

Neutrinooszillationen

10. Dezember 2002

Seminarvortrag von Alexander Floßdorf

Betreuung: Prof. Thomas Hebbeker

Problematik

-solares Neutrino­problem

(es können nur etwa die Hälfte der erwarteten Elektron­neutrinos von der Sonne nachgewiesen werden)

-atmosphärisches Neutrino­problem

(das Verhältnis von Myon- zu Elektron­neutrinos ist wesentlich geringer als erwartet)

⇒ mögliche Lösung:
Neutrinooszillationen

Gliederung

1. Theorie
2. Allgemeine Bemerkungen zu Experimenten
3. Atmosphärische Neutrinos
4. Solare Neutrinos
5. Künstlich erzeugte Neutrinos

1. Theorie

Flavoureigenzustände \neq Masseneigenzustände!

ν_i seien die Massen-, ν_α die Flavoureigenzustände und U die zugehörige unitäre Transformation. Wir benutzen natürliche Einheiten.

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i(t)\rangle, \quad |\bar{\nu}_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\bar{\nu}_i(t)\rangle$$

Zeitevolution eines Zustandes: $|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(t=0)\rangle$

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

Wenn CP-Invarianz gilt, so ist U reell.

Übergangsamplitude:

$$A(\alpha \rightarrow \beta, t) = \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle = \sum_i U_{\alpha i} \cdot U_{\beta i} \cdot e^{-i E_i t}$$

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

$$\Rightarrow A(\alpha \rightarrow \beta, t) = \sum_i U_{\alpha i} \cdot U_{\beta i} \cdot e^{-i \frac{m_i^2}{2E} L} \cdot e^{-ipt}$$

$L = ct$ = Abstand Quelle-Detektor

Übergangswahrscheinlichkeit:

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = |A(\alpha \rightarrow \beta, t)|^2$$

Übergangswahrscheinlichkeit:

$$A(\alpha \rightarrow \beta, t) = \sum_i U_{\alpha i} \cdot U_{\beta i} \cdot e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \cdot e^{-ipt}$$

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = |A(\alpha \rightarrow \beta, t)|^2$$

$$= \sum_{i,j} U_{\alpha i} \cdot U_{\alpha j} \cdot U_{\beta i} \cdot U_{\beta j} \cdot e^{-i(E_i - E_j)t}$$

$$= \sum_i |U_{\alpha i} \cdot U_{\beta i}|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} \cdot U_{\alpha j} \cdot U_{\beta i} \cdot U_{\beta j} \cdot e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}}$$

$$= \sum_i U_{\alpha i}^2 \cdot U_{\beta i}^2 + 2 \sum_{j>i} U_{\alpha i} \cdot U_{\alpha j} \cdot U_{\beta i} \cdot U_{\beta j} \cdot \cos \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right)$$

Mischung von zwei Flavoureigenzuständen

Mischungsmatrix:

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

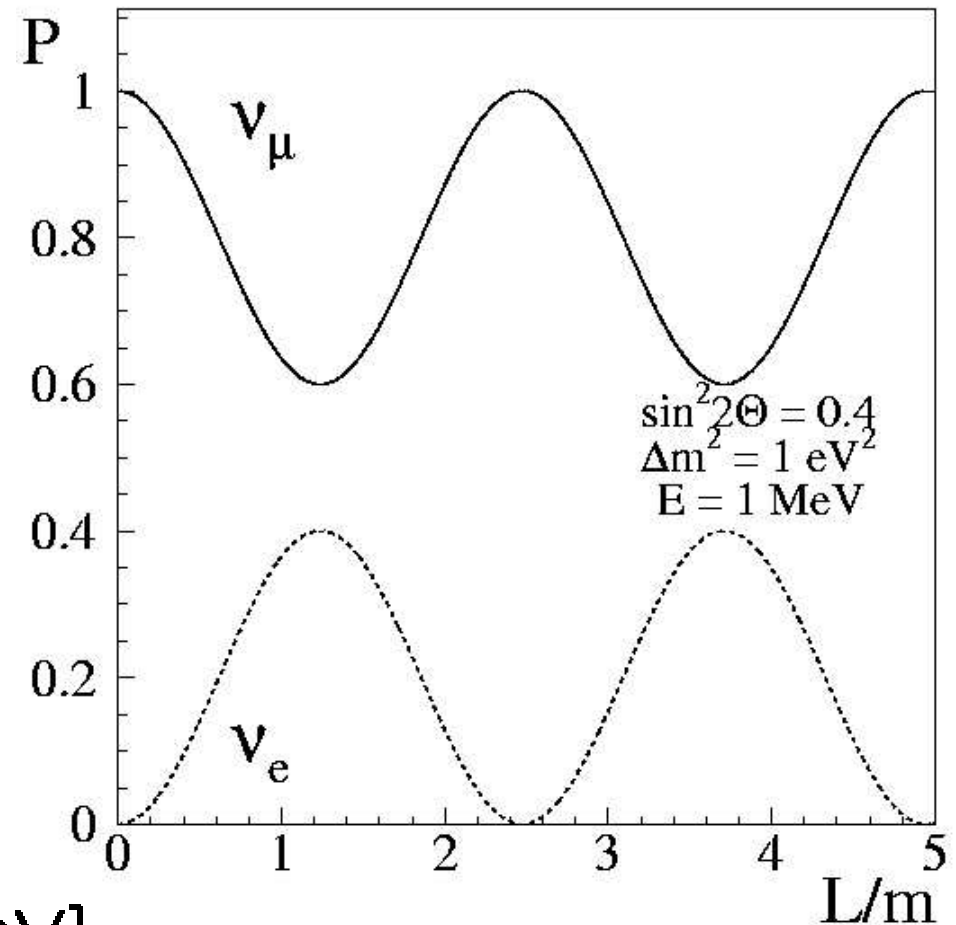
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Übergangswahrscheinlichkeit:

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = 2 \cos^2 \theta \sin^2 \theta - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \cos \left(\frac{\Delta m^2 L}{2 E} \right)$$

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4 E} \right)$$

Darstellung der Oszillationswahrscheinlichkeiten bei einer Mischung von zwei Flavours



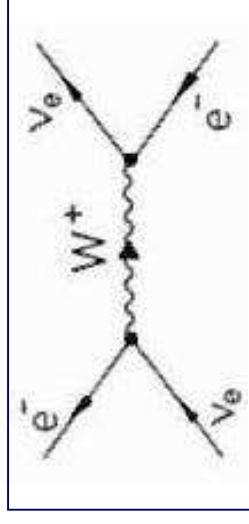
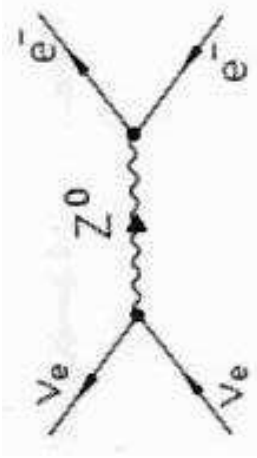
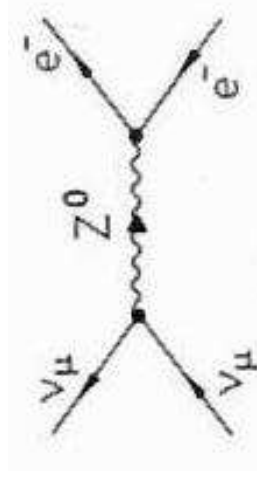
Oszillationslänge:

$$L_0 = 4\pi \frac{E}{\Delta m^2} = 2,480 \frac{E[\text{MeV}]}{\Delta m^2[\text{eV}^2]} \text{m}$$

$$\sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4 E} \right) = \sin^2 \left(\pi \frac{L}{L_0} \right)$$

Für $E = 10 \text{ MeV}$ und $\Delta m^2 = 10^{-4} \text{ eV}^2$ folgt: $L_0 \approx 250 \text{ km}$

Der Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein-Effekt (MSW-Effekt)



Elektronenneutrinos sehen ein zusätzliches Potential V .

$$V = \sqrt{2}G_F N_e$$

G_F ist die Fermi-Wechselwirkungskonstante der schwachen Wechselwirkung, N_e die Elektronendichte der Materie

$$(E - V)^2 = p^2 + m^2$$

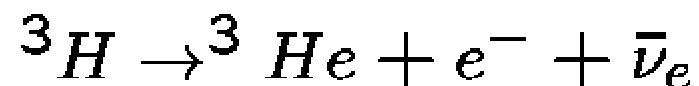
In Materie ändern sich Mischungswinkel zwischen Elektron- und anderen Neutrinos

2. Allgemeine Bemerkungen zu Experimenten

Bisher experimentell ermittelte Massenoberggrenzen(95% CL)

- e-Neutrino: 2,8eV
- μ -Neutrino: 0,17MeV
- τ -Neutrino: 18,2MeV

Beispiel: Messung der Antielektronneutrinomasse über Tritiumzerfall:



Untersuchung eines ν_α -Strahls

Nachweis der Neutrinos durch Entstehung von e, μ, τ

Appearance-Experimente: Nachweis einer Neutrinosorte $\nu_\beta \neq \nu_\alpha$

Messung der Übergangswahrscheinlichkeit $P(\alpha \rightarrow \beta)$

Neutrinoenergie muss größer als die Masse des erzeugten Teilchen sein!

Disappearance-Experimente: Messen des Flusses von ν_α

Messung der Überlebenswahrscheinlichkeit $P(\alpha \rightarrow \alpha)$

Veränderung der Oszillationswahrscheinlichkeiten durch Variation von L/E :

$$\sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4 E} \right)$$

$$\frac{L}{E} \gtrsim \frac{1}{\Delta m^2}$$

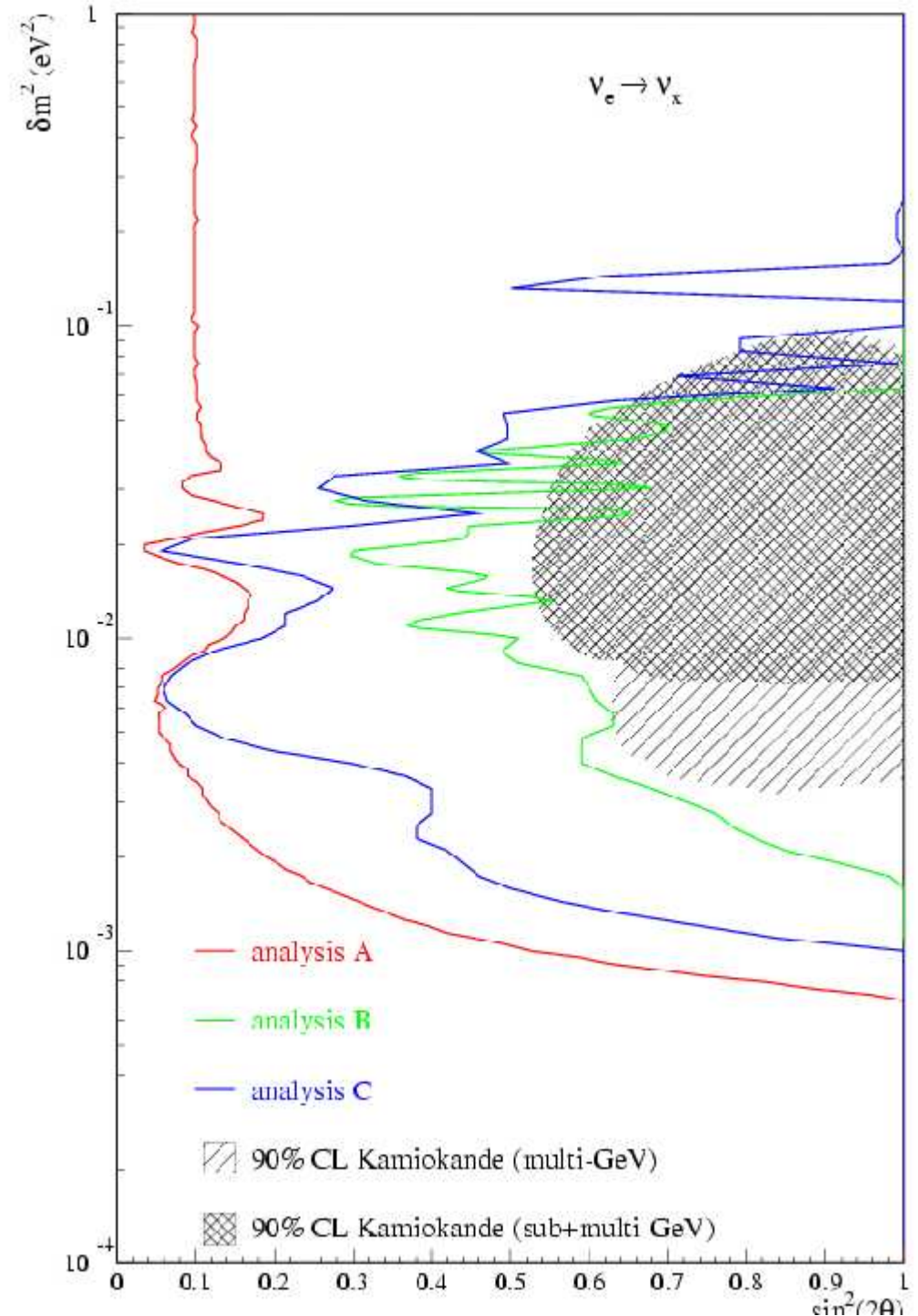
<i>Quelle</i>	<i>L/E-Bereich[m/MeV]</i>	$\Delta m^2 [eV^2]$
<i>Atmosphäre</i>	$1 - 10^5$	10^{-5}
<i>Sonne</i>	$10^{10} - 10^{12}$	10^{-12}
<i>künstlich</i>	$1 - 10^4$	10^{-4}

