

Vom Neutron zum Neutrino

Zum 60ten von Reinhard Maschuw

G.Flügge, Karlsruhe Mai 2003

Verschlungene Wege

Reinhard Maschuw

Universität
Hamburg
1962-1970

Pluto-Exp.
bei DESY
1977-1978

KfK
Karlsruhe
1980-1986

60ter
Geburtstag
2003

Günter Flügge

Neutronen in Hamburg



Van-de-Graaff-
Halle Uni Hamburg

Einsamer Denker am Ostseestrand



1968 ?

Irgendwann geht ihm ein Licht auf



1984

Neutrinos in Rutherford



ISIS
Spallationsquelle

Verschlungene Wege

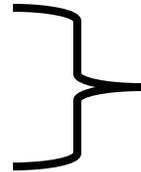
Universität
Hamburg

Reinhard Maschuw

Studium (1962-68)

Diplomarbeit

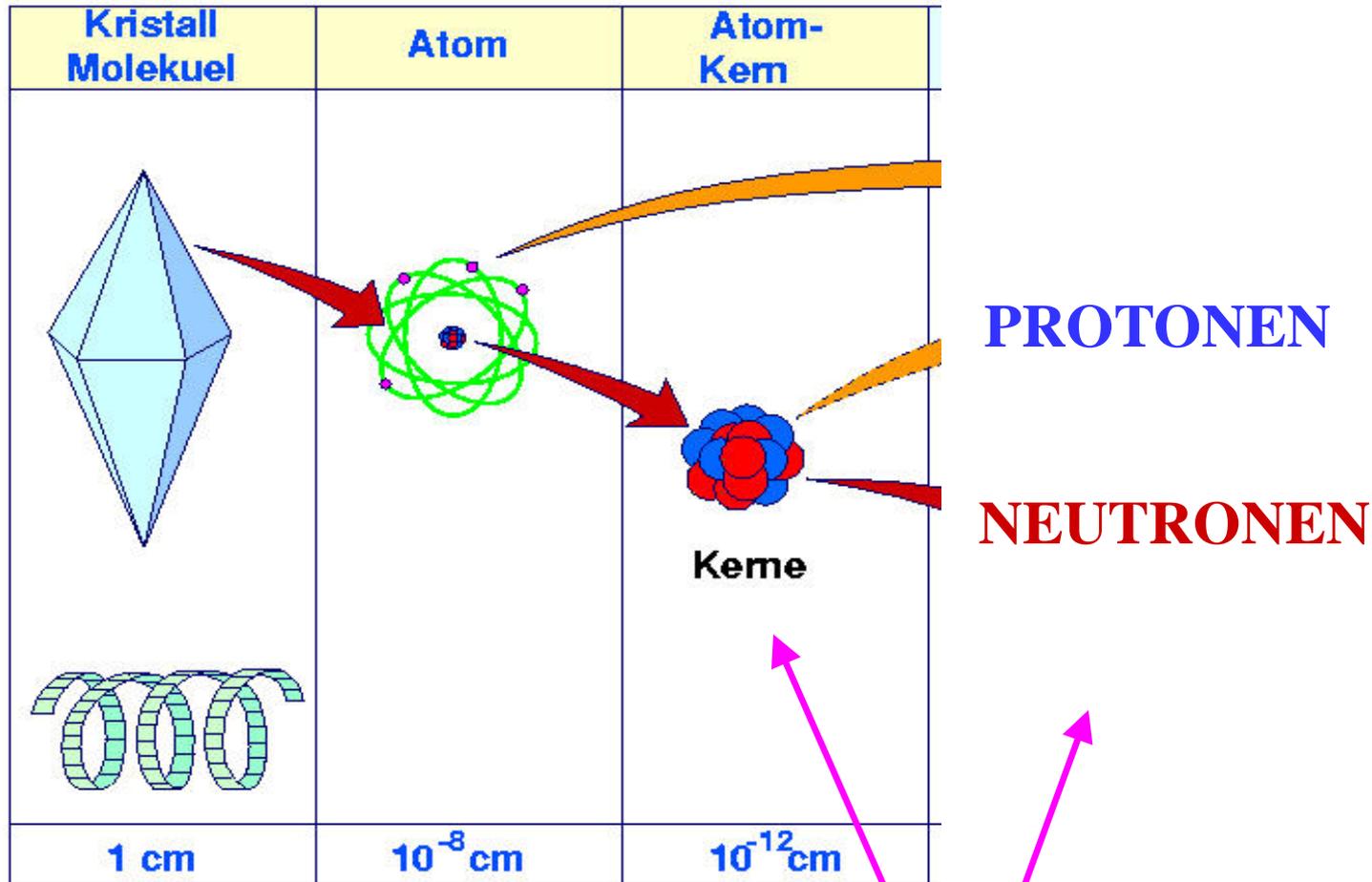
Doktorarbeit



Kernphysik am
Van-de-Graaff

Günter Flügge

Die Struktur der Materie



Kernkraft = starke Wechselwirkung

Streulänge des Neutrons

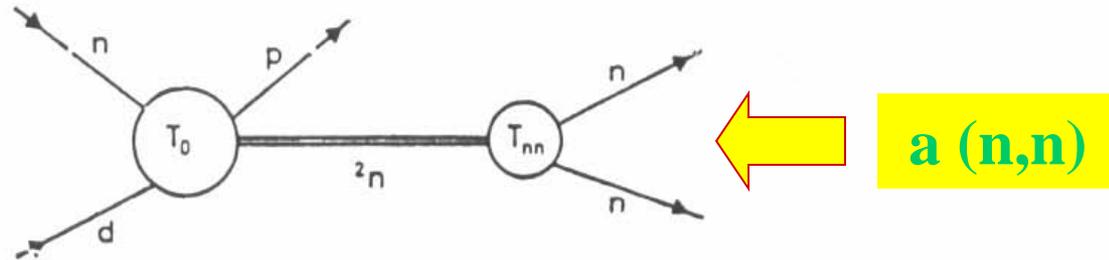


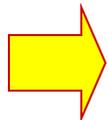
Fig. 1. Sequential decay mechanism in the reaction $n+d \rightarrow n+n+p$, leading to n - n final state interaction.

B. Zeitnitz, R. Maschuw, P. Suhr: $a(n,n) = -16.4 (+2.6 -2.9) \text{ fm}$

sehr nahe am heutigen Mittelwert:

Streulänge der Neutron-Neutron-Streuung $a(n,n) = -16.7 \pm 0.5 \text{ fm}$

Vergleich mit Proton-Proton-Streulänge $a(p,p) = -17.9 \text{ fm}$



Ladungssymmetrie der Kernkräfte

Experimenteller Aufbau

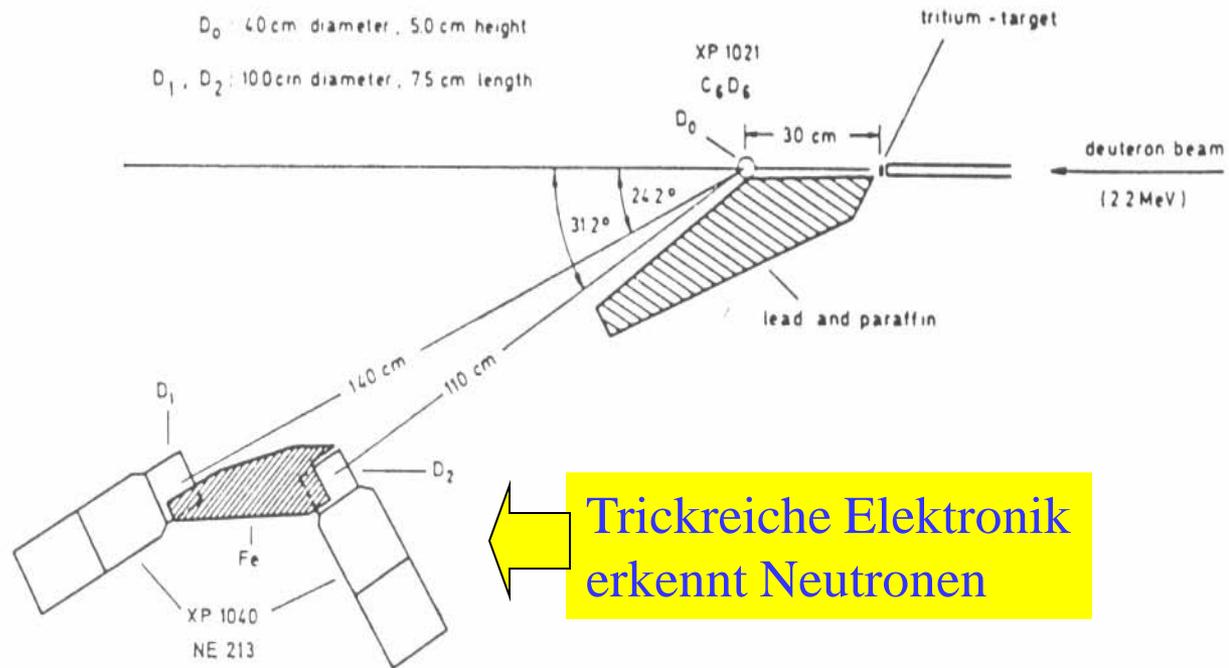


Fig. 2. Experimental arrangement: 18.5 MeV neutrons, produced by the $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ reaction, bombard a scintillator of deuterated benzene D_0 . The neutrons from deuteron breakup are detected in D_1 and D_2 .

Verschlungene Wege

Reinhard Maschuw

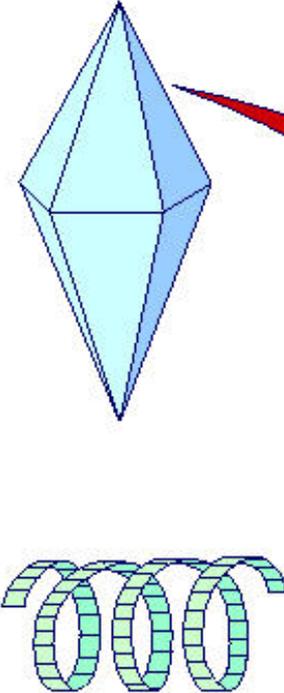
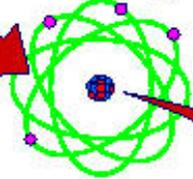
Universität
Hamburg

Leiter Techn. Entwickl.
Phys. Inst. Hamburg

CERN

Pluto-Exp.
bei DESY

Günter Flügge

Kristall Molekuel	Atom	Atom-Kern	Elementar- teilchen	
			<p>Hadronen</p> <p>Mesonen</p>  <p>Baryonen</p>  <p>Proton Neutron</p>	 <p>Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$</p>  <p>Quarks u, c, d, s, b, t</p>
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	?

