

# *Neutrinooszillationen*

10. Dezember 2002

Seminarvortrag von Alexander Floßdorf

Betreuung: Prof. Thomas Hebbeker

# Problematik

-solares Neutrino problem

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

-atmosphärisches Neutrino problem

(das Verhältnis von Myon- zu Elektroneneutrinos 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!

$\nu_i$  seien die Massen-,  $\nu_\alpha$  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:

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

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

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

$L = ct$  = 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:

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

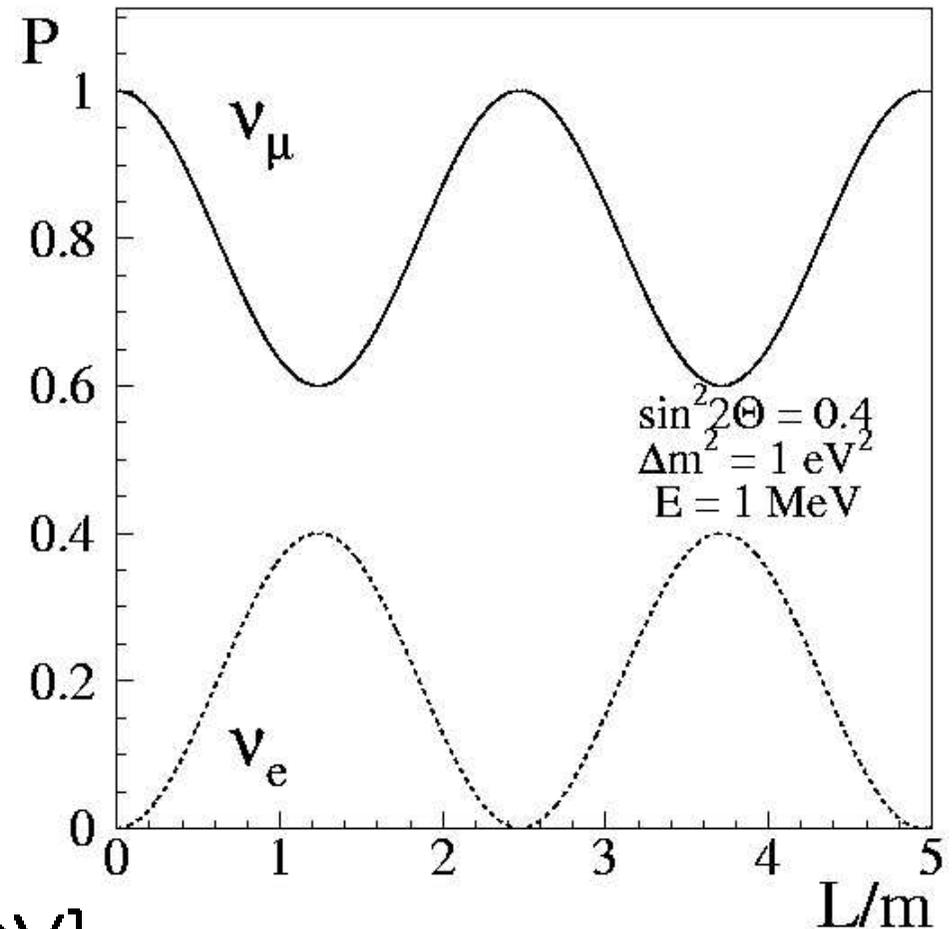
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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



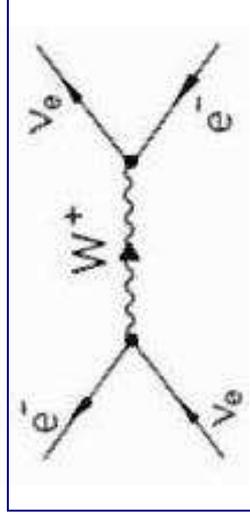
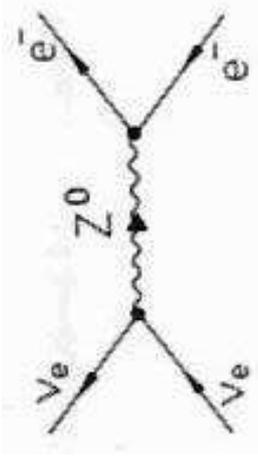
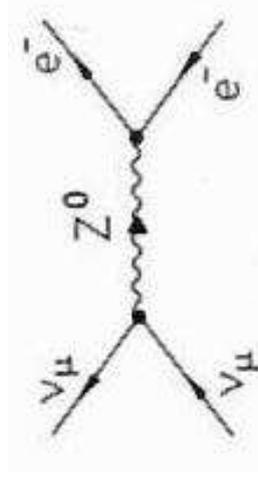
Oszillationslänge:

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

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

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)



Elektroneneutrinos 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

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

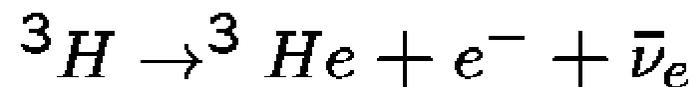
In Materie ändern sich Mischungswinkel zwischen Elektron- und anderen Neutrinos

## 2. Allgemeine Bemerkungen zu Experimenten

Bisher experimentell ermittelte Massenoberggrenzen(95% CL)

- e-Neutrino: 2,8eV
- $\mu$ -Neutrino: 0,17MeV
- $\tau$ -Neutrino: 18,2MeV

***Beispiel: Messung der Antielektronneutrinomasse über Tritiumzerfall:***



# Untersuchung eines $\nu_\alpha$ -Strahls

Nachweis der Neutrinos durch Entstehung von  $e, \mu, \tau$

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  $\nu_\alpha$

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

Veränderung der Oszillationswahrscheinlichkeiten durch Variation von  $L/E$ :

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

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

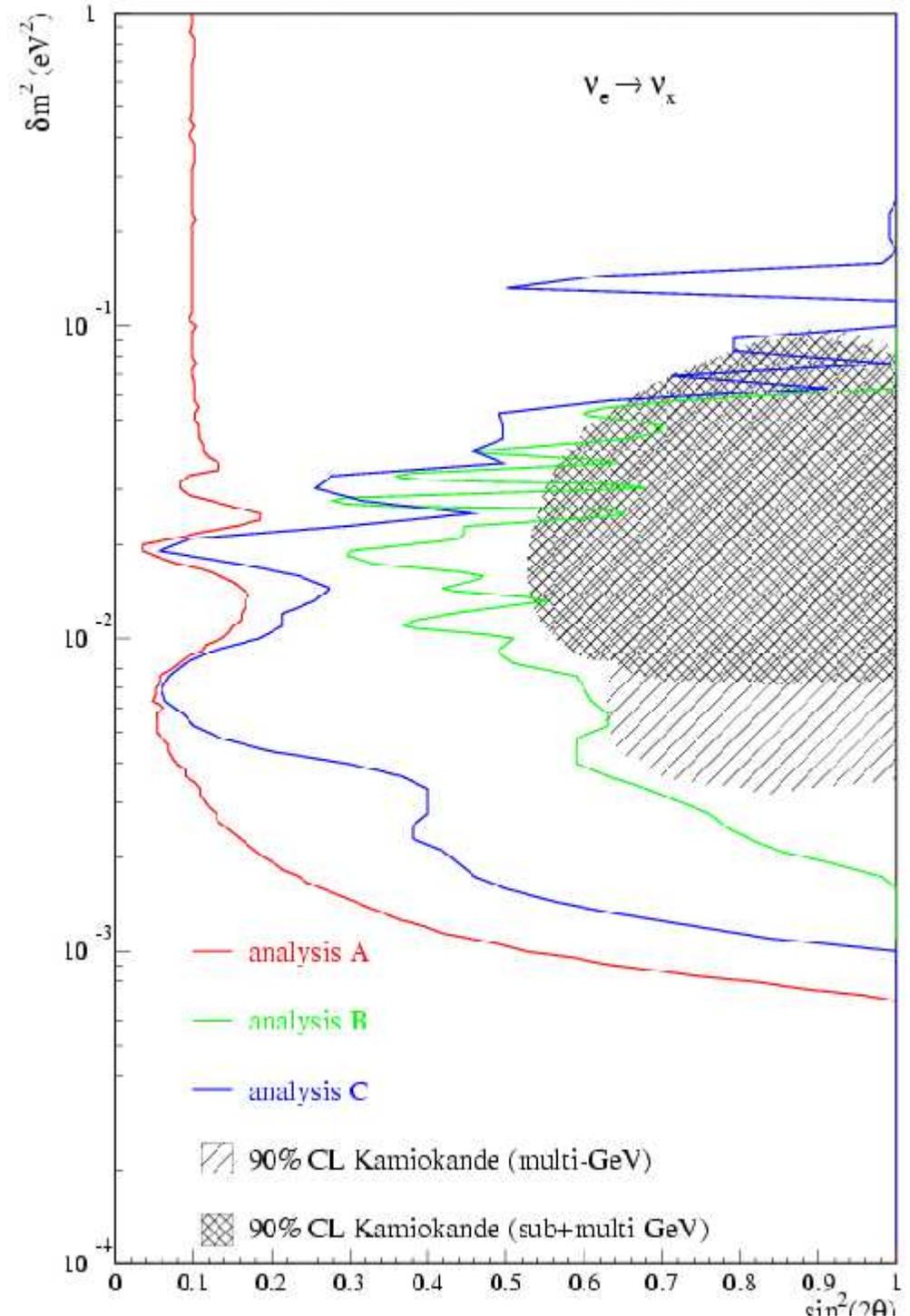
<i>Quelle</i>	<i>L/E-Bereich[m/MeV]</i>	$\Delta m^2 [eV^2]$
<i>Atmosphäre</i>	$1 - 10^5$	$10^{-5}$
<i>Sonne</i>	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{-12}$
<i>künstlich</i>	$1 - 10^4$	$10^{-4}$

- 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  $\Delta m^{-2}$  ist, so erhält man nur Mittelwerte der Übergangswahrscheinlichkeiten

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

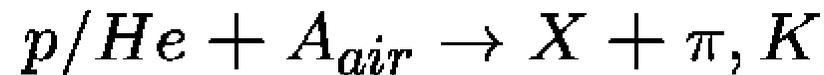
→ Vergleich mit der  
Theorie, die von den  
Parametern  $\Delta m^2$  und  
Mischungswinkel  $\theta$   
abhängt