- L ist bei ausgedehnten Quellen nicht scharf
- E ist unscharf, falls die Neutrinos ein Energiespektrum besitzen
- betrachtet man viele Oszillationen, also ein Verhältnis von L zu E, das viel größer als Δm^{-2} ist, so erhält man nur Mittelwerte der Übergangswahrscheinlichkeiten

Gemessen wird der
Neutrinofluß Φ in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

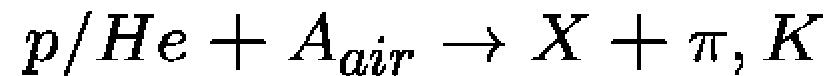
→ Vergleich mit der
Theorie, die von den
Parametern Δm^2 und
Mischungswinkel θ
abhängt

→ graphische Darstellung
von Ergebnissen in
Diagrammen, in denen
 $\sin^2 2\theta$ und Δm^2
gegeneinander
aufgetragen werden



3. Atmosphärische Neutrinos

Atmosphärische Neutrinos entstehen durch
Hadronenschauer in der Atmosphäre

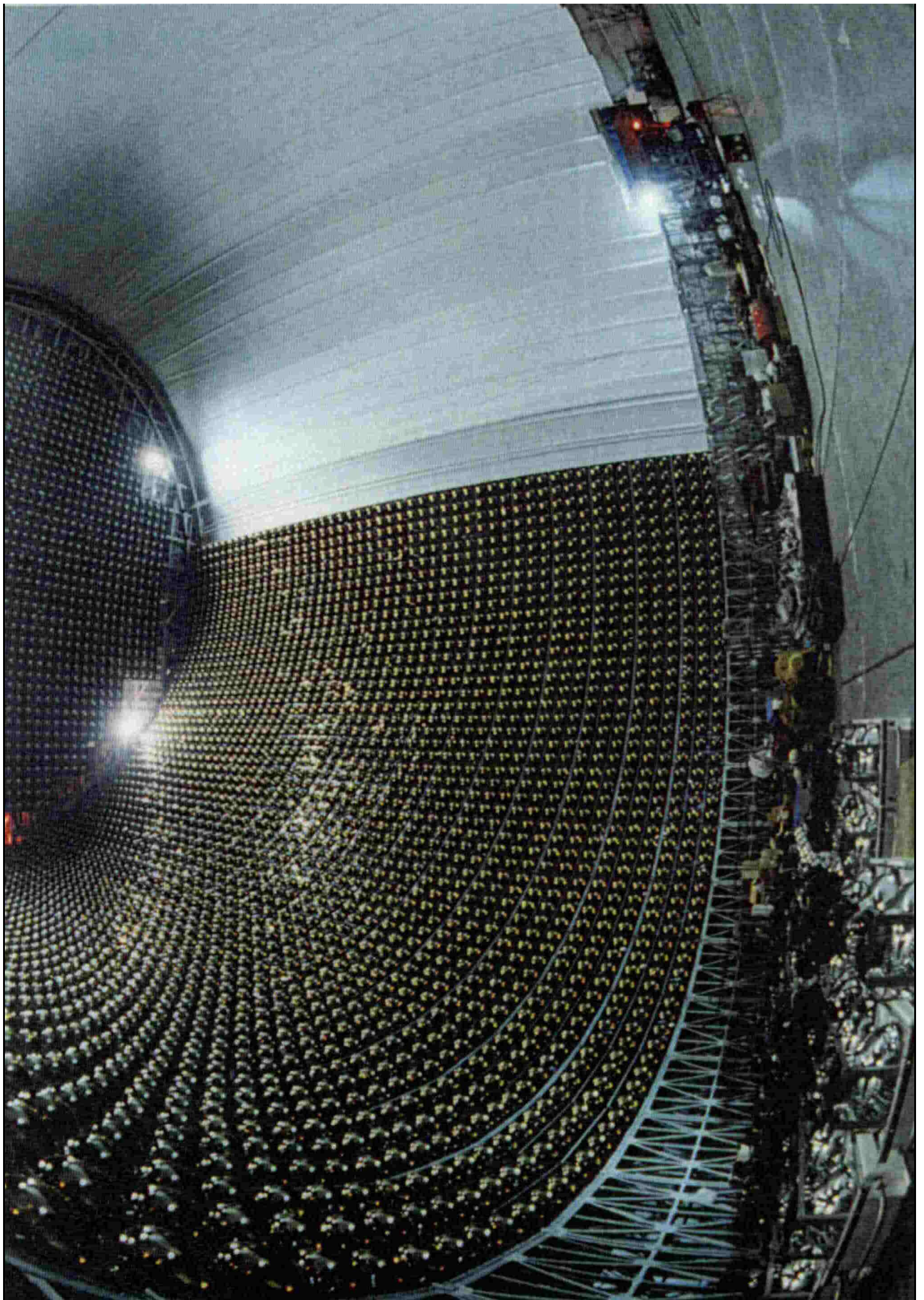


Erwartetes Verhältnis Myon-Elektron-Neutrinos
bei Energien im MeV-Bereich: 2 zu 1

Verhältnis wächst mit steigender Energie!

Super Kamiokande

- „ Wasser-Cherenkov-Detektor in der Mozumi-Mine in Kamioka, Japan
- „ Lage 1000m unter der Erde entspricht 2700m Wasseräquivalent
- „ Detektor: zylinderförmiger Wassertank mit ca. 40m Höhe und Durchmesser; mit 50.000t reinem Wasser gefüllt und 11.200 PMTs (photomultiplier tubes) zur Datennahme ausgestattet
- „ Betrieb: April 1996 bis November 2001



Nachweis der Neutrinos über sogenannte Charged-Current-Reaktionen (CC). Dabei werden durch Wechselwirkung mit dem Wasser e^\pm und μ^\pm erzeugt, die Cherenkovlicht ausstrahlen, das detektiert wird.

<u>Teilchen</u>	<u>Energieschwelle für Cherenkovlicht[MeV]</u>
e^\pm	0,768
μ^\pm	158,7
τ^\pm	2.097

Myonenrate: 2Hz

Energieschwelle von Super Kamiokande: 5MeV

Beobachtungsintervall: 100MeV bis 1000GeV

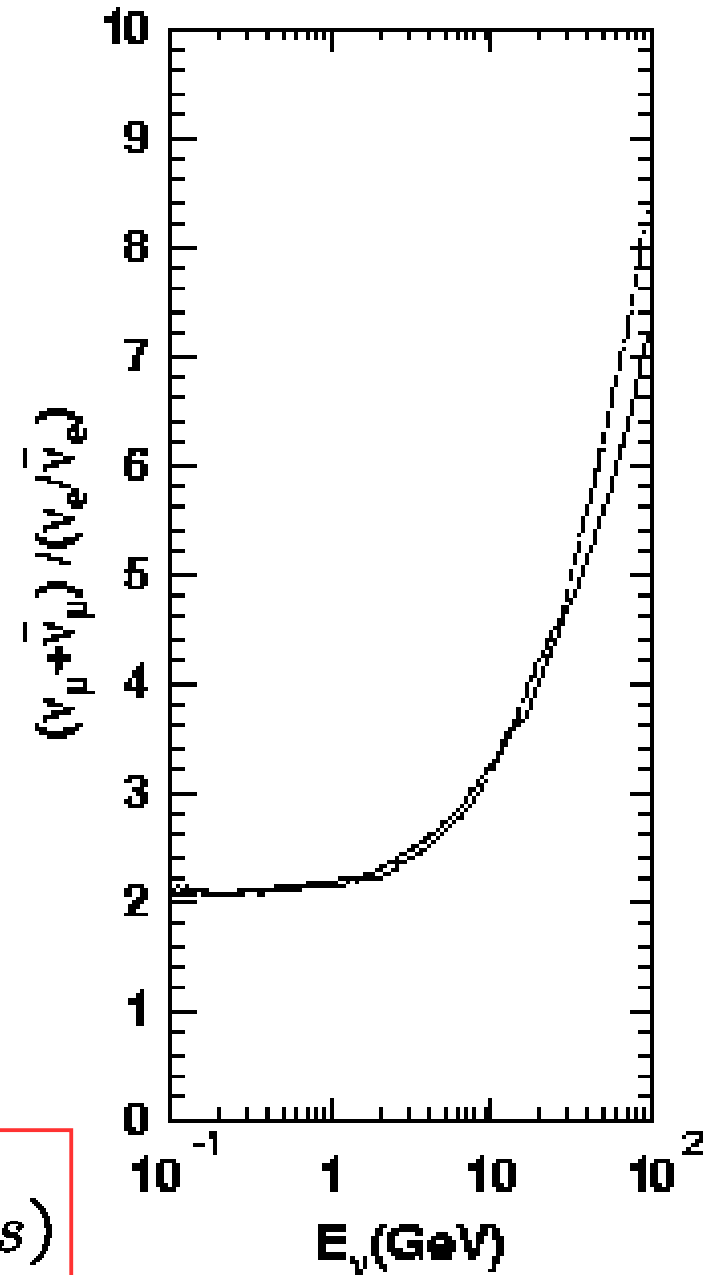
Verhältnis der Neutrinoarten

*Das erwartete Verhältnis
Myon-Elektron-
Neutrino ist in der
Graphik dargestellt*

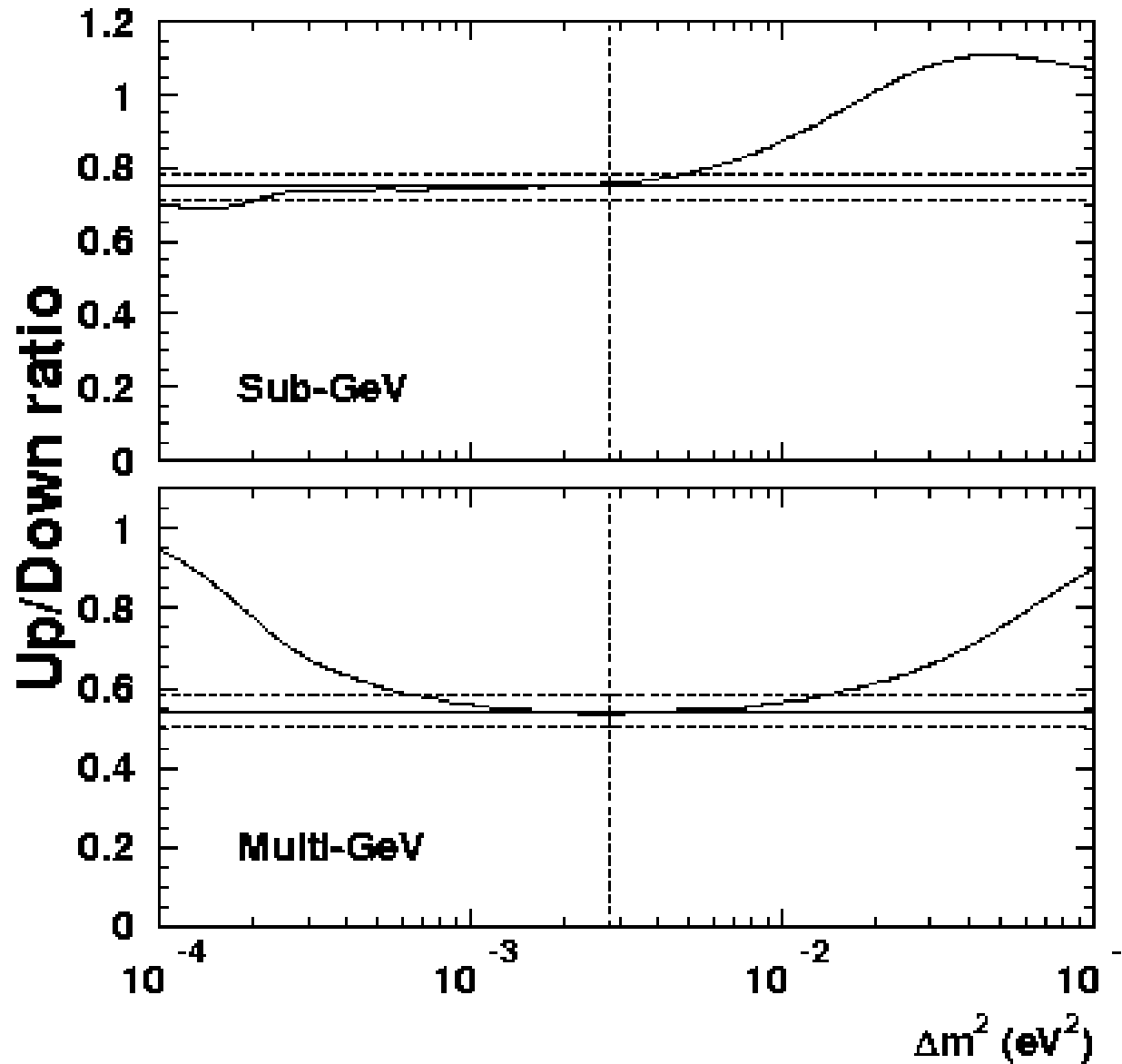
$$V := \frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