Reiche Ernte am Pluto bei DESY

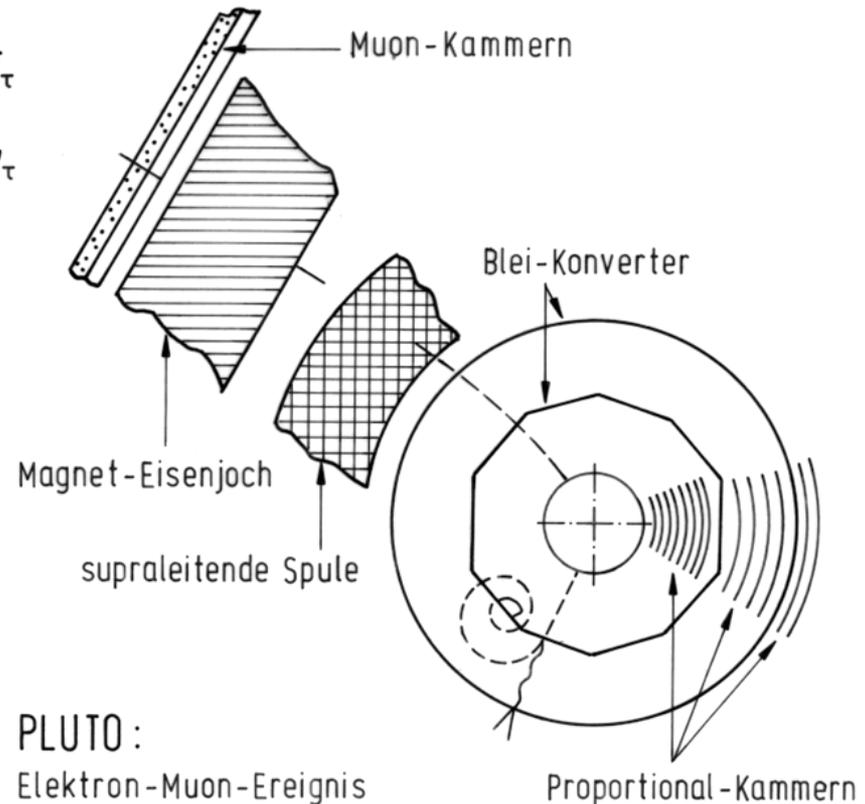
- Tau – Leptonen τ

$$e^+ e^- \rightarrow \begin{cases} \tau^+ \tau^- & \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau \\ & \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \end{cases}$$

,charm'-Quark c

,beauty'-Quark b

Glukonen g



Standardmodell der Teilchenphysik

Materie-Teilchen:

3 Teilchen - „Familien“

Leptonen:	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$
Quarks:	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
	leicht	schwer	sehr schwer

Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark: **Gluonen g** binden Quarks zu Nukleonen
- elektromagnetisch: **Photonen** binden Elektronen an Kerne
- schwach: **W-Boson, Z-Boson** ermöglichen Umwandlungen

Verschlungene Wege

Reinhard Maschuw

Universität
Hamburg

Leiter Techn. Entwickl.
Phys. Inst. Hamburg

CERN

Pluto-Exp.
bei DESY

MPI Heidelberg

DESY

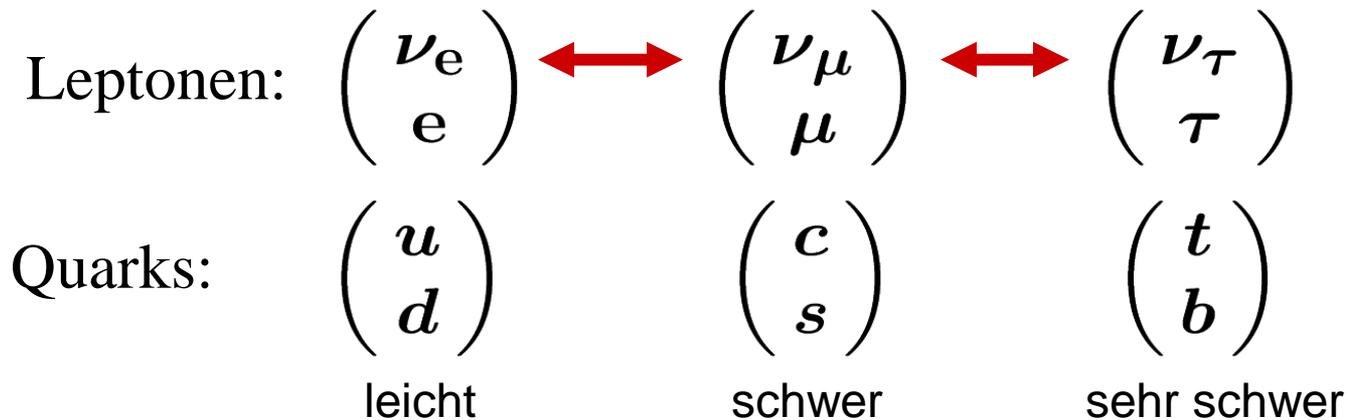
KfK
Karlsruhe

Günter Flügge

Standardmodell der Teilchenphysik

Materie-Teilchen:

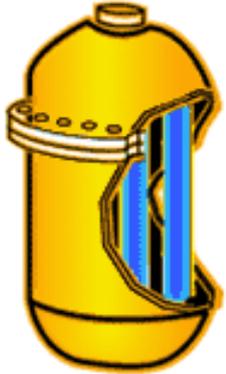
3 Teilchen - „Familien“



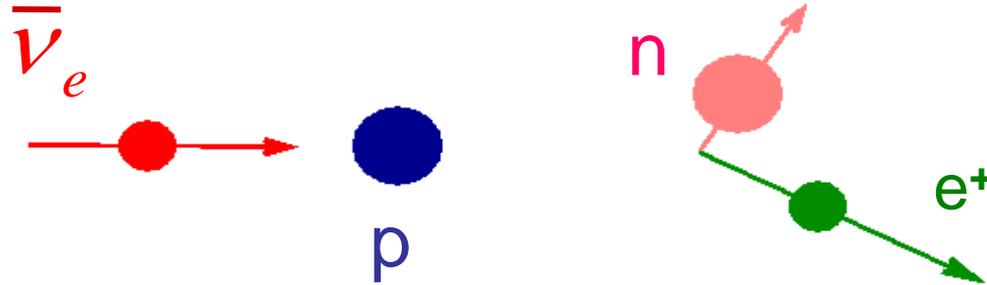
Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark: **Gluonen g** binden Quarks zu Nukleonen
- elektromagnetisch: **Photonen** binden Elektronen an Kerne
- schwach: **W-Boson, Z-Boson** ermöglichen Umwandlungen

Neutrino-Nachweis $\bar{\nu}_e p \rightarrow n e^+$



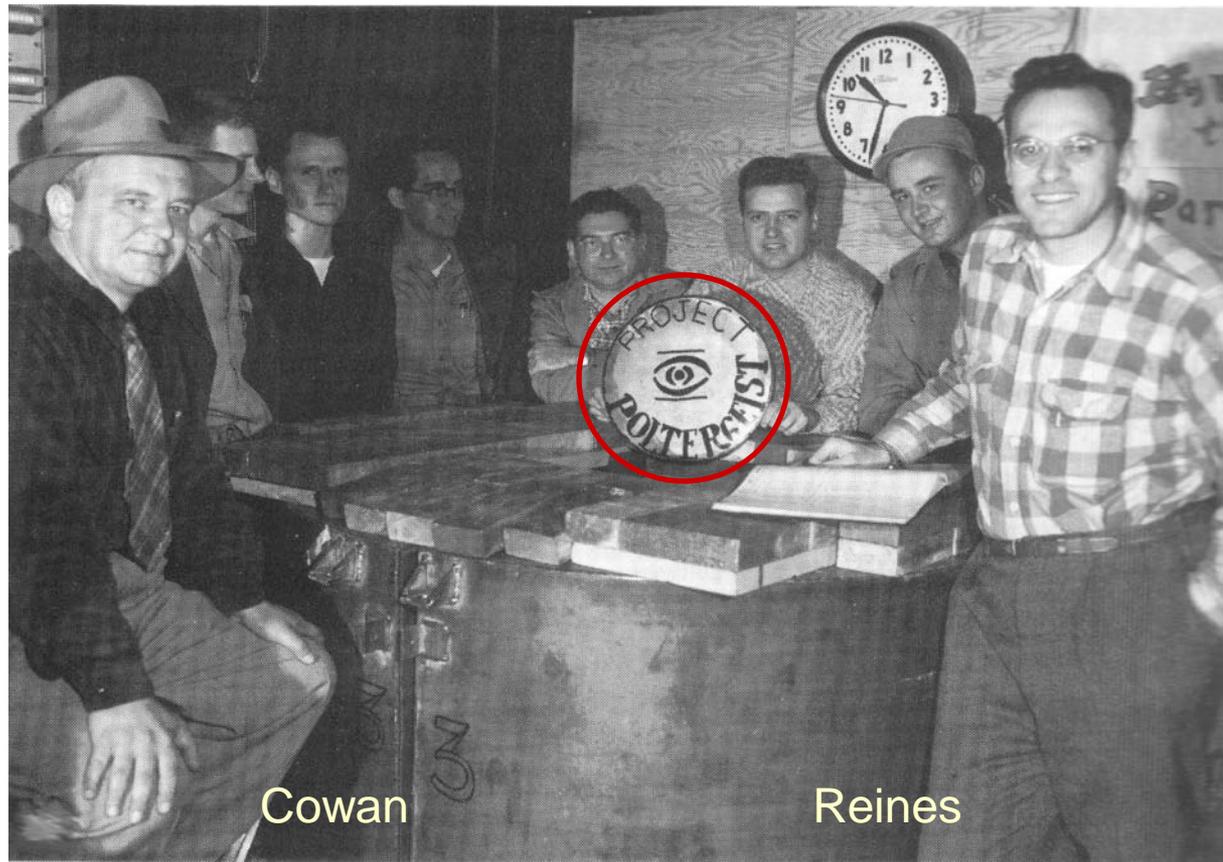
Kernreaktor



1956

C. Cowan, F. Reines

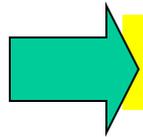
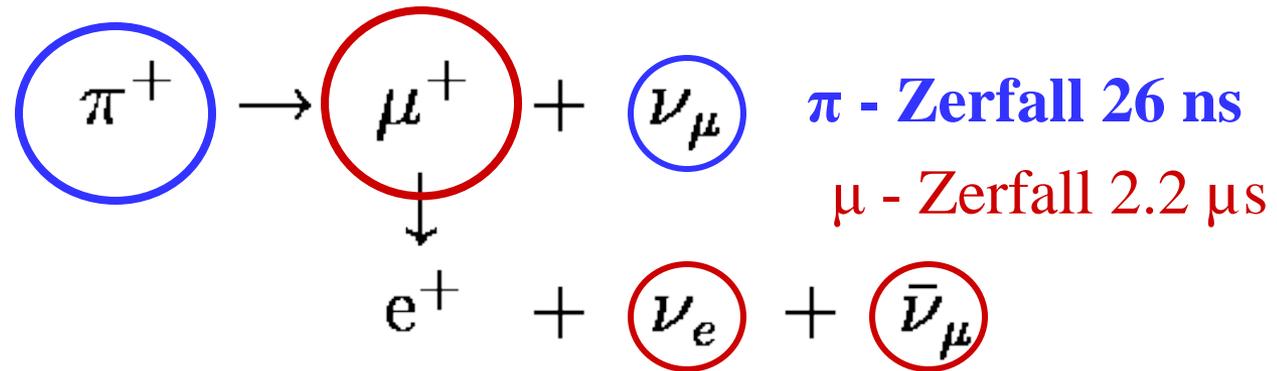
„Project
Poltergeist“