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



# 3. Atmosphärische Neutrinos

Atmosphärische Neutrinos entstehen durch  
Hadronenschauer in der Atmosphäre

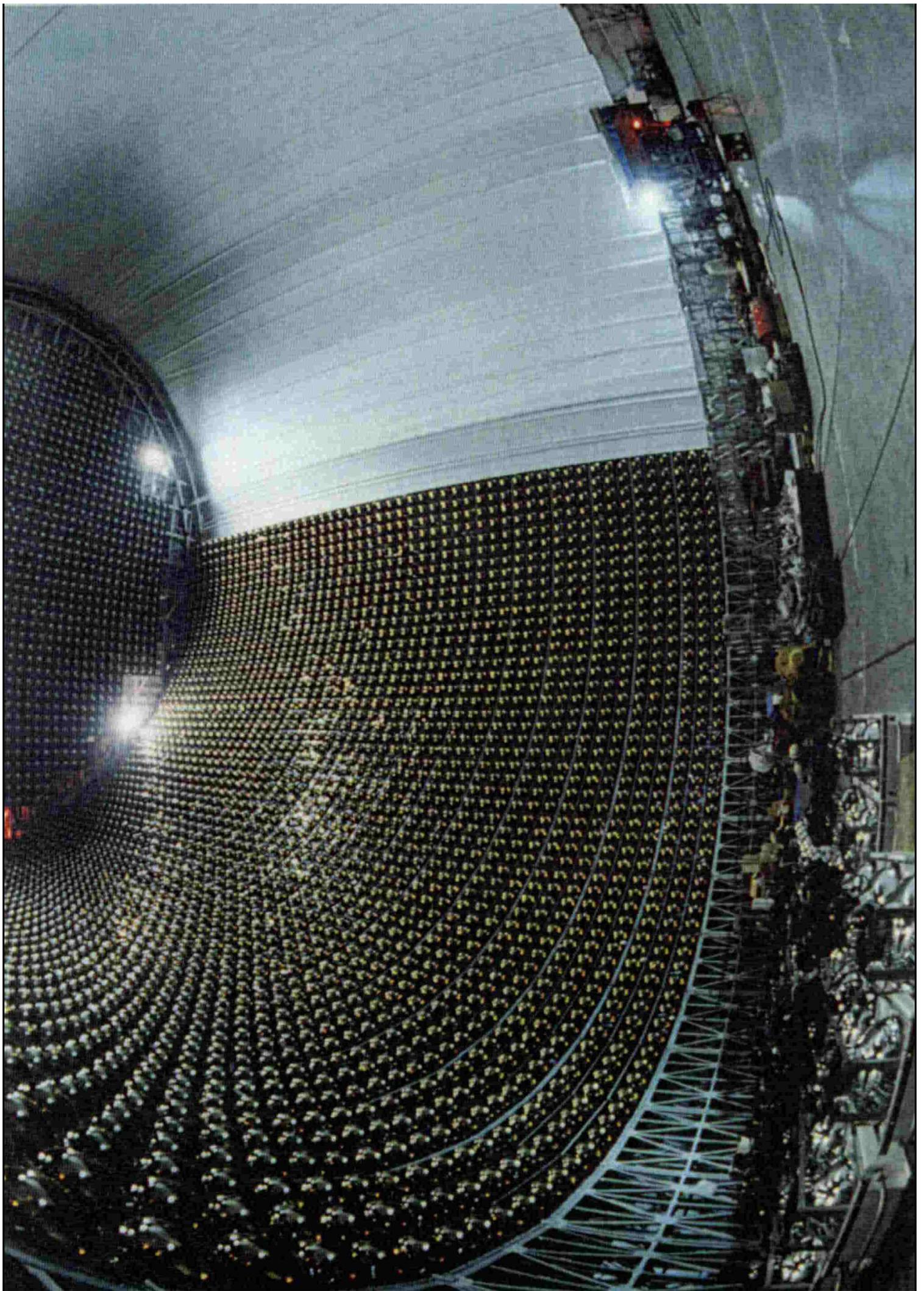


Erwartetes Verhältnis Myon-Elektron-Neutrinos  
bei Energien im MeV-Bereich: 2 zu 1

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  $\mu^\pm$  erzeugt, die Cherenkovlicht ausstrahlen, das detektiert wird.

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

Myonenrate: 2Hz

Energieschwelle von Super Kamiokande: 5MeV

Beobachtungsintervall: 100MeV bis 1000GeV

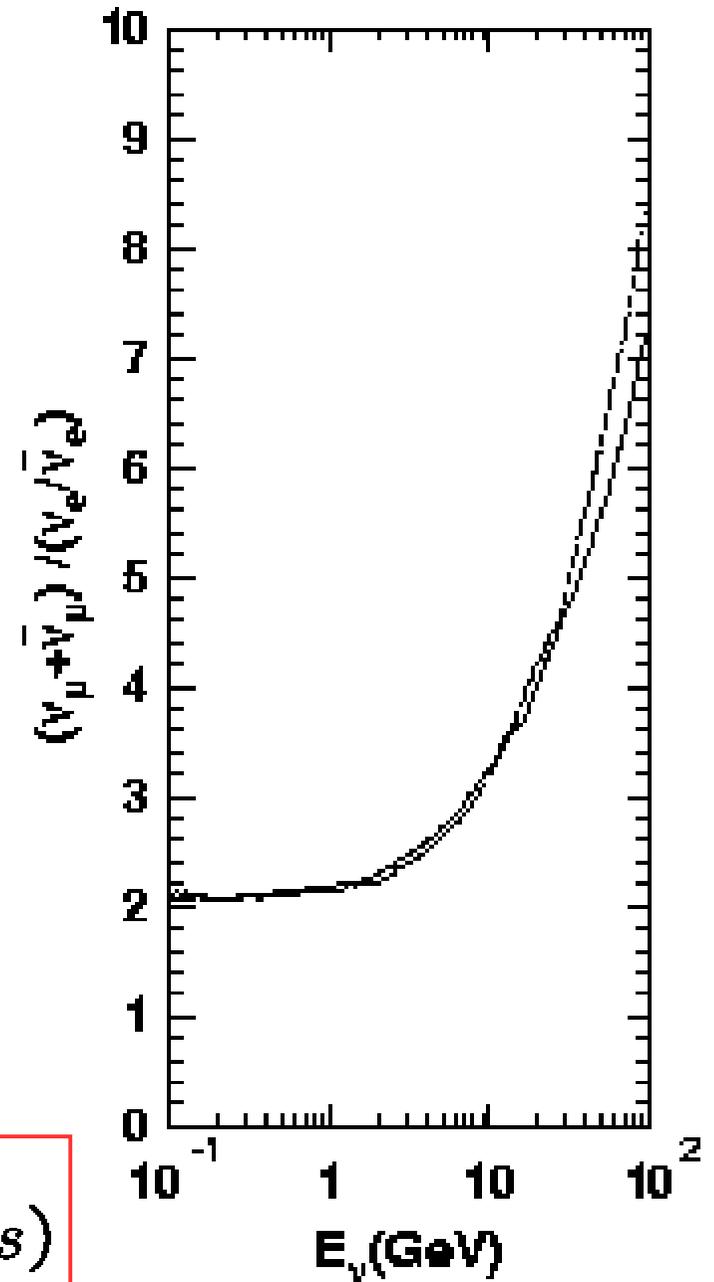
# Verhältnis der Neutrinoarten

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

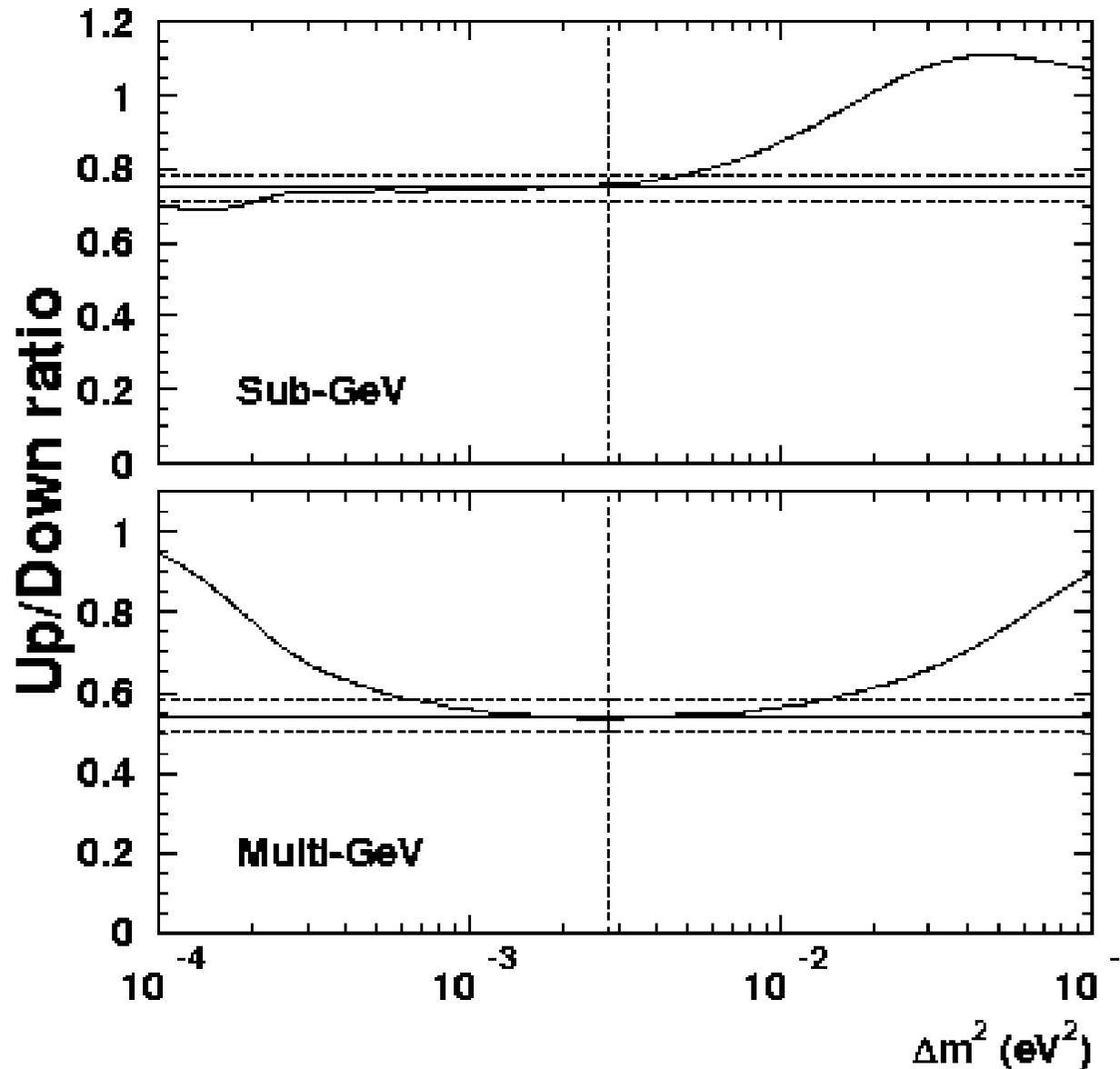
$$V := \frac{\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}}{\nu_e + \bar{\nu}_e}$$

*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  $5\sigma$

# Hypothese: Zwei- Flavouroszillationen

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

bester Fit:

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

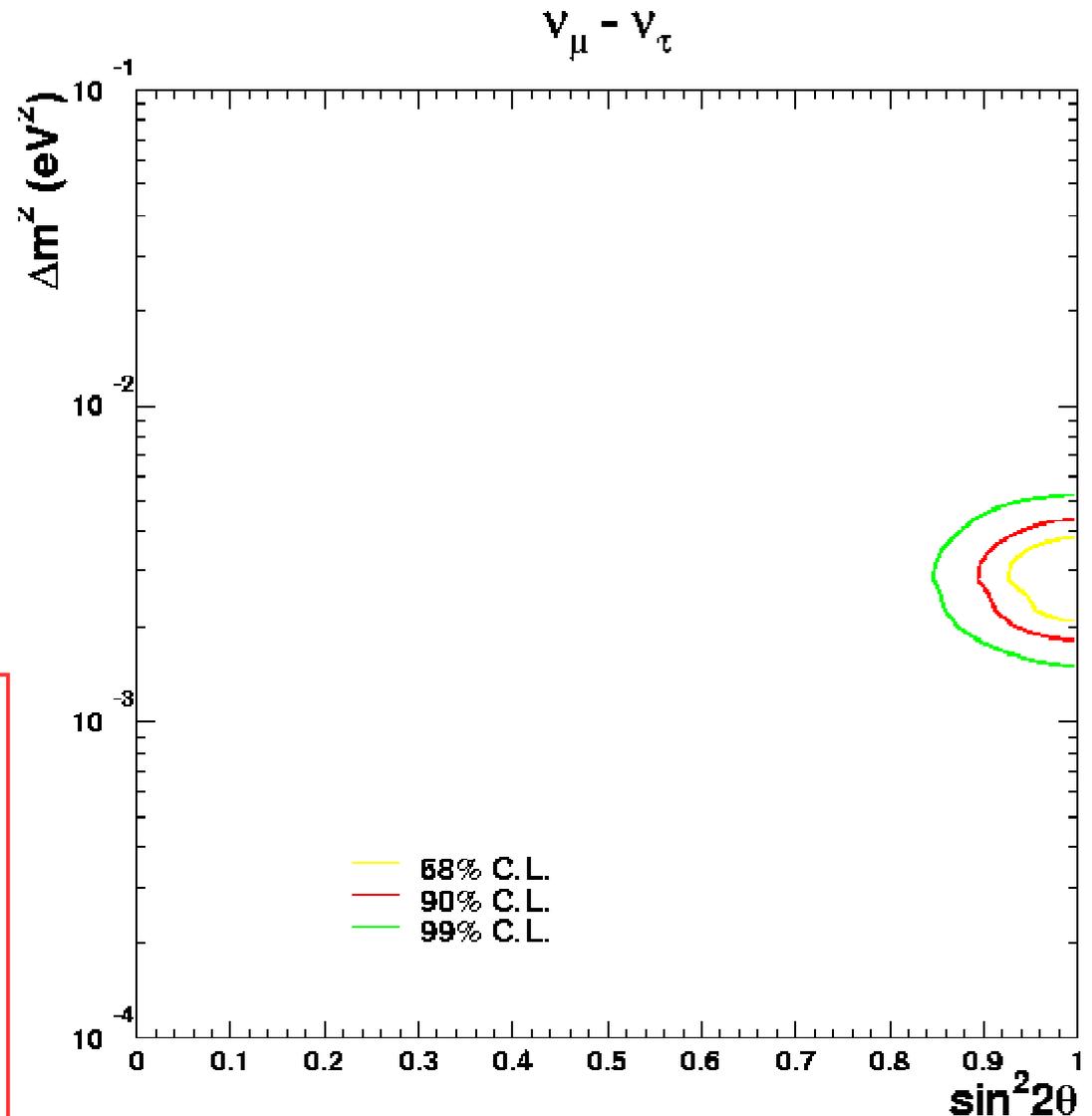
$$\Delta m^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$$