Ergebnis von Super Kamiokande:

$$\frac{V(\text{exp})}{V(\text{theor})} = 0,66 \pm 0,06(\text{stat}) \pm 0,08(\text{sys})$$



Up-Down-Rate



*Ergebnisse
konsistent mit
Neutrino-
oszillationen*

$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$ mit
einer
Signifikanz
von 5σ

Hypothese: Zwei- Flavouroszillationen

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$$

bester Fit:

$$\sin^2 2\theta = 1,00$$

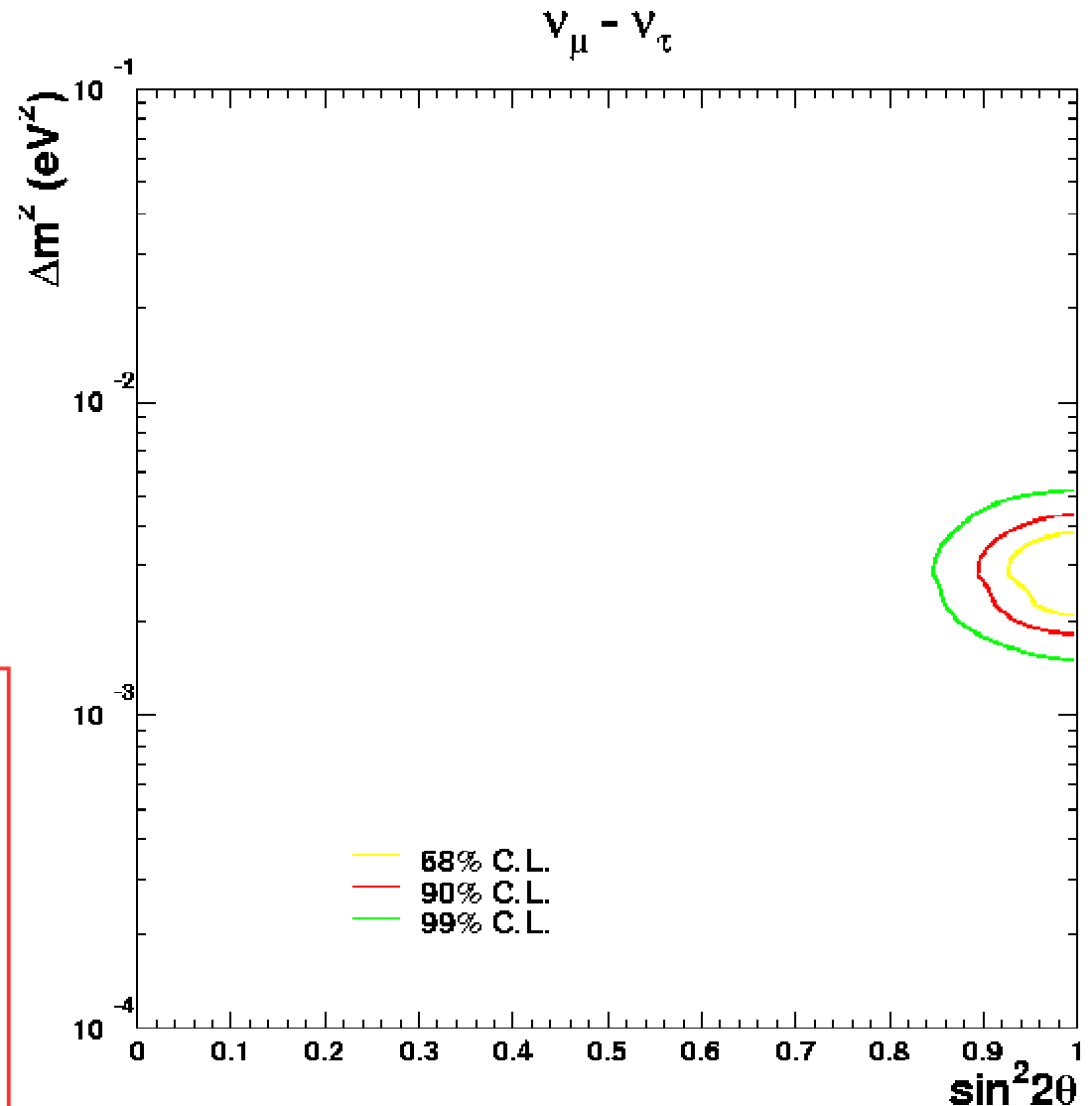
$$\Delta m^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$$

Mit 90% CL (Confidence Level) ergibt sich:

$$1,8 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m^2$$

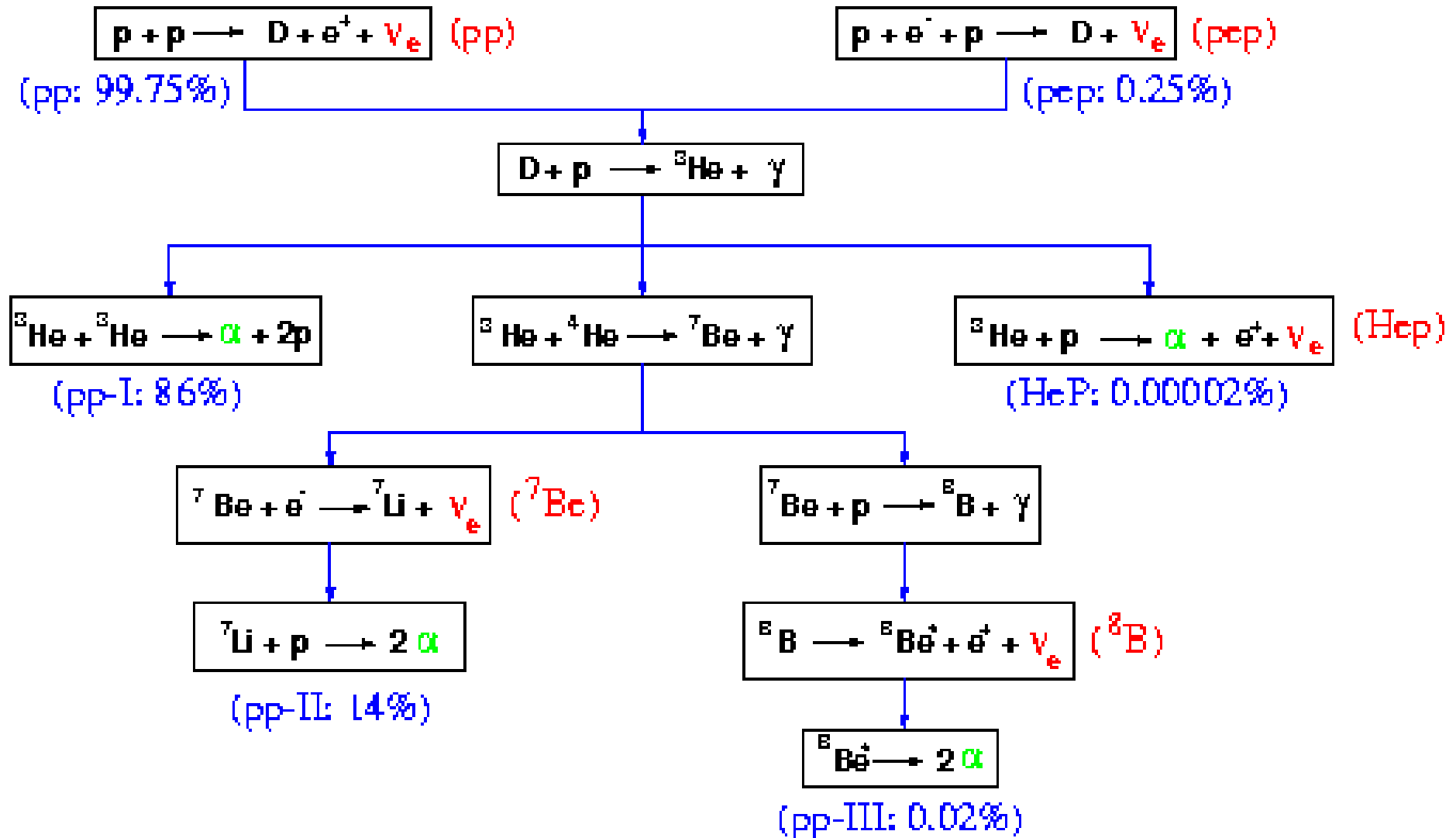
$$< 4,5 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2,$$

$$0,89 < \sin^2 2\theta$$



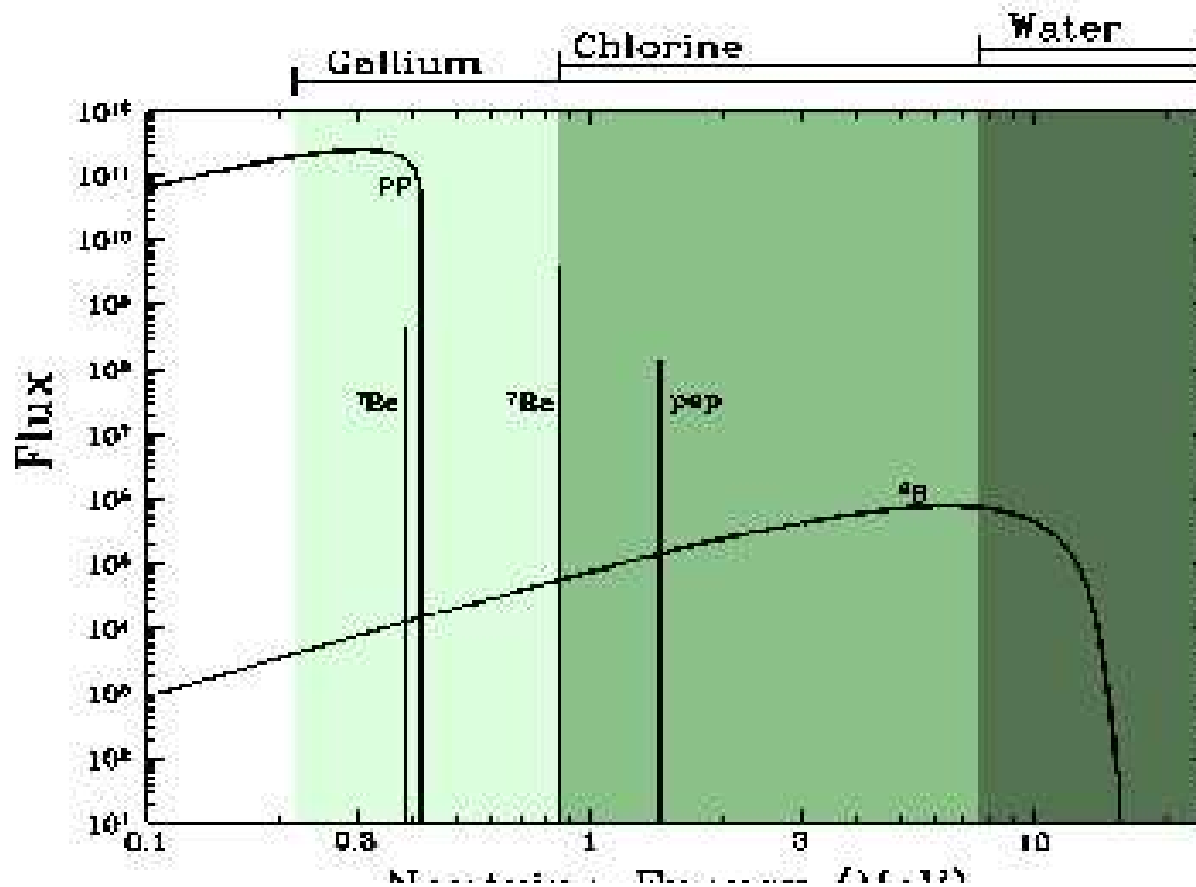
4. Solare Neutrinos

Standard -Sonnen -Modell (SSM)



Vorhersage des SSM

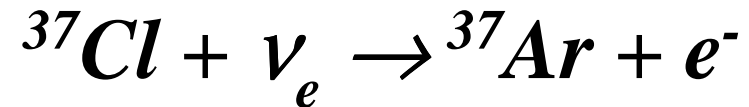
Reaktionsquelle	Fluss [$10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
pp	$5,69 \pm 0,06$
${}^7\text{Be}$	$0,480 \pm 0,043$
pep	$0,0139 \pm 0,0001$
${}^8\text{B}$	$(5,15^{+0,98}_{-0,72}) \cdot 10^{-4}$



Homestake

Chlorexperiment:

Nachweis über inversen β -Zerfall:



- „ Lage: Homestake Goldmine in Lead, South Dakota, USA
- „ zylindrischer Tank mit einem Volumen von 390.000 Litern
- „ Targetmaterial: Tetrachloroethen(C_2Cl_4)
- „ Messzeitraum: 1968 bis heute



natürlicher Anteil an ^{37}Cl beträgt 24,23%

Energieschwelle: 0,814MeV

Detektion von ^8B -, ^7Be -, pep-Neutrinos

Über einen Zeitraum von ein bis drei Monaten werden Argon (Halbwertszeit: 35d) produziert und dann die Zerfälle gemessen: ca. 15 bei $2 \cdot 10^{30}$ Chloratomen!



