

8. Experimente zu Neutrinos und ihrer Masse

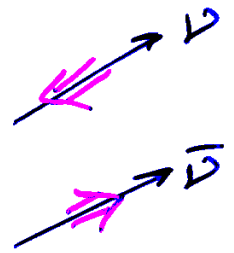
- Eigenschaften der Neutrinos
- Experimente zur Neutrinomasse
 - ▷ Elektron-Neutrino
 - ▷ Myon-Neutrino
 - ▷ Tau-Neutrino
- Probleme mit Neutrinos
 - ▷ Sonnen-Neutrino Problem
 - ▷ Problem der atmosphärischen Neutrinos
 - ▷ Anzeichen für ν -Oszillationen
- Experimente zu Neutrino-Oszillationen
 - ▷ kurze Basislänge: LSND vs. KARMEN
 - ▷ lange Basislänge: K2K und MINOS

Eigenschaften der Neutrinos

Bisher wurden die folgenden Eigenschaften der Neutrinos vermutet:

- Masse $m_\nu = 0$

- { Neutrinos sind linkshändig
Antineutrinos sind rechtshändig



- (Anti-) Neutrinos sind Fermionen Spin: $\frac{1}{2} \hbar$

- Jede Generation hat eine erhaltene (ladungsartige) Quantenzahl

$$L_e, L_\mu, L_\tau$$

Fragen: \blacktriangleright Wie sicher sind diese Eigenschaften?


\blacktriangleright Was wäre, wenn $m_\nu \neq 0$?

- ↳ Masseneigenzustand \neq Leptonzahleigenzustand
- ↳ Neutrino-Mischung wie bei Quarks (à la CKM)
- ↳ Neutrino-Oszillationen

Experimente mit Neutrinos ...

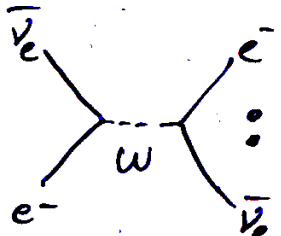
... sind keineswegs leicht, denn

- Wirkungsquerschnitte sind klein, z.B.



$\sigma_{\text{tot}}(\nu_e e^-) = \frac{G_F^2}{\pi} \cdot s \approx s [\text{GeV}] \cdot 1.7 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2$

Quadrat der Energie im Schwerpunktsystem



$\sigma_{\text{tot}}(\bar{\nu}_e e^-) = \frac{G_F^2}{3\pi} \cdot s \approx s [\text{GeV}] \cdot 5.6 \cdot 10^{-39} \text{ cm}^2$

Zudem im "fixed target"-Modus: $s = 2m_e \cdot E_\nu$

$$\Rightarrow \frac{G_F^2 m_e}{2\pi} \approx 4.2 \cdot 10^{-42} \text{ cm}^2/\text{GeV}$$

$$\left(\text{Ereignisrate } \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot \text{Luminosität} \right)$$

Zahl der auftreffenden Teilchen pro Sekunde und cm^2

- Nachweis von Neutrinos ist schwierig

▷ sehr massive Absorber erforderlich
(viele target-Teilchen)

▷ hohe Neutrinoflüsse aus Quelle
(= Luminosität)

Neutrinomassen

● Elektron-Neutrino



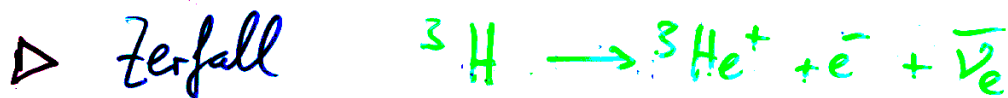
$$m_n - m_p = 1.29 \text{ MeV}/c^2$$

max. Impuls von $p, e^-, \bar{\nu}_e$: $1.19 \text{ MeV}/c$

Präzise Messung der Energien & Impulse von Neutron, Proton u. Elektron \rightarrow

$$m_\nu^2 = m_n^2 - m_p^2 - m_e^2 + 2(E_p E_e - \vec{p}_p \vec{p}_e - m_n(E_p + E_e))$$

Problem: Um auf $m_\nu = 1 \text{ eV}/c^2$ empfindlich zu sein, müßte man Energien & Impulse auf besser als 6 Dezimalstellen messen