Mit 90% CL (Confidence Level) ergibt sich:

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

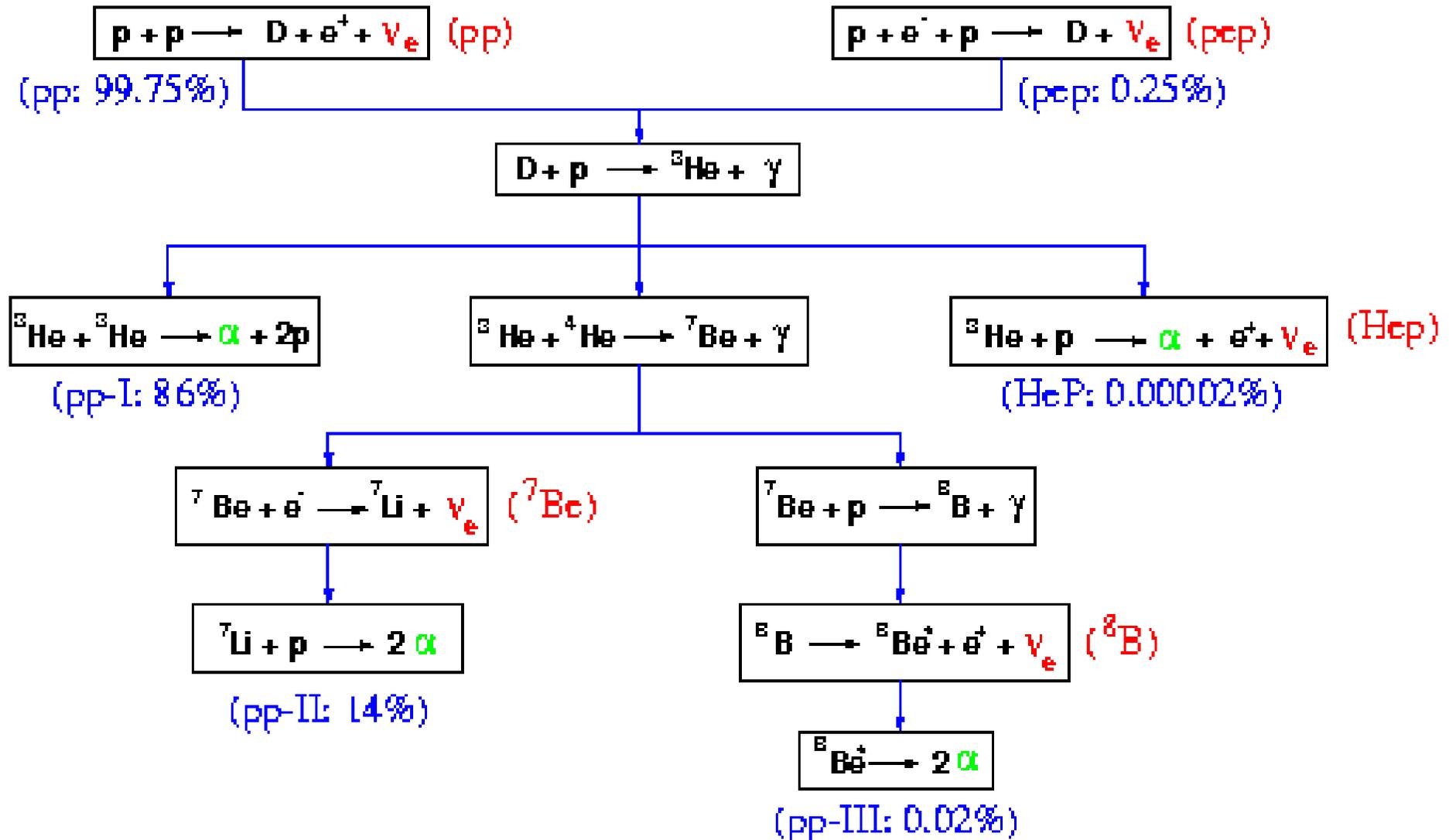
$$< 4,5 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2,$$

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



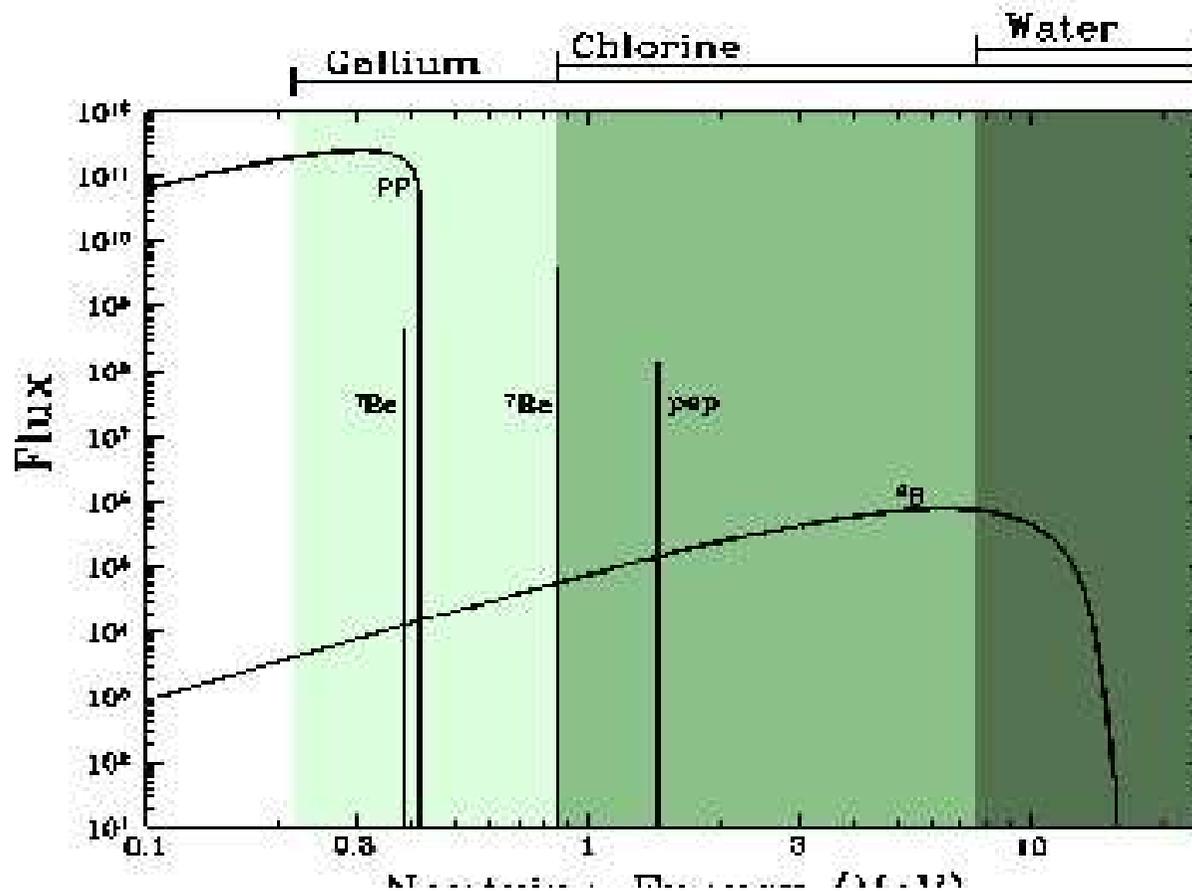
# 4. Solare Neutrinos

## Standard -Sonnen -Modell (SSM)



# Vorhersage des SSM

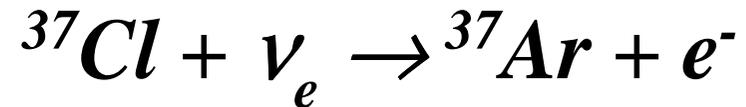
Reaktionsquelle	Fluss [ $10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
pp	$5,69 \pm 0,06$
${}^7\text{Be}$	$0,480 \pm 0,043$
pep	$0,0139 \pm 0,0001$
${}^8\text{B}$	$(5,15^{+0,98}_{-0,72}) \cdot 10^{-4}$



# Homestake

*Chlorexperiment:*

*Nachweis über inversen  $\beta$ -Zerfall:*



- „ Lage: Homestake Goldmine in Lead, South Dakota, USA
- „ zylindrischer Tank mit einem Volumen von 390.000 Litern
- „ Targetmaterial: Tetrachloroethen( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ )
- „ Messzeitraum: 1968 bis heute



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

Energieschwelle: 0,814MeV

Detektion von  $^8\text{B}$ -,  $^7\text{Be}$ -, 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:

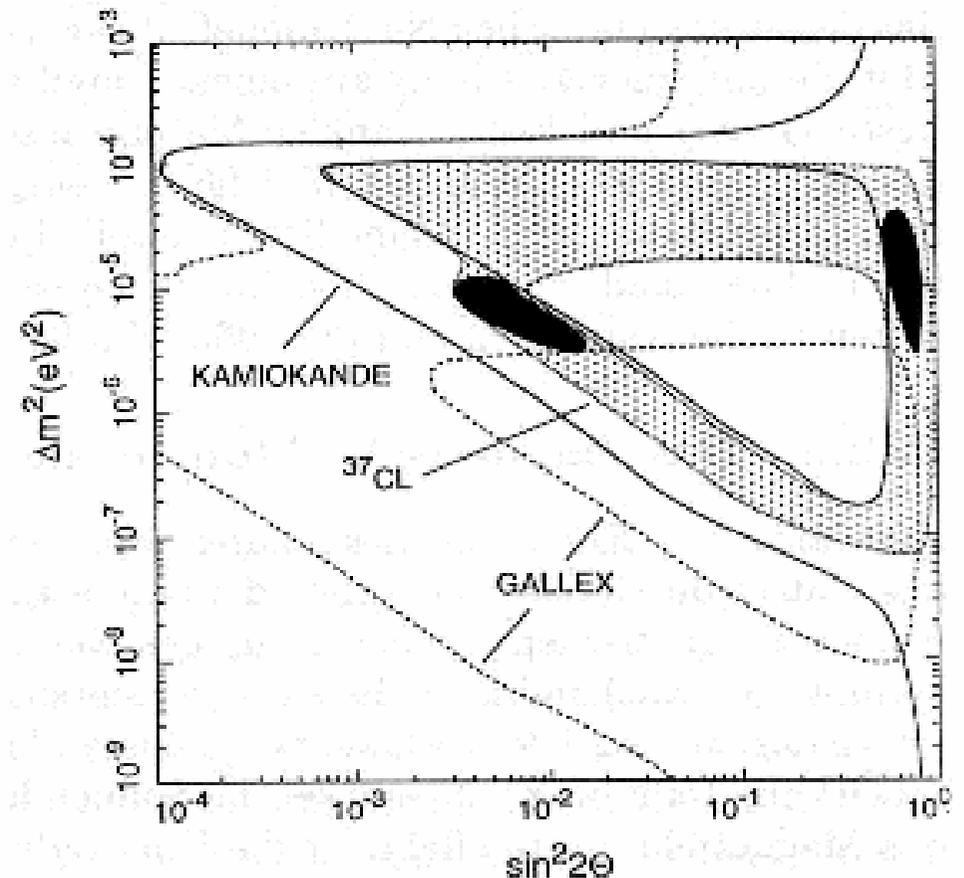
$$\Phi = 7,7_{-1,0}^{+1,2} \text{SNU}$$

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*

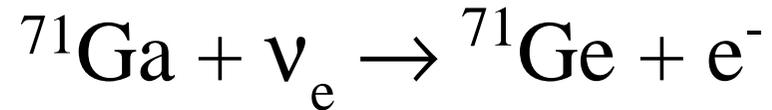
*konsistent mit  
Oszillationen  $\nu_e \leftrightarrow \nu_x$*