KARMEN

KARlsruhe Rutherford Medium Energy Neutrino Experiment

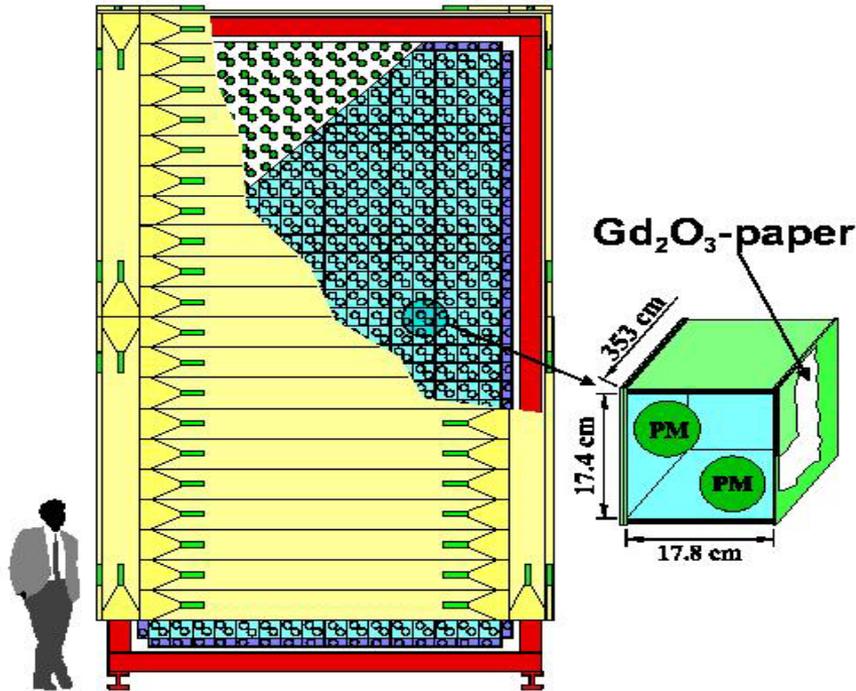
Spallations-Neutrino-Quelle ISIS (RAL Rutherford):



Zeitliche Separation der drei Neutrino-Sorten

Karmen-Detektor

KARMEN detector



Effizienter Nachweis :

- Elektronen + Photonen
- Neutronen

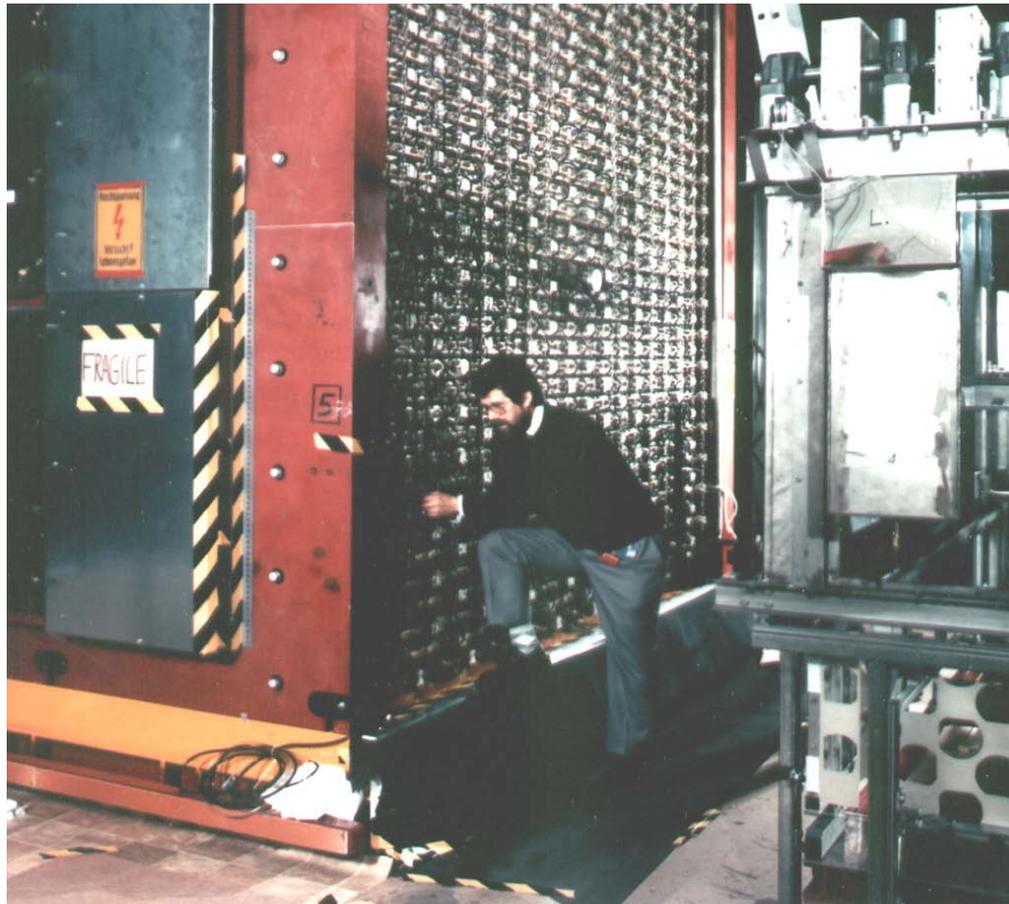
- 512 Hauptdetektormodule
- 2 Photomultiplier pro Seite
- Gadolinium zum Neutron-Nachweis

96% active volume of ¹²C and p

$$\sigma_E = \frac{11.5\%}{\sqrt{E[\text{MeV}]}} \quad \Delta t_{\text{ISIS}} \leq \pm 2\text{ns}$$

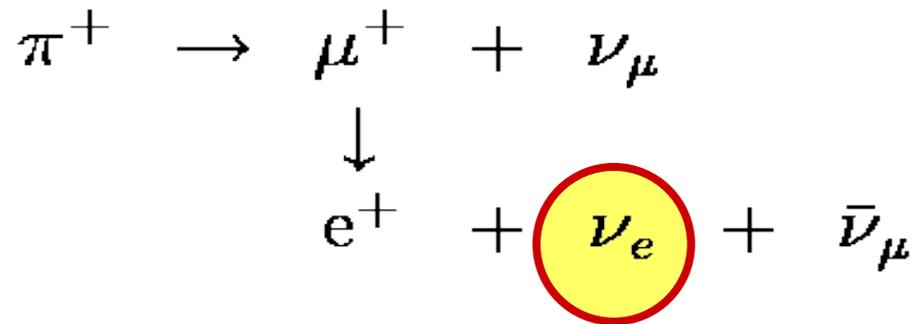
- 65000 Liter Szintillator (Mineralöl)

Einsatz am Karmen-Detektor

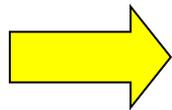
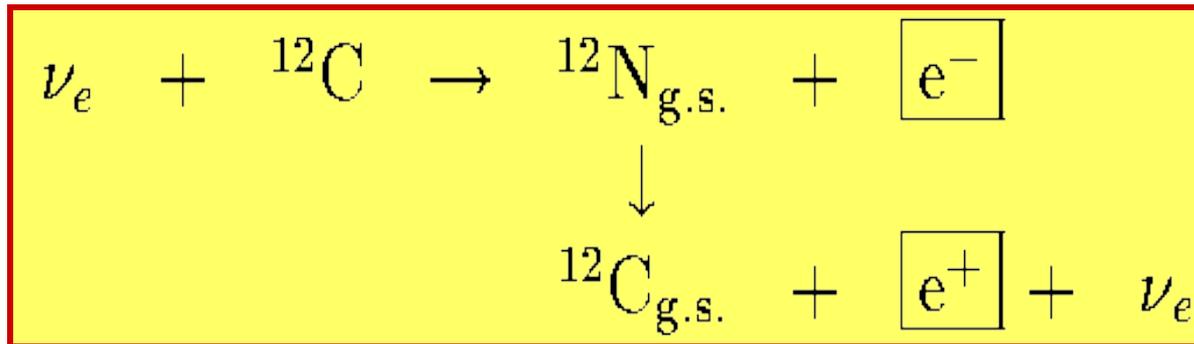


Einweihung von Karmen



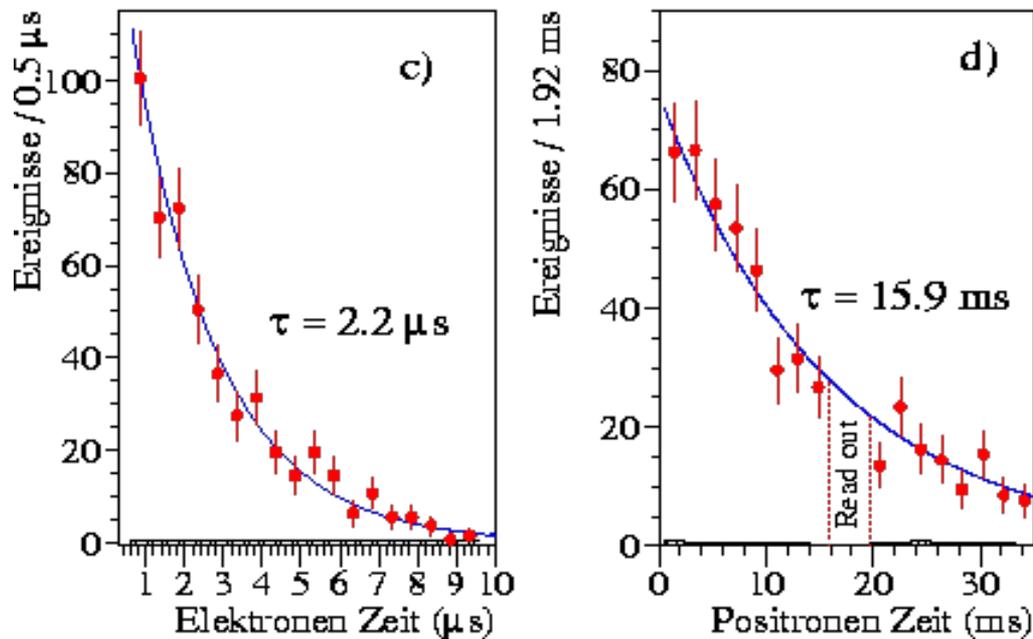


Neutrino-Streuung am Kohlenstoff



Fast untergrundfreie Messung der schwachen Wechselwirkung bei mittleren Energien durch verzögerte Koinzidenz