+ hat max. Zerfallsenergie von $Q = 18.6 \text{ keV}$

+ meßbar durch Abbremsung der Elektronen in einem elektr. Gegenfeld

\leadsto Energie folgt aus Spannungsmessung

+ falls $m_{\nu_e} \neq 0$, dann wird das

Elektronenergiespektrum bei $E < Q$

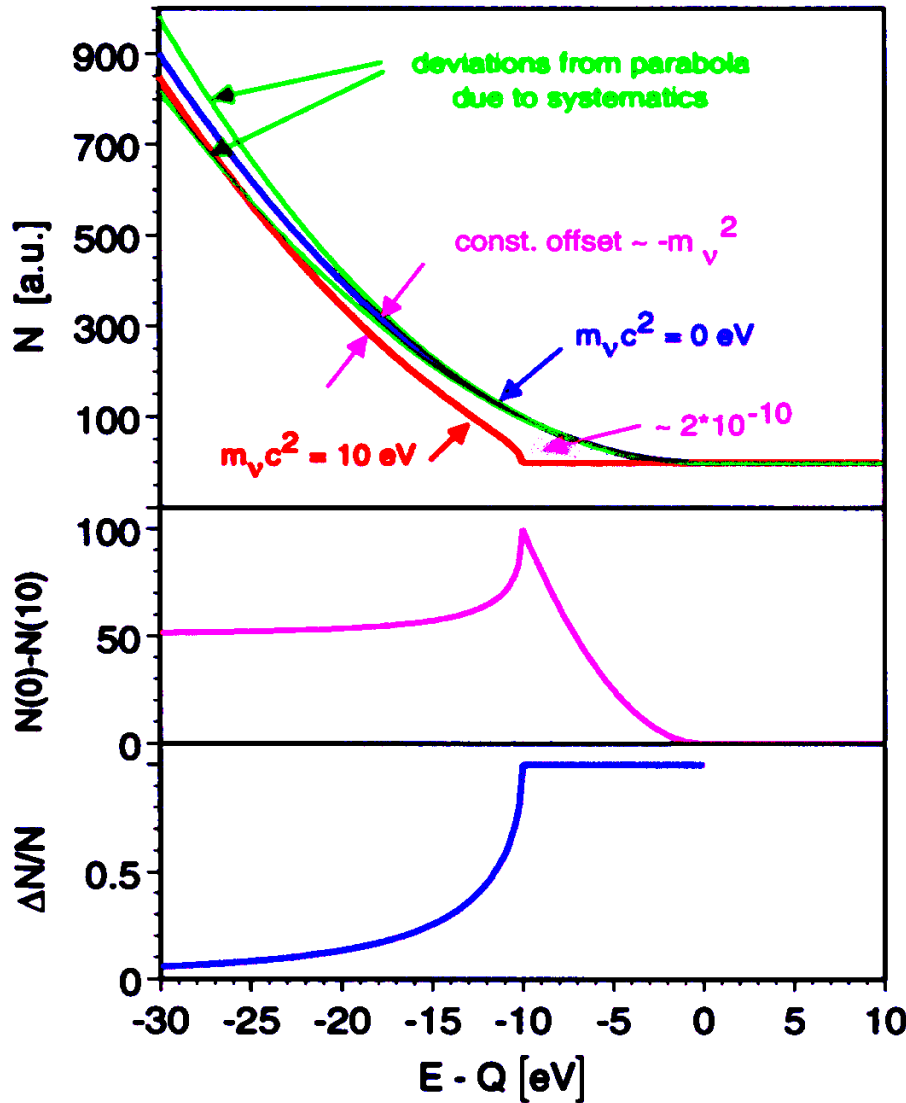
abbrechen

Direct measurement of m_{ν_e}

superalloyed



$t_{1/2} = 12.3 \text{ y}$



scattering
final states
resolution eff.

