

Neue Ergebnisse der Neutrinophysik DPG Aachen

Caren Hagner
Virginia Tech

2002 großes Jahr in der Neutrinophysik!



Neutrinomassen und Neutrinomischung

3 massive Neutrinos: ν_1, ν_2, ν_3 mit Massen: $m_1 < m_2 < m_3$

Flavor-Eigenzustände \neq Massen-Eigenzustände

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

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_3 \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Neutrinomischung!

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

Parametrisierung der Neutrinomischung

Neutrino-Mischungsmatrix:

- 3 Mischungswinkel: θ_{12} , θ_{23} , θ_{13}
- 1 CP-verletzende Dirac-Phase: δ

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & \theta_{13}, \delta & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Im Fall von Majorana Neutrinos zusätzlich:

- 2 CP-verletzende Majorana-Phasen

Experimentelle Methoden

Neutrinooszillationen: Mischungswinkel, δ
Massendifferenzen

β -Zerfall: Absolute Masse

$\beta\beta$ -Zerfall: Majorana-Teilchen?
Absolute Masse
(Majorana Phase)

Kosmologie (CMBR): Absolute Masse

Neutrinooszillationen: Vakuum (2 Flavours)

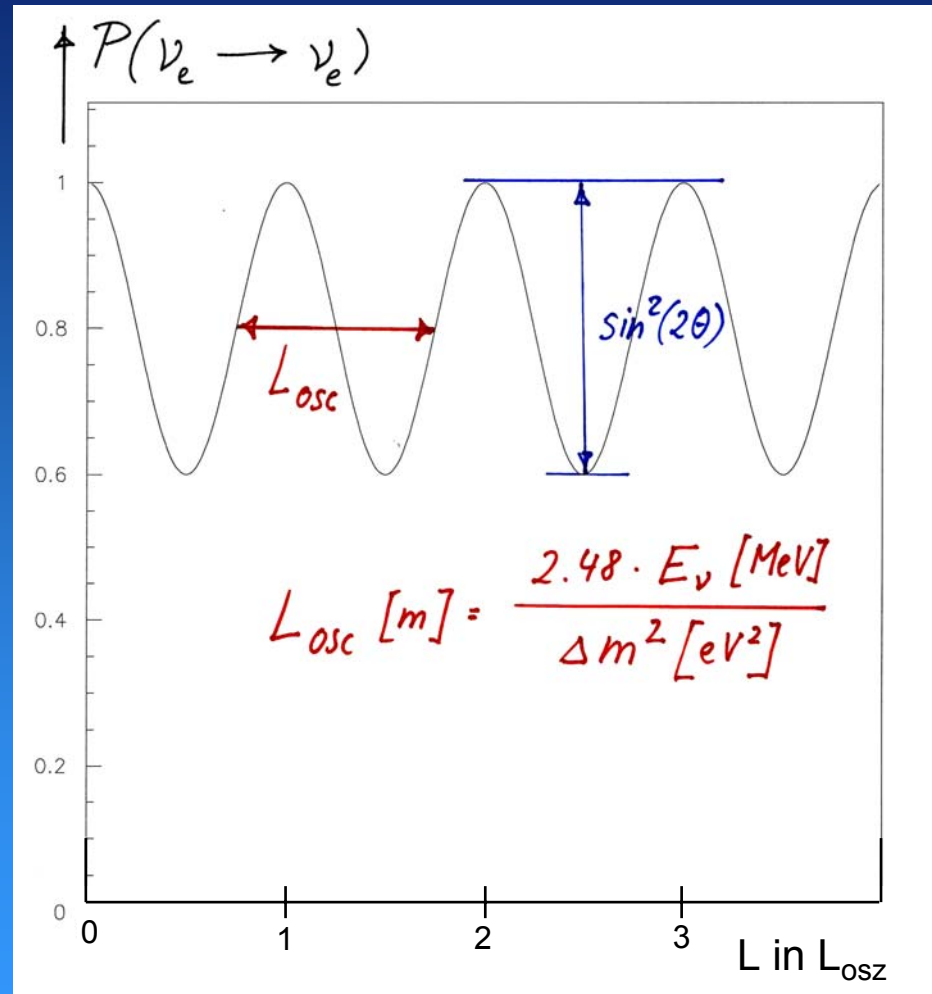
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Überlebenswahrscheinlichkeit:

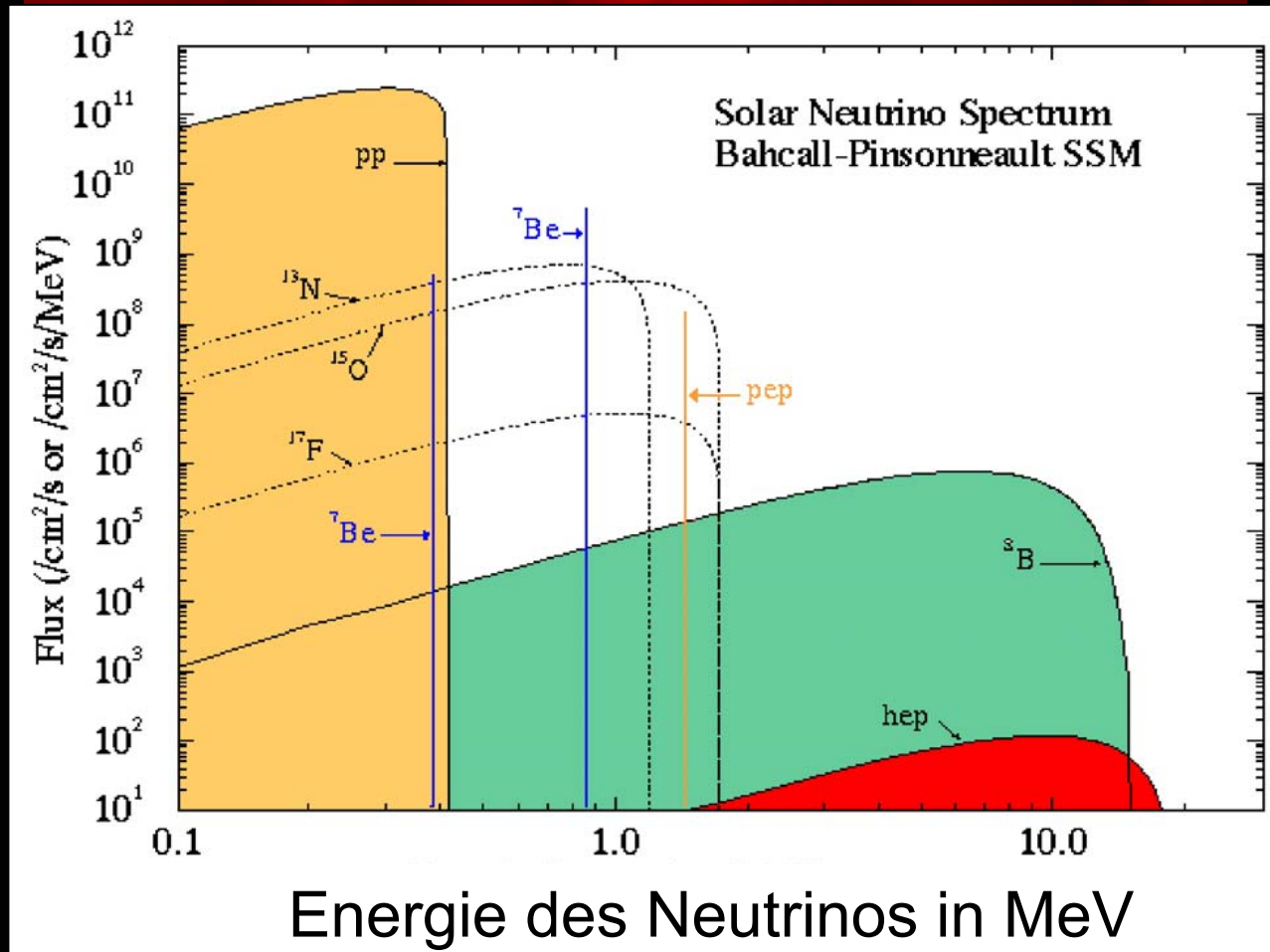
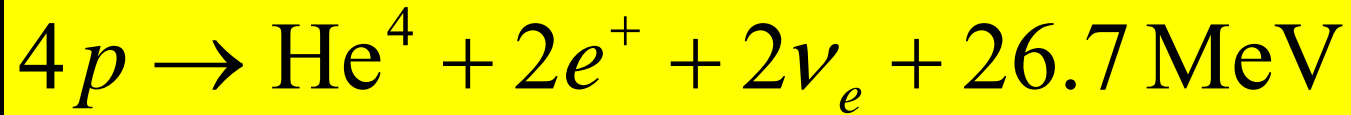
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) =$$

$$1 - \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2}{2} \cdot \frac{L}{E_\nu}\right)$$

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$$



Solare Neutrinos



Solare Neutrinos: "pioneering experiment"

