Ereignisse:**
- Neutrino streut an e^-
beschleunigtes e^- sendet Čerenkov-Strahlung aus
 - Neutrino wechselwirkt mit Atomkernen
erzeugt je nach Flavour e^- oder μ^-

$$\nu_1 e^- \rightarrow \nu_1 e^-$$

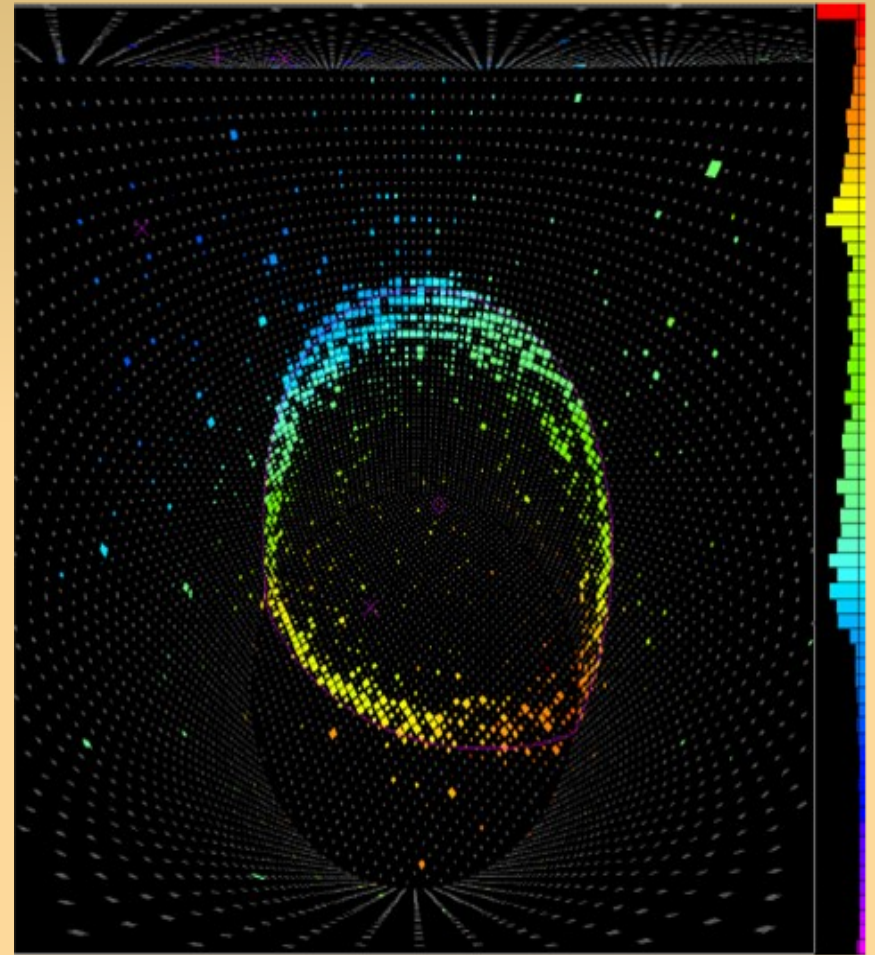
$$\nu_1 p \rightarrow l^- X$$

- Unterscheidung zwischen e und μ Flavour
durch Form des Čerenkov-Kegels

Super Kamiokande



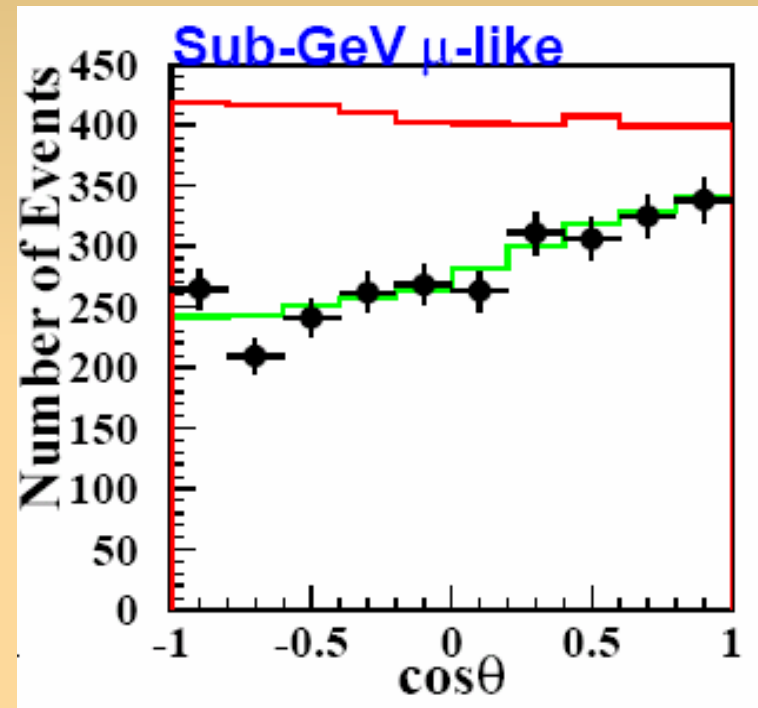
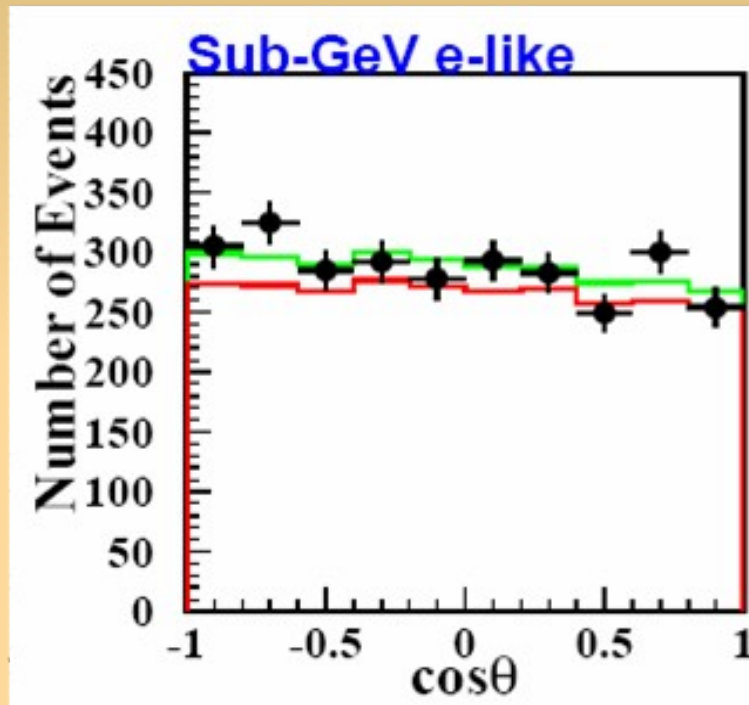
Elektron