signature
for $m_{\nu} \neq 0$

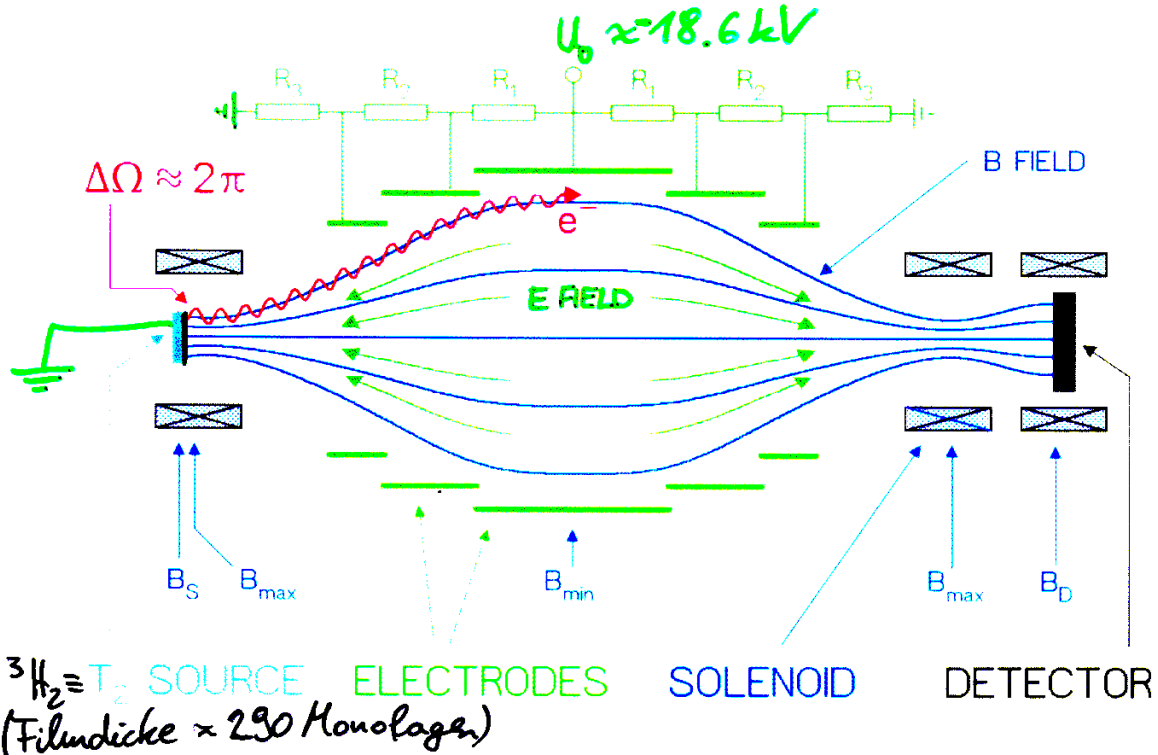
rel. signature
for $m_{\nu} \neq 0$

if more than one eigenstate is contributing (not resolved):

$$\overline{m_{\nu}^2} := \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_i^2$$

Retardierungsspektrometer des Mainz-Experiments

SOLENOID RETARDING SPECTROMETER (NIM B63 (1992) 345-358)



$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{adiab}} + \vec{F}_{\text{elec}} = (\vec{\mu} \nabla) \vec{B} - e \vec{E}$$

WITHOUT E FIELD:



- magnetic guiding field

$$\rightarrow \Delta\Omega \approx 2\pi$$

Akzeptanz für zerfallselektronen in halben Raumwinkel

- adiabatic transf. $E_{\perp} \rightarrow E_{\parallel}$ + electrostatic retardation

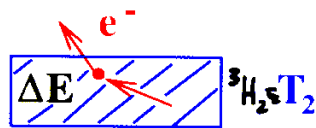
$$\rightarrow \Delta E \approx 4 - 6 \text{ eV}$$

Messgenauigkeit

Systematic uncertainties

Inelast. Streuung im $^3\text{H}_2$ -Film \rightarrow Energieverlust d. Elektronen

- Inelastic Scattering film thickness



λ_{free}
shape of energy loss function

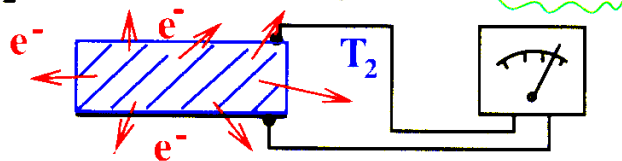
- Anregung benachbarter $^3\text{H}_2$ beim Zerfall eines ^3H (Rückstoß)
Final states (effects due to solid state)

spectator excitation

changes of excited states energy levels

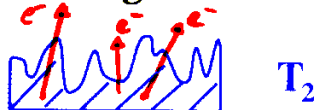
Aufladung des $^3\text{H}_2$ -Films \rightarrow zusätz. Abbremsung d. e^-

- T_2 film charging up



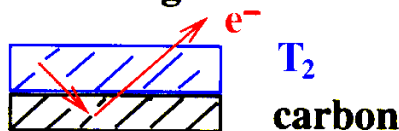
Rauheit des Films \rightarrow größere Streuung der e^- -Startenergie

- T_2 film roughness (avoided)