Nobelpreis 2002

Seit ≈ 1970



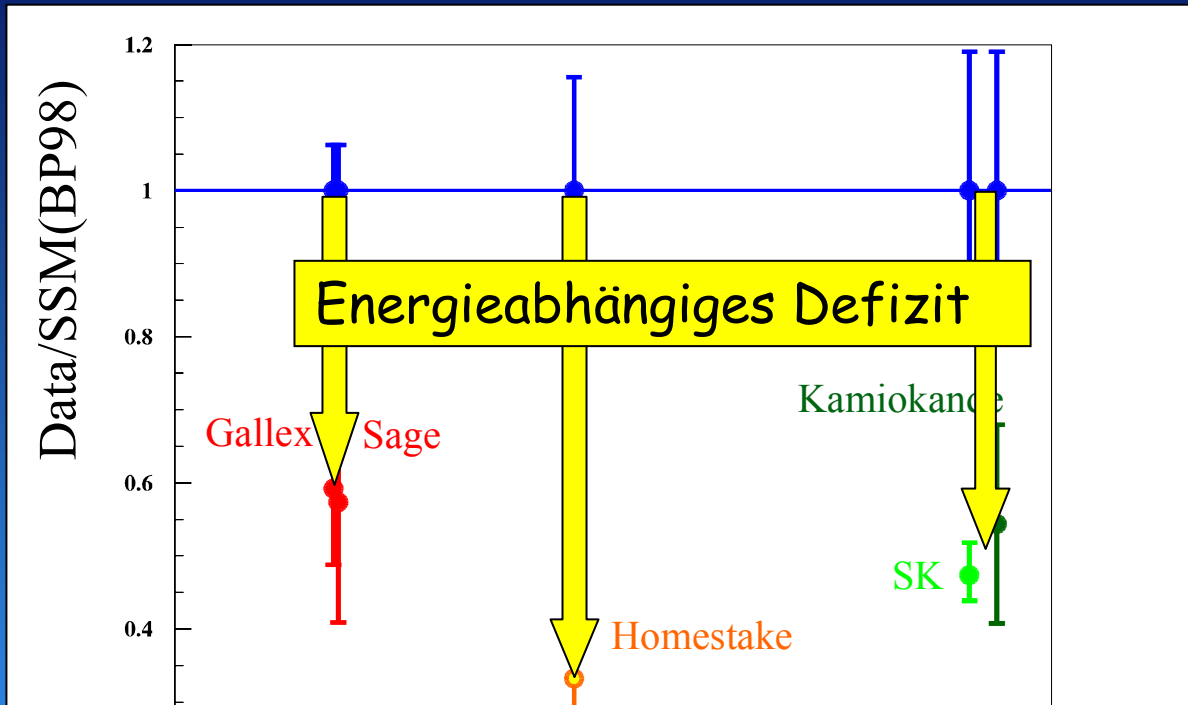
$E_\nu > 814 \text{ keV}$

$$R_{\text{exp}} = 0.34 \times \text{SSM}$$

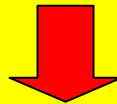


Raymond Davis Jr.,
Homestake Experiment

Das solare Neutrinorätsel



Sonnenmodelle durch Helioseismologie bestätigt



Non-Standard Neutrinoeigenschaften!

Neutrinooszillationen in Materie

Elastische Neutrino-Elektron Streuung in Materie:

V_e : geladener + neutraler Strom
 $V_{\mu,T}$: neutraler Strom

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_m & \sin \theta_m \\ -\sin \theta_m & \cos \theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{1m} \\ \nu_{2m} \end{pmatrix}$$

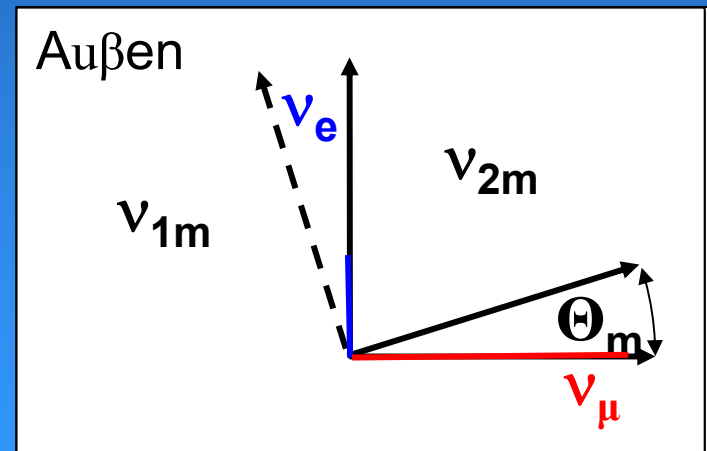
$$\sin(2\theta_m) = \frac{\sin(2\theta)}{\sqrt{(X - \cos(2\theta))^2 + \sin^2(2\theta)}}$$

$$X = 1.52 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{E[\text{MeV}] \cdot Y_e \rho[\text{g/cm}^3]}{(m_2^2 - m_1^2)[\text{eV}^2]}$$

Resonanz für $X = \cos(2\theta)$

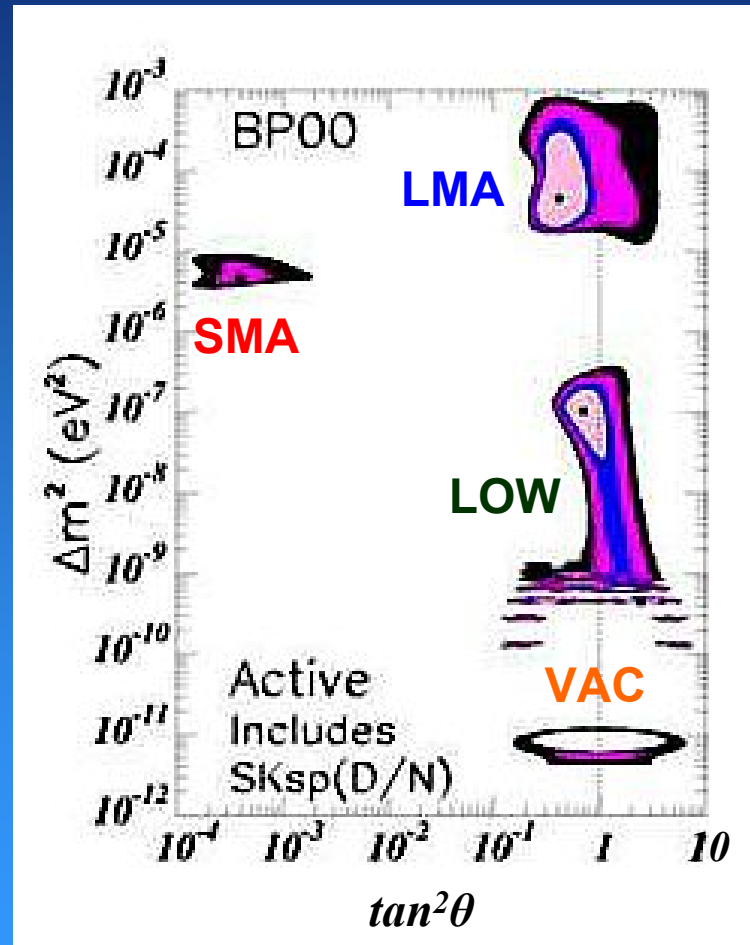
Im Inneren der Sonne: $\theta_m = 90^\circ$

An der Oberfläche: $\theta_m = \theta$



Beste Erklärung: Neutrinooszillationen

Stand letzte DPG-Tagung, Frühjahr 2002



SNO: Sudbury Neutrino Observatory

Target sind 1000t D₂O

NEU!

Messung des ⁸B-Flusses

CC (geladener Strom): ν_e

ES (elast. Streuung): $\nu_e, (\nu_{\mu/\tau})$

NC (neutraler Strom): $\nu_e + \nu_{\mu} + \nu_{\tau}$

Creighton Nickel-Mine in Sudbury Canada



SNO: NC

NC: $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$ ($E_\nu > 2.2\text{MeV}$)

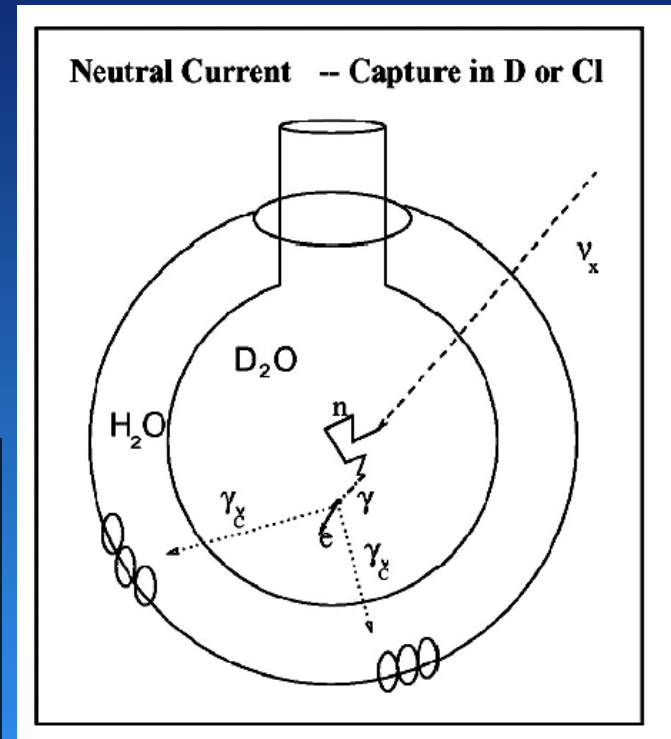
- Gleicher WQ für ν_e, ν_μ, ν_τ
- Messung des gesamten ^8B -Neutrinoflusses

Neutronennachweis:

Phase1: $n + d \rightarrow t + \gamma$ (6.25MeV)
bisherige Resultate!