Zeitspektren der Elektronen und Positronen



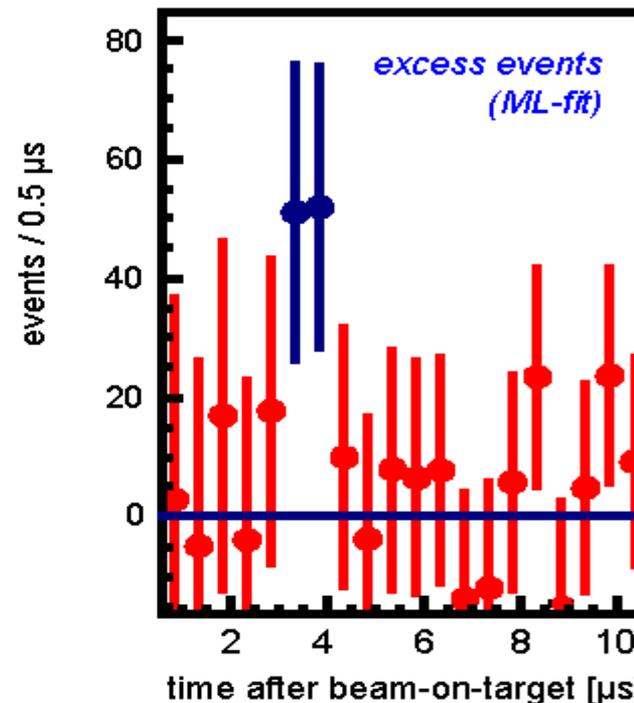
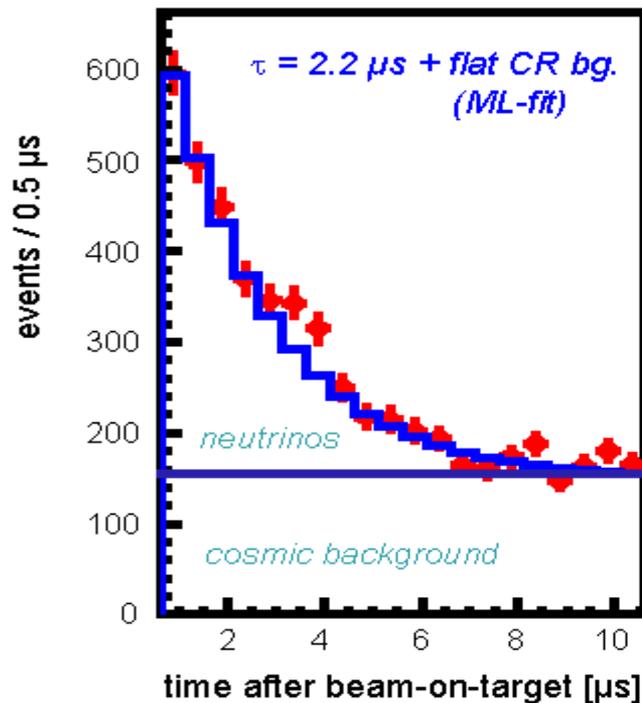
Perfekte Übereinstimmung mit Standard-Model

Zeitspektrum der e-Neutrinos: Zeit-Anomalie ($\pi \rightarrow \mu + X$?)

Time Distribution of single-prong events KARMEN1/2

time interval 0.6-20.6 μs ($10 \tau_\mu$)
energy interval 10-36 MeV

13707 C protons-on-target (1991-95,97/98)
8275 single prong events (no sequentials)



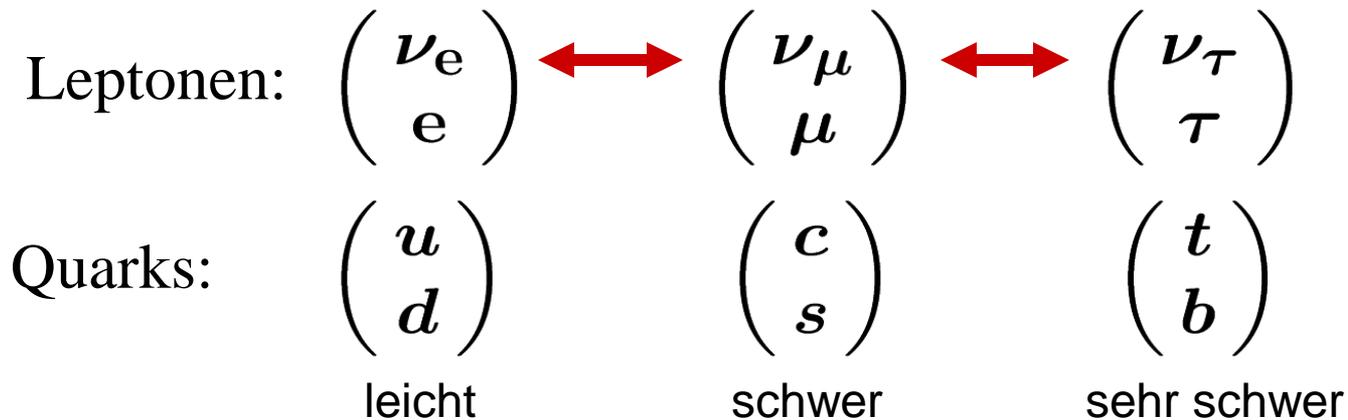
time interval 3.1-4.1 μs : *expected 551 evts.*
measured 658 evts.

time interval 3.1-4.1 μs : *excess 103 ± 34 evts.*

Standardmodell der Teilchenphysik

Materie-Teilchen:

3 Teilchen - „Familien“



Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark: **Gluonen g** binden Quarks zu Nukleonen
- elektromagnetisch: **Photonen** binden Elektronen an Kerne
- schwach: **W-Boson, Z-Boson** ermöglichen Umwandlungen

Neutrinooszillationen: Vakuum (2 Flavors)

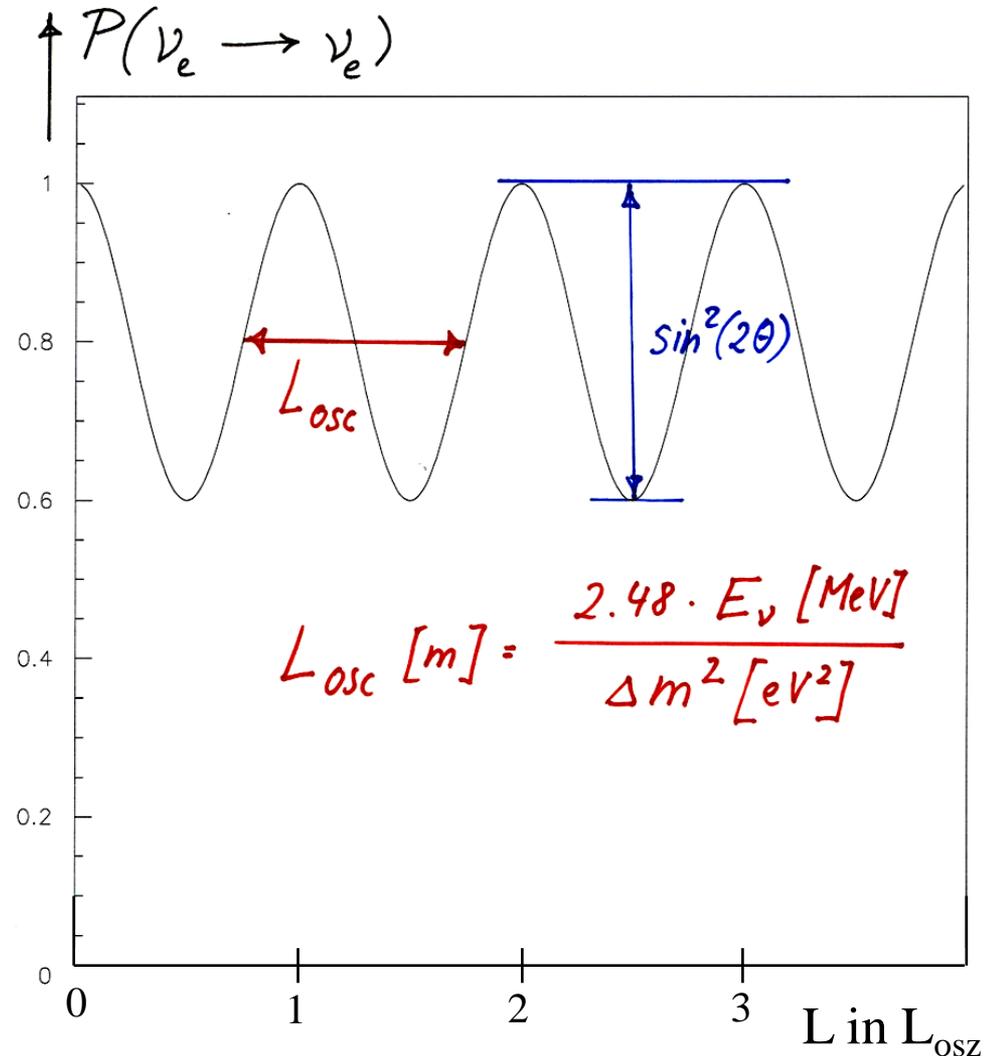
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Überlebenswahrscheinlichkeit:

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

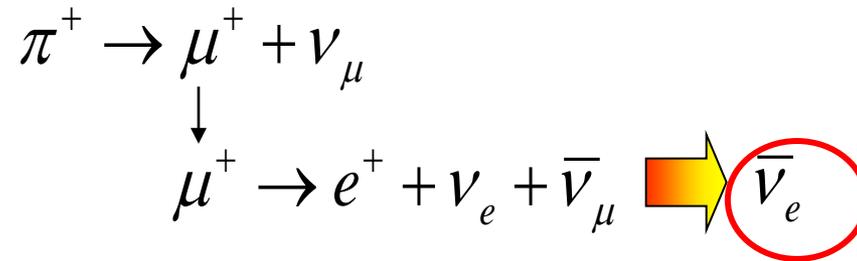
$$1 - \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2}{2} \cdot \frac{L}{E_\nu}\right)$$

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



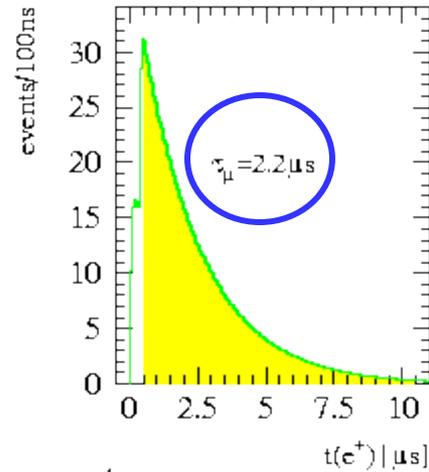
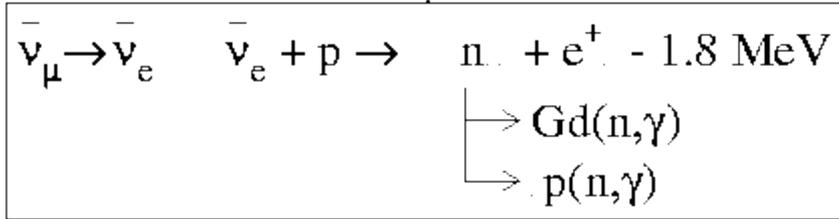
KARMEN:Rutherford

LSND: Los Alamos

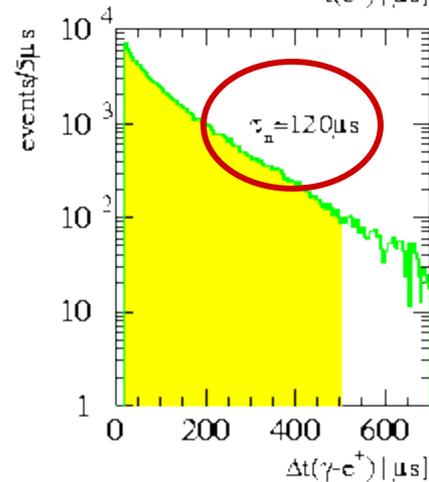


Überschuss gesehen?