Rück-Streuung an Trägerplatte des $^3\text{H}_2$ -Films

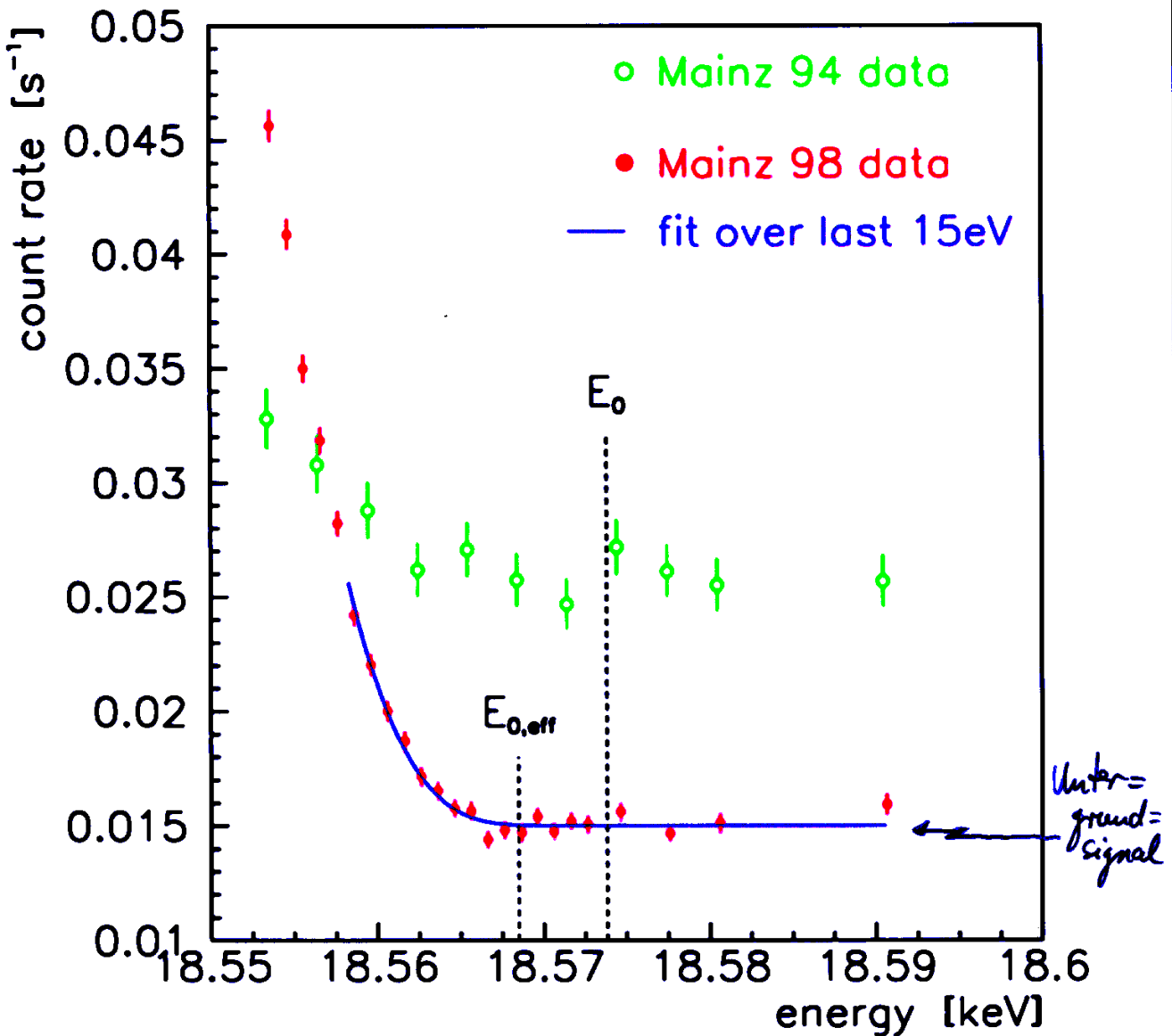
- Backscattering (small)



- Detector efficiency (small)

Summing up all 1998 data

Q3+Q4+Q5



⇒ $m_\nu^2 c^4 = -0.1 \pm 3.8 \pm 1.8 \text{ eV}^2$

⇒ $m_\nu \leq 2.9 \text{ eV}/c^2$ mit 95% statistischer Zuverlässigkeit (CL = confidence level)

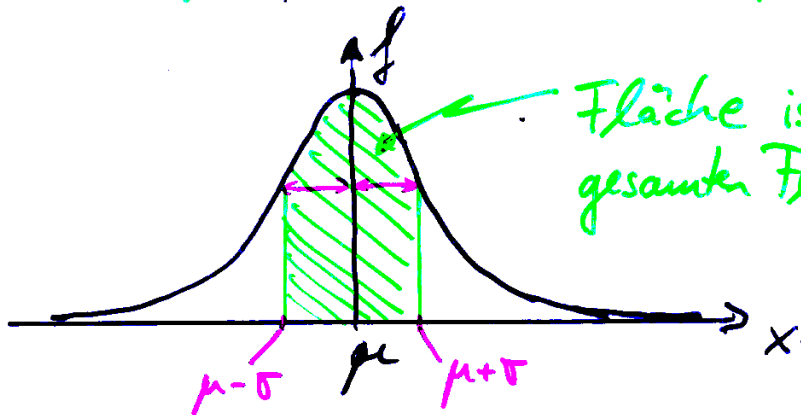
Grenzwerte und Zuverlässigkeit

Jede Messung stellt eine Stichprobe dar. Wiederholt man eine Messung häufig, so sollte die Verteilung der Stichproben

▷ **gaussisch** sein für große Erwartungswerte μ

$$f(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion



Gaußsche Verteilung bedeutet, daß in statistischer Verteilung der Stichproben **~68%** im Intervall von **$\pm 1\sigma$** um den wahren Mittelwert μ liegen.

Die Fehlerangabe für einen Meßwert stellt üblicherweise den 1σ -Fehler dar (systematische Fehler sind i.a. nicht gaußisch verteilt, werden aber häufig so behandelt). Damit hat der **Meßwert** eine **68%-ige Zuverlässigkeit**, im **$\pm 1\sigma$ -Intervall** um den wahren (unbekannte) Mittelwert zu liegen.