Phase2: $n + ^{35}\text{Cl} \rightarrow ^{36}\text{Cl} + \gamma$'s (8.6MeV)
seit Juni 2001

Phase3: $n + ^3\text{He} \rightarrow p + t$
(He-Zählrohre)



SNO: CC und ES

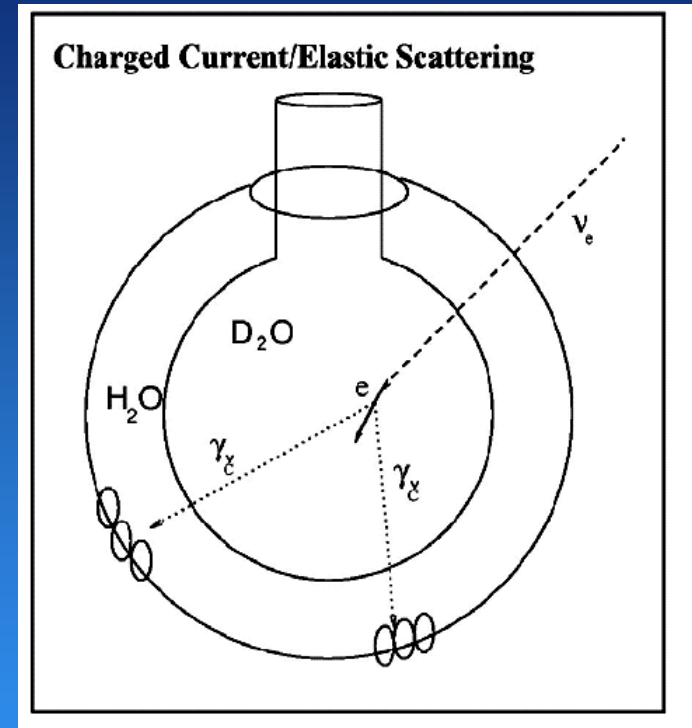
CC: $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ ($E_\nu > 1.4\text{MeV}$)

- Nur sensitiv auf ν_e
- Messung des ν_e Energiespektrums

ES: $\nu_{e\mu\tau} + e^- \rightarrow \nu_{e\mu\tau} + e^-$

- $\sigma(\nu_e, e) \approx 5 \times \sigma(\nu_{\mu\tau}, e)$

Auch in Super-K
(KamLAND-solar, Borexino)



SNO: Solarer ^8B -Neutrinofluss

2000
260
580
Ereignisse
(306Tage)

$$\phi_{\text{CC}}^{\text{SNO}} = 1.76_{-0.05}^{+0.06}(\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst.})$$

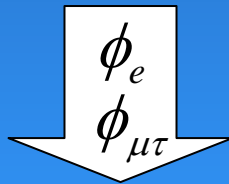
$$\phi_{\text{ES}}^{\text{SNO}} = 2.39_{-0.23}^{+0.24}(\text{stat.})_{-0.12}^{+0.12}(\text{syst.})$$

$$\phi_{\text{NC}}^{\text{SNO}} = 5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat.})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst.})$$

} $\times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Standard Sonnen Modell (SSM): BP00

$$\phi_{\text{SSM}} = 5.05_{-0.81}^{+1.01} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



$$\phi_e = 1.76_{-0.05}^{+0.05}(\text{stat.})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst.})$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.45}^{+0.45}(\text{stat.})_{-0.45}^{+0.48}(\text{syst.})$$

Stimmt!

SNO: Folgerung

Anzahl der ^8B -Neutrinos wie vom SSM vorausgesagt!

1/3 erreichen den Detektor als ν_e

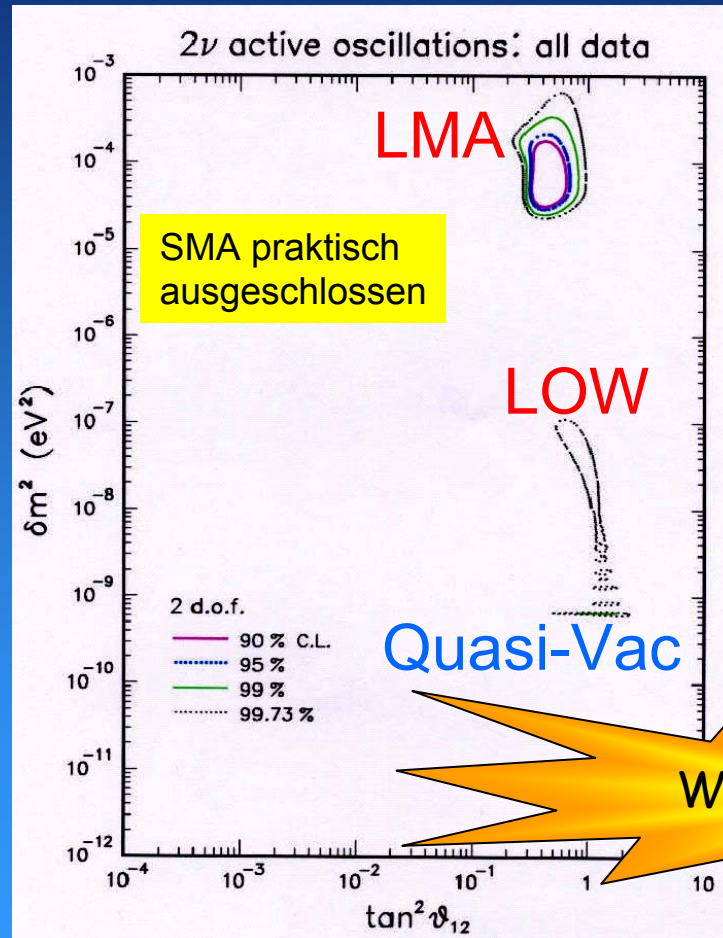
2/3 erreichen den Detektor als ν_μ oder ν_τ



Mechanismus ?

Analyse der solaren Neutrinoexperimente

Stand nach SNO Ergebnis, Sommer 2002

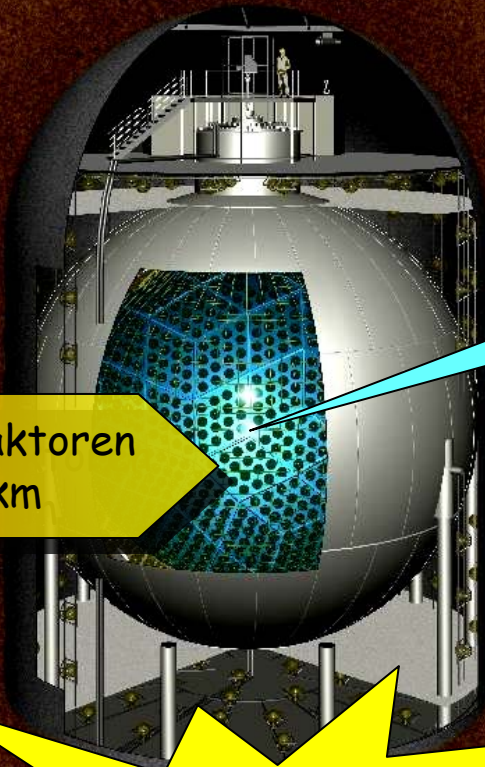


Welche Lösung?

Reaktorneutrino-Experiment KamLAND

Reaktor:
 $\bar{\nu}_e$
 $E_\nu \approx 1 \div 10 \text{ MeV}$

Distanz der Reaktoren
 $\langle L \rangle \approx 175 \text{ km}$



1000t Flüssig-Szintillator

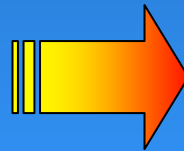
Verschwinden von $\bar{\nu}_e$?

LMA-Test mit Reaktor-(Anti)-Neutrinos

Mittlere Entfernung
der Reaktoren von Kamland:
175km

$$L_{osz}^{vac} [\text{m}] = \frac{2.48 \cdot E_{\nu} [\text{MeV}]}{\Delta m^2 [\text{eV}^2]}$$

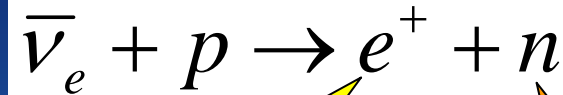
$$E (\text{Reaktor-}\nu) \approx 5 \text{MeV}$$
$$\Delta m^2 (\text{LMA}) = 5 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$$



$$L_{osz} \approx \frac{2.5 \cdot 5}{5 \cdot 10^{-5}} \text{m} = 250 \text{km}$$

Test möglich!