**Widersprüchliche
Ergebnisse**



Positronen
folgen der
 μ -Zeitverteilung



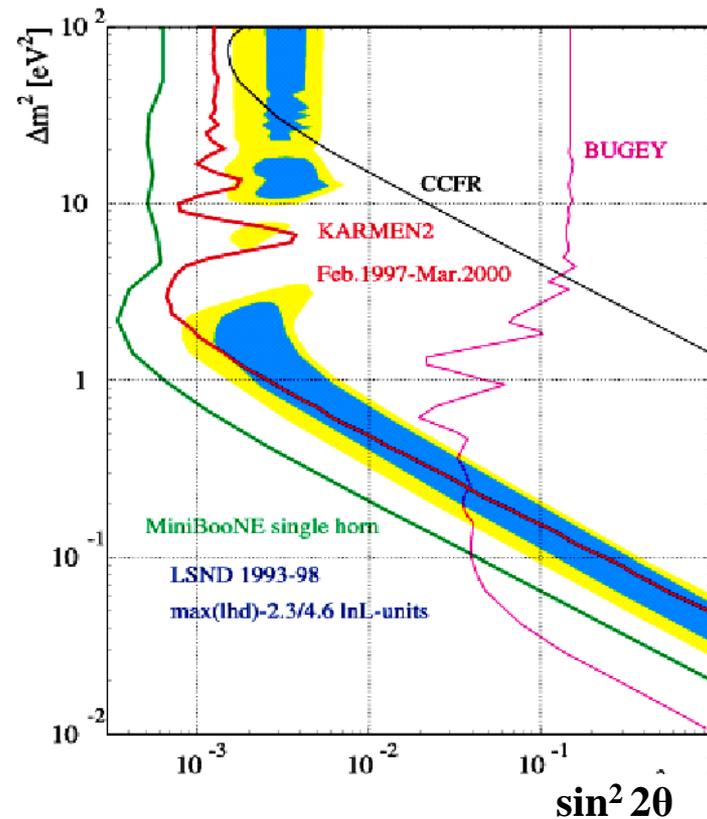
Verzögerte
Photonen aus
Neutron-Einfang

LSND vs KARMEN

LSND:
Mehr $\bar{\nu}_e$ -Ereignisse
als erwartet.

KARMEN schließt
großen Bereich von
LSND aus, kleiner
Rest bleibt.

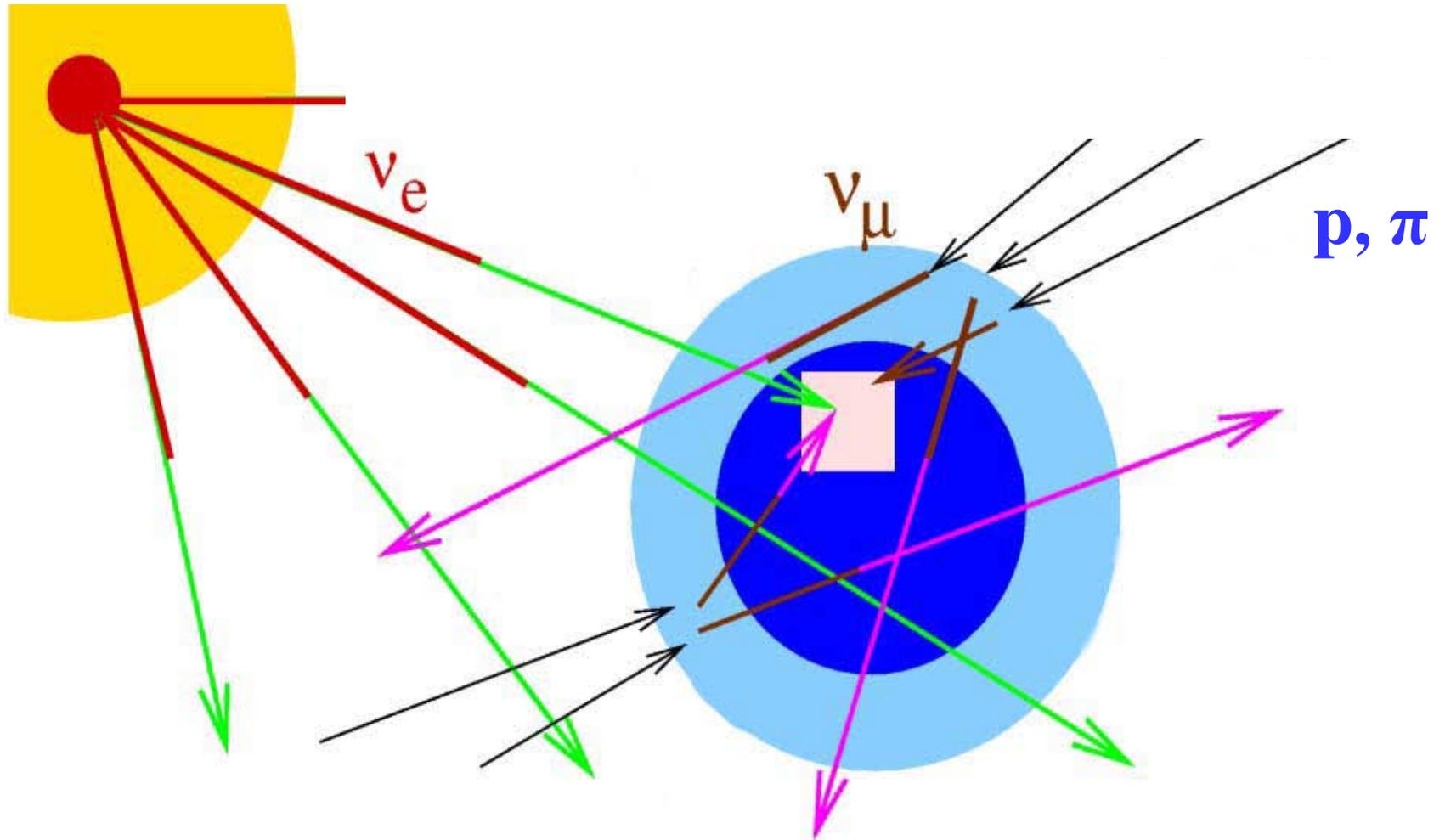
MiniBooNE wird den
gesamten erlaubten
Bereich testen:
Start 2002
(1000 evts/year)



Abschaltung von Karmen

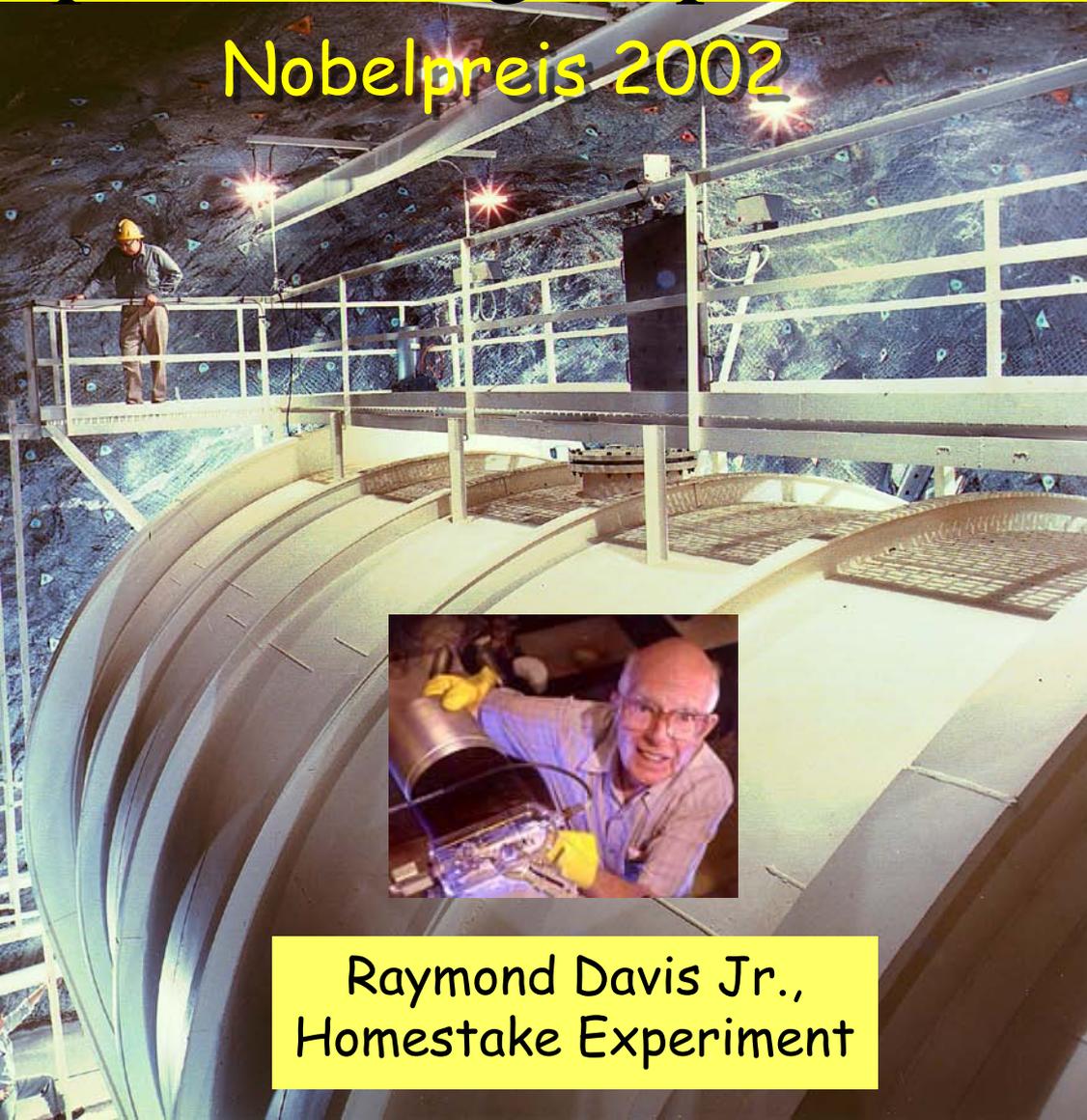


Sonnen- und Atmosphären- Neutrinos



Solare Neutrinos: “pioneering experiment”