Grenzwerte und Zuverlässigkeit

▷ Gaußsche Fehler und Zuverlässigkeiten:

$\pm 1.0 \sigma \rightarrow \approx 68\%$ Zuverlässigkeit
(CL = confidence level)

$\pm 2.0 \sigma \rightarrow \approx 95\%$ CL

$\pm 2.6 \sigma \rightarrow \approx 99\%$ CL

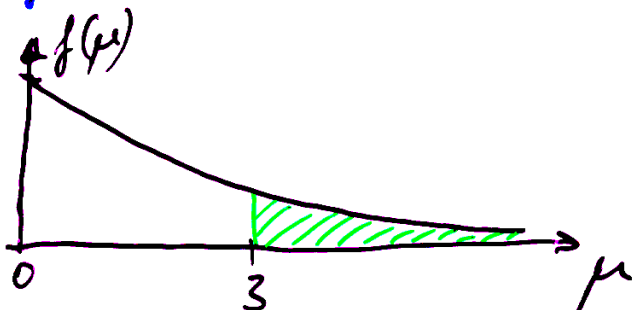
(diese Zahlen gelten nur für 1dim. Verteilungen, bei 2 dim. Verteilungen muß entsprechend der Bruchteil der Gesamtfläche unterhalb des Gaußhügels in der Ellipse $\sigma_1 - \sigma_2$ betrachtet werden  $\rightarrow 39\%$ CL)

Im Falle kleiner Ereigniszahlen gilt:

▷ Poisson Statistik $f(\mu, r) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!}$

μ : Erwartungswert; r : Beobachtung ($r = 0, 1, 2, \dots$)

z.B. für $r = 0$ (kein beobachteter Kandidat): $f(\mu) = e^{-\mu}$



Für $\mu = 3$ ist $f(\mu) \approx 0.05$

\Rightarrow 5% Wahrscheinlichkeit für $r' > 3$ oder
95% Wahrscheinlichkeit für $r' < 3$ (95% CL)

Neutrino masse

• Myon-Neutrino

Genauere Vermessung des Zerfalls $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$

Probleme: Δm_π nur auf $\pm 35 \text{ eV}/c^2$ bekannt

$\Delta p_\mu = p_\nu = 30 \text{ MeV}/c$ (p & E müssen direkt gemessen werden)

\Rightarrow $m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}/c^2$ mit 90% statistischer Zuverlässigkeit ($\approx 1.6 \cdot \sigma$)

• Tau-Neutrino

□ Bisher noch nicht direkt beobachtet!

□ Genauere Vermessung von $\tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ (\pi^0) \nu_\tau$
 $\tau^- \rightarrow 2\pi^- \pi^+ (\pi^0) \nu_\tau$

□ Betrachte Phasenraum der Masse und Energie des Systems aus den Pionen: m_h, E_h

$$E_h \equiv \sum E_\pi$$

$$m_h^2 = (\sum E_\pi)^2 - (\sum \vec{p}_\pi)^2$$

Größen sind korreliert!

\Rightarrow $m_{\nu_\tau} < 15.5 \text{ MeV}/c^2$ mit 95% statistischer Zuverlässigkeit ($\approx 2 \cdot \sigma$)

Masse-Energie-Phasenraum im $\tau \rightarrow 5\pi \nu_\tau$ Zerfall

$$E_h = \sum E_\pi$$

$$m_h^2 = (\sum E_\pi)^2 - (\sum \vec{p}_\pi)^2$$

korrelierte Größen
 \Downarrow
 geneigte Kontur-
 ellipsen der
 "Gaushügel"