Nachweis der Reaktor-Antineutrinos



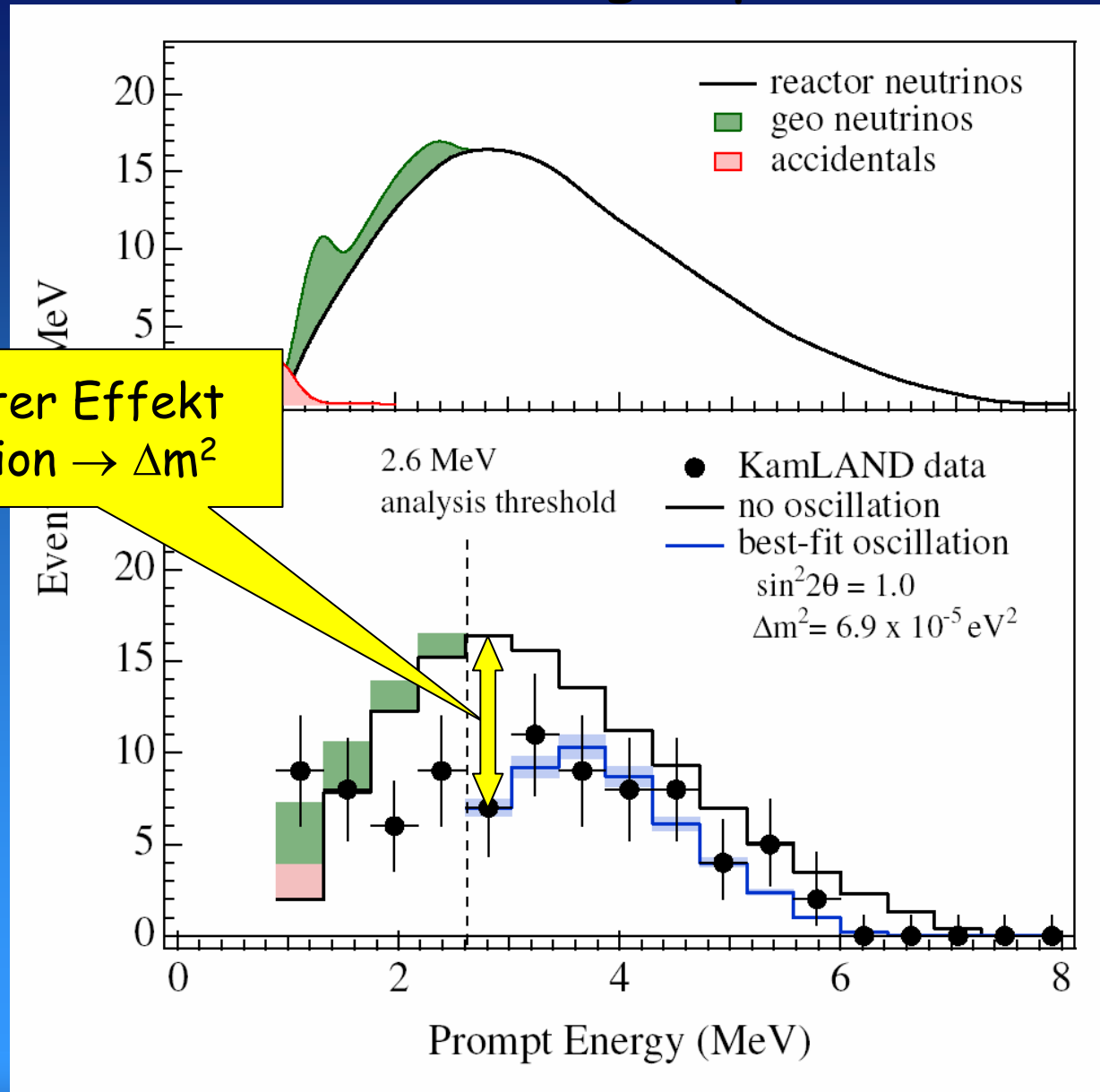
$$E_\nu > 1.8 \text{ MeV}$$

promptes Ereignis:
 $E_\nu - 0.77 \text{ MeV}$

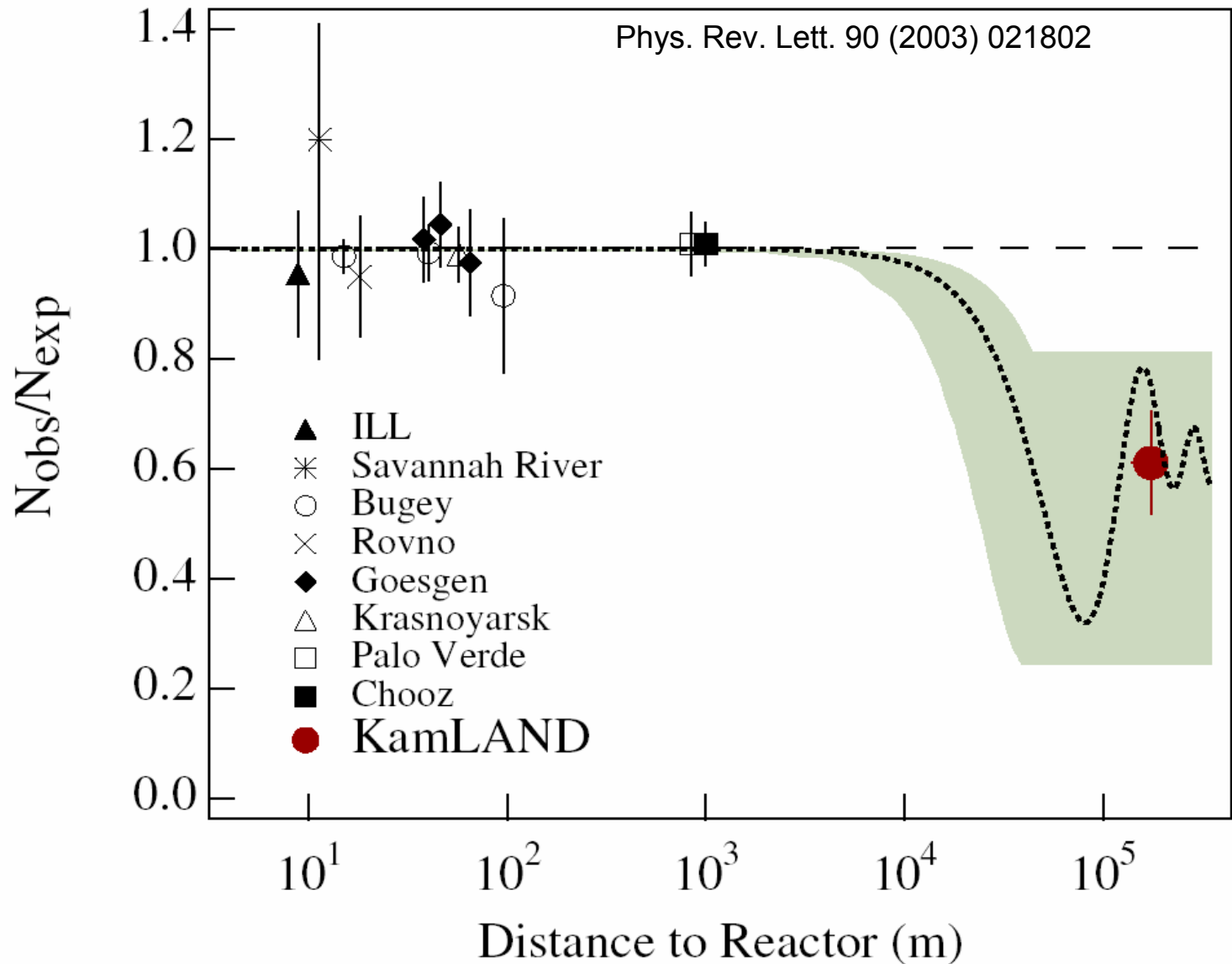
180 μsec

verzögertes Ereignis:
 $n + p \rightarrow d + \gamma(2.2 \text{ MeV})$

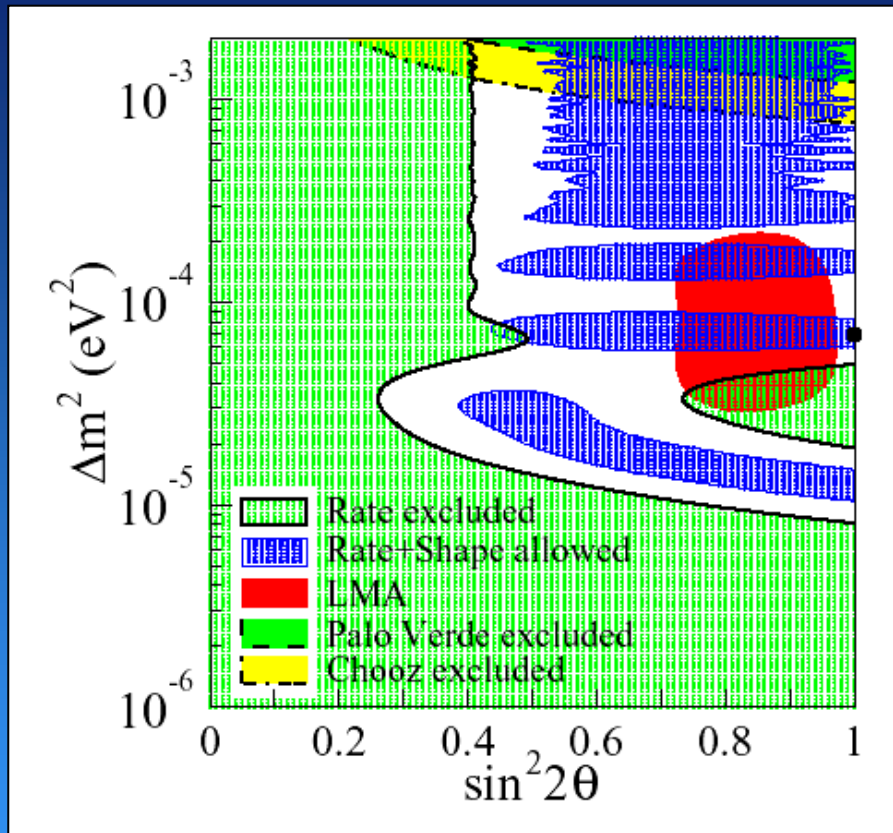
KamLAND: Energiespektrum



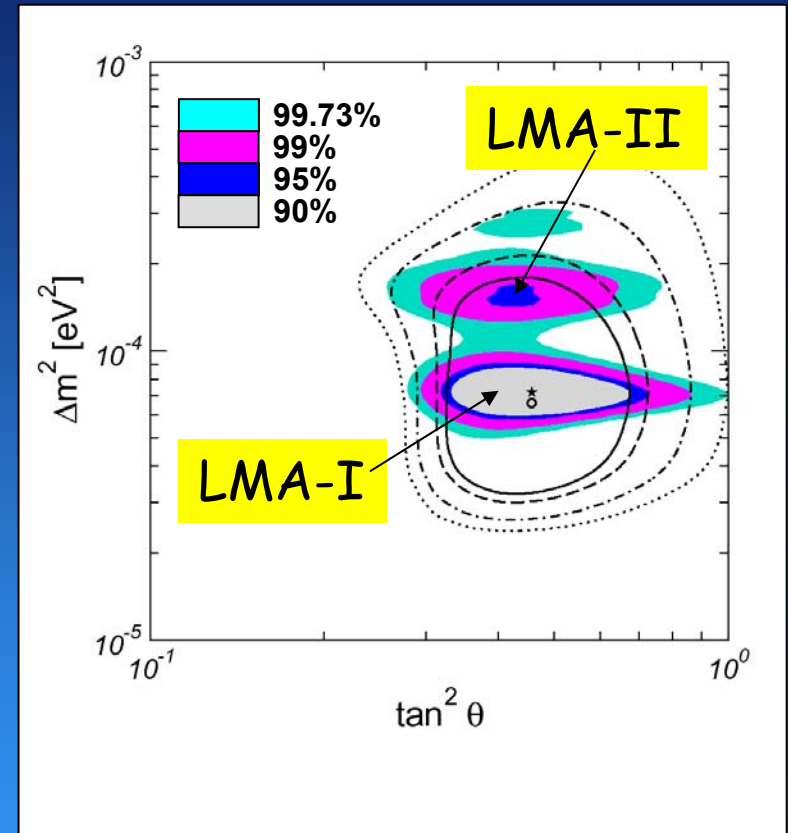
Reaktorneutrino-Experimente



Analyse: Solare Neutrinos + KamLAND



Analyse KamLAND-Koll.
Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 021802