Nobelpreis 2002



Raymond Davis Jr.,
Homestake Experiment

Seit \approx 1970

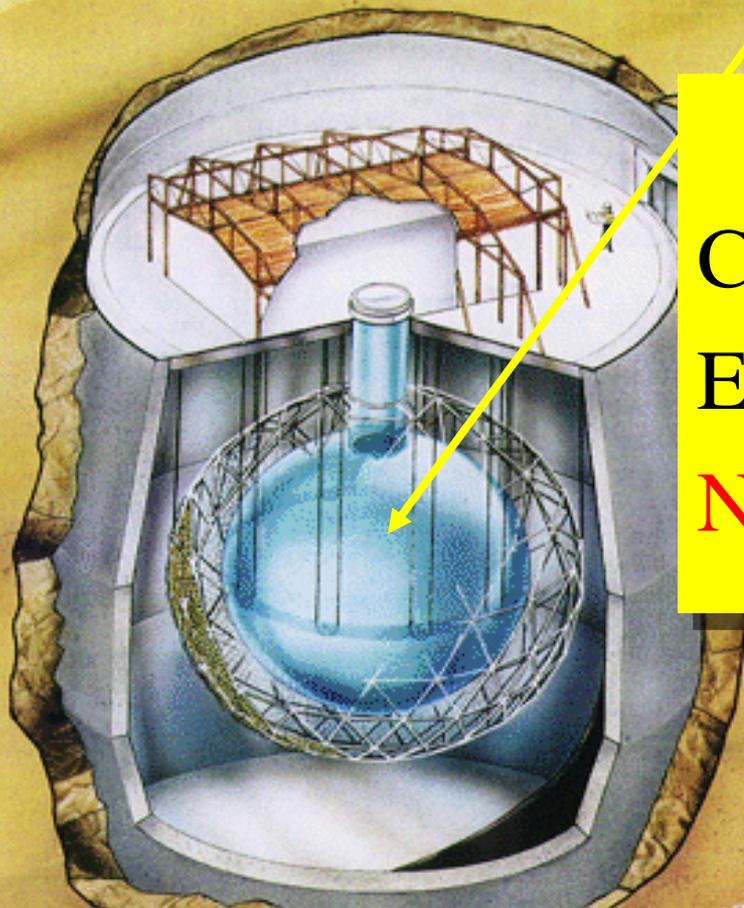


$E_\nu > 814 \text{ keV}$

Nur 1/3 der
Sonnenneutrinos
 $R_{\text{exp}} = 0.34 \times \text{SSM}$

SNO: Sudbury Neutrino Observatory

Target sind 1000t D₂O



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

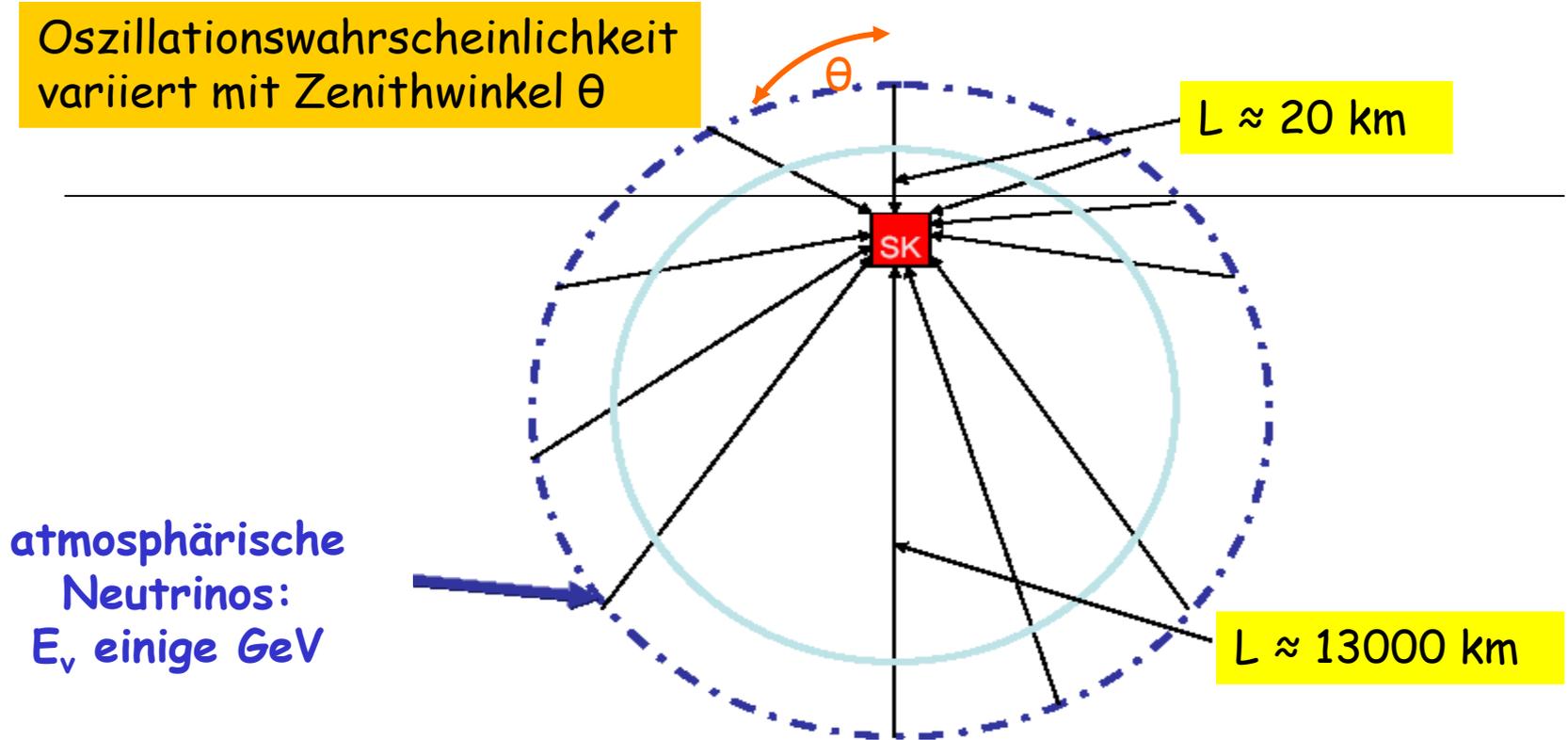
Solare/Reaktor Neutrinos: Status

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

Beste Erklärung:
Neutrinooszillationen in Materie

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

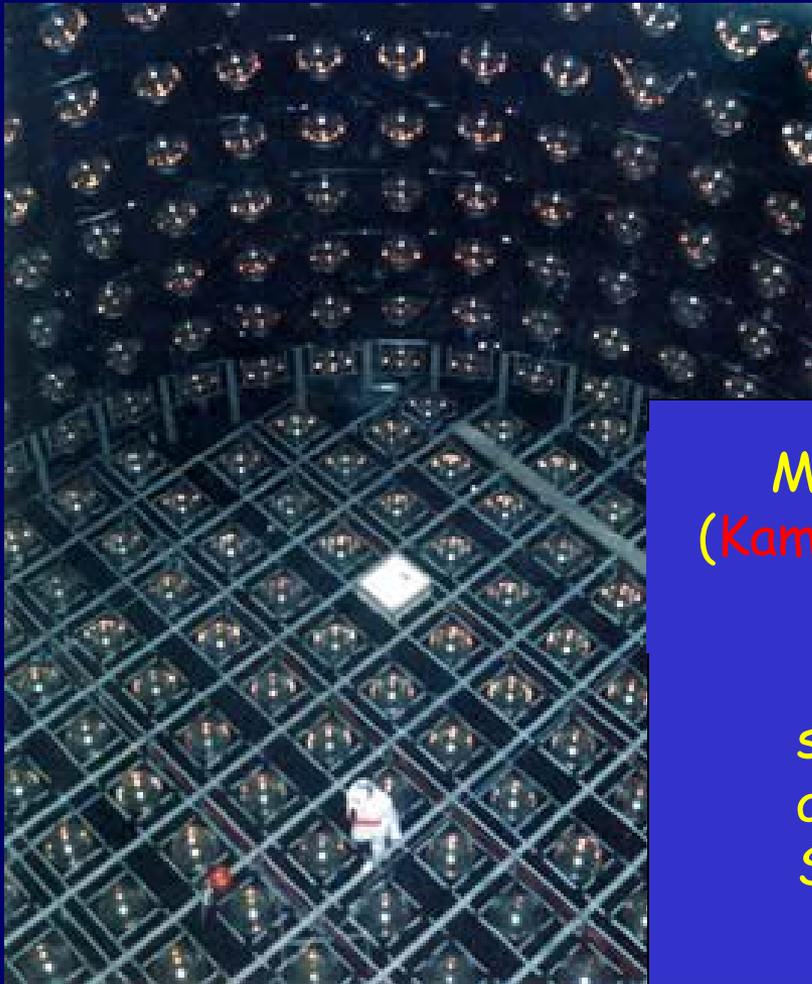
Atmosphärische Neutrinos



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

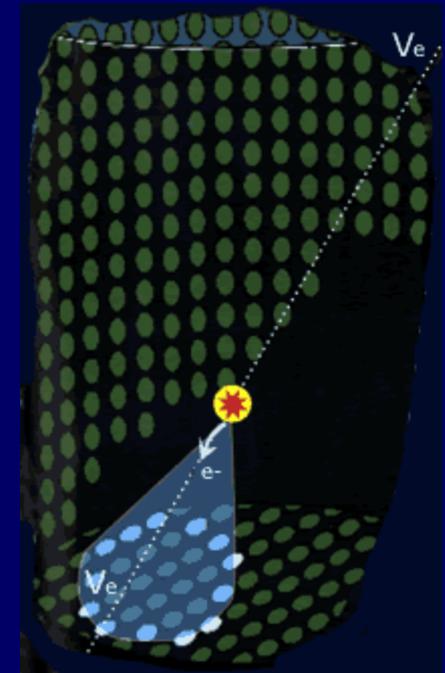
Kamiokande Experiment:

Nobelpreis 2002



Masatoshi Koshiba,
(Kamioka Neutron Decay)
Experiment

solare ν
atmosphärische ν
Supernova ν



Atmosphärische Neutrinos: Resultate

Verschwinden (disappearance) von ν_μ

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

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

Neutrinooszillationen?

- Solare Neutrinos:

$$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}, \quad \Delta m^2 = 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- Disappearance ν_e : Homestake, Gallex, Sage, Super-K, SNO

- Appearance von $\nu_{\mu,\tau}$: SNO

- Bestätigung durch KAMLAND

- Atmosphärische Neutrinos:

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}, \quad \Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

- Disappearance von ν_{μ} : Super-K, Macro, Soudan

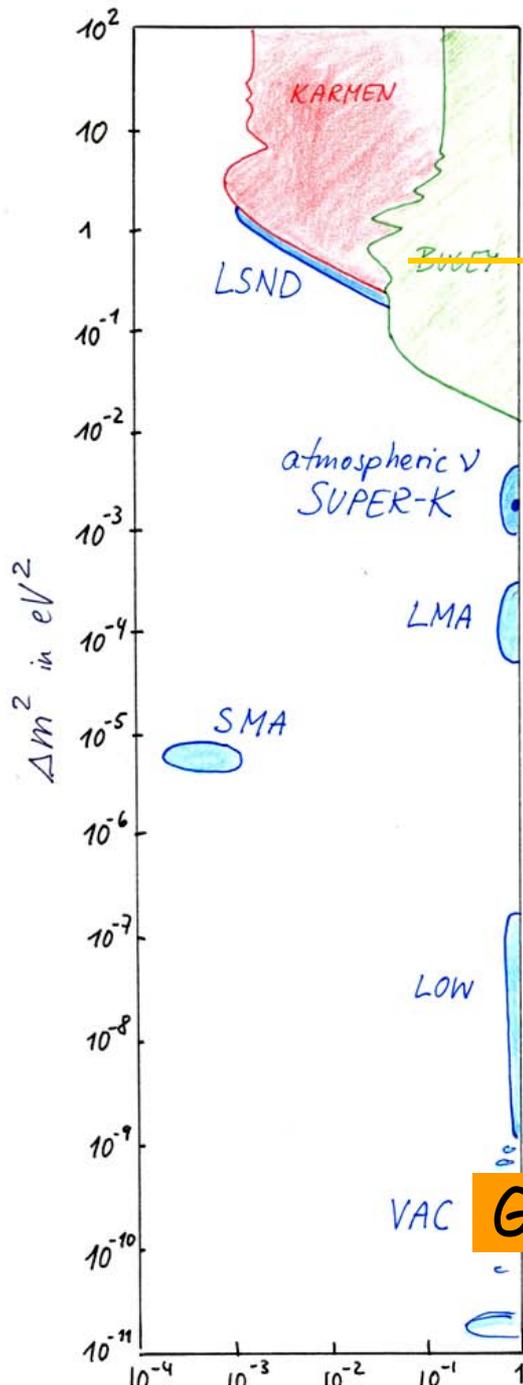
- Bestätigung durch K2K (Beschleunigerexperiment)

- LSND vs. KARMEN

$$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e, \quad \Delta m^2 = 3 \times 10^{-2} \div 1 \text{ eV}^2$$

- Appearance von $\bar{\nu}_e$???