Myon

Super Kamiokande

Ergebnisse:



ν_e -Fluss stimmt mit Simulation überein kein Überschuss

ν_μ -Fluss zeigt Defizit \Rightarrow Oszillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

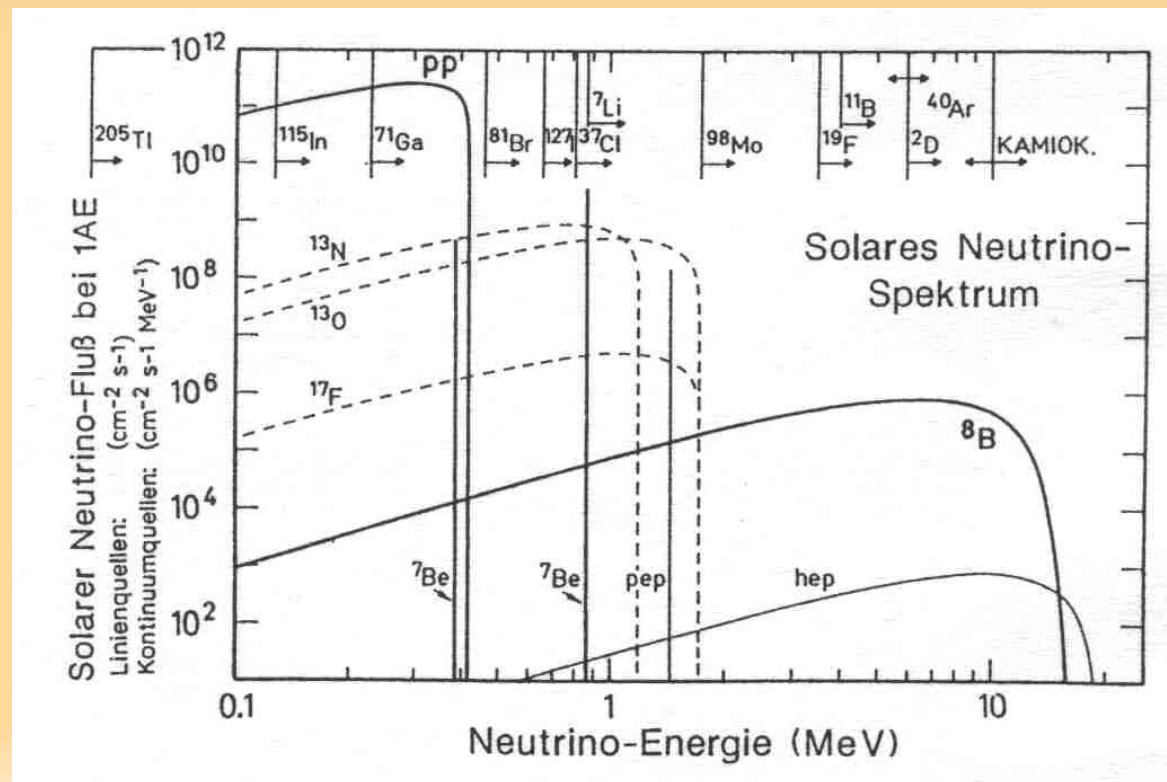
Solare Neutrinos

Solare Neutrinos:

durch verschiedene Fusionsprozesse:



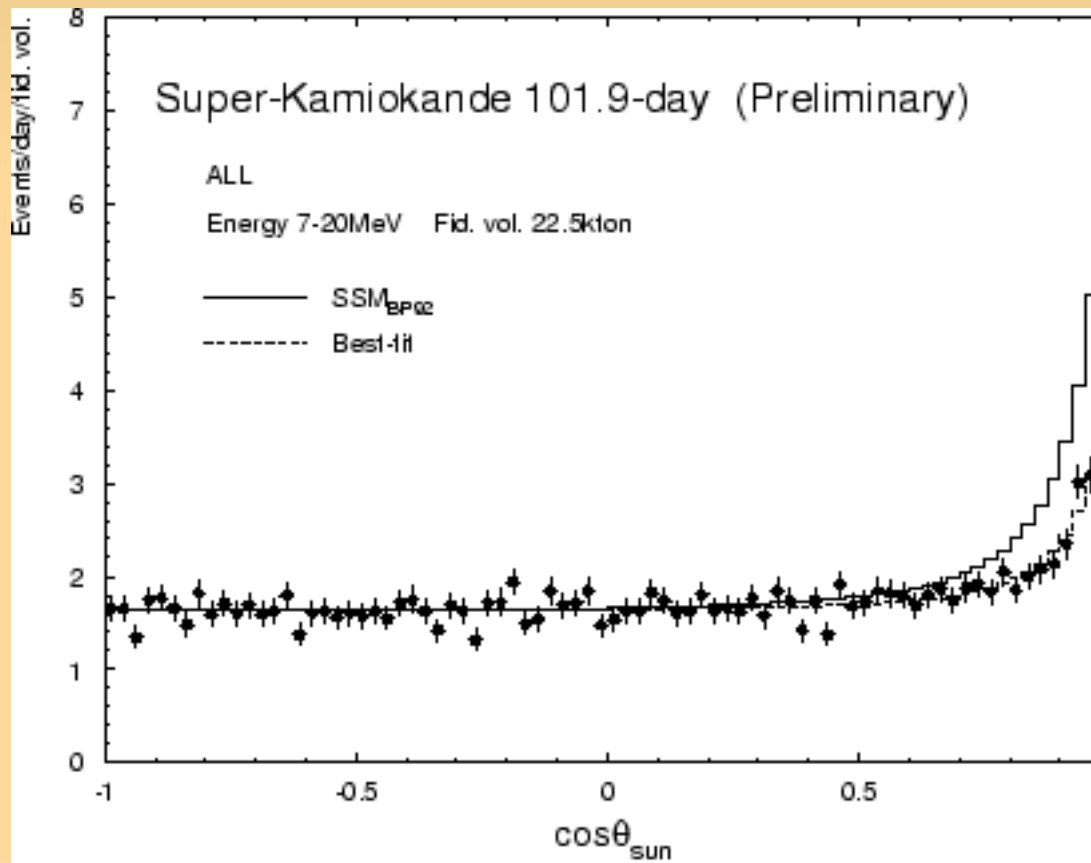
Spektrum der Energieverteilung:



Solare Neutrinos

Problem: Neutrino-Defizit

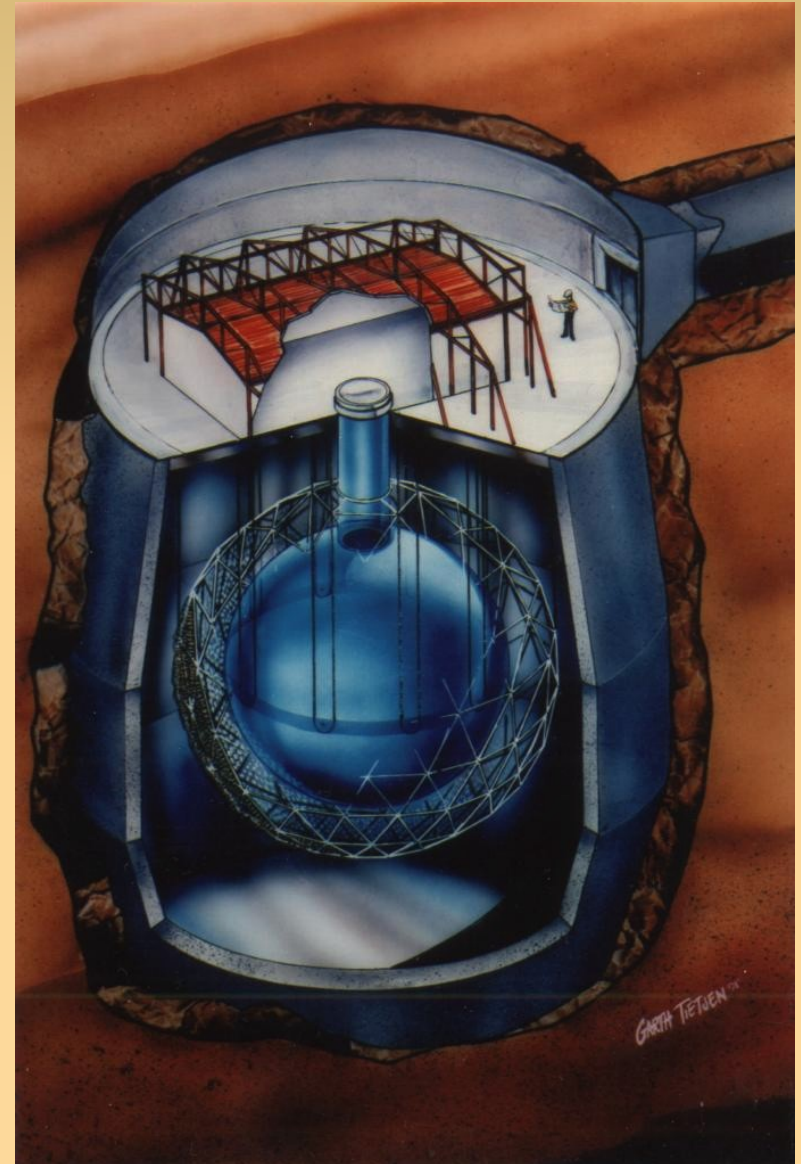
- mit radiochemischen Experimenten sowie Wasser-Čerenkovdetektoren wurde nur $\approx 1/3$ des erwarteten Neutrino­flusses gemäß dem Standard-Sonnen-Modell (SSM) gemessen



SNO

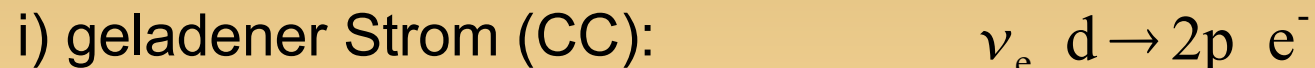
SNO: Sudbury Neutrino Observatory

- 10.000 t D²O
- 9600 Photomultiplier
- 7.400 t Wasser als Abschirmung
- Tiefe: 2700m
- Detektion über Čerenkov-Licht



SNO

Reaktionen:



da i) nur von ν_e durchgeführt wird, die anderen Reaktionen aber Flavour blind sind \Rightarrow Unterscheidung zwischen Gesamt- und Elektronneutronfluss möglich