Analyse Maltoni, Schwetz, Valle

Solare/Reaktor Neutrinos: Status

Flavor-Umwandlung $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu/\tau}$

Beste Erklärung:
Neutrinooszillationen in Materie

Mischung nicht maximal!
Vorzeichen von Δm^2_{21} bestimmt

LMA (best fit):

$$\tan^2 \theta_{\text{sol}} \approx 0.46$$

$$\Delta m^2_{21} \approx 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

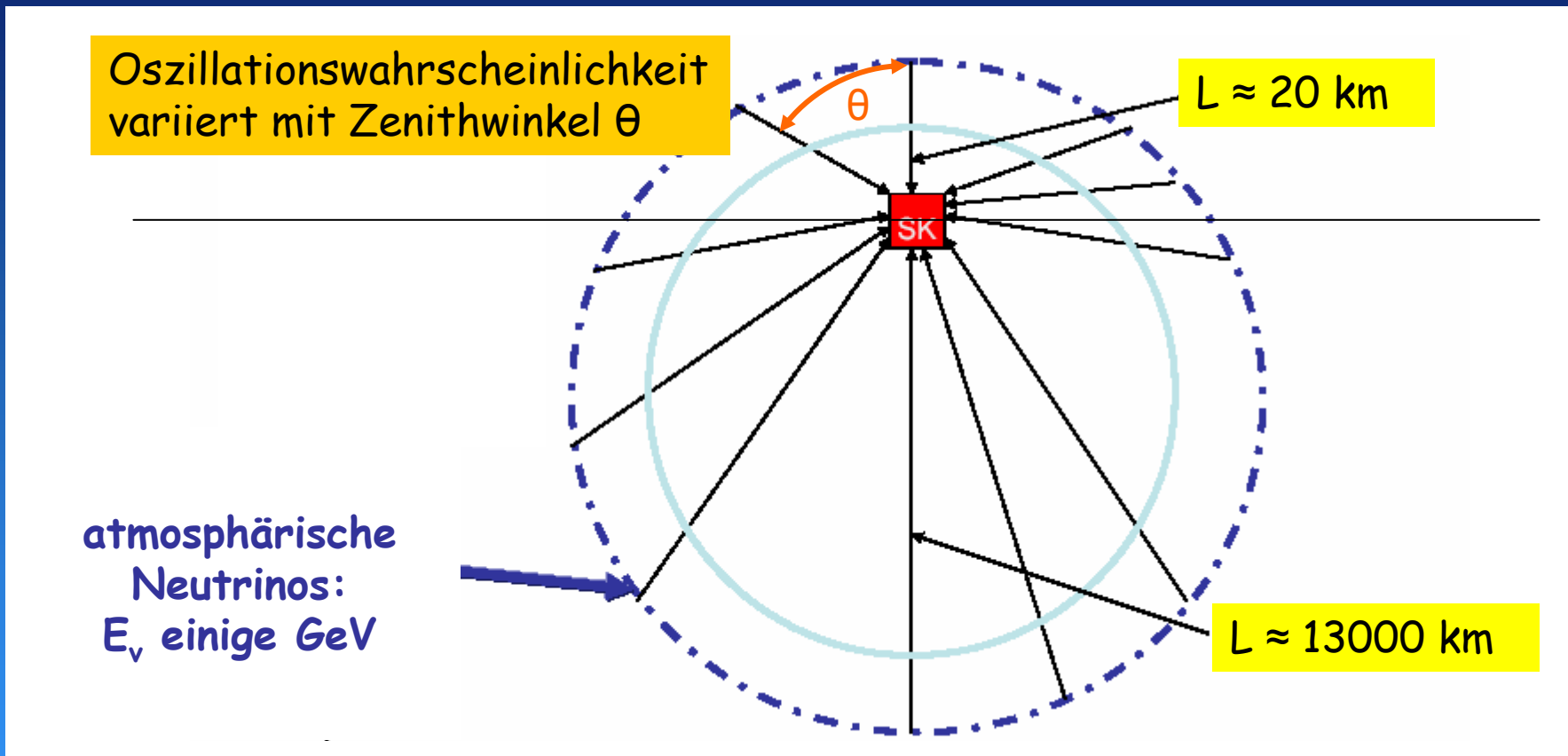
Solare/Reaktor Neutrinos: Zukunft

- KamLAND-Reaktor: höhere Statistik
- Neues Reaktorexperiment mit geeigneter Distanz
 - ➔ Oszillationsmuster, Genauigkeit Δm^2_{sol} und θ_{sol}

Test des Standard Sonnenmodells
und Test des Materieeffekts:

- ${}^7\text{Be}$ -Fluss: $(0.64 \pm 0.03) \times \text{SSM}$
KamLAND-Solar und BOREXINO
- pp-Fluss:
GNO, LENS

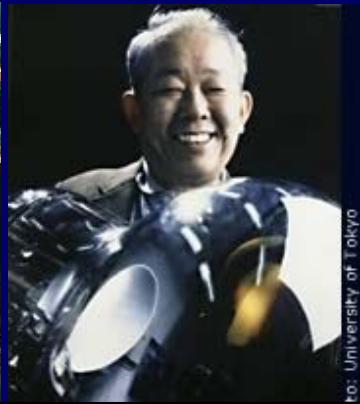
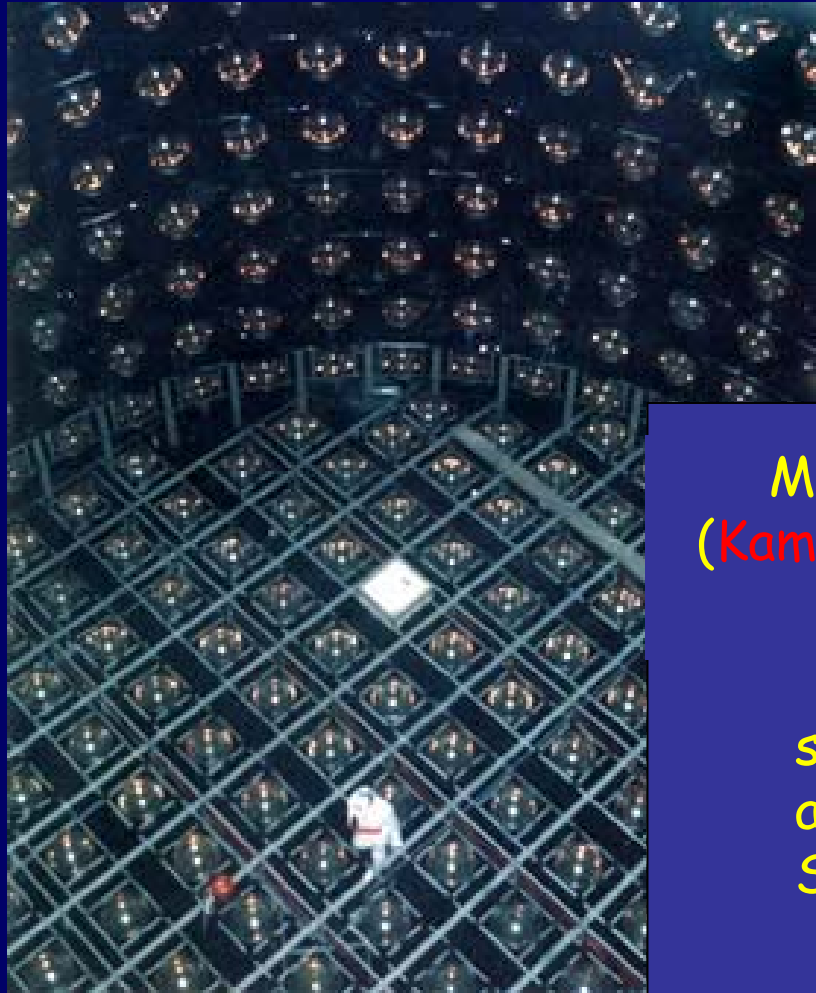
Atmosphärische Neutrinos



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_x) = \sin^2 2\theta_{atm} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{atm}^2 L}{E_\nu} \right)$$

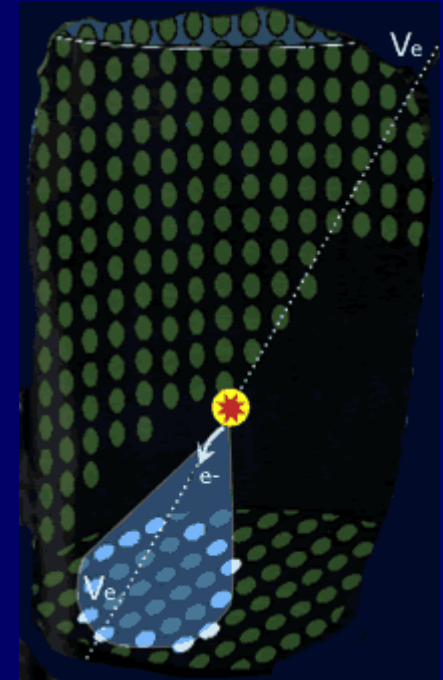
Kamiokande Experiment:

Nobelpreis 2002



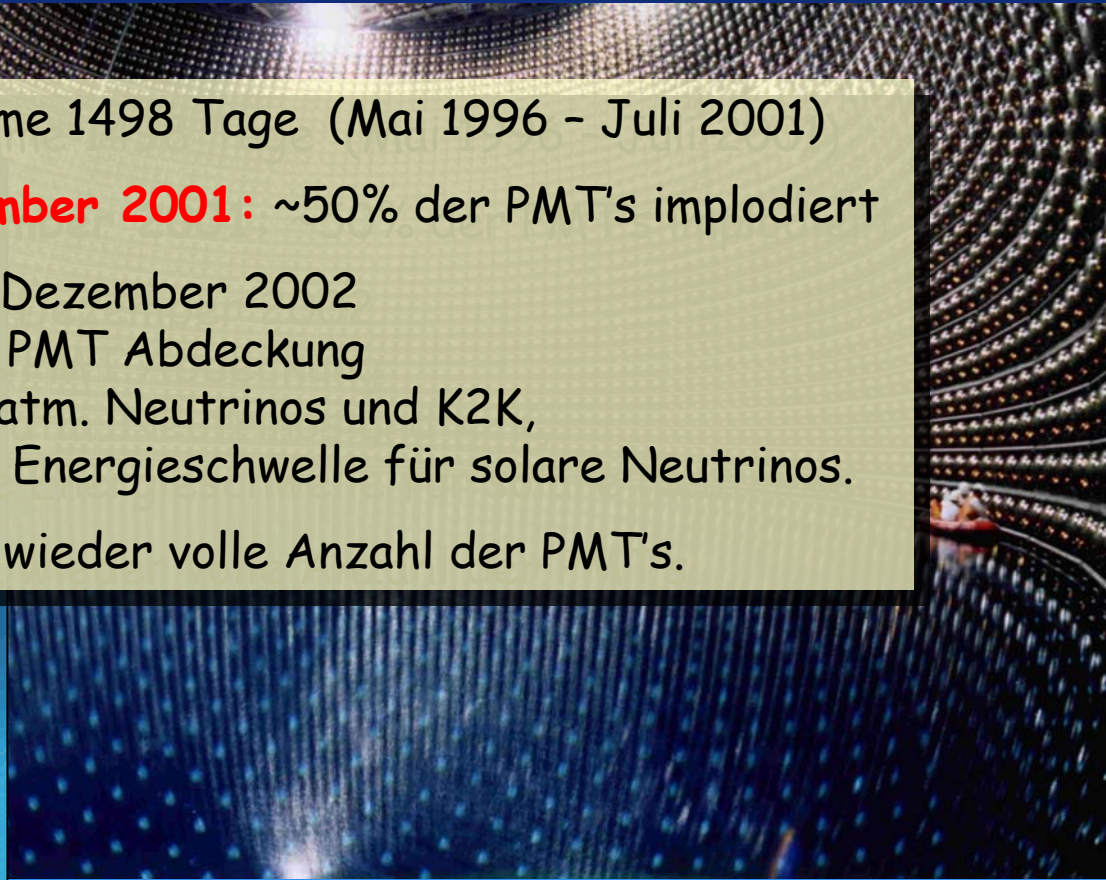
Masatoshi Koshiba,
(Kamioka Neutron Decay)
Experiment

solare ν
atmosphärische ν
Supernova ν



50kton Super-Kamiokande Detektor

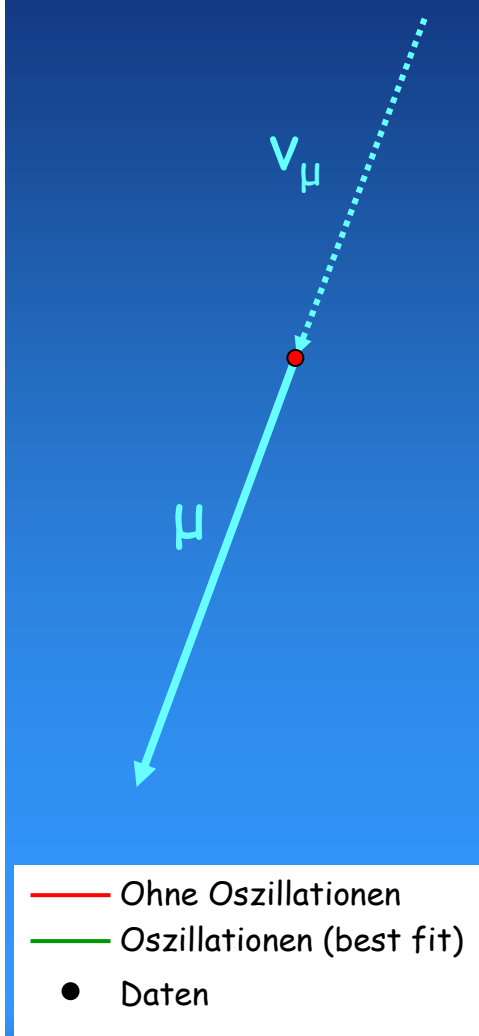
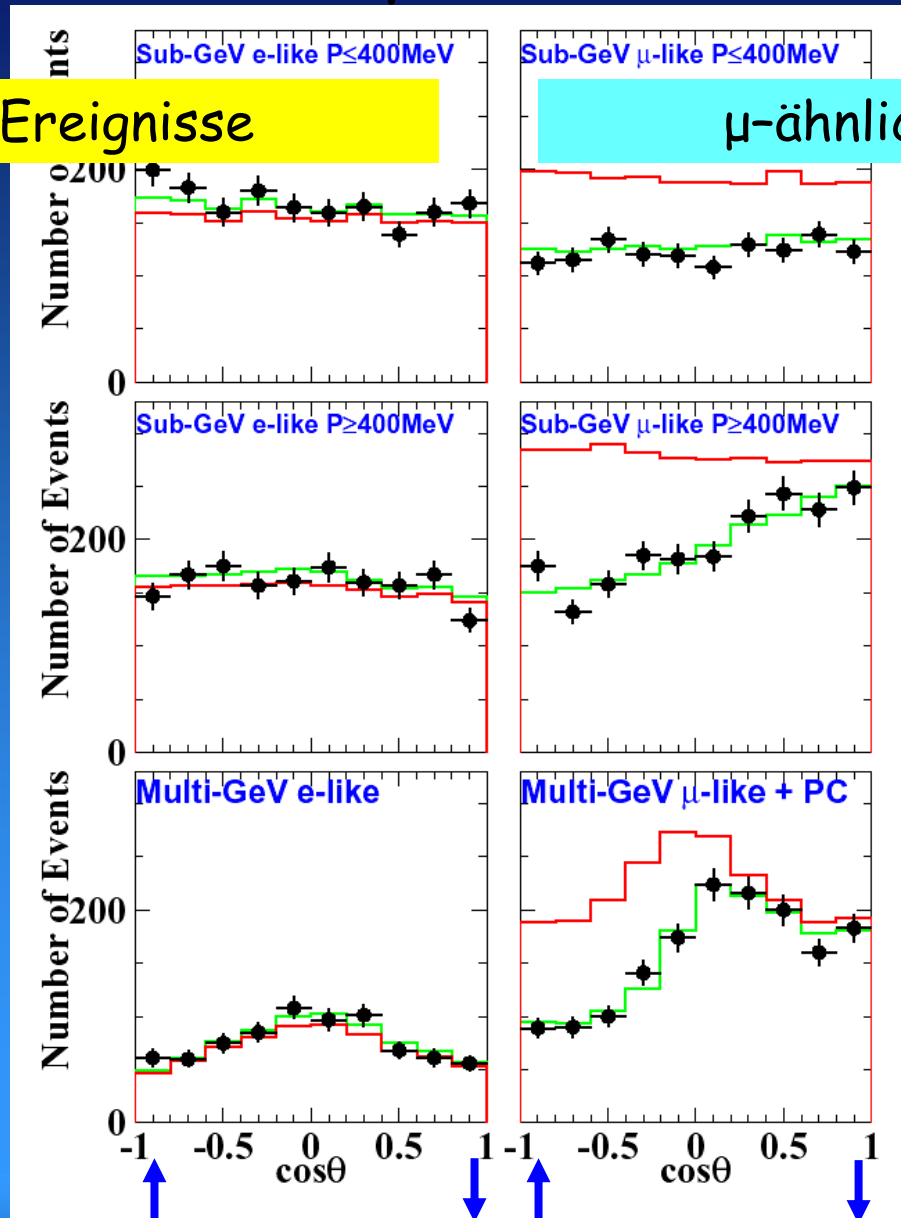
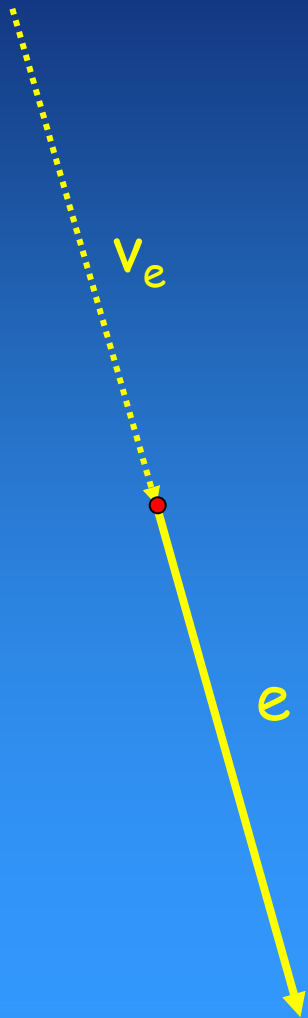
- SK-I: Datennahme 1498 Tage (Mai 1996 - Juli 2001)
- **Unfall im November 2001:** ~50% der PMT's implodiert
- SK-II: Start 6. Dezember 2002
mit 50% PMT Abdeckung
 - ok für atm. Neutrinos und K2K,
 - höhere Energieschwelle für solare Neutrinos.
- SK-III: ~2005, wieder volle Anzahl der PMT's.