***Angabe der Ergebnisse häufig in SNU = ein
Einfang pro 10^{36} Targetatome pro Sekunde***

vom SSM vorhergesagte Rate:

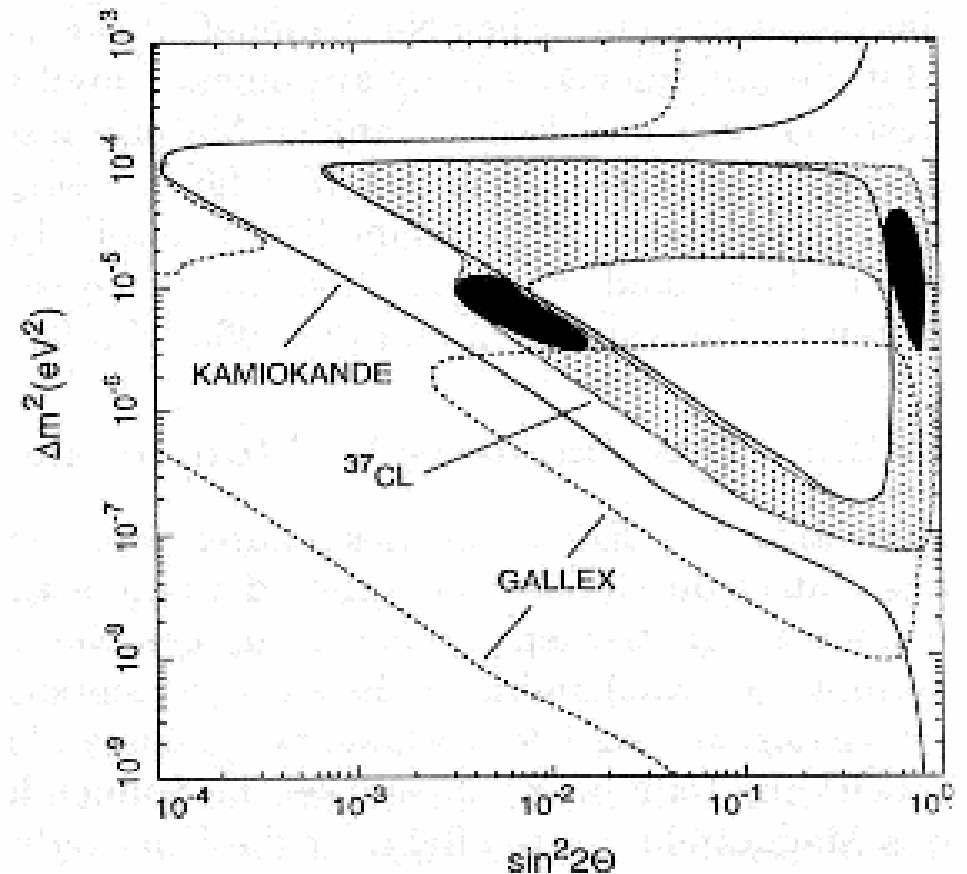
$$\Phi = 7,7_{-1,0}^{+1,2} \text{SNU}$$

gemessene Rate:

$$\Phi = 2,56 \pm 0,16(\text{stat}) \pm 0,16(\text{sys}) \text{SNU}$$

*Nur 33% der erwarteten
Rate werden bei
Homestake nachgewiesen*

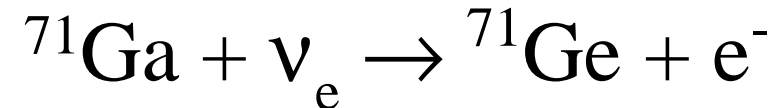
*konsistent mit
Oszillationen $\nu_e \leftrightarrow \nu_x$*



GALLEX / GNO

Galliumexperiment:

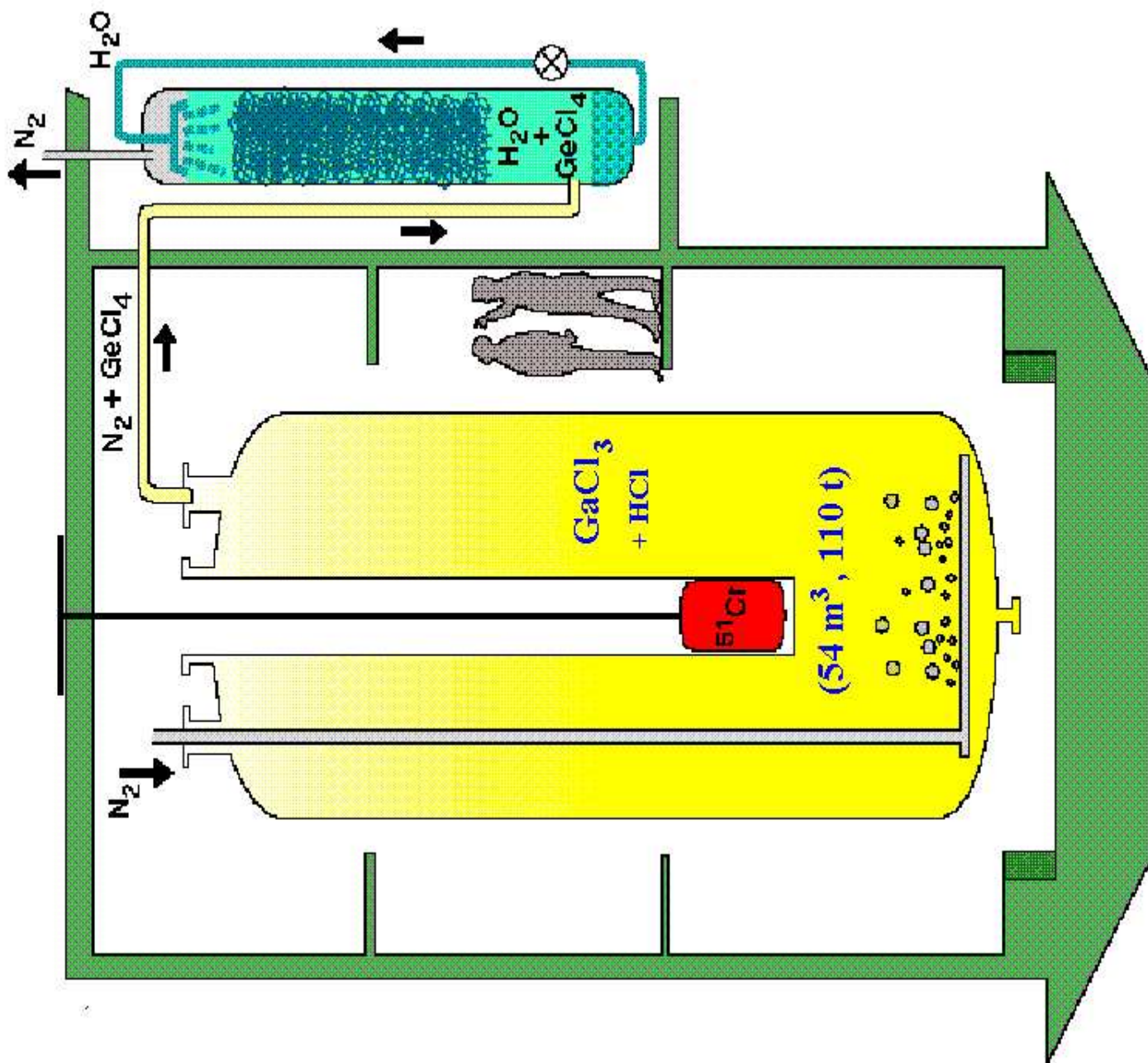
Nachweisreaktion:



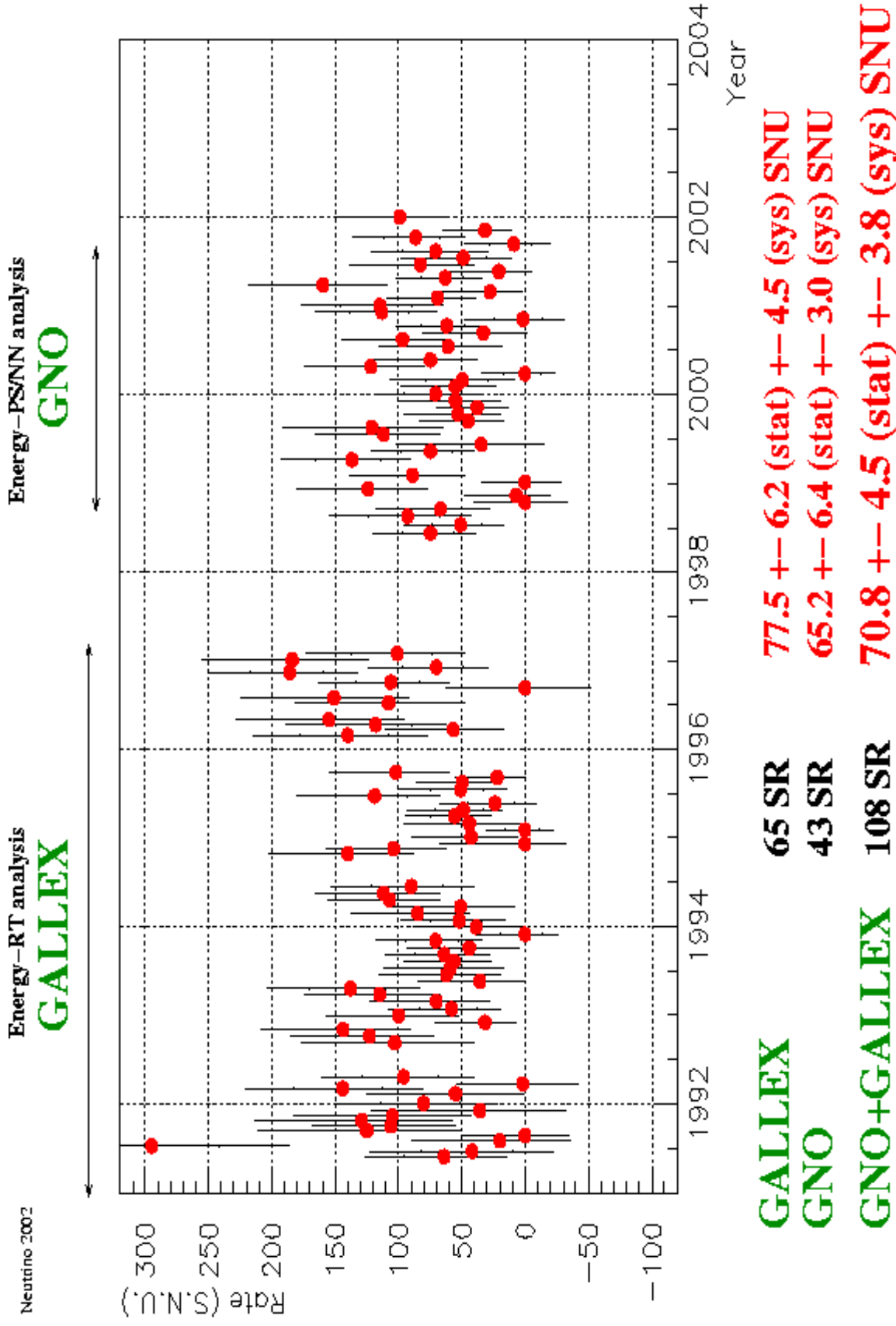
Energieschwelle: 233,2keV

Da die Maximalenergie der pp-Neutrinos bei ~420keV liegt, können diese detektiert werden.

- „ Versuch aufgebaut im unterirdischen LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso), Italien
- „ Targetmaterial: 30,3t Gallium
- „ Messzeiten: GALLEX: 1991-1997, GNO: 1998 bis heute