SNO

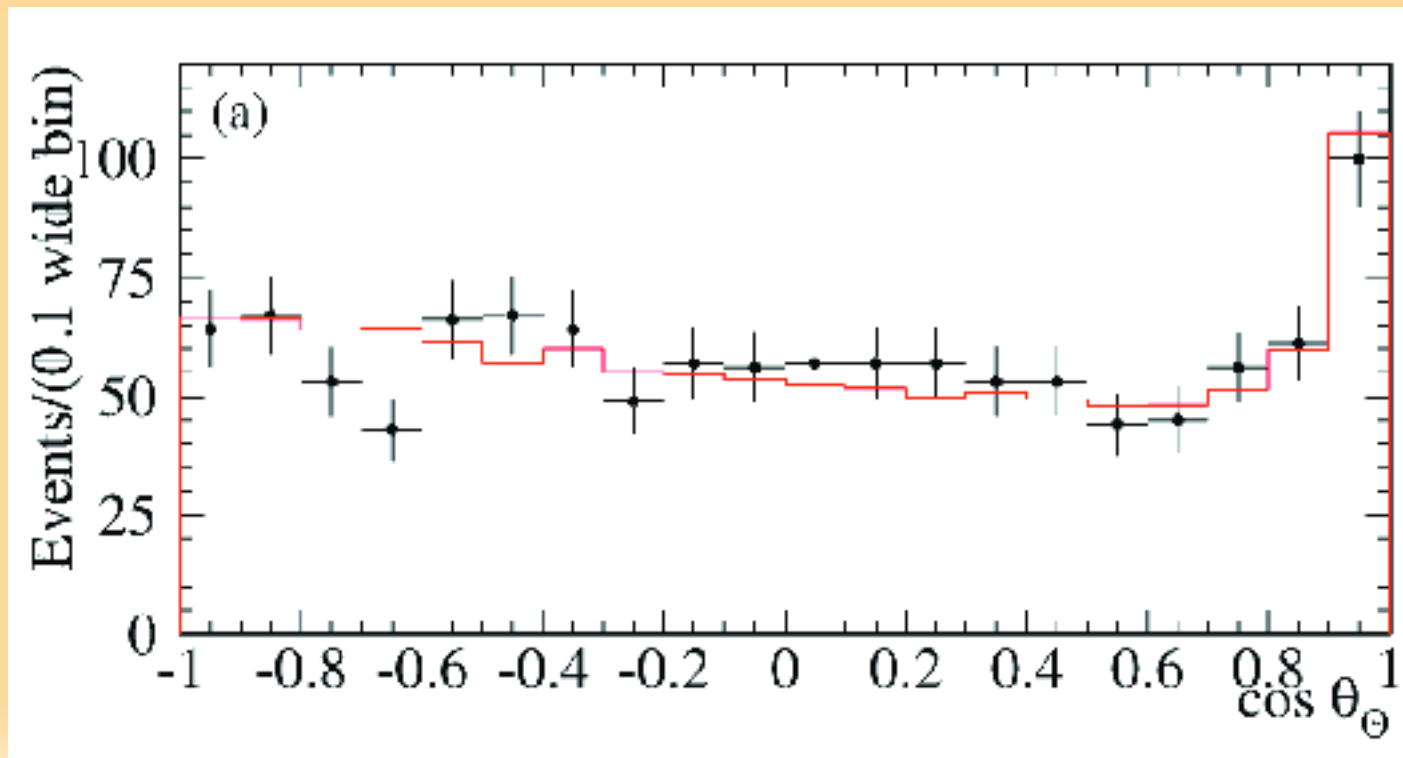
Ergebnisse:

$$\Phi_{\text{CC}} = \Phi(\nu_e) = 1.75 \pm 0.07 \begin{matrix} +0.12 \\ -0.11 \end{matrix}$$

$$\Phi(\nu_1) = 5.44 \pm 0.99$$

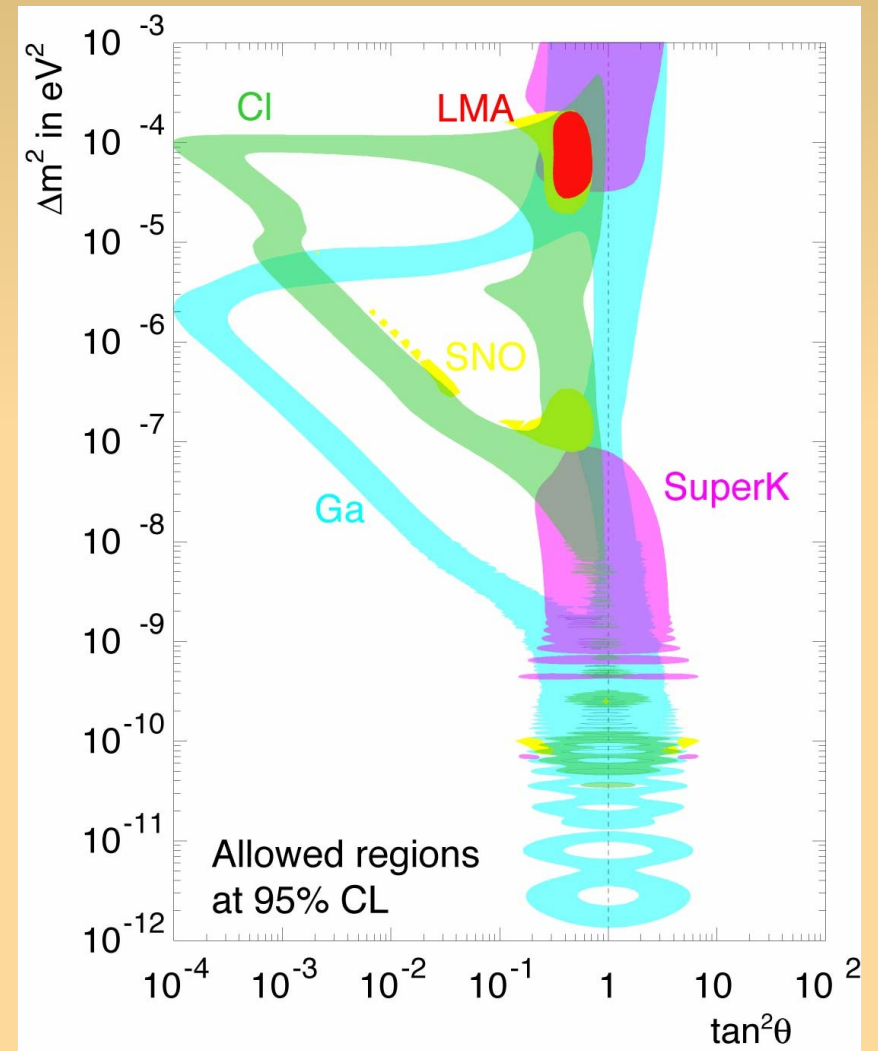
$$\Phi_{\text{SSM}} = 5.05 \begin{matrix} 1.01 \\ 0.81 \end{matrix}$$

$$[\Phi] = 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}}$$



SNO

- Solares Neutrino Defizit erklärt
- $\Delta m^2 \approx 8.0 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ $\tan^2 \theta \approx 0.45$



Reaktor-Neutrinos

→ Gibt es Oszillationen auch bei Reaktorneutrinos?