# GALLEX / GNO

Galliumexperiment:

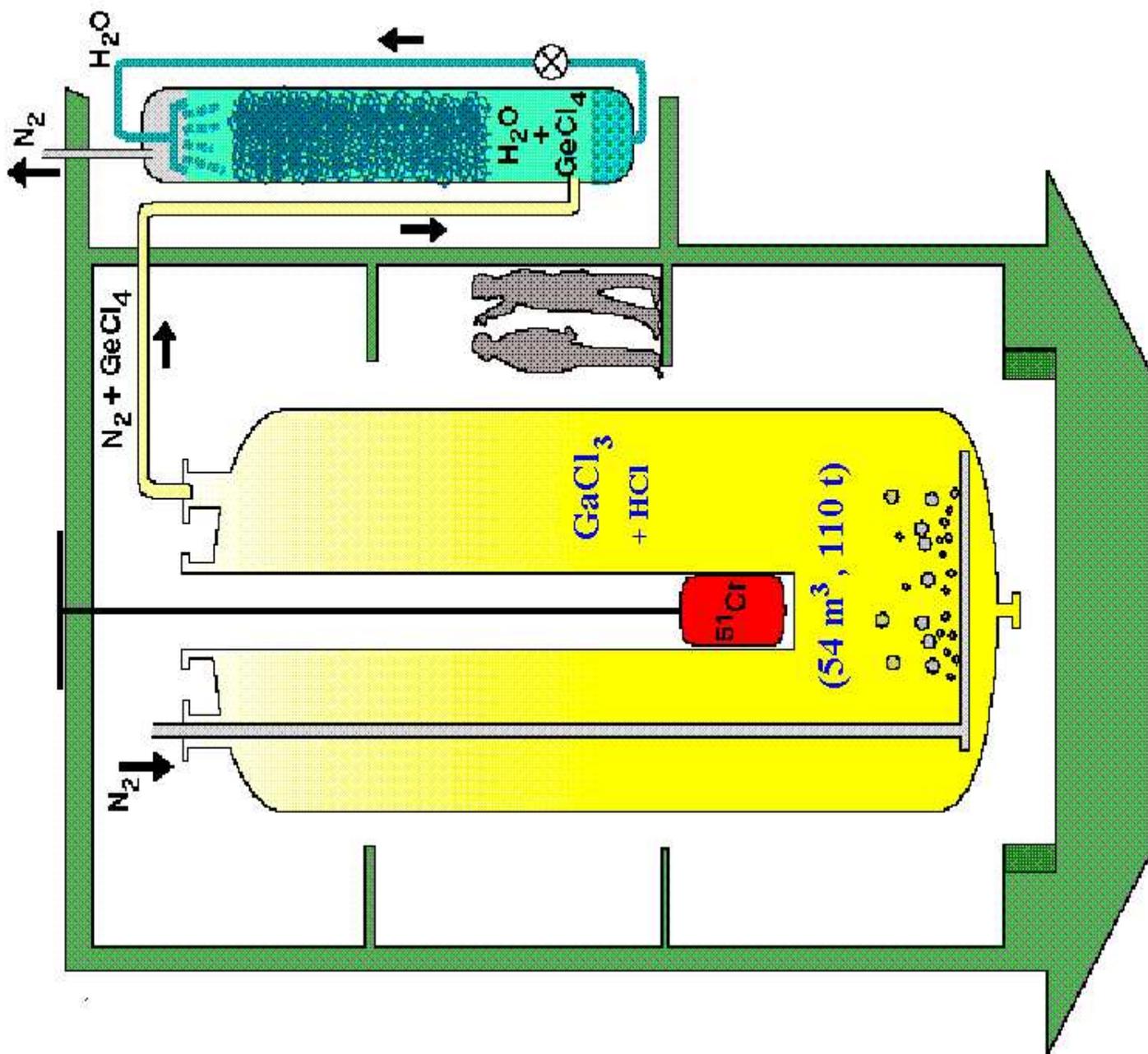
Nachweisreaktion:



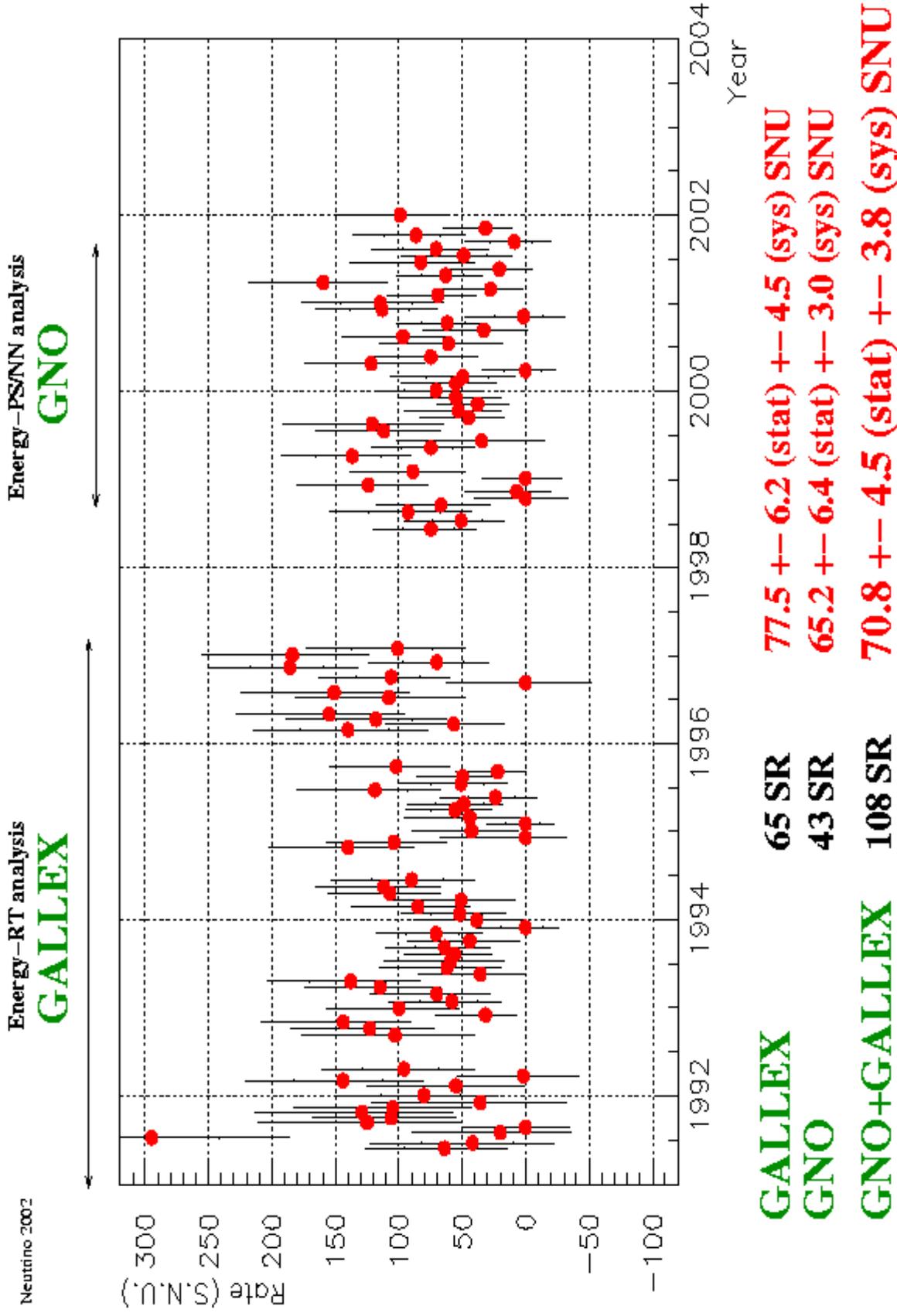
Energieschwelle: 233,2keV

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

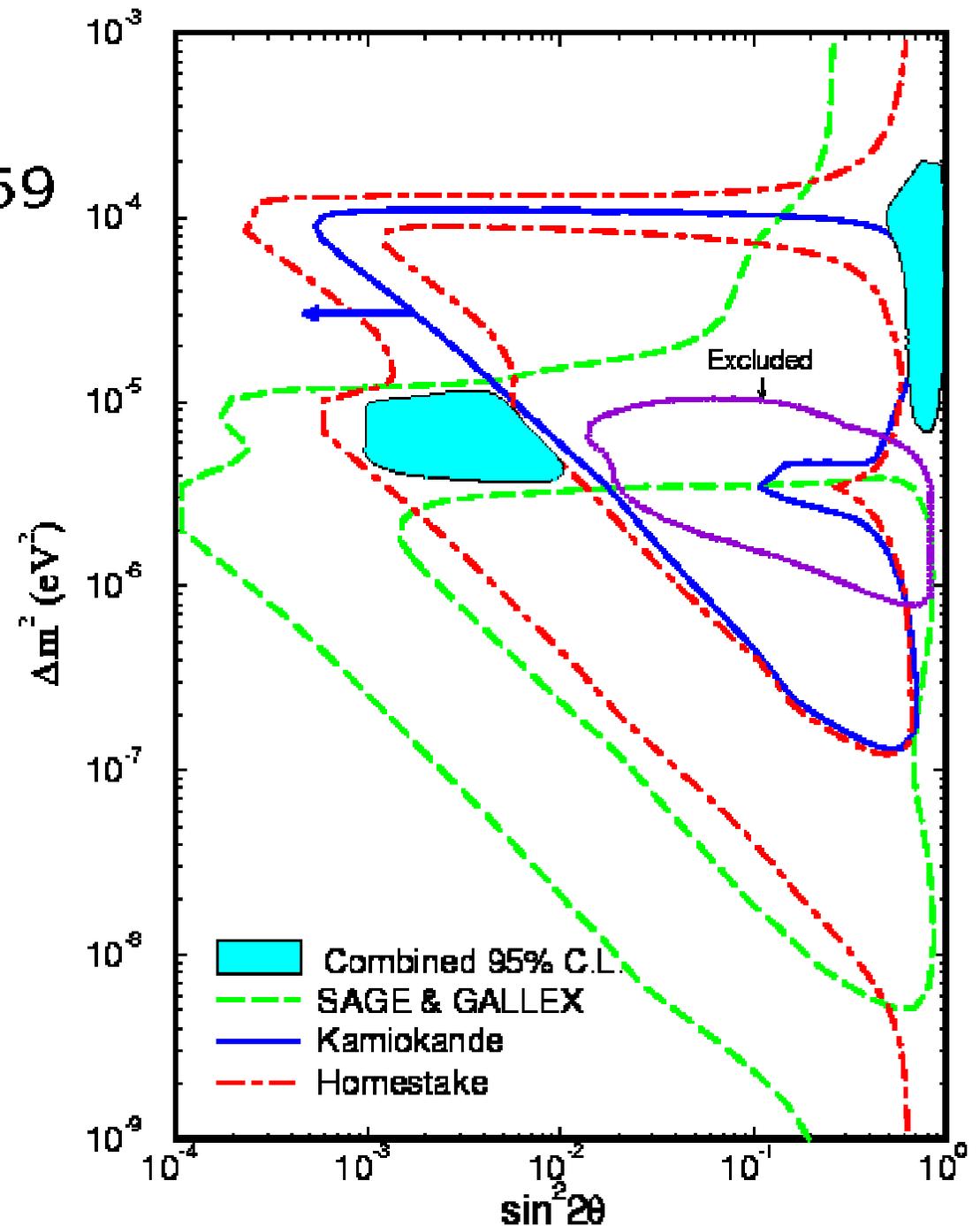


Vergleich mit SSM:

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

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

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



# Super Kamiokande

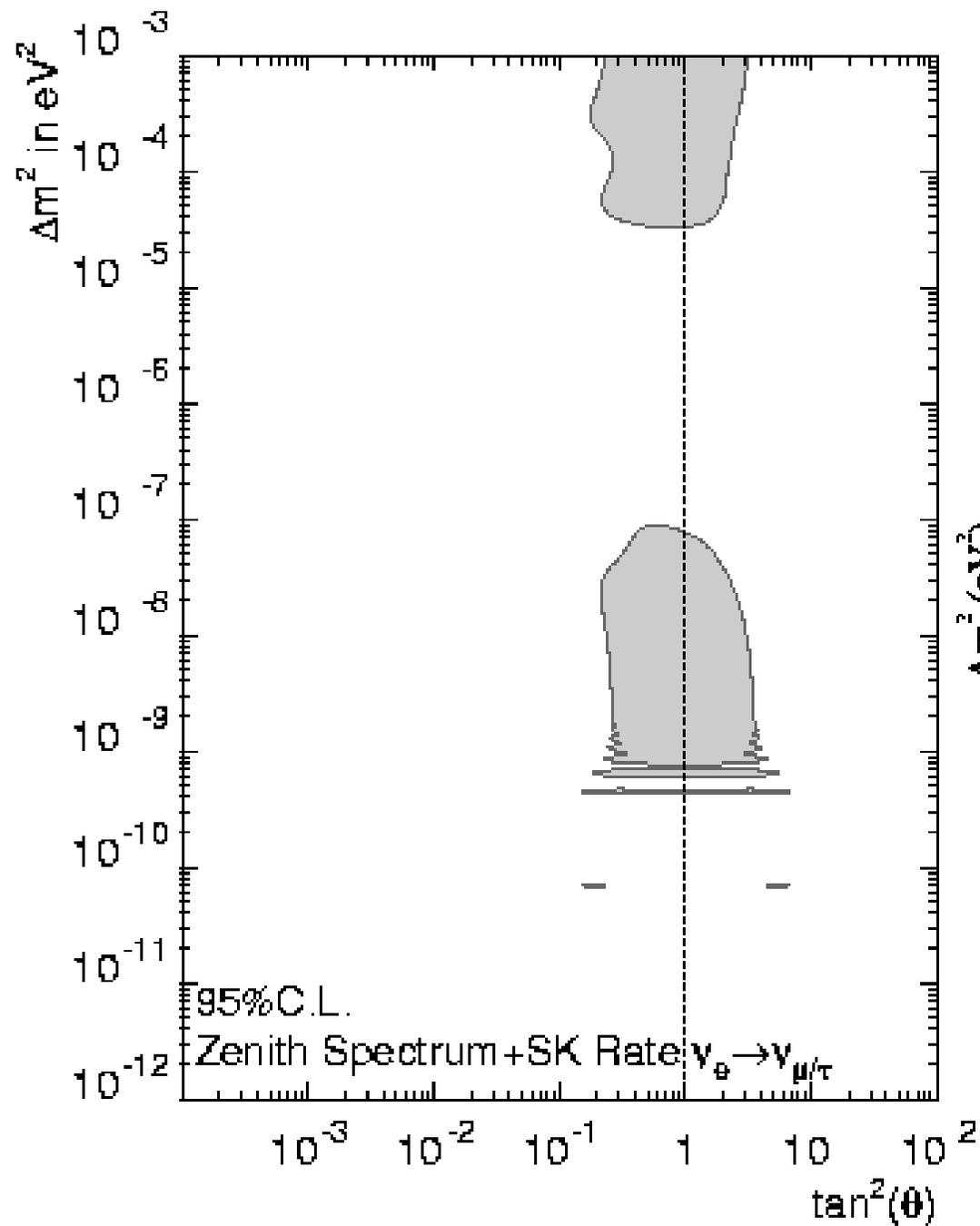
Untersuchung des  $^8\text{B}$ -Flusses zwischen 5,5MeV und 20MeV über Streuung der Elektronenneutrinos an Elektronen (ES) über einen Zeitraum von 1496 Messtagen.

Verhältnis:

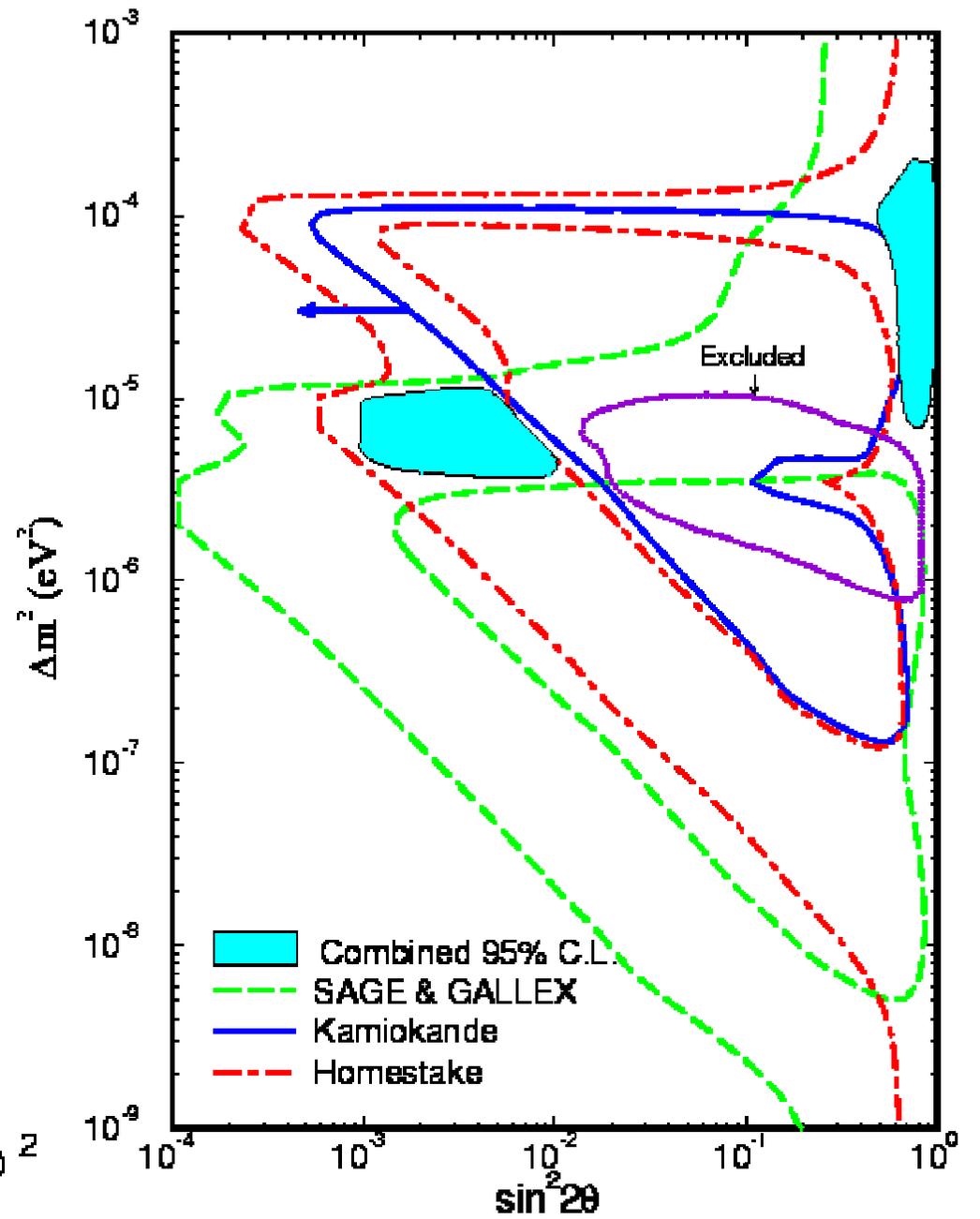
$$\frac{\Phi(\text{exp})}{\Phi(\text{theor})} = 0,465^{+0,015}_{-0,013}$$

*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!*

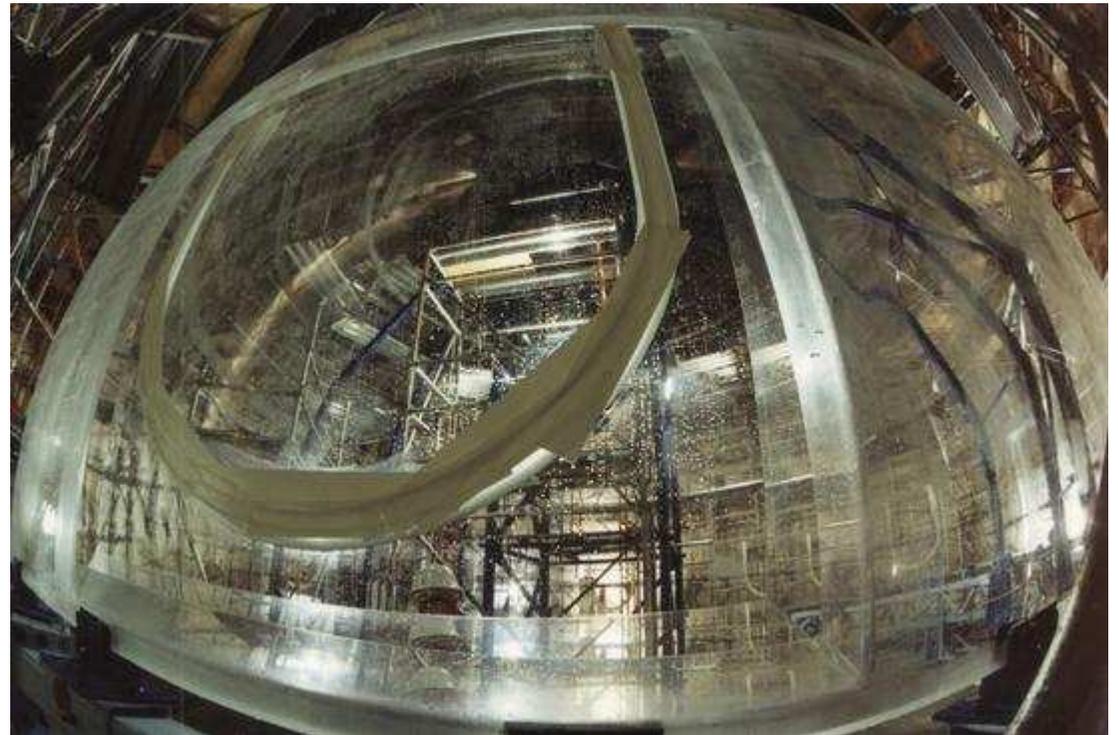
*Lösung: Es müssen auch die Flüsse der anderen Neutrinoarten gemessen werden*

# SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

*SNO kann alle drei Flavours*

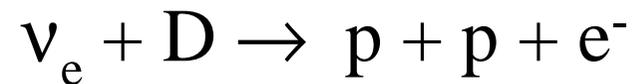
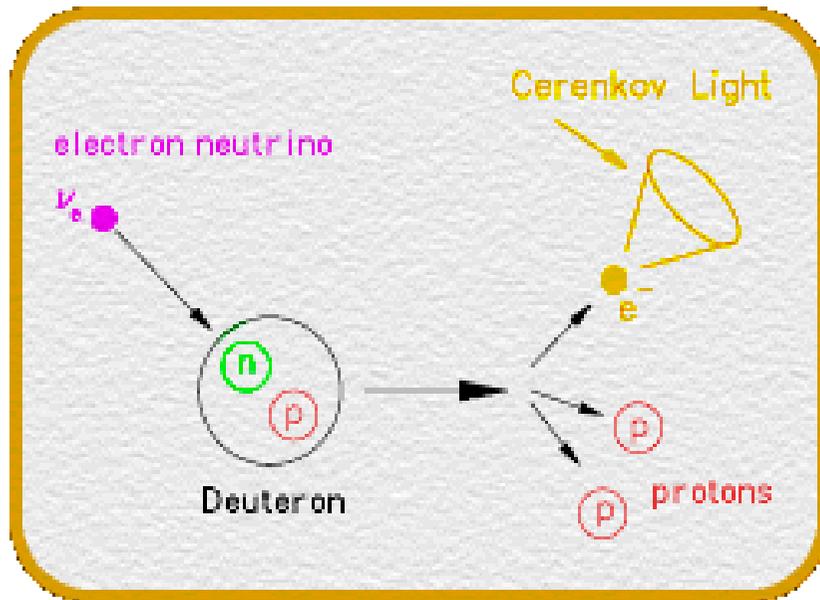
*nachweisen!*

- „ 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

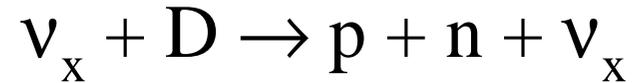
## Charged Current Reaction



Ausschließlich Nachweis von Elektroneneutrinos möglich

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

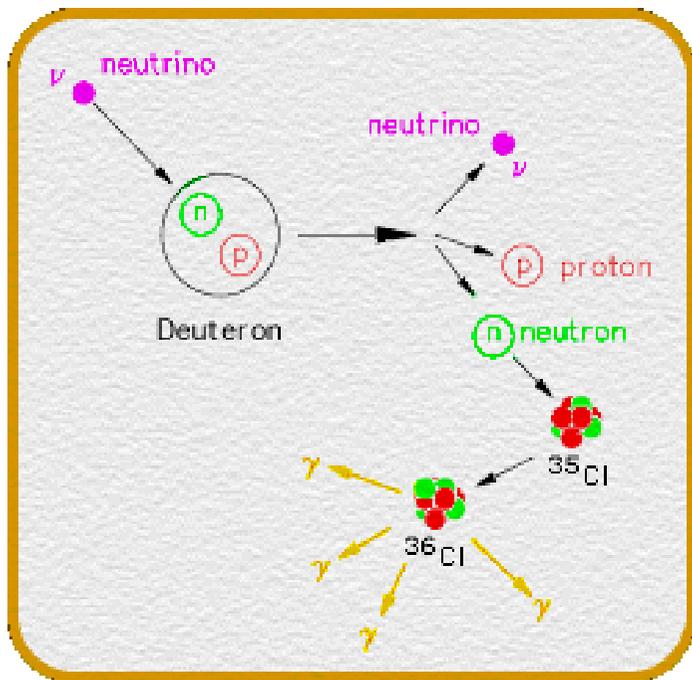
# Neutral Current Reaction



Nachweis von allen Neutrinoarten  
gleichermaßen, keine  
Unterscheidung möglich

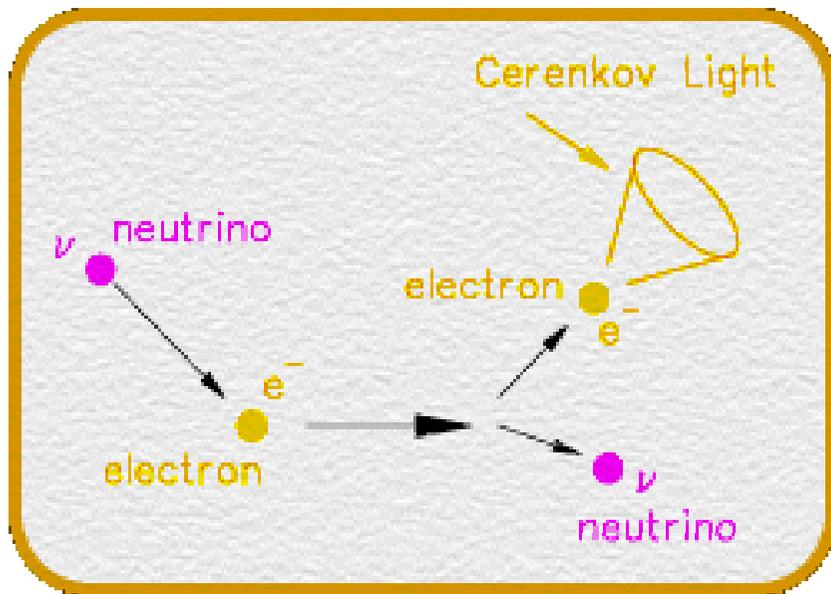
Zugabe von NaCl, da Chlor einen  
hohen Absorptionsquerschnitt für  
thermische Neutronen hat

beim Neutroneneinfang emittierte  $\gamma$ -  
Quanten streuen an Elektronen  $\rightarrow$   
Cherenkovlicht



# Electron Scattering (ES)

$$e^{-} + \nu_x \rightarrow e^{-} + \nu_x$$



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:

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

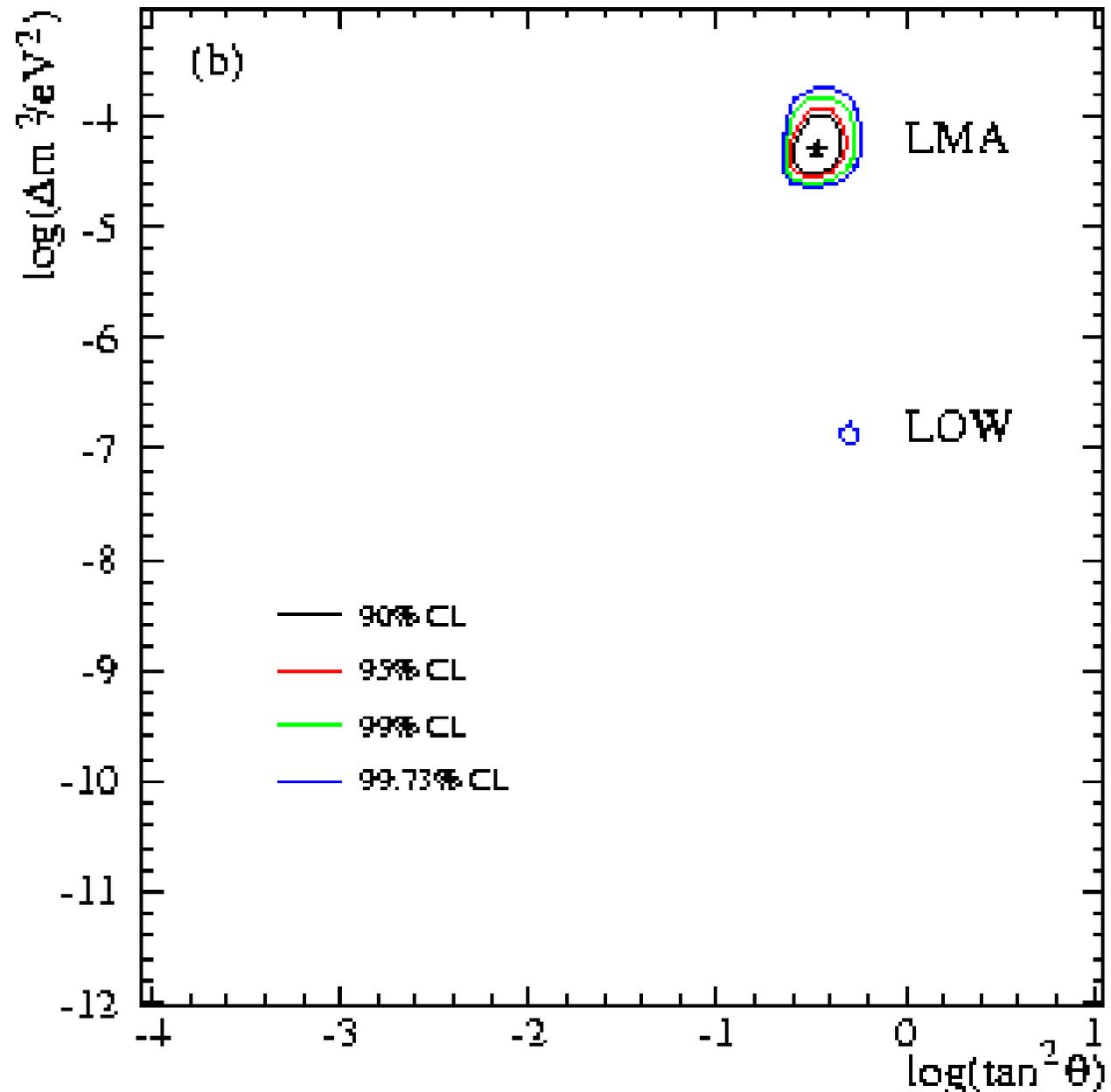
$$\Phi_e = 1,76 \pm 0,05(stat) \pm 0,09(sys) \cdot 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