SuperK - atmosphärische Neutrinos

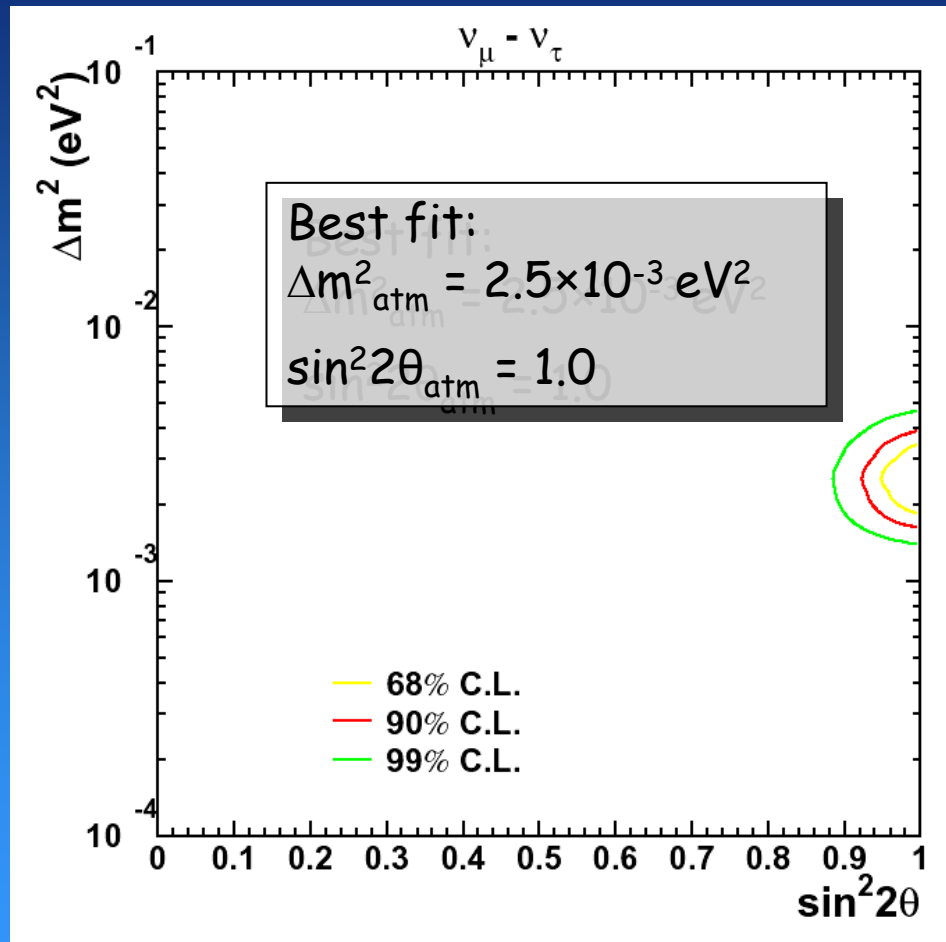
e-ähnliche Ereignisse

μ -ähnliche Ereignisse



- Ohne Oszillationen
- Oszillationen (best fit)
- Daten

Atmosphärische Neutrinos: Analyse Neutrinooszillationen



Bestätigt durch MACRO, SOUDAN

Atmosphärische Neutrinos: Resultate

Disappearance von ν_μ (Zenithwinkel abh.)

Bester fit für $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oszillationen

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Oszillationen von CHOOZ Exp. ausgeschlossen

Vorzeichen von Δm^2_{23} unbekannt!

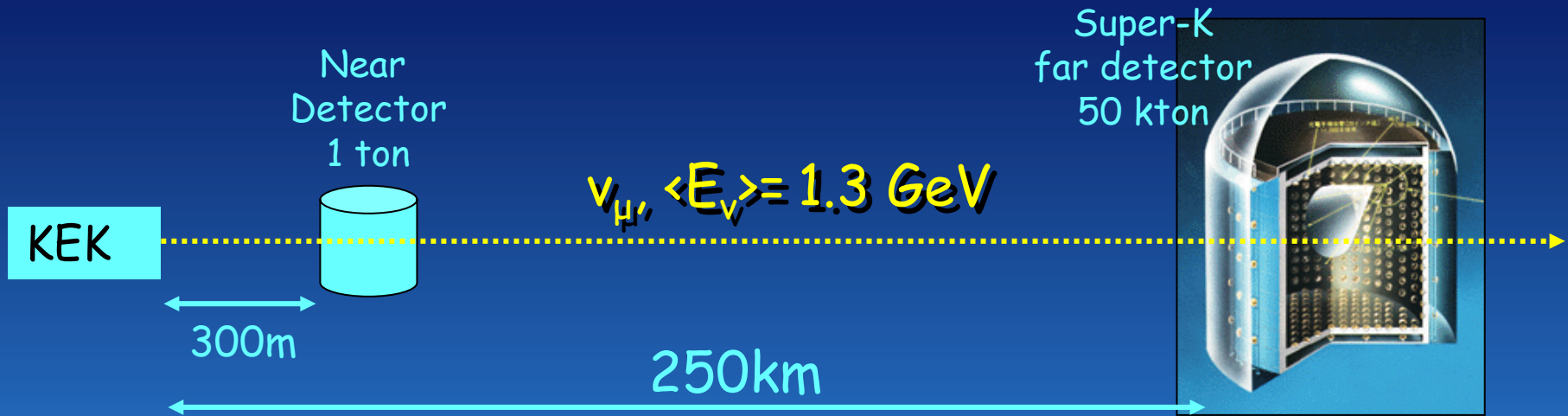
$$\Delta m^2_{\text{atm}} = (1.5 - 4) \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \text{ (90\%CL)}$$

$$\sin^2 2\theta_{\text{atm}} = 1.0$$

Maximale
Mischung!

(LMA-Mischung θ_{solar} nicht maximal)

K2K Beschleuniger Experiment



Ziel: 1.0×10^{20} POT
= 200 Neutrino Ereignisse in SK

Ergebnis (06/1999 - 07/2001):

$5.6 \cdot 10^{19}$ POT

Ereignisse "Far Detector" : 56

ohne Oszillationen erwartet: $80.1^{+6.2}_{-5.4}$

Wahrscheinlichkeit für Null Oszillation: $< 0.4\%$

Long Baseline Beschleuniger Experimente: Zukunft

Appearance der Tau-Neutrinos:

OPERA, Icarus (Cern → Gran Sasso)

Volles Oszillationsmuster:

MINOS (Fermilab → Soudan), Icarus

Präzisionsmessung von Δm^2_{atm} und $\sin^2 2\theta_{\text{atm}}$:

MINOS, Icarus

JHF → Super-K

Was wissen wir über die Mischungsmatrix?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & \theta_{13}, \delta & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Solare Neutrinos und Reaktorexperiment (Kamland):
 $\tan^2\theta_{\text{sol}} \approx 0.46$

Atmosphärische Neutrinos und Beschleuniger (K2K):
 $\sin^2 2\theta_{\text{atm}} \approx 1$

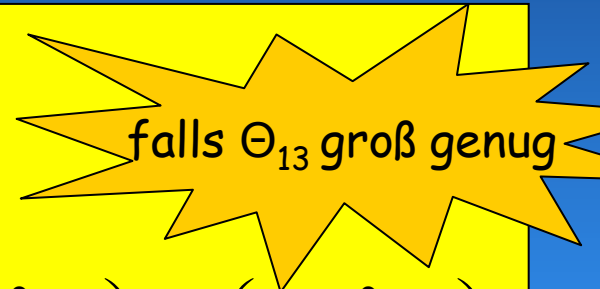
Unbekannt: θ_{13} , CP-Phase δ
 Grenze durch CHOOZ Reaktorexperiment:
 $\sin^2 2\theta_{13} < 0.1$

Jagd nach θ_{13} und δ !

Bestimmung von θ_{13} und δ :

θ_{13} in subdominanten Effekten
bei "long baseline" Neutrinooszillations-Experimenten:
Reaktor und Beschleuniger

δ durch Asymmetrie:

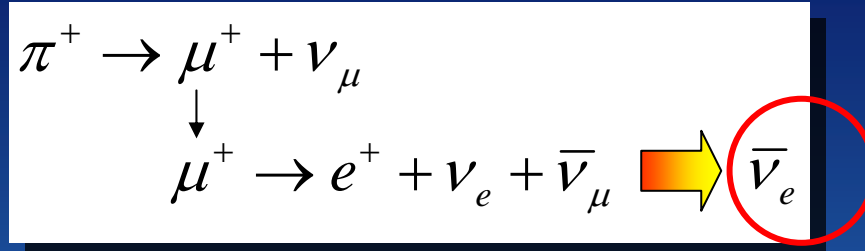


$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) =$$

$$16s_{12}c_{12}s_{13}c_{13}^2s_{23}c_{23} \sin \delta \sin\left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right) \sin\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}\right)$$

Neutrino-Superbeams, Off-axis beams, Neutrino Factory

LSND: Beam Dump Experiment



Überschuss gesehen!

Verifizierung durch
MiniBooNE/FNAL
(läuft)

Interpretation:
steriles Neutrino

Bestimmung der Neutrinomasse

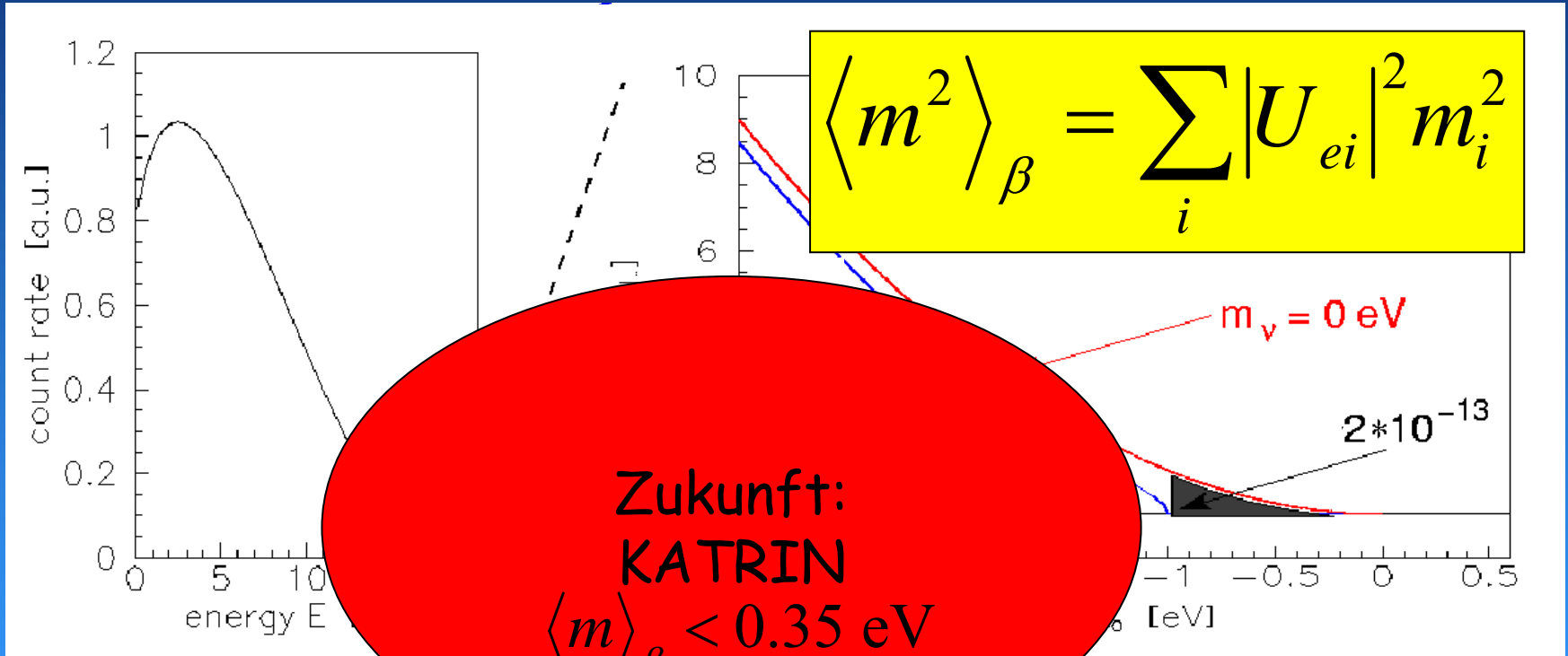
Super-K (atm. Neutrinos):

$$\Delta m^2_{\text{atm}} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Rightarrow m(\nu_i) > 0.05 \text{ eV}$$