- aus Ergebnissen der solaren Neutrinos $\Delta m^2 = 8.0 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$; $\theta = 33.9^\circ$

$$L(\text{m}) = \frac{2.48 \cdot E_\nu [\text{MeV}]}{\Delta m^2 [\text{eV}^2]} \quad \text{mit } E \approx 5 \text{ MeV}$$

$$L(\text{m}) \approx 150 \text{ km}$$

→ Japan ideal

KamLAND

Kamioka Liquid Scintillator Anti Neutrino Detector

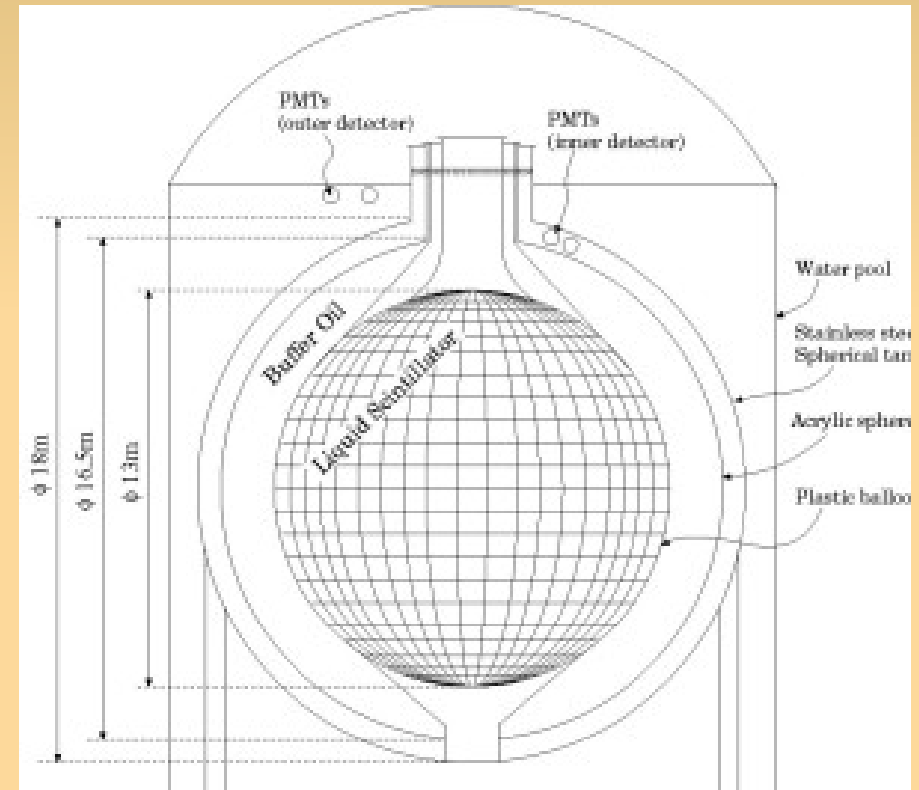
- Messung des Neutrinoflusses von Kernkraftwerken in Japan

- Liquid Scintillator:

80% $C_{12}H_{26}$

20% C_9H_{12}

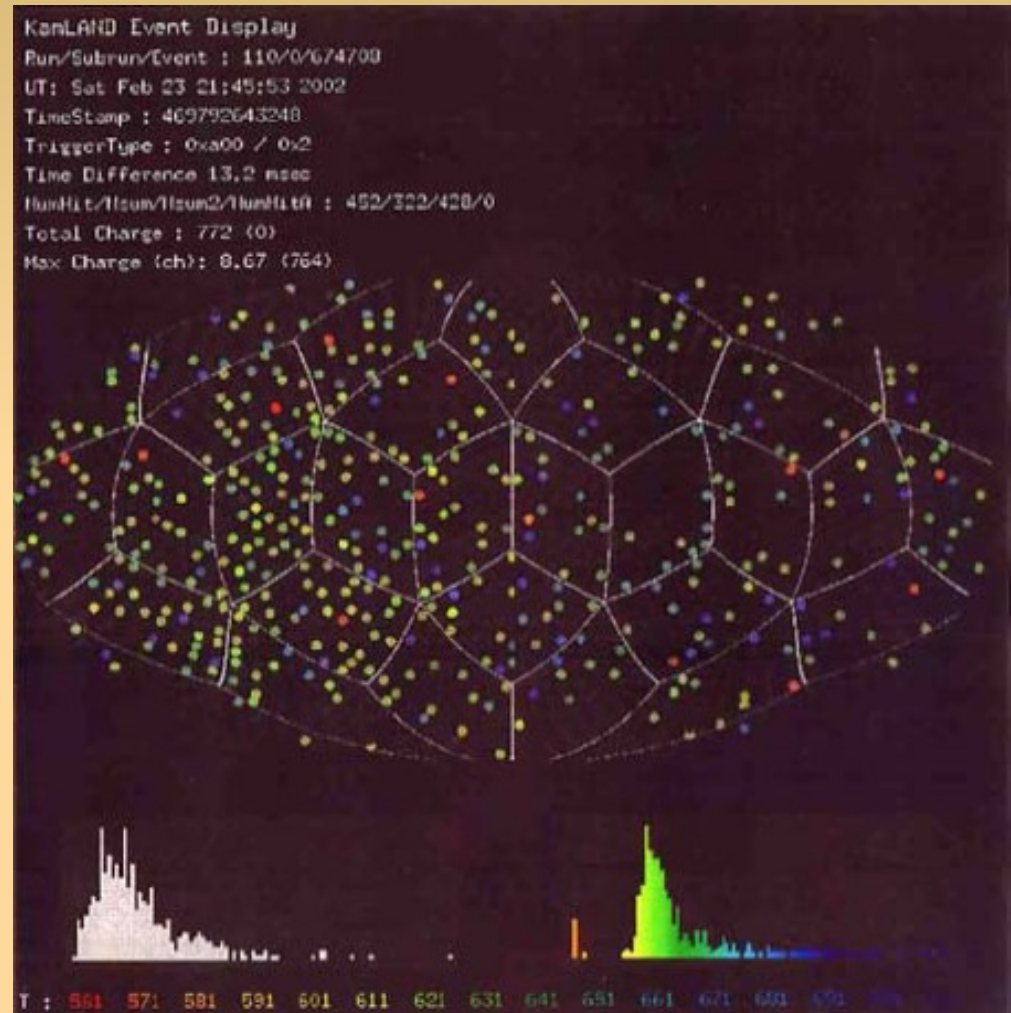
1.52 g/liter PPO (2,5-Diphenyloxazole)



KamLAND

Ereignisse:

- 1. Nachweis-Reaktion: $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$
- $E_{\nu} \approx 0.77 \text{ MeV}$
- 2. Zeitverzögerte Reaktion ($200\mu\text{s}$)
 $n p \rightarrow d \gamma$
- $E_{\gamma} \approx 2.2 \text{ MeV}$
- fast identische Spektren, aber feste Zeitdifferenz
→ ident. Ereigniss

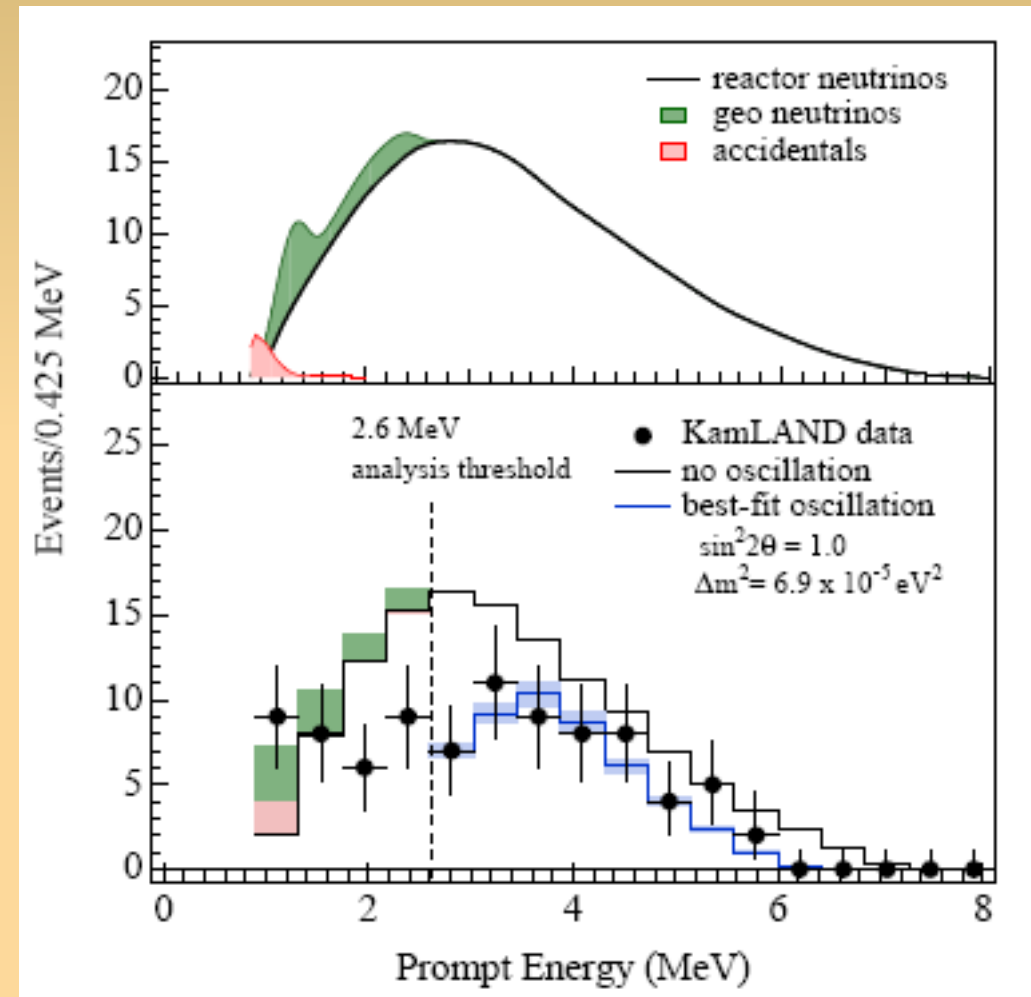


KamLand

Ergebnisse:

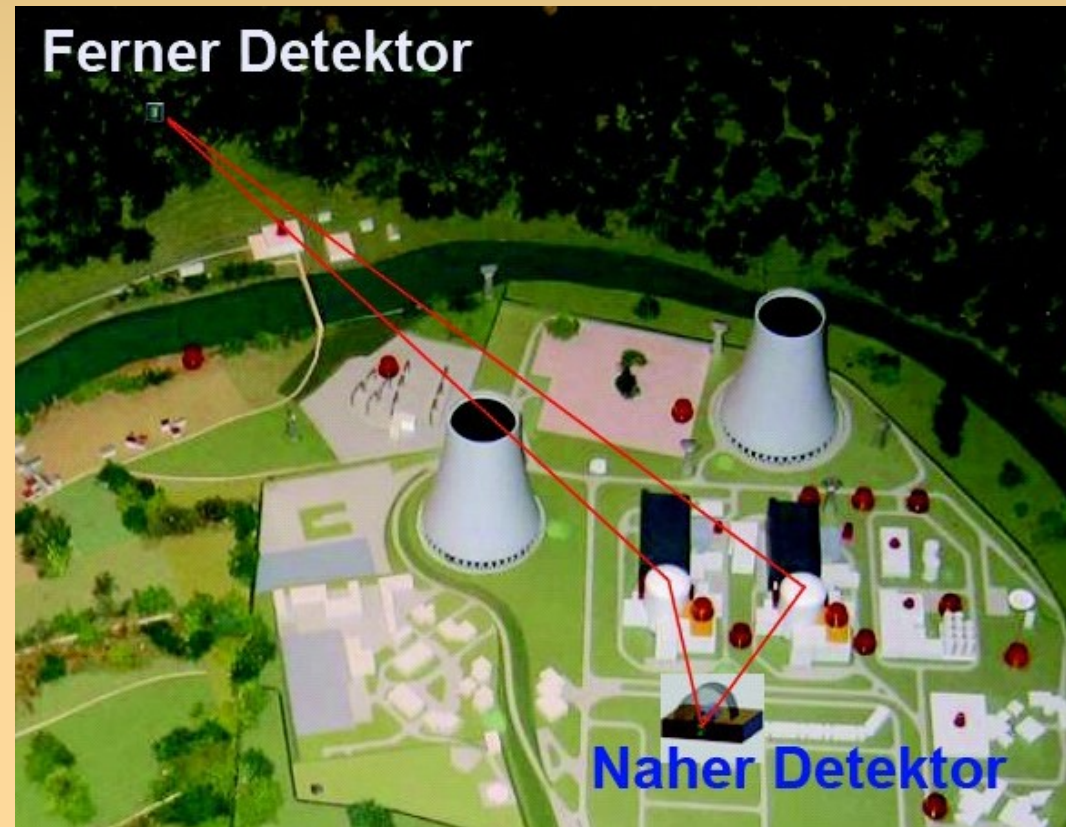
$$\frac{N_{\text{beobachtet}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{erwartet}}} = 0.611 \pm 0.085 \pm 0.041$$