Erwarteter Fluß: $\Phi = 129^{+8}_{-6}$ SNU

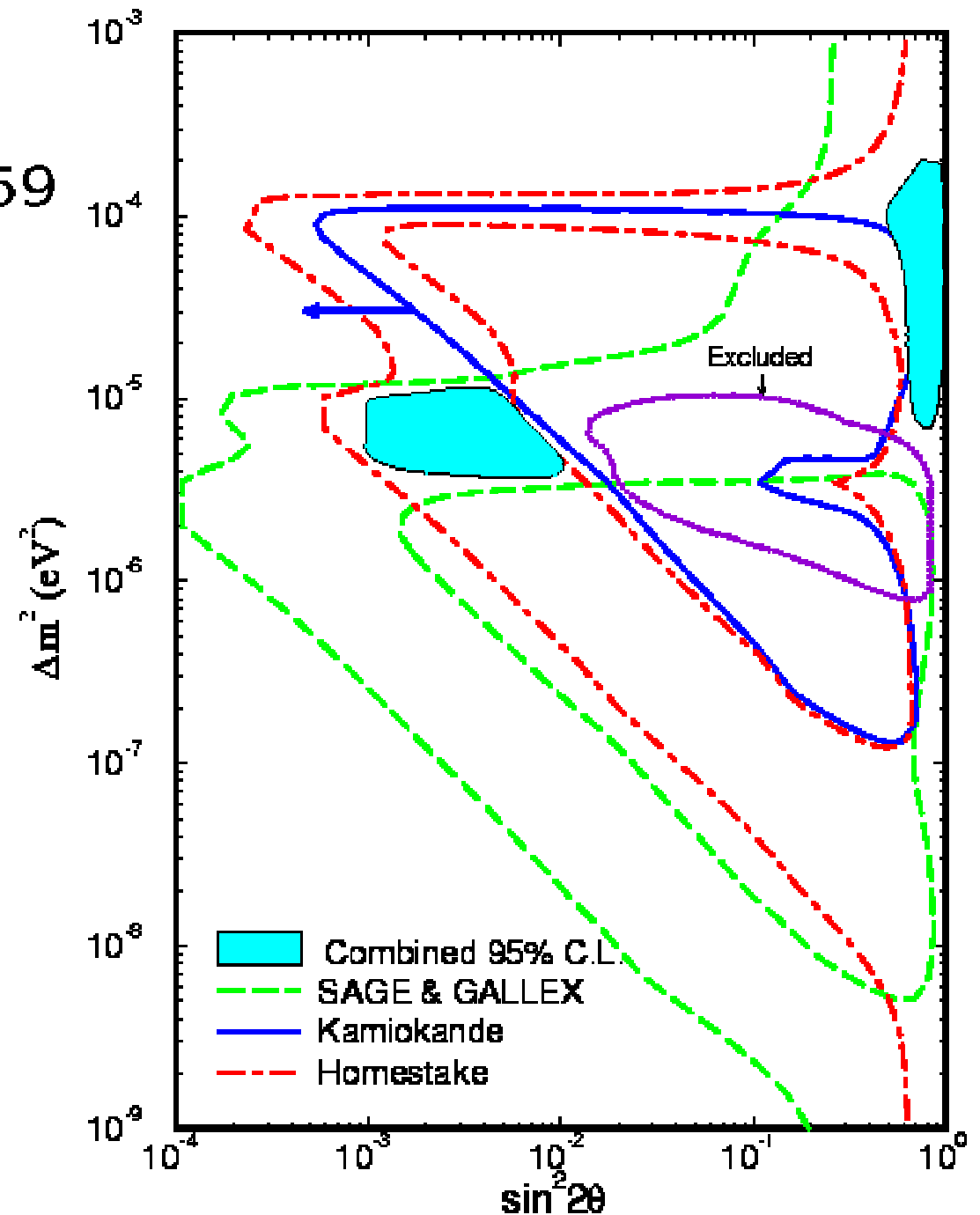


Vergleich mit SSM:

$$\frac{GALLEX}{SSM} = 0,600 \pm 0,059$$

$$\frac{GNO}{SSM} = 0,525 \pm 0,061$$

Daten aus
Galliumexperimenten
konsistent mit
Oszillationen $\nu_e \leftrightarrow \nu_x$



Super Kamiokande

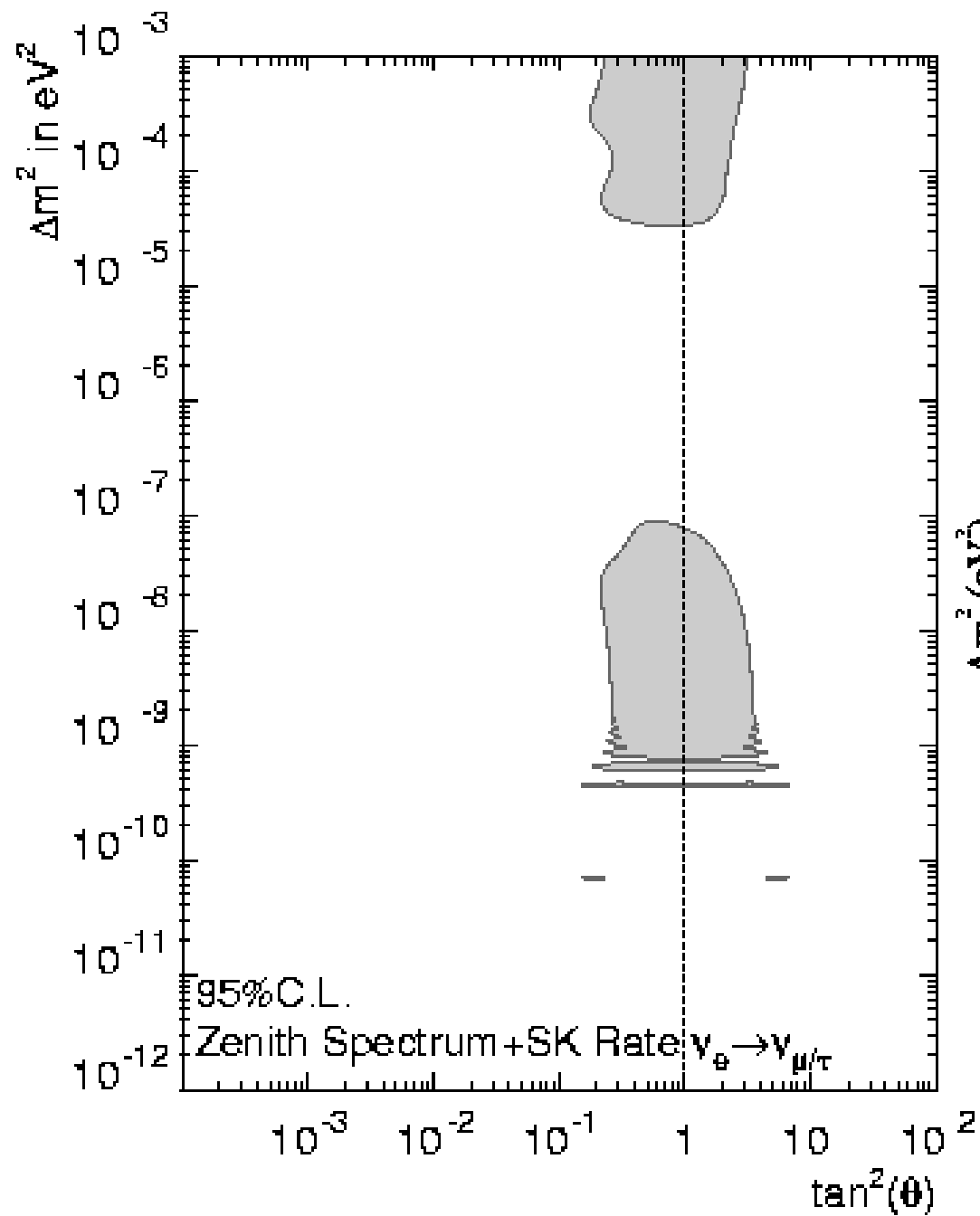
Untersuchung des ${}^8\text{B}$ -Flusses zwischen 5,5MeV und 20MeV über Streuung der Elektronenneutrinos an Elektronen (ES) über einen Zeitraum von 1496 Messtagen.

Verhältnis:

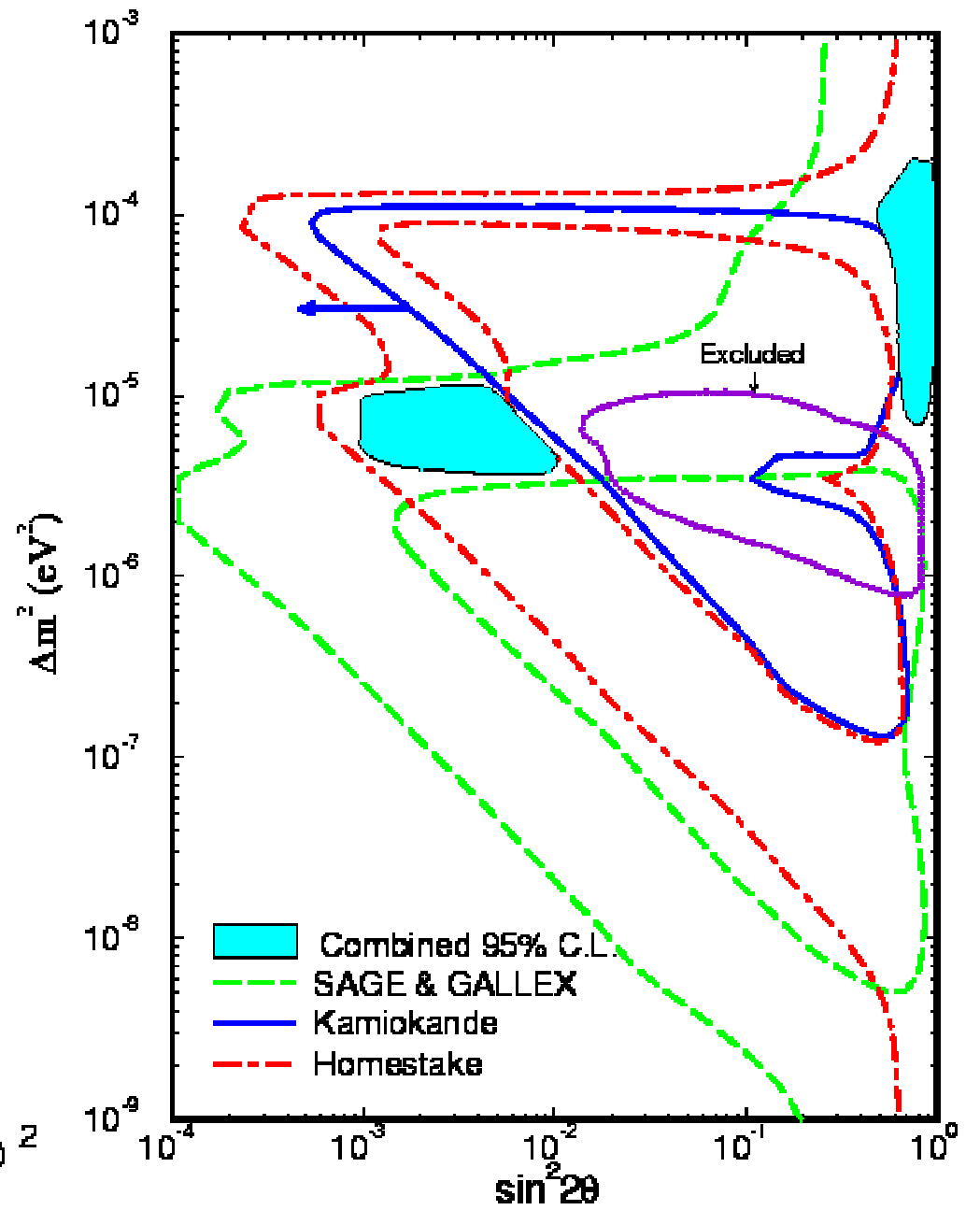
$$\frac{\Phi(\text{exp})}{\Phi(\text{theor})} = 0,465^{+0,015}_{-0,013}$$

Mit der Vorhersage des ${}^8\text{B}$ -Flusses aus dem SSM ergeben sich mit 95% CL die grauen Gebiete als erlaubte Regionen für Oszillationen

$$\nu_e \leftrightarrow \nu_x$$



Super Kamiokande



GNO / Homestake

Zwischenbilanz

-alle bisherigen Experimente weisen ausschließlich Elektroneneutrinos nach

- es handelt sich bei allen Experimenten um Disappearance-Experimente

⇒ Sind die Voraussagen des SSM falsch, so sind die experimentellen Ergebnisse nicht richtig zu interpretieren!

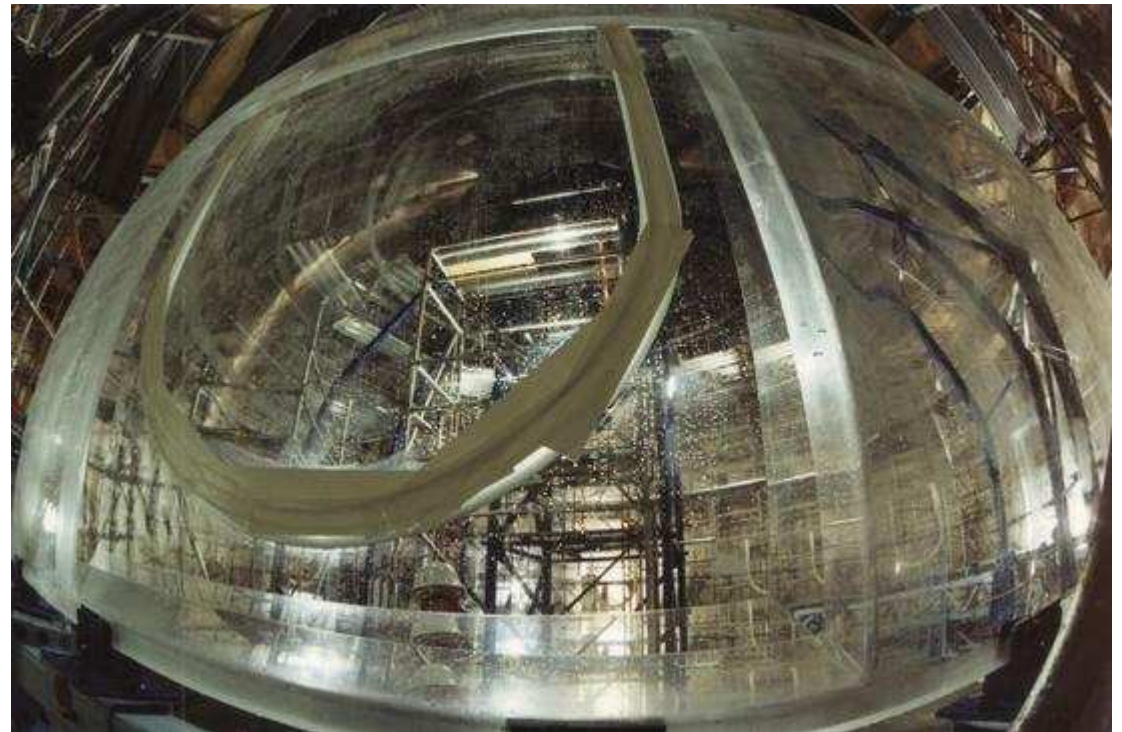
Lösung: Es müssen auch die Flüsse der anderen Neutrinoarten gemessen werden

SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

SNO kann alle drei Flavours

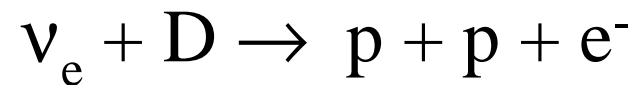
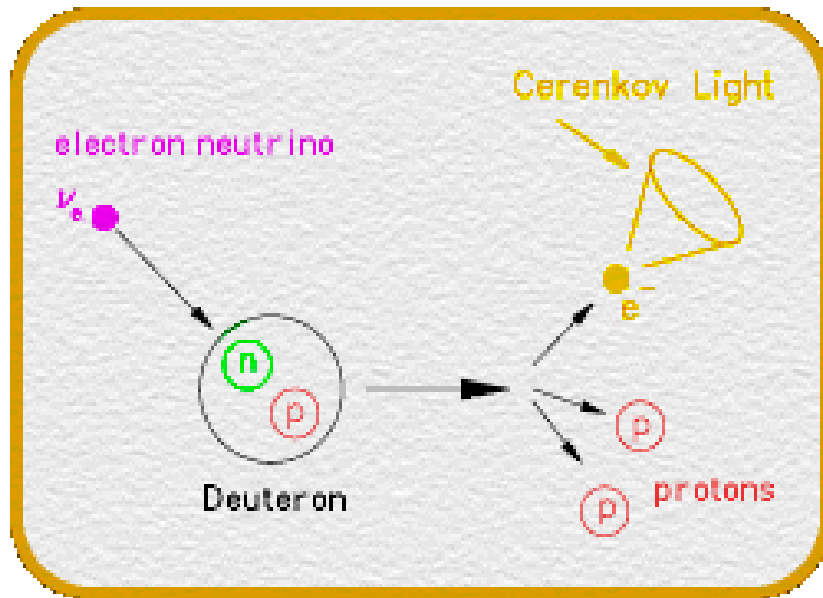
nachweisen!

- „ Lage: Creighton-Mine, Sudbury, Kanada
- „ Kugelförmiger Behälter mit zwölf Metern Durchmesser
- „ Targetmaterial: 1000t schweres Wasser (D_2O)
- „ Messzeit: 1999 bis heute
- „ Energieschwelle: 6,75MeV



Messmethoden

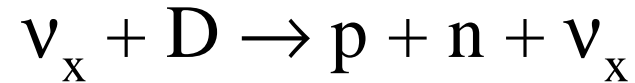
Charged Current Reaction



Ausschließlich Nachweis von Elektronenutrinos möglich

Die erzeugten Elektronen erhalten den größten Teil der Neutrinoenergie und strahlen Cherenkovlicht ab.

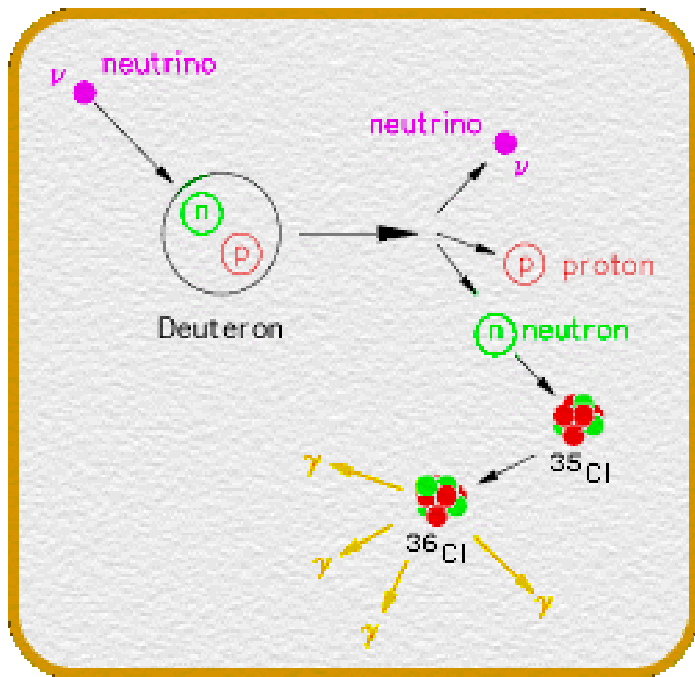
Neutral Current Reaction



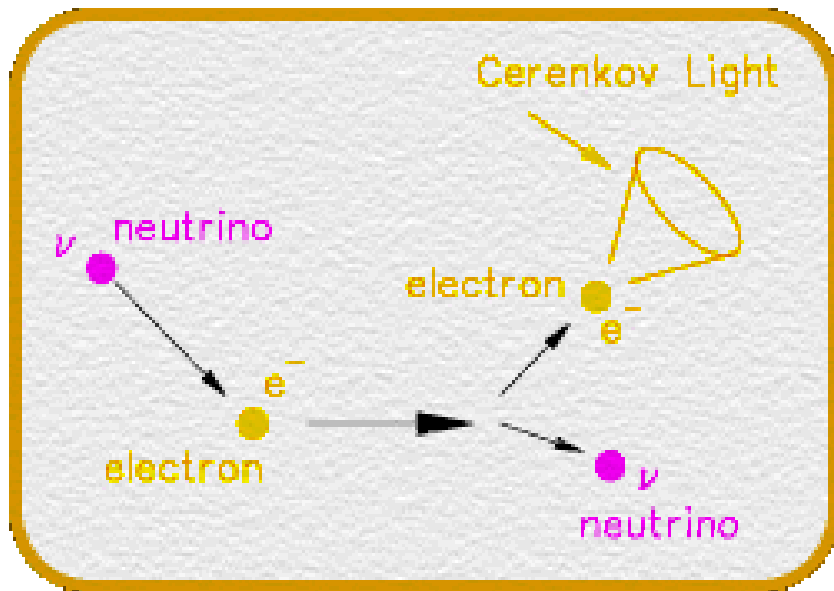
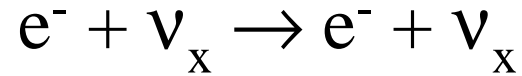
Nachweis von allen Neutrinoarten
gleichermaßen, keine
Unterscheidung möglich

Zugabe von NaCl, da Chlor einen
hohen Absorptionsquerschnitt für
thermische Neutronen hat

beim Neutroneneinfang emittierte γ -
Quanten streuen an Elektronen \rightarrow
Cherenkovlicht



Electron Scattering (ES)



Detektion sämtlicher Neutrinoarten möglich, aber unterschiedlich starke Wirkungsquerschnitte, Elektroneneutrinos dominieren mit Faktor sechs

Abgabe von Energie vom Neutrino an das Elektron

schlechte Spektral-, aber gute Richtungsinformation

Ergebnisse

erwarteter Fluß nach SSM:

$$\Phi_{SSM} = 5,05^{+1,01}_{-0,81} \cdot 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

gemessener Gesamtfluß über NC:

$$\Phi_{gesamt} = 6,42 \pm 1,57(stat)^{+0,55}_{-0,58}(sys) \cdot 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

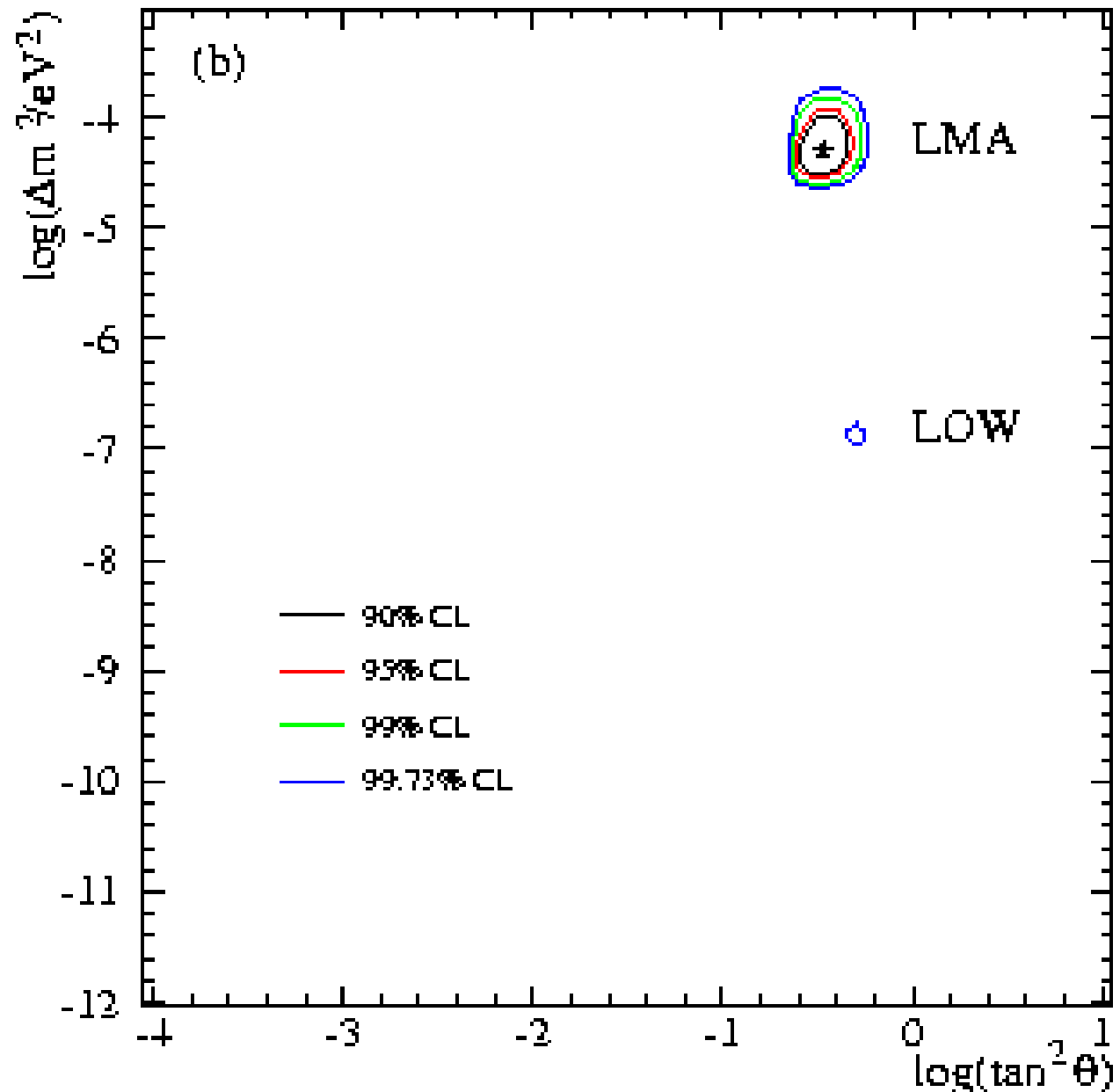
$$\Phi_e = 1,76 \pm 0,05(stat) \pm 0,09(sys) \cdot 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\Phi_{\mu\tau} = 3,41 \pm 0,45(stat)^{+0,48}_{-0,45}(sys) \cdot 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