Evidenz für Neutrino-Oszillationen:



$$\Delta m^2_{\text{LSND}} \sim 0.1-1 \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2_{\text{atm}} \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2_{\text{solar}} \sim 10^{-5}-10^{-4} \text{ eV}^2$$

or $10^{-11}-10^{-7} \text{ eV}^2$

Mit 3 Neutrinos ist dies nicht möglich!

Gibt es ein weiteres unbekanntes Neutrino?

Verschlungene Wege

Reinhard Maschuw

Universität
Hamburg

Leiter Techn. Entwickl.
Phys. Inst. Hamburg

CERN

Pluto-Exp.
bei DESY

MPI Heidelberg

DESY

KfK
Karlsruhe

Uni Bonn/Dekanat
Direktorat FZK

Günter Flügge

RWTH Aachen

60ter
Geburtstag

Neutrino-Massenbestimmung

Neutrino-
Oszillationen:

Mischungswinkel
Massendifferenzen

$\beta\beta$ -Zerfall:

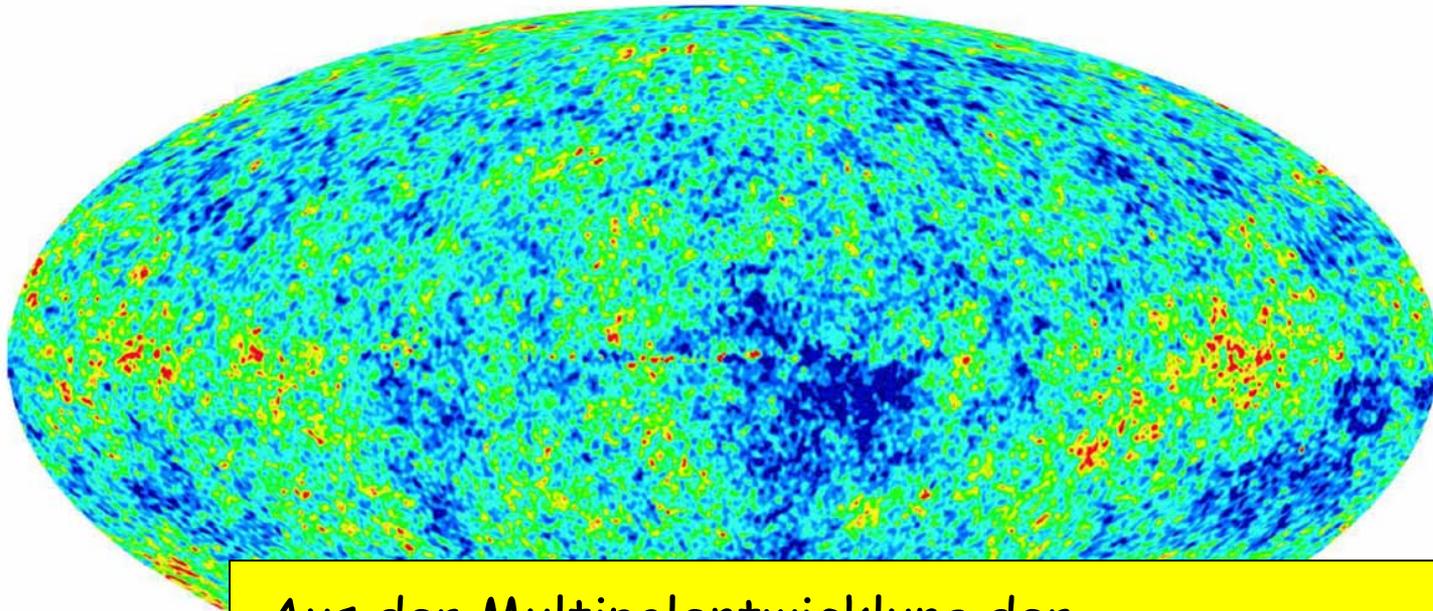
Kosmologie
(CMBR):

Majorana-Teilchen?
Absolute Masse

β -Zerfall:

Absolute Masse

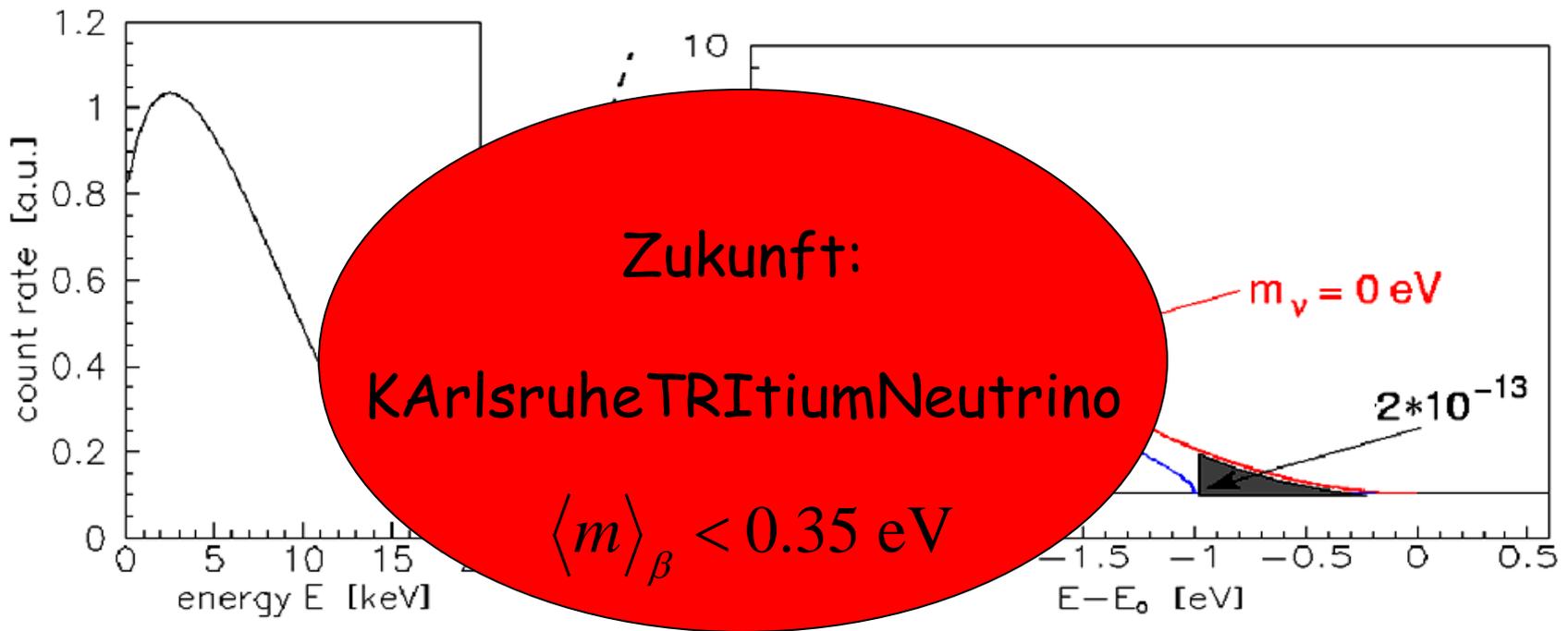
Neutrinomasse aus kosmischer Hintergrundstrahlung (WMAP)



Aus der Multipolentwicklung der
Temperatur-Fluktuationen:

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

Tritium β -Zerfall: Mainz/Troitsk



Mainz Daten (1998, 1999, 2001)

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

Verantwortung tragen !



Jahresfeier Uni Karlsruhe



Früh übt er sich in
Richtungsbestimmungen...



...später auch wissenschafts-politisch



GridKa im FZ Karlsruhe



Gewinnen nur im Team



Alinghi-Team: Intern. Coll. von 15 Nationen angeführt von einem Kernphysiker



Herzlichen Glückwunsch

zum

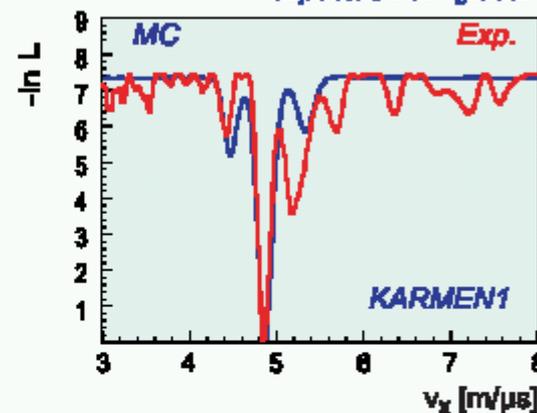
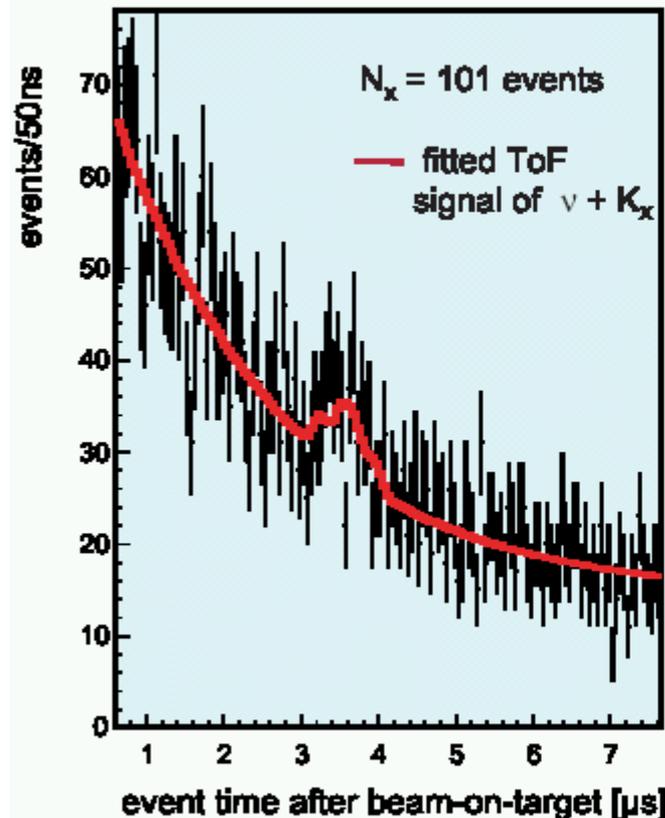
Geburtstag !

KARMEN Time Anomaly : $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + X$ hypothesis

KARMEN1+2 data : 1990-99

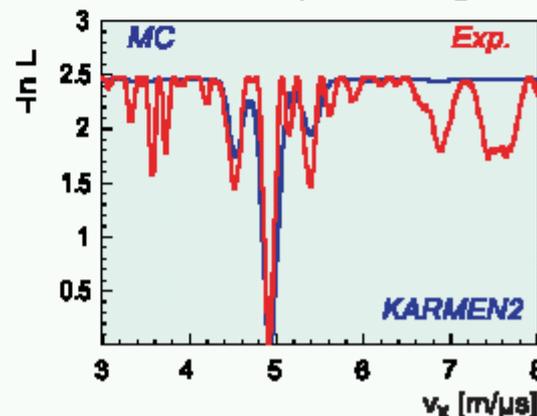
Likelihood Analysis : x - T Correlation !