- beobachtet Neutrino-Oszillation auf der Erde



Double CHOOZ

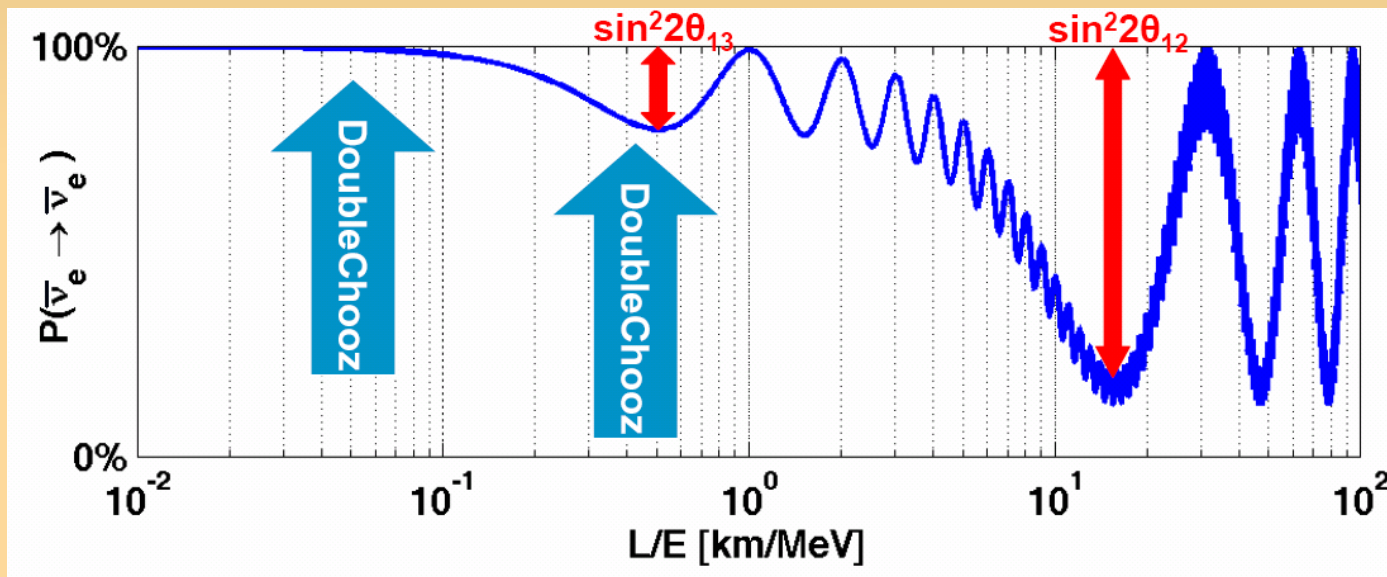
- Nachfolgeexperiment von CHOOZ
- ab 2008 teilweise, ab 2010 ganz in Betrieb
- Quelle 2 Reaktoren mit je $4,2 \text{ Gw}_{\text{th}}$
- Reiner Antineutrinofluss
- Neutrinoenergie: 2-10 MeV
- 2 Detektoren in $\sim 200 \text{ m}$ und 1.05 km Entfernung



Double CHOOZ

Messprinzip: Überlebenswahrscheinlichkeit

$$P(\nu_a \rightarrow \nu_b)(t) = \left| \sum_i U_{bi} e^{i(E_i \cdot t)} U_{ai}^* \right|^2$$



- Erlaubt ungestörte Messung von Δm_{31}^2 und $\sin^2 2\theta_{13}$

Double CHOOZ

Detektoren:

- 2 identische Flüssig-Szintillatoren
- 20% C₁₆H₁₈, 80% Dodekan
0,1 Massen-% Gd
- Nachweisreaktion: inverser Betazerfall
sofortige Positronannihilation 0,6 – 8 MeV
bis zu 200 μ s später: Neutroneinfang auf Gd 6-12 MeV
- Naher Detektor misst Gesamtneutrinofluss, weil frei von Oszillationen
- Ferner Detektor dient zur Messung des Verlustes durch Oszillation