$$\Rightarrow \frac{\Phi_e}{\Phi_{SSM}} = 0,349^{+0,023}_{-0,022}$$

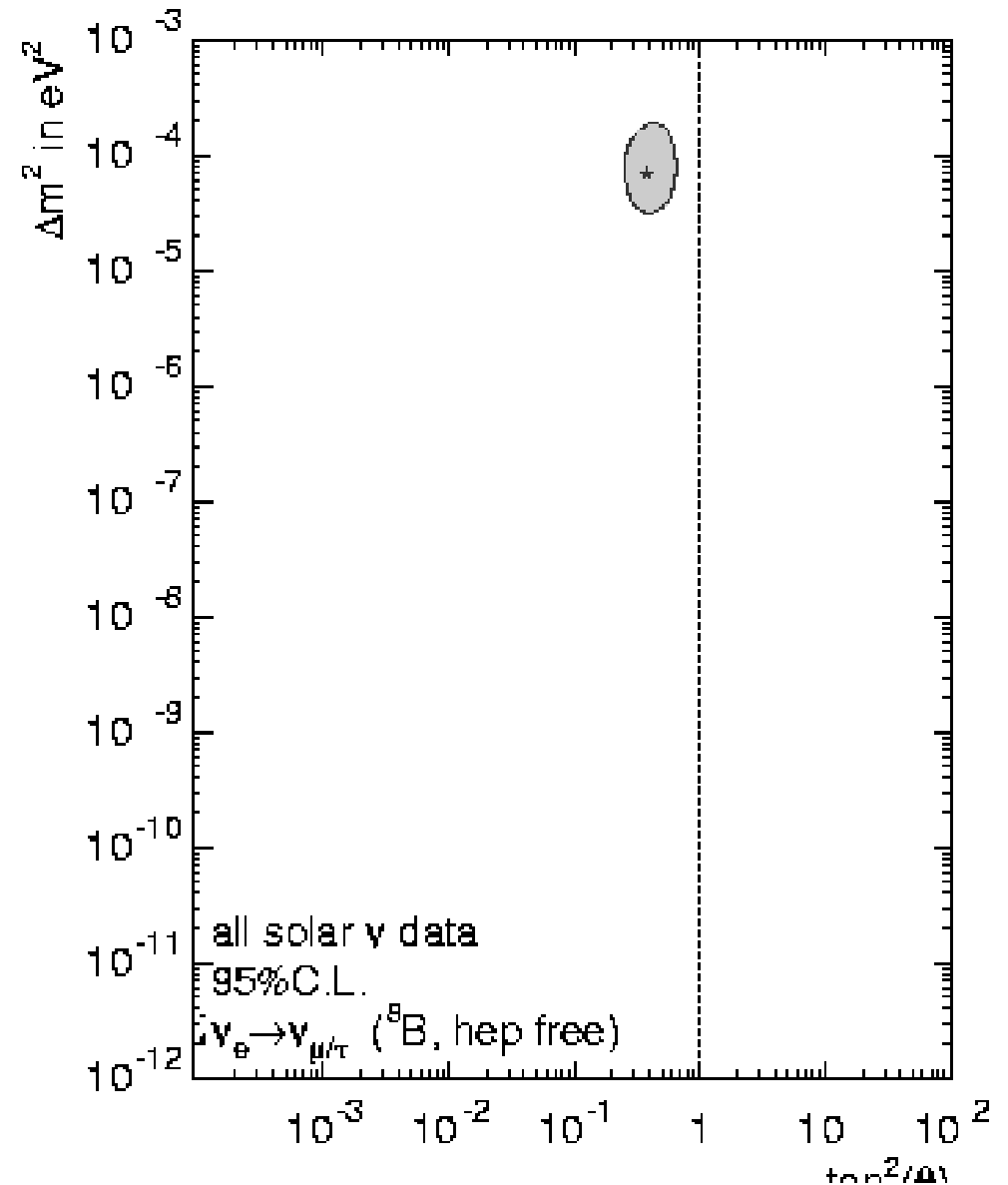
Signifikant
für
Oszillationen

$\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau}$
mit $5,3\sigma$



Kombination der solaren Ergebnisse

Kombination der Ergebnisse von Homestake, GALLEX/GNO, SAGE, Super Kamiokande und SNO liefern ein klar favorisiertes Gebiet für Mischungswinkel und Massendifferenzquadrat für ν_e -disappearance



5. Künstlich erzeugte Neutrinos

- „ Beschleunigerexperimente

1. Short Baseline: LSND

2. Long Baseline: K2K

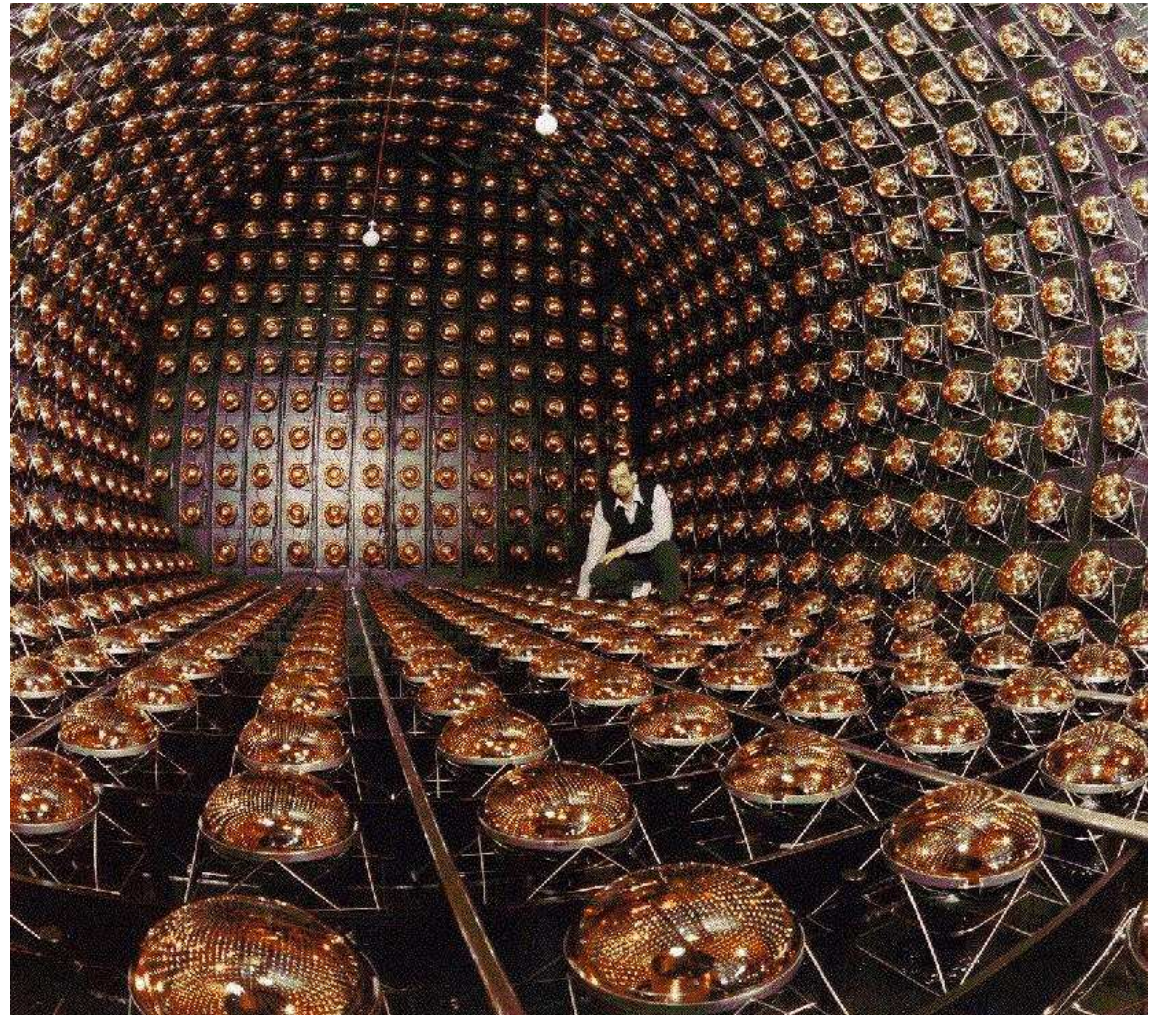
- „ Reaktorexperiment:

Chooz

LSND

(Liquid Scintillator Neutrino Detector)

- „ Lage: Los Alamos, USA
- „ Suche nach Oszillationen von (Anti-) Myonneutrinos zu (Anti-) Elektronneutrinos
- „ Appearance-Experiment
- „ Detektormaterial:
Mineralöl und b-PBD



Protonen werden im Beschleuniger LANSCE auf 800MeV beschleunigt und auf Eisen- und Kupfertargets geschossen.

Es entstehen Myon- und Antimyonenneutrinos. Im 30m entfernten Detektor werden (Anti-) Elektronenneutrinos detektiert.

Starker Hintergrund durch Zerfälle von Myonen in Elektronen und Positronen:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$$

Ergebnisse

Nachgewiesen (abzüglich background):

$$18,1 \pm 6,6(stat) \pm 3,5(sys) \nu_e$$

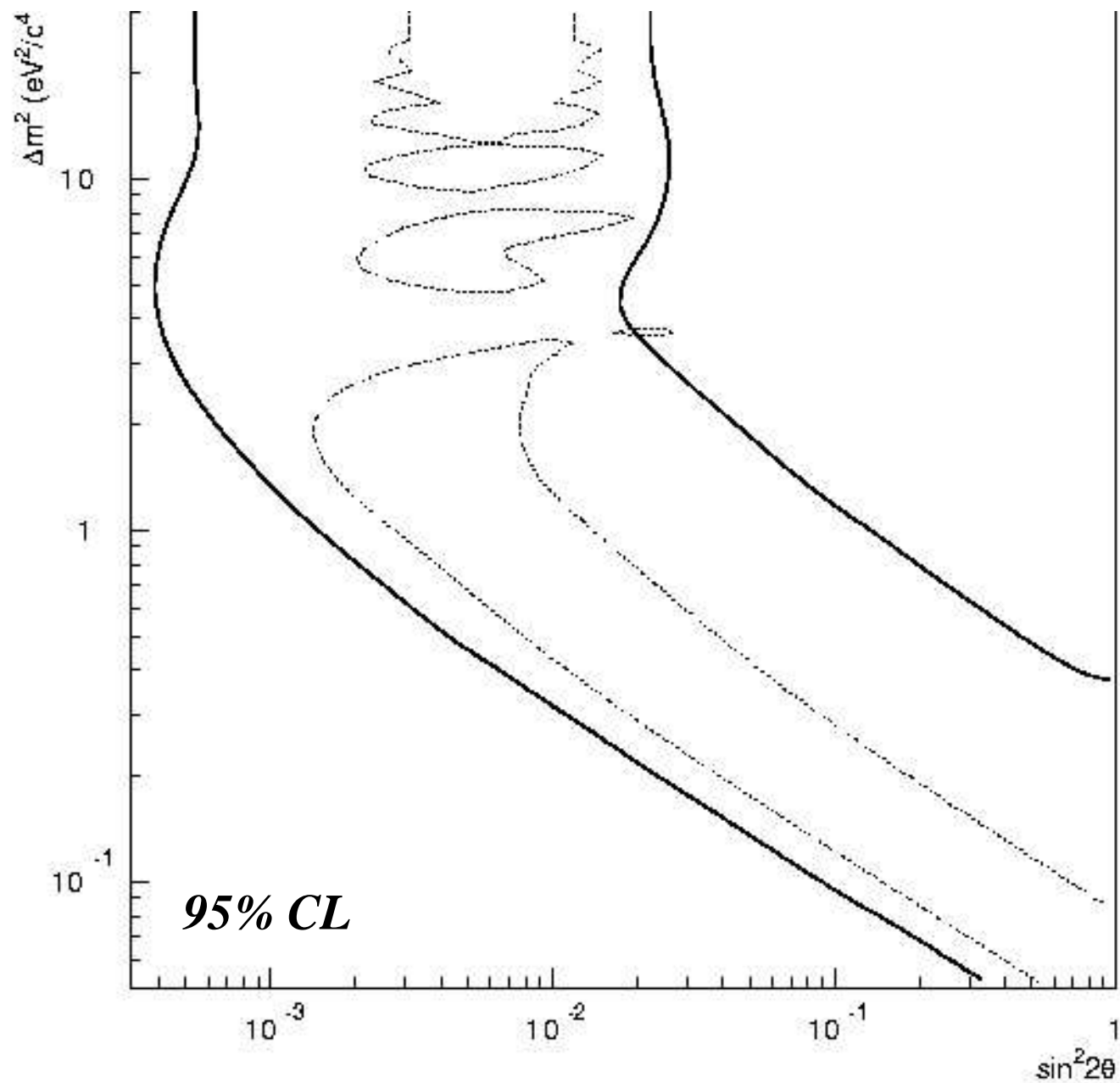
$$51,0^{+20,2}_{-19,5}(stat) \pm 8,0(sys) \bar{\nu}_e$$

Wahrscheinlichkeit für statistische
Schwankung $< 10^{-7}$

Oszillationswahrscheinlichkeiten:

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e: (0,26 \pm 0,10(stat) \pm 0,05(sys))\%$$

$$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e: (0,31 \pm 0,12(stat) \pm 0,05(sys))\%$$