Das bestimmt die Energieskala
bei der man suchen muss

Tritium β -Zerfall: Mainz/Troitsk

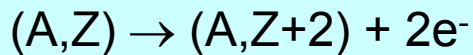
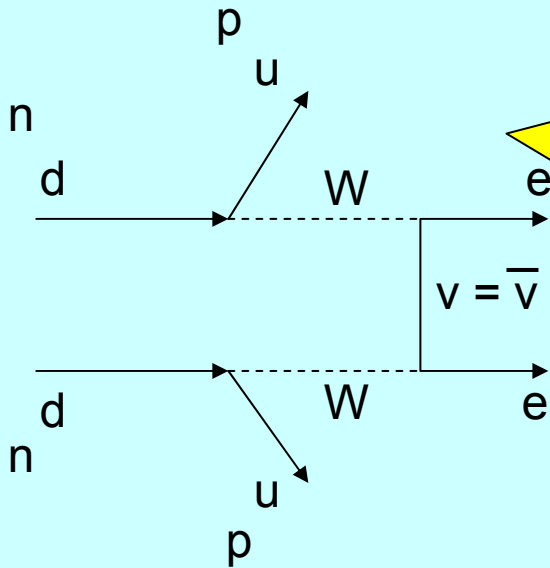


Mainz Daten (1999)

$$\langle m^2 \rangle_\beta = -1.2 \pm 2.2 \pm 2.1 \text{ eV}^2 \Rightarrow \langle m \rangle_\beta < 2.2 \text{ eV} \text{ (95\%CL)}$$

Neutrinosloser Doppelbetazerfall

0ν Doppelbetazerfall:



nur für
Majorana-Neutrino
und
 $m_\nu > 0!$



Majorana-Neutrino:
Neutrino \equiv Anti-Neutrino

Neutrinosloser Doppelbetazerfall

$$[T_{1/2}^{0\nu}]^{-1} = G^{0\nu}(E_0, Z) \left| M_{GT}^{0\nu} - \frac{g_V^2}{g_A^2} M_F^{0\nu} \right|^2 \langle m_\nu \rangle_{\beta\beta}^2$$

Phasenraumfaktor (blue oval around $G^{0\nu}(E_0, Z)$)
 Übergangsmatrixelement (red oval around $M_{GT}^{0\nu} - \frac{g_V^2}{g_A^2} M_F^{0\nu}$)
 effektive Neutrinomasse (green oval around $\langle m_\nu \rangle_{\beta\beta}^2$)

effektive Neutrinomasse im $0\nu\beta\beta$ -Zerfall:

$$\langle m \rangle_{\beta\beta} \equiv \left| \sum_{i=1}^3 m_i U_{ei}^2 \right|$$

Vergleich β -Zerfall:

$$\langle m^2 \rangle_{\beta} = \sum_i m_i^2 |U_{ei}|^2$$

Doppelbeta-Experimente: Resultate

$$\langle m \rangle_{\beta\beta} < 0.35 \text{ eV (90\% CL)}$$

Heidelberg-Moskau Kollaboration, Eur.Phys.J. A12 (2001) 147

IGEX Kollaboration, hep-ex/0202026, Phys. Rev. C59 (1999) 2108

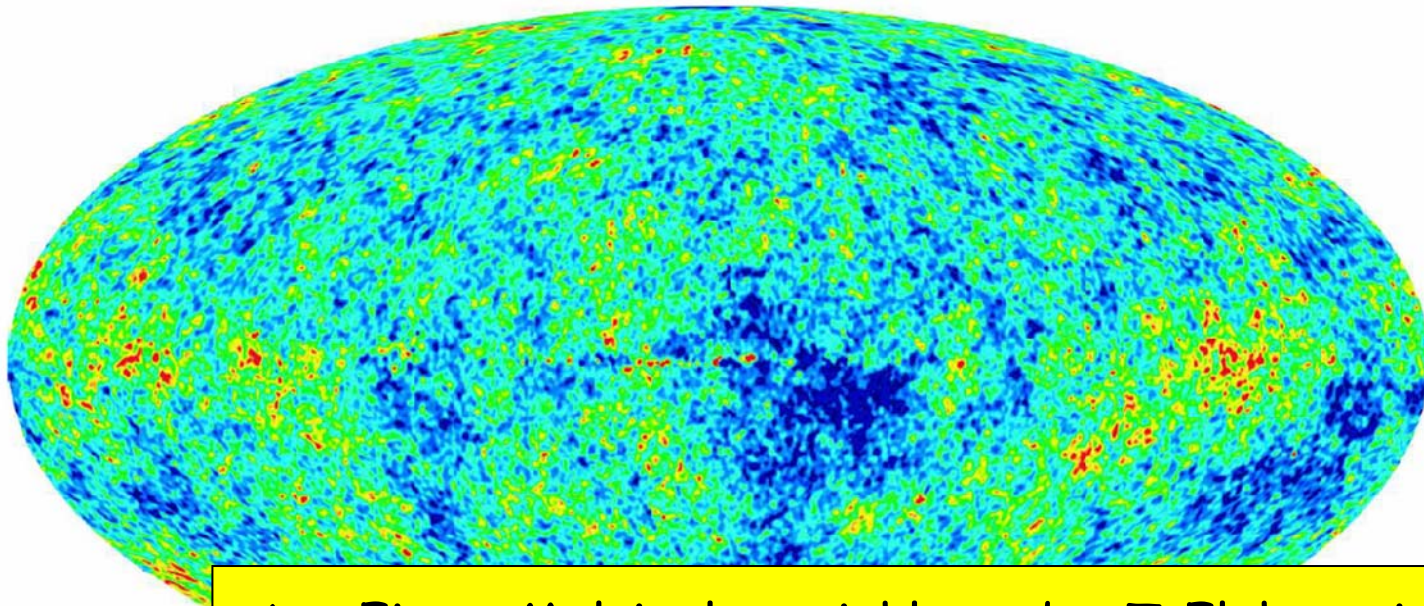
Isotope	$T_{1/2}^{0\nu}$ (y)	$\langle m_\nu \rangle$ (eV)
^{48}Ca	$> 9.5 \times 10^{21}$ (76%)	< 8.3
^{76}Ge	$> 1.9 \times 10^{25}$ HM-K	< 0.35
	$> 1.6 \times 10^{25}$ IGEX	$< 0.33 - 1.35$
^{82}Se	$> 2.7 \times 10^{22}$ (68%)	< 5
^{100}Mo	$> 5.5 \times 10^{22}$	< 2.1
^{116}Cd	$> 7 \times 10^{22}$	< 2.6
^{128}Te	$> 7.7 \times 10^{24}$	$< 1.1 - 1.5$
^{130}Te	$> 2.1 \times 10^{23}$	$< 0.85 - 2.1$
^{136}Xe	$> 4.4 \times 10^{23}$	$< 1.8 - 5.2$
^{150}Nd	$> 1.2 \times 10^{21}$	< 3

alle 90%CL

Doppelbetazerfall: Zukunft

Experiment	Isotope	$T_{1/2}^{0\nu}$ (10^{26} y)	$\langle m_\nu \rangle$ (meV)
CUORE[47]	^{130}Te	7	27
CUORICINO[47]	^{130}Te	0.15	184
EXO[48]	^{136}Xe	8	52
GENIUS[49]	^{76}Ge	100	15
MAJORANA[50]	^{76}Ge	40	25
GEM[51]	^{76}Ge	70	18
MOON[52]	^{100}Mo	10	36
XMASS[53]	^{136}Xe	3	86
COBRA[54]	^{130}Te	0.01	240
DCBA[55]	^{150}Nd	0.15	190
NEMO 3[56]	^{100}Mo	0.04	560
CAMEO[57]	^{116}Cd	> 1	69
CANDLES[58]	^{48}Ca	1	158[15]

Neutrinomasse aus kosmischer Hintergrundstrahlung (WMAP)



Aus Fit an Multipolentwicklung der T-Fluktuationen
(WMAP, CBI, ACBAR, 2dFGRS, Lyman- α):

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0076 \quad (95\% \text{ CL})$$

$$m_\nu < 0.23 \text{ eV}$$

Zusammenfassung

Neutrinooszillationen:

Solare, Reaktor-Neutrinos/KamLAND:

$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu/\tau}$ Oszillationen (LMA)

Oszillationsmuster

Atmosphärische, Beschleuniger-Neutrinos/K2K:

$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ Vakuum Oszillationen

Oszillationsmuster
 ν_{τ} -Appearance

Masse des leichtesten Neutrinos:

$\langle m \rangle_{\beta} < 2.2 \text{ eV}$ β -Zerfall

$\langle m \rangle_{\beta\beta} < 0.35 \text{ eV}$ $\beta\beta$ -Zerfall

$m_{\nu} < 0.23 \text{ eV}$ CMBR-fit

Majorana?

Zukunft: Messung von θ_{13} , δ

Reaktor, Superbeams, Off-axis beams, Neutrino factory

ENDE