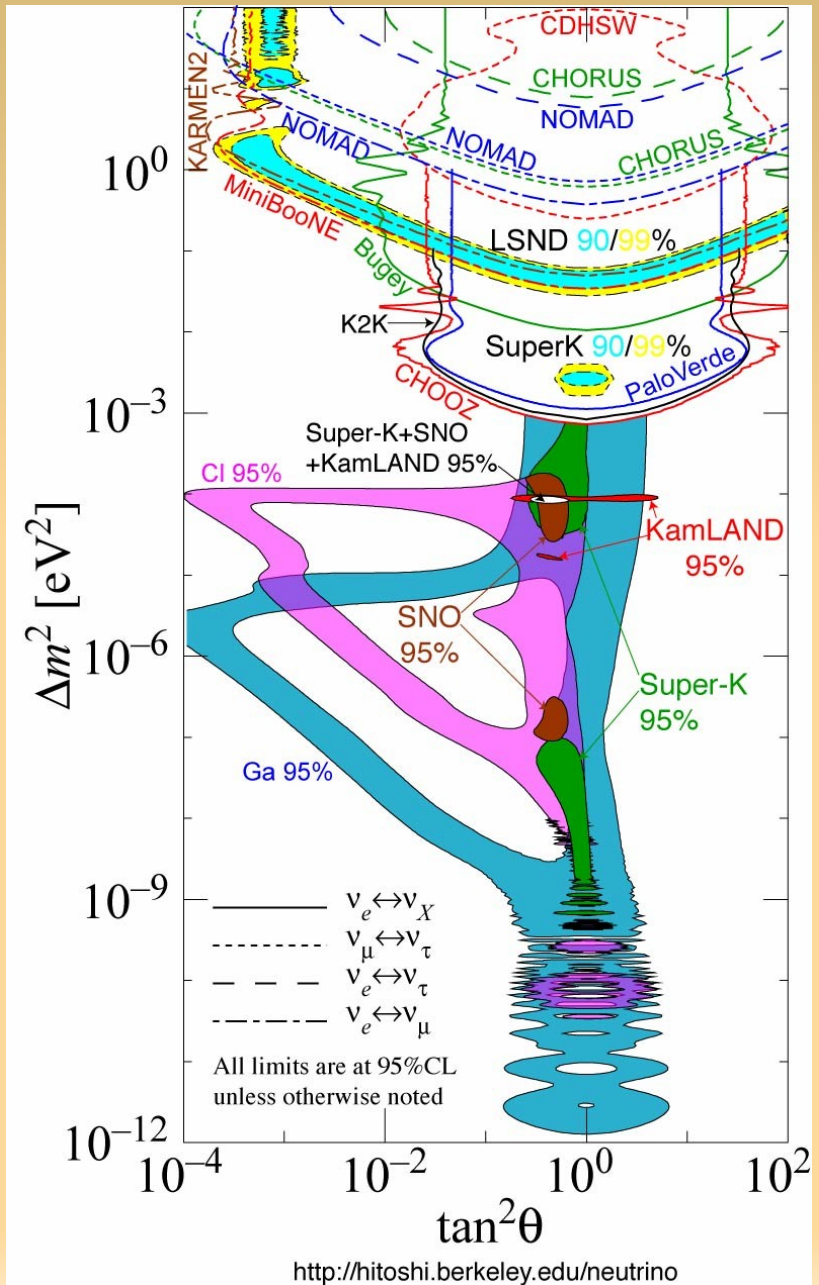
Fazit

- genaue Neutrinomassen noch nicht bekannt, lediglich Obergrenzen durch direkte Massenbestimmungen und Untergrenzen durch Oszillationsexp.
- Superposition aller Bereiche führt zu globalen Ausschlussbereichen

$$\Delta m_{12}^2 = 8.0_{-0.3}^{+0.4} \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad \sin^2(2\theta_{12}) = 0.86_{-0.04}^{+0.03}$$

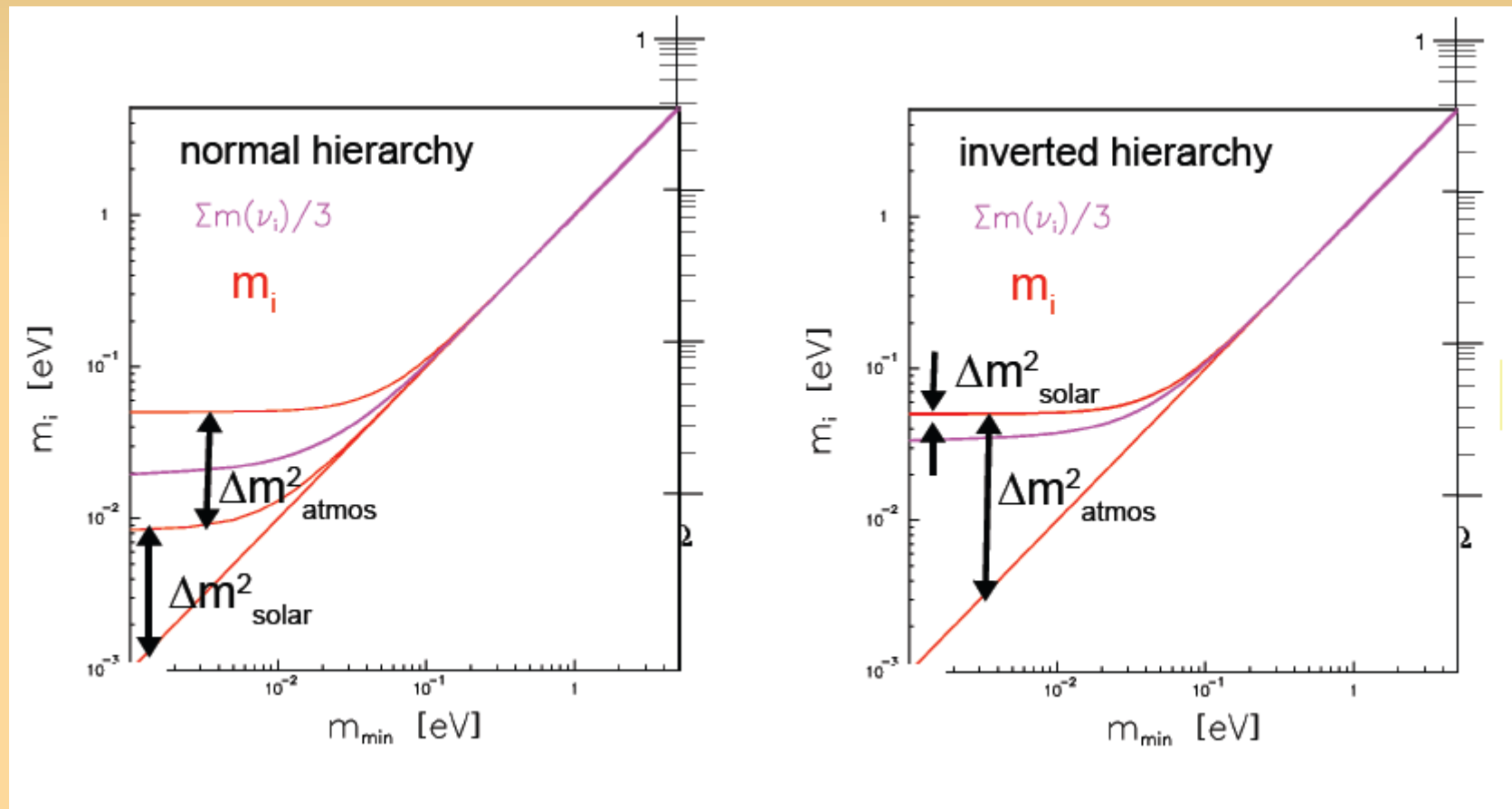
$$\Delta m_{23}^2 = 3.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \sin^2(2\theta_{23}) = 0.92$$

$$\sin^2(2\theta_{13}) < 0.19$$



Fazit

Mögliche Drei-Flavour-Modelle



Ende

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Fragen?