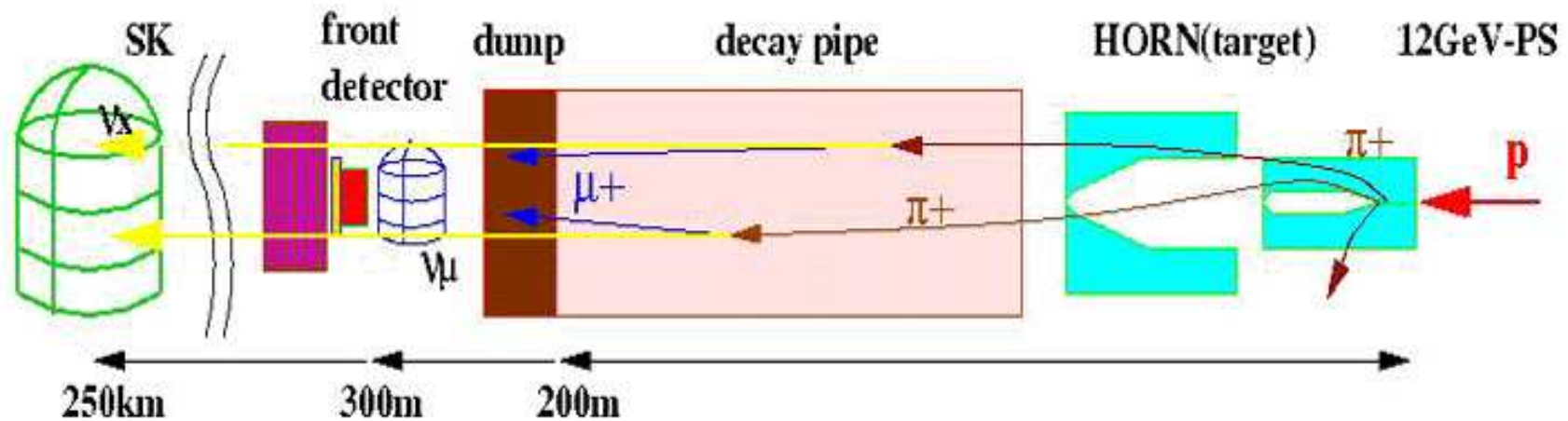
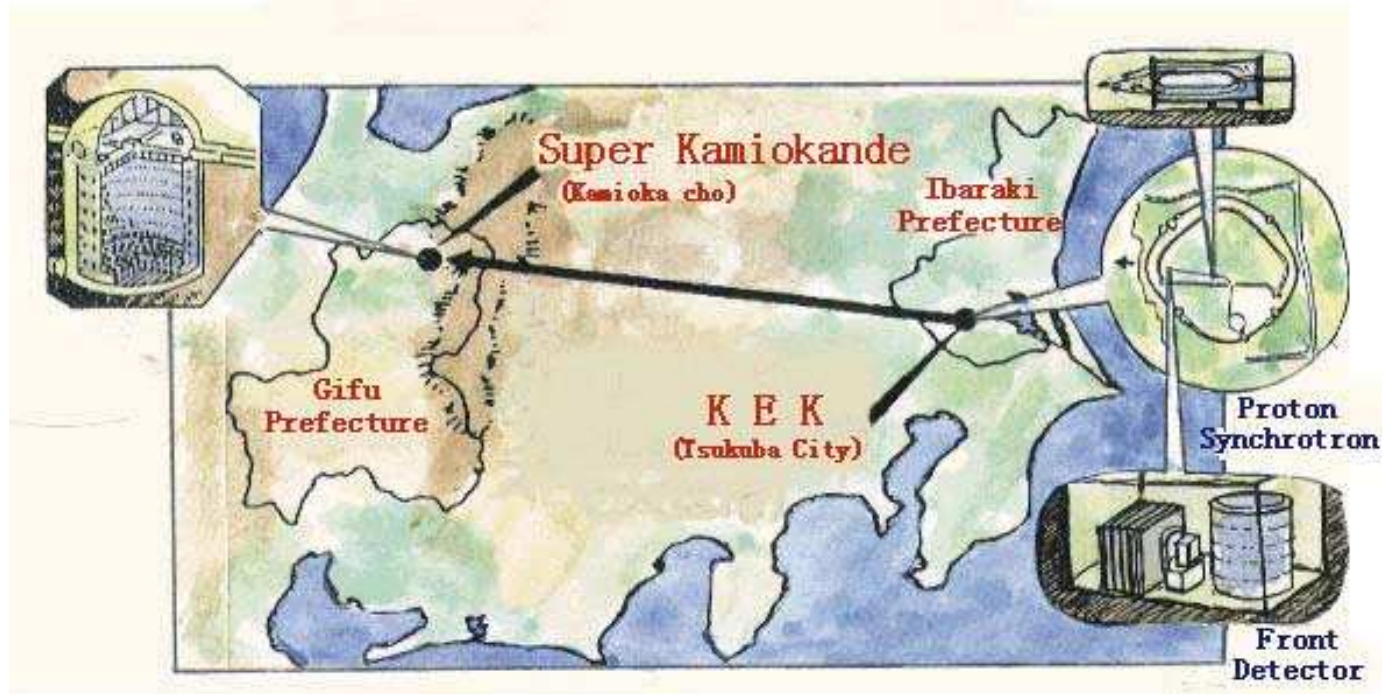


In beiden Fällen favorisiert:

$$0,2\text{eV}^2 < \Delta m^2 < 2,0\text{eV}^2$$

K2K

Appearance- / Disappearance-Experiment



Ergebnisse

Ohne Oszillationen erwartete Myonen-Ereignisse: $80^{+6,2}_{-5,4}$

Bisher wurden 56 Myonneutrinos nachgewiesen.
Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine statistische Fluktuation handelt ist kleiner als 1%.

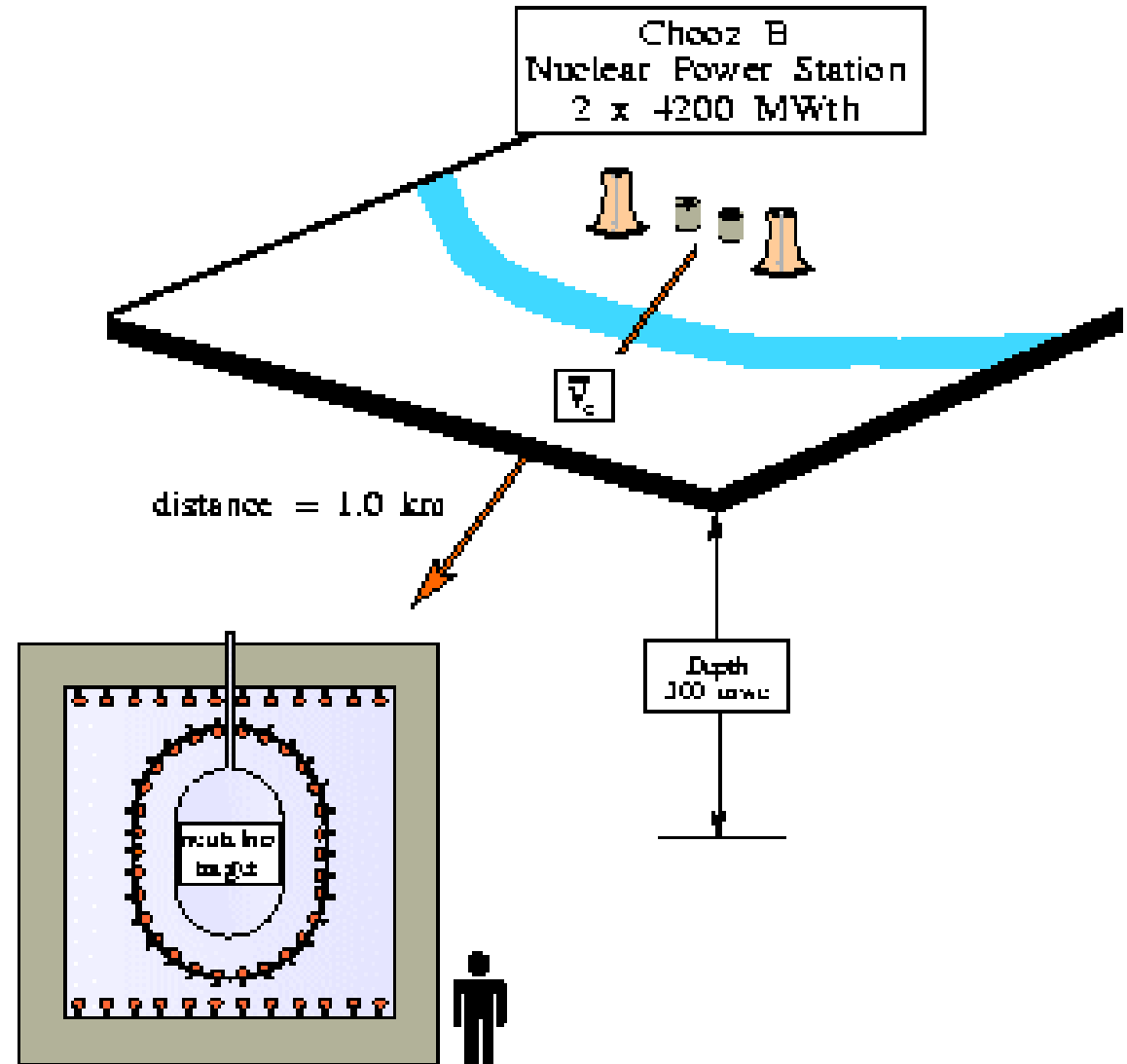
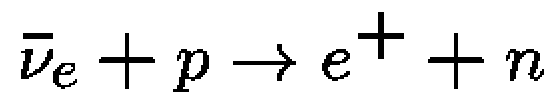
Oszillationen mit einer
Signifikanz von 3σ nachgewiesen

*Ausblick: Bisher wurden erst 50% der
Möglichkeiten von KEK genutzt; Geplant ist eine
Verdopplung der Neutrinorate in den nächsten zwei*

CHOOZ

- „ Reaktorexperiment
- „ Disappearance-Experiment
- „ Lage: Ardennes, Frankreich
- „ Energieschwelle: 1,8MeV
- „ Lebenszeit: 342 Tage

Nachweisreaktion



Chooz Underground Neutrino Laboratory
Ardennes, France

$$\frac{\Phi_{\bar{\nu}_e}(exp)}{\Phi_{\bar{\nu}_e}(theor)} =$$

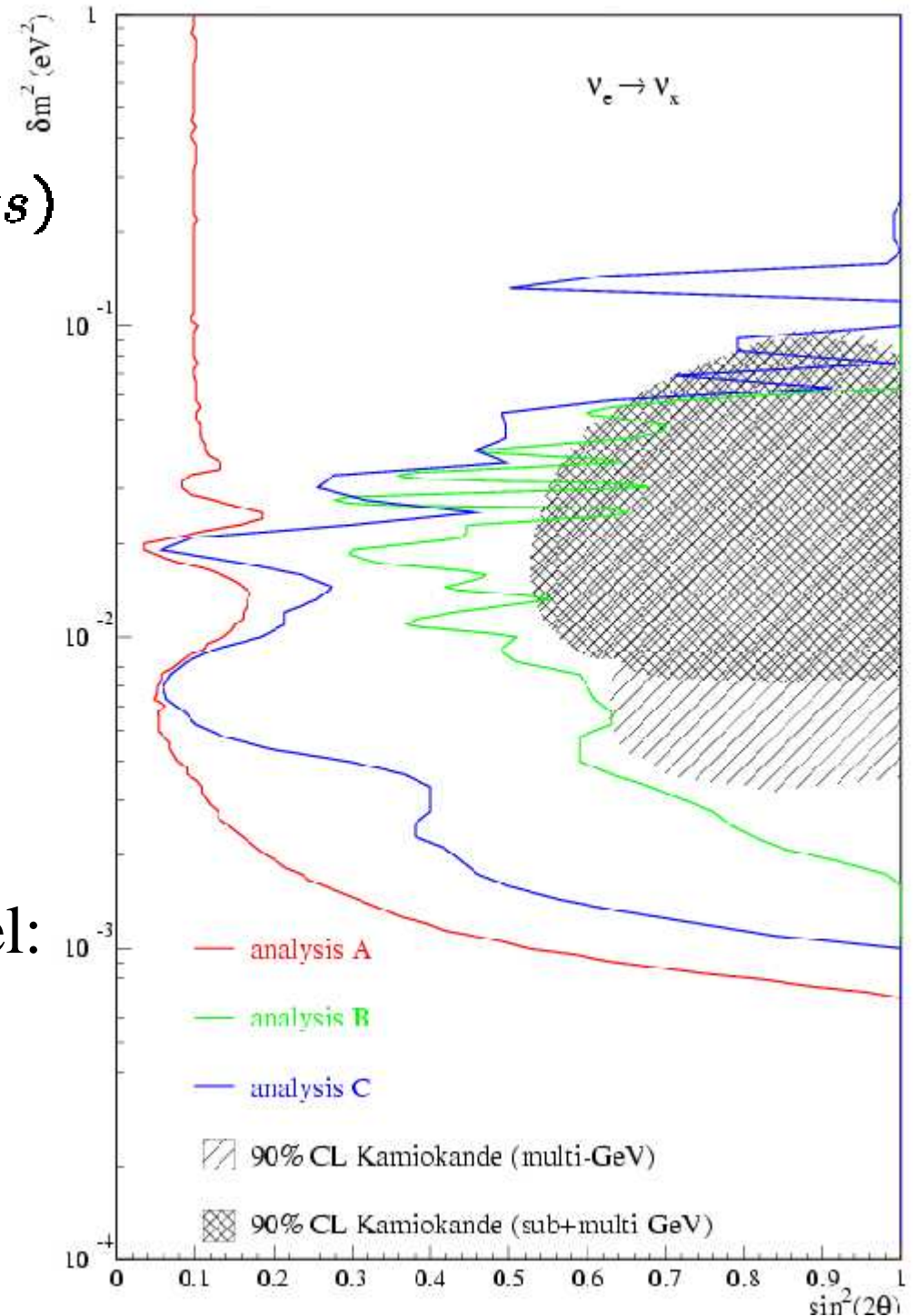
$$1,01 \pm 0,028(stat) \pm 0,027(sys)$$

Mit 90% CL Oszillationen
ausgeschlossen

Ausgeschlossene Gebiete:

Für maximalen Mischungswinkel:
 $\Delta m^2 > 7 \cdot 10^{-4} eV^2$

Für großes Δm^2 : $\sin^2 2\theta > 0,1$



Zusammenfassung der Ergebnisse

Atmosphärisches Neutrinoproblem durch *Oszillationen* $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$ erklärbar

Favorisiert wird zur Zeit ein großer Mischungswinkel und eine Massendifferenz von $\Delta m = 0,05-0,1\text{eV}$

CHOOZ: Ausschluss des Gebietes $\Delta m_{e\mu} > 0,25\text{eV}$

⇒ Lösung: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Solares Neutrinoproblem durch *Oszillationen* $\nu_e \rightarrow \nu_x$ erklärbar

Favorisiert werden zur Zeit ein großer Mischungswinkel und eine Massendifferenz von $\Delta m = 0,01\text{eV}$

LSND: Massendifferenz $\Delta m_{e\mu} > 0,4\text{eV}$

Da nur zwei unabhängige Δm^2 -Werte existieren können, kommt es hier zu einem Widerspruch