KARMEN1: $v_x = (4.85 \pm 0.05) \text{ m}/\mu\text{s}$ $N_x = (57 \pm 25)$ events
expected from global analysis : 50 events



$v = 1/60 c //$

KARMEN2: $v_x = (4.91 \pm 0.06) \text{ m}/\mu\text{s}$ $N_x = (16 \pm 11)$ events
expected from global analysis : 19 events

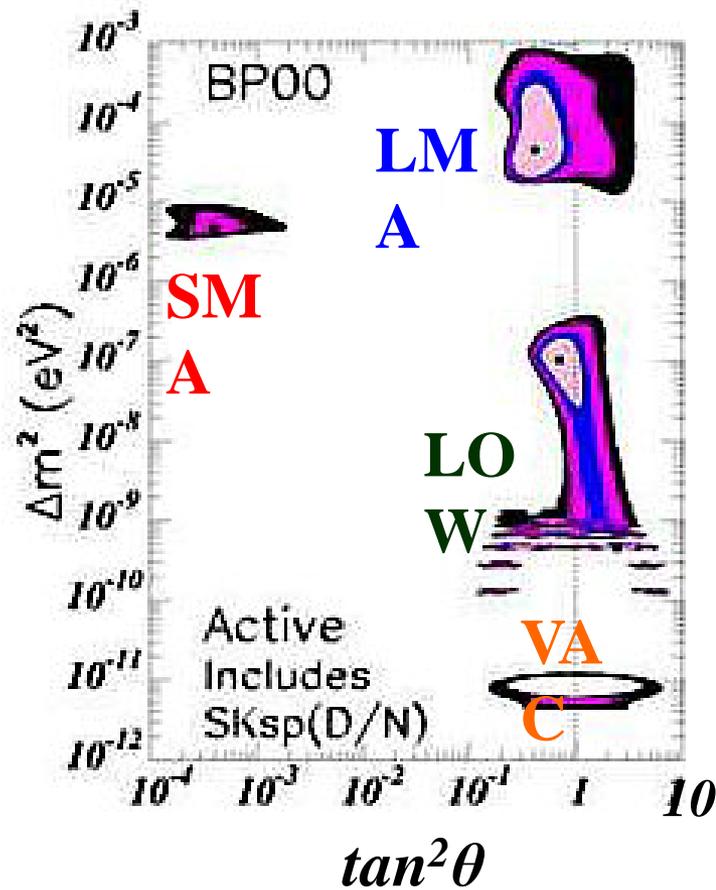


$v = 1/60 c //$

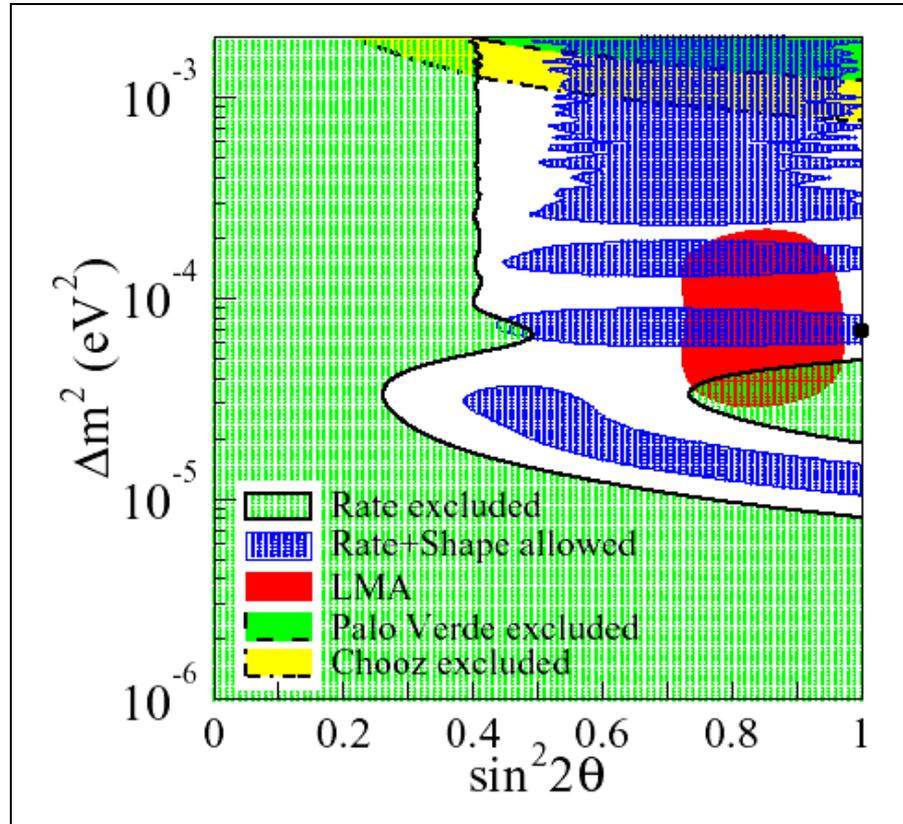
stat. significant beam excess (4.3σ)
excess = ToF signal of X-decays (?)

Beste Erklärung: Neutrinooszillationen

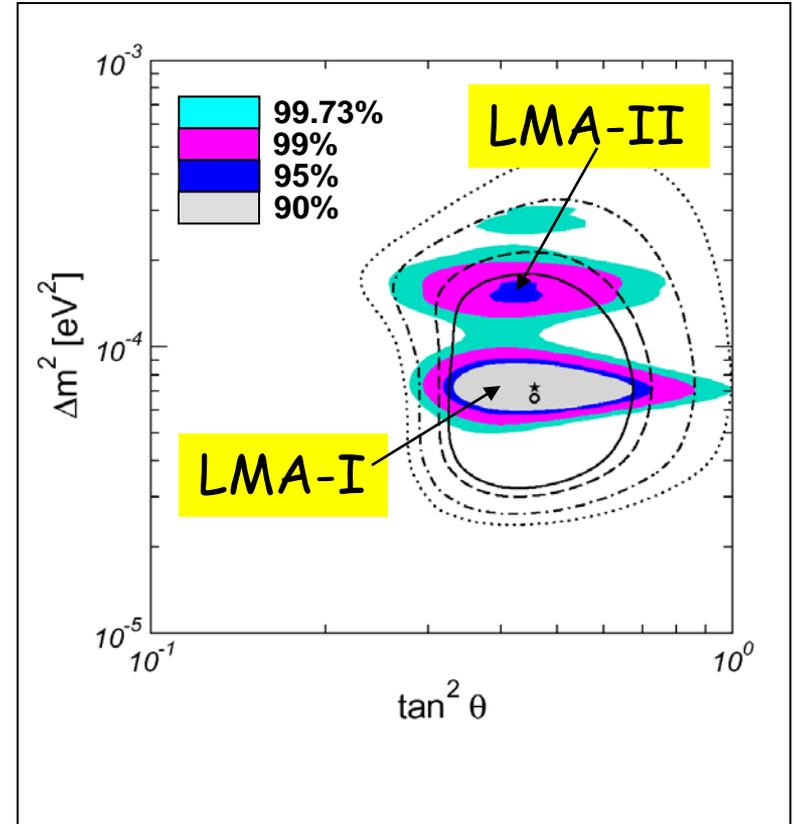
Stand letzte DPG-Tagung, Frühjahr 2002



Analyse: Solare Neutrinos + KamLAND

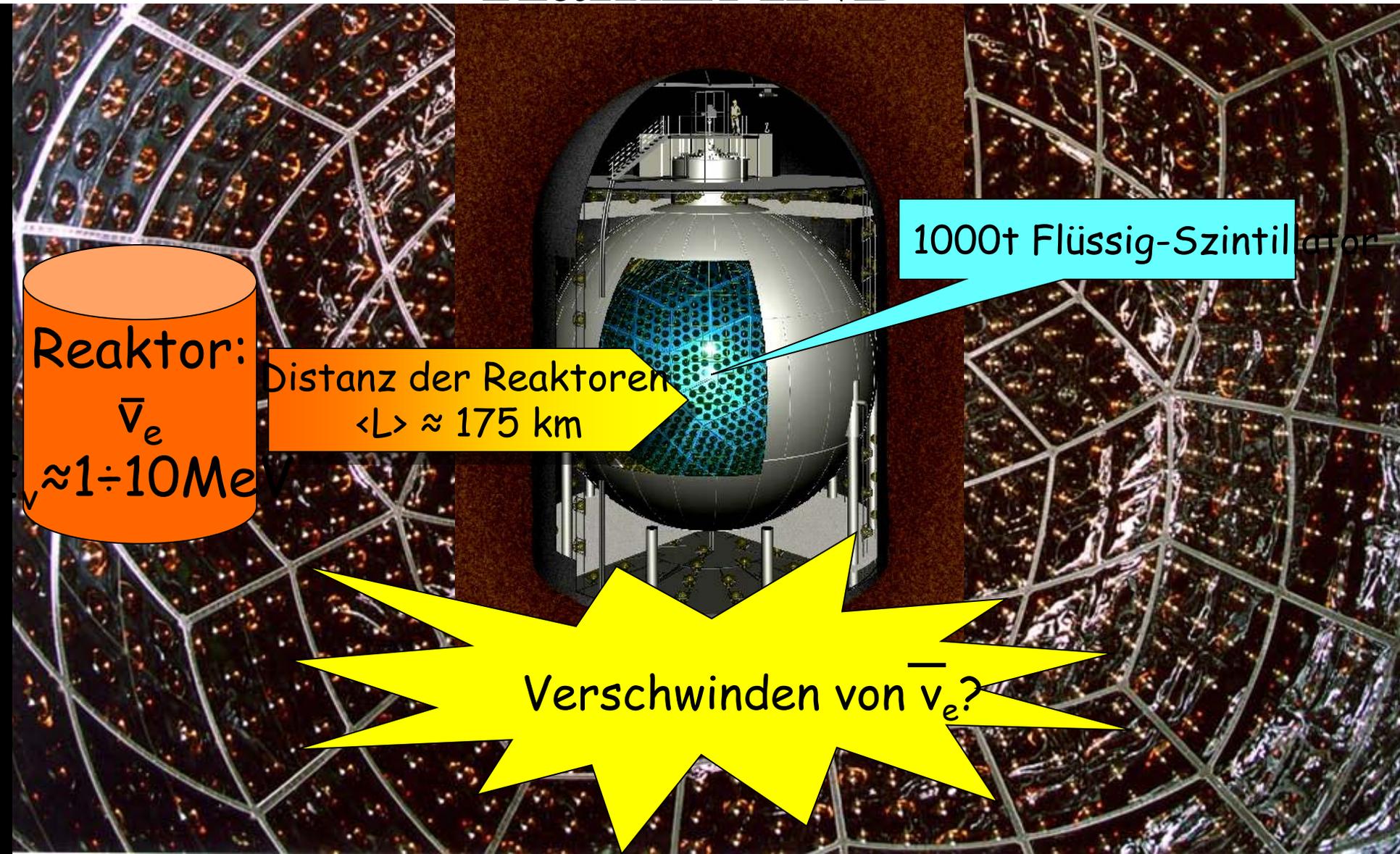


Analyse KamLAND-Koll.
Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 021802



Analyse Maltoni, Schwetz, Valle

Reaktorneutrino-Experiment KamLAND



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

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

1000t Flüssig-Szintillator

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