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

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

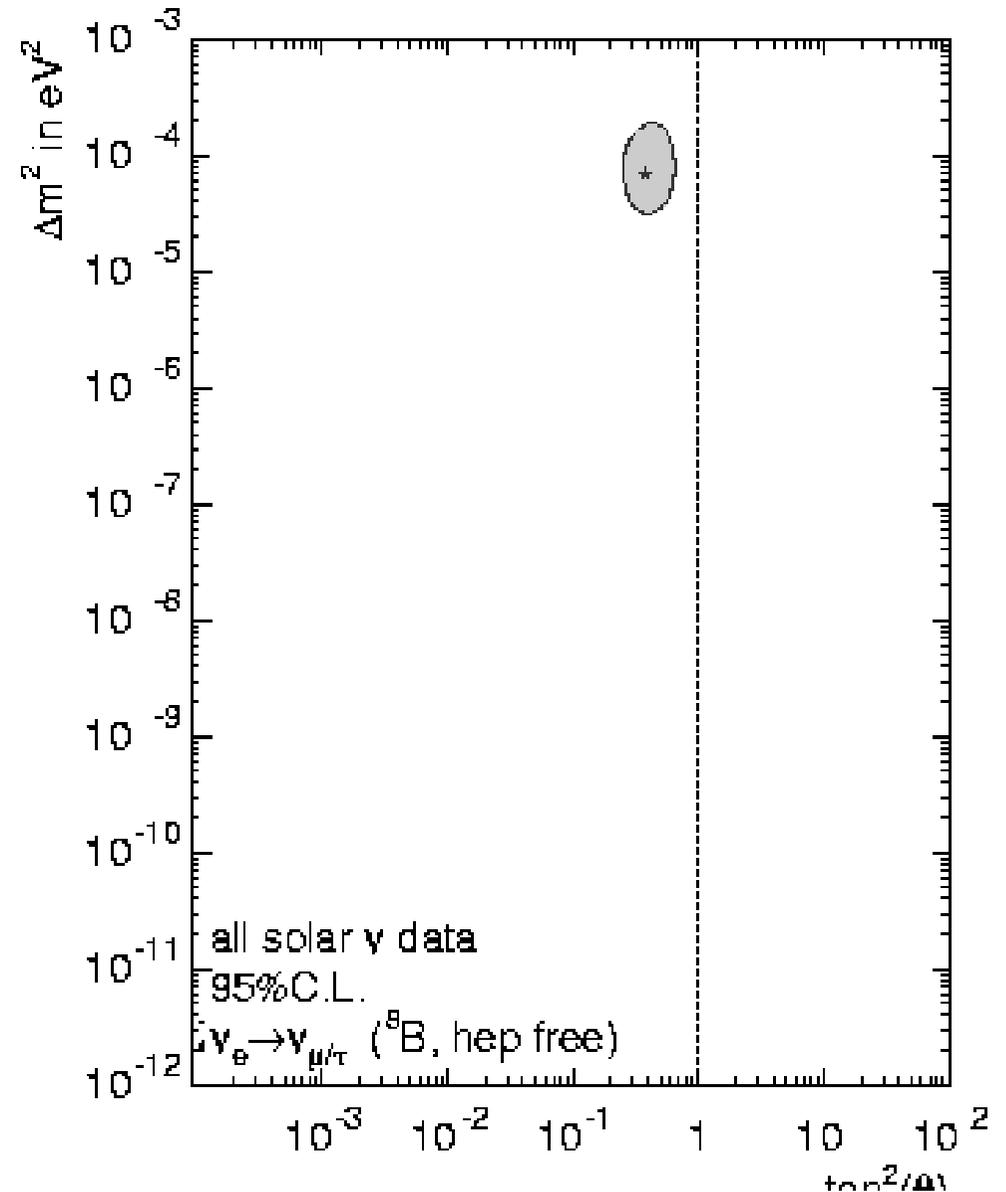
Signifikant  
für  
Oszillationen

$\nu_e \leftrightarrow \nu_{\mu,\tau}$   
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  $\nu_e$ -disappearance



# 5. Künstlich erzeugte Neutrinos

- „ Beschleunigerexperimente

1. Short Baseline: LSND

2. Long Baseline: K2K

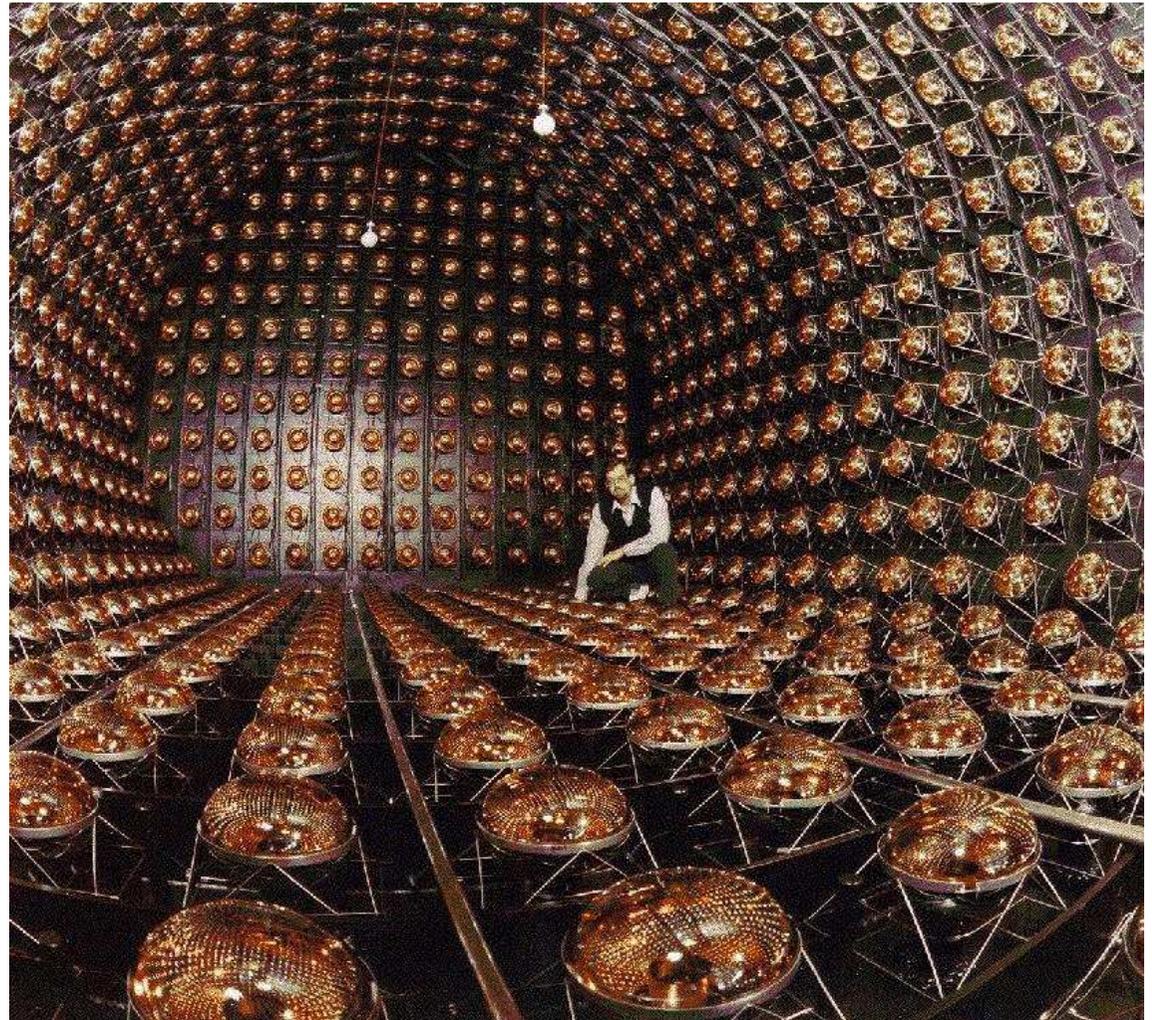
- „ Reaktorexperiment:

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):

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

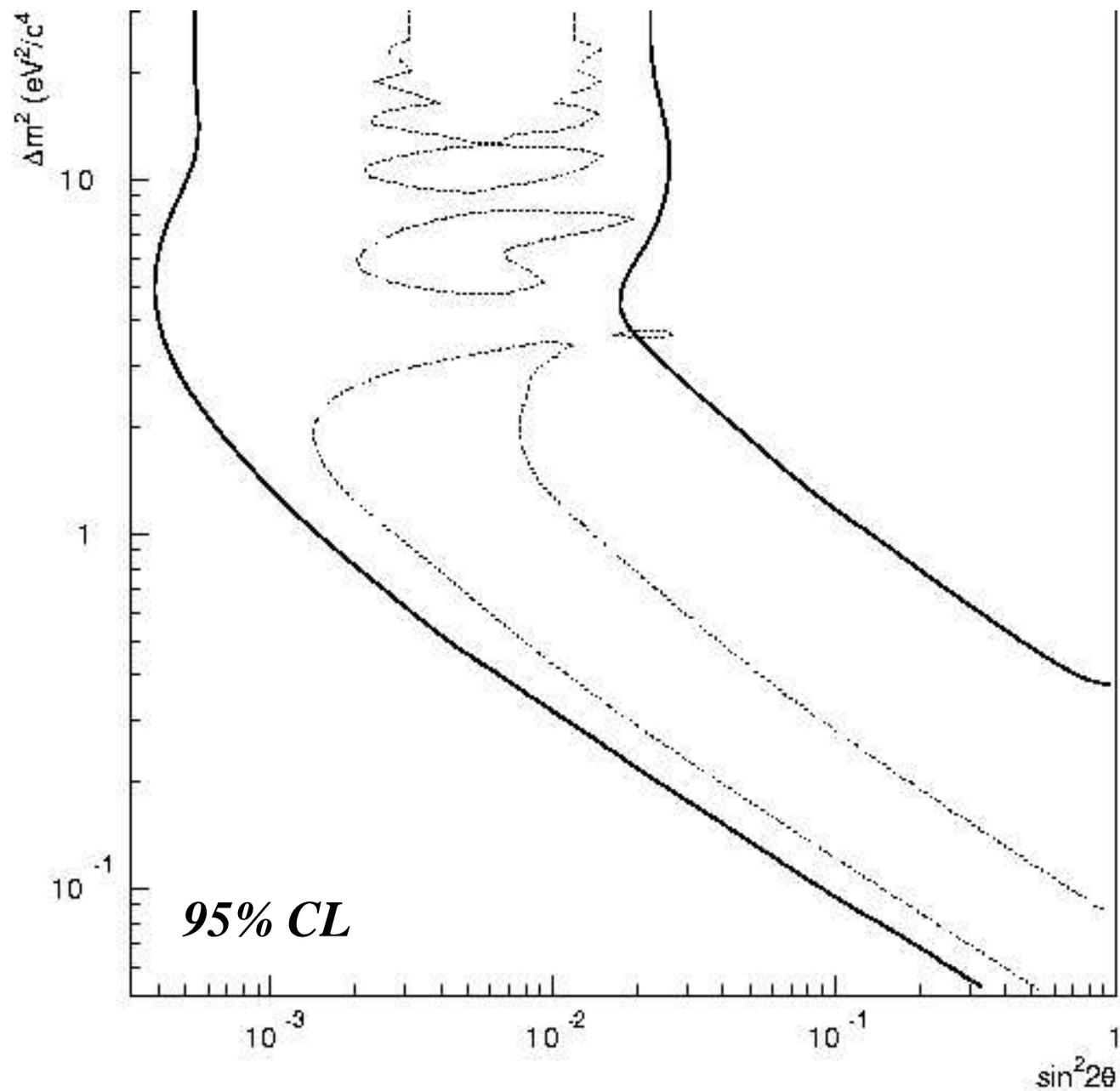
$$51,0^{+20,2}_{-19,5}(stat) \pm 8,0(sys) \bar{\nu}_e$$

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

Oszillationswahrscheinlichkeiten:

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

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

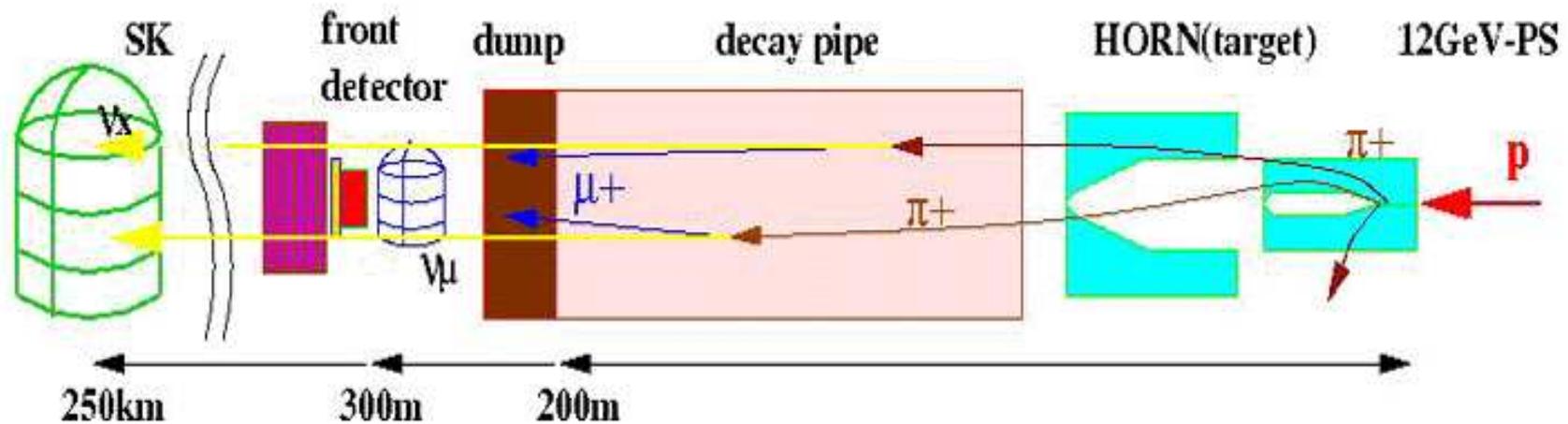
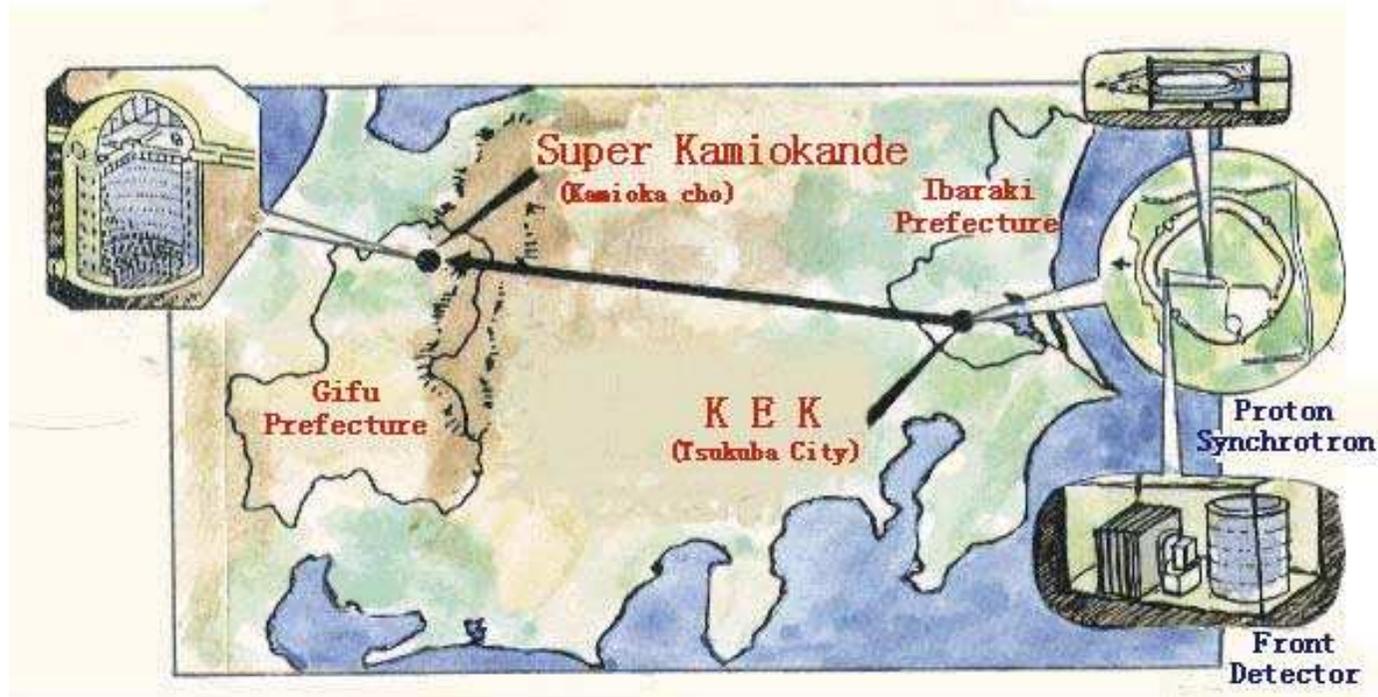


In beiden Fällen favorisiert:

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

# 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  $3\sigma$  nachgewiesen

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

# CHOOZ

„ Reaktorexperiment

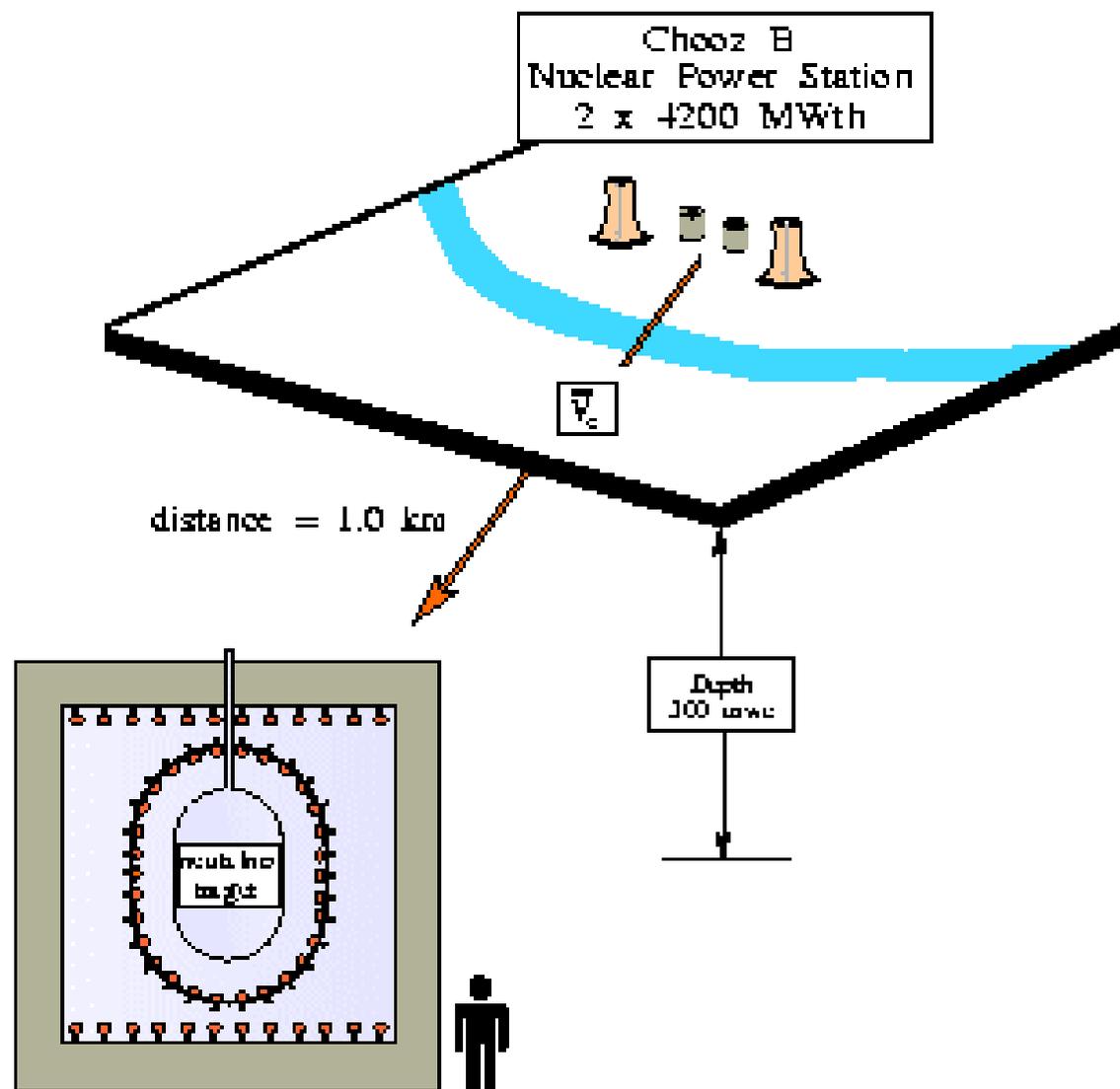
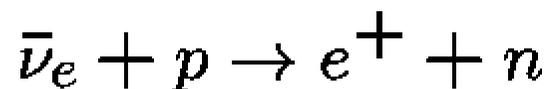
„ Disappearance-  
Experiment

„ Lage: Ardennes,  
Frankreich

„ Energieschwelle:  
1,8MeV

„ Lebenszeit: 342  
Tage

Nachweisreaktion



Chooz Underground Neutrino Laboratory  
Ardennes, France

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

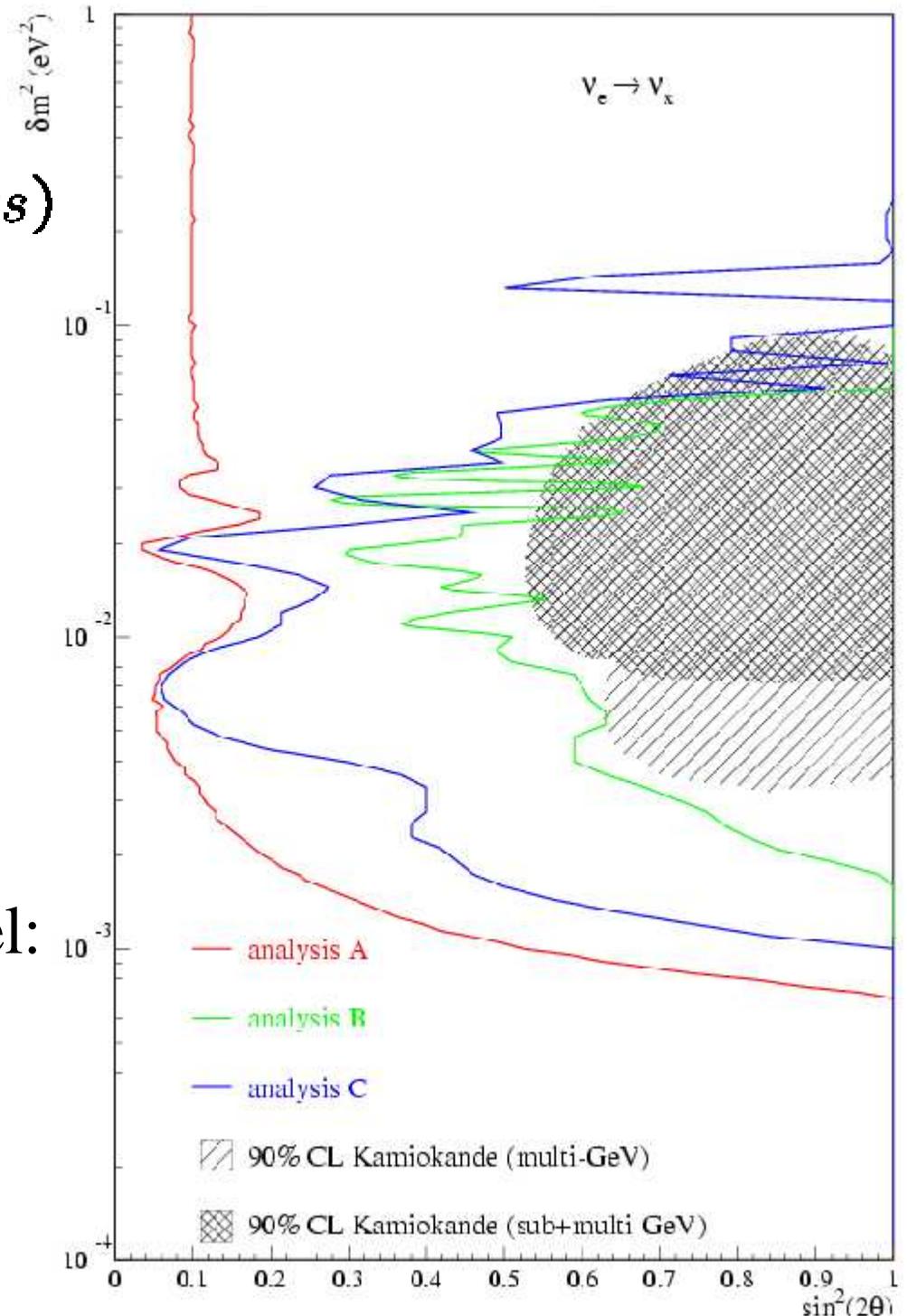
$$1,01 \pm 0,028(stat) \pm 0,027(sys)$$

Mit 90% CL Oszillationen  
ausgeschlossen

Ausgeschlossene Gebiete:

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

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



# Zusammenfassung der Ergebnisse

***Atmosphärisches Neutrino***problem 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  $\Delta m_{e\mu} > 0,25\text{eV}$

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

***Solares Neutrino***problem 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  $\Delta m^2$ -Werte existieren können,***  
kommt es hier zu einem Widerspruch