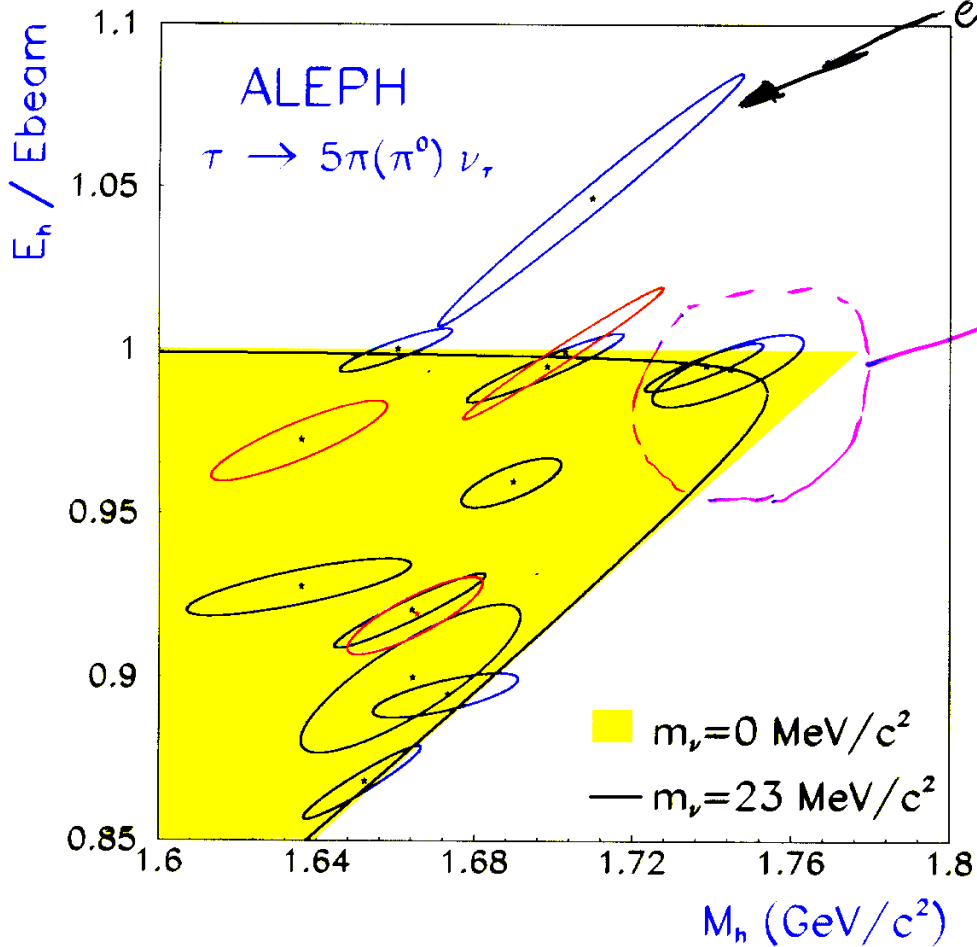


Figure 4: Distribution in the upper part of the (m_h, E_h) plane for $\tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ (\pi^0) \nu_\tau$ candidates in the data. The grey area is the allowed region for a massless neutrino. The borderline of the allowed region for a $23 \text{ MeV}/c^2$ neutrino is also drawn. The only $\tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ \pi^0 \nu_\tau$ event in the plot is the one with the largest hadronic energy.

Neutrinomassen

- Massengrenzen:

$$m_{\nu_e} < 2.3 \text{ eV}/c^2 \quad 95\% \text{ CL}$$

$$m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}/c^2 \quad 90\% \text{ CL}$$

$$m_{\nu_\tau} < 15.5 \text{ MeV}/c^2 \quad 95\% \text{ CL}$$

⇒ alle verträglich mit Neutrinos der Masse Null!

- Andere Anzeichen für $m_\nu \neq 0$?

→ z.B. die für $m_\nu \neq 0$ erwartete
 ν -Oszillationen ...

▷ Messungen mit Neutrinos, die den Erwartungen nicht entsprechen:

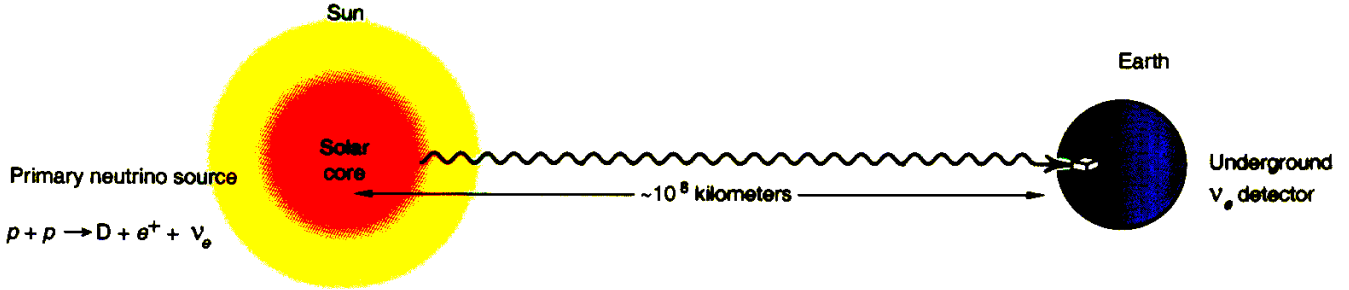
- Sonnen-Neutrino-Problem

- Problem der atmosphärischen Neutrinos

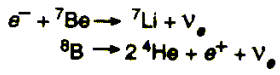
- Experimente an Beschleunigern

Neutrino Quellen

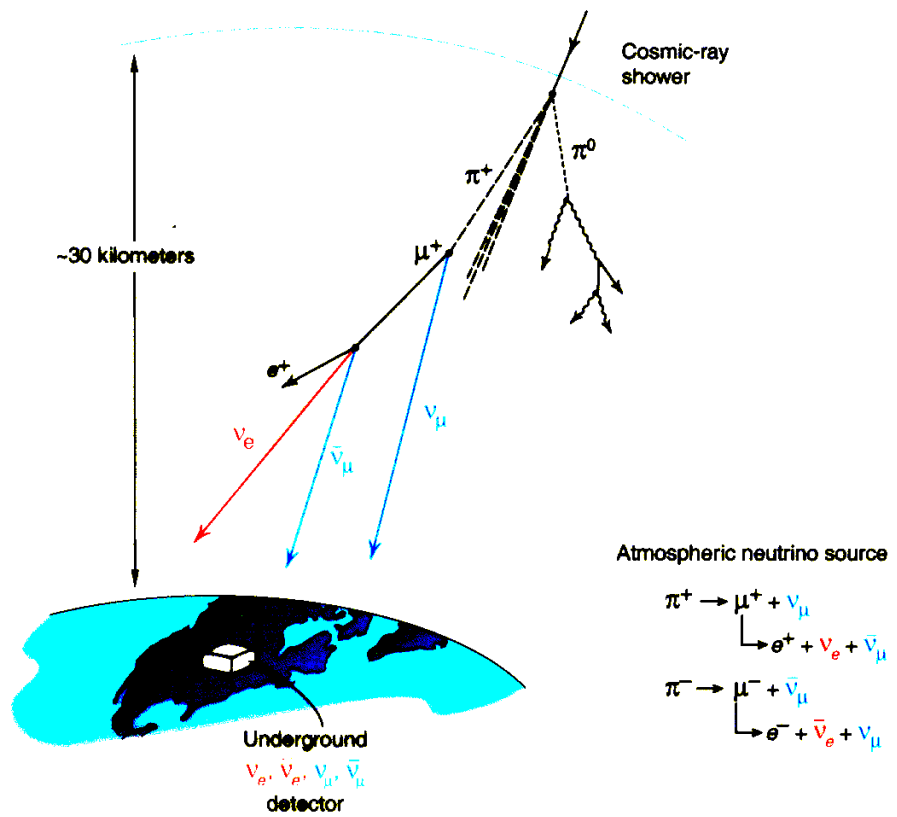
Sonne:



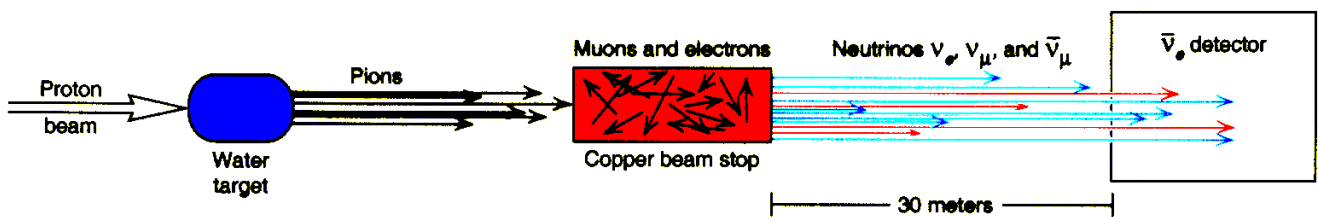
Other sources of neutrinos:



Atmosphäre:

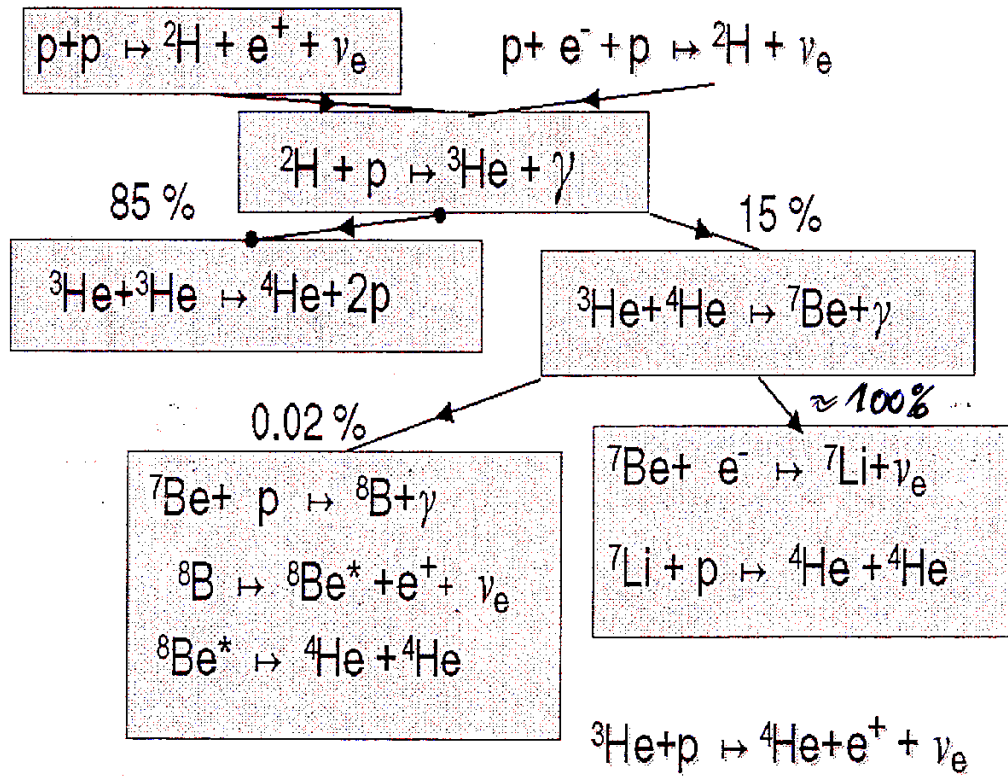


Beschleuniger:



Neutrinos von der Sonne

▷ Neutrinoquelle sind Fusionsprozesse:



(od. ${}^7\text{Li}^*$ mit ${}^7\text{Li}^* \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$)

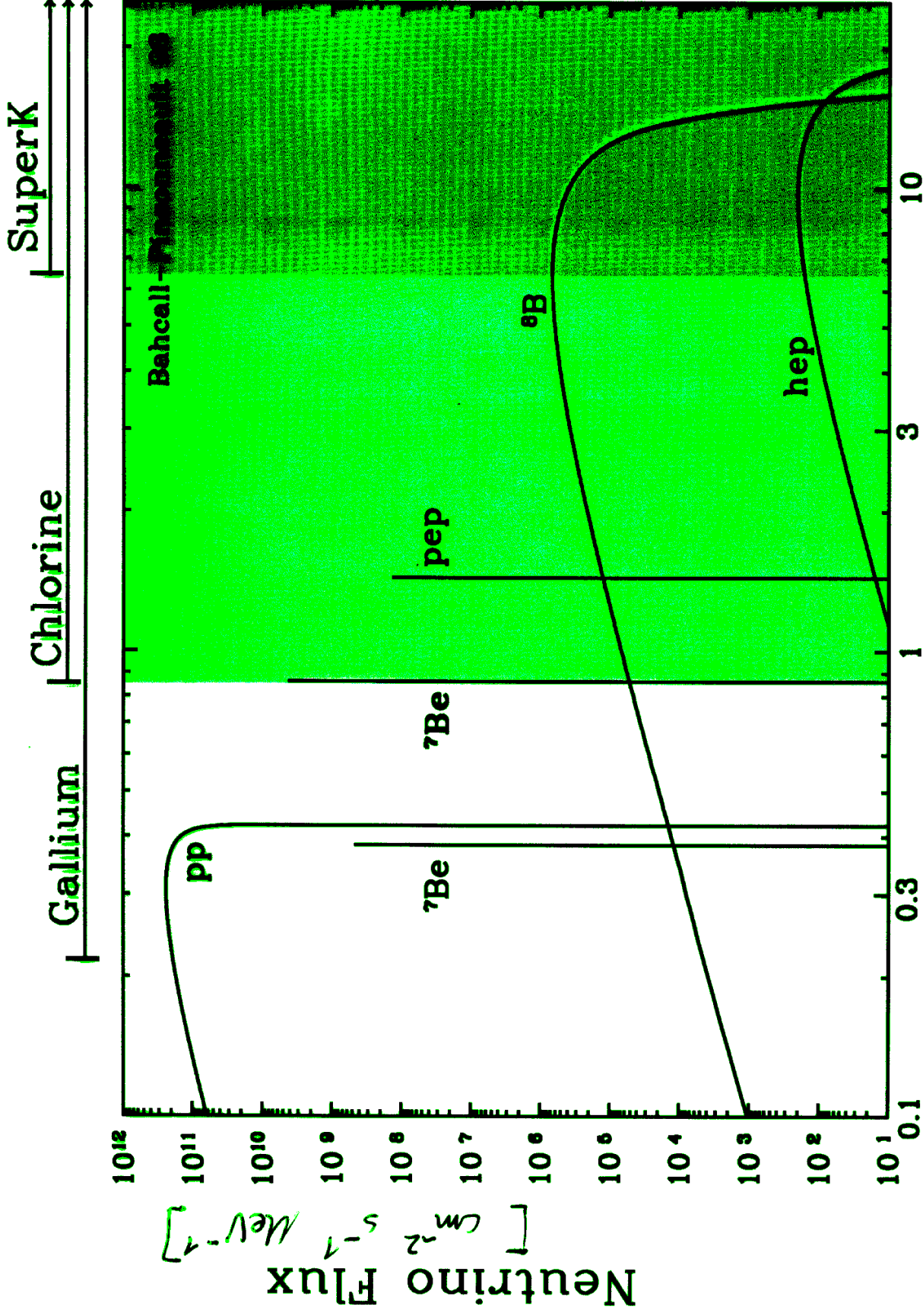
▷ Gesamter Neutrinofluß auf der Erde:

$$\approx 6.5 \cdot 10^{10} \frac{\nu}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

im Energiebereich von

$$0.1 \dots 20 \text{ MeV}$$

▷ nutzbares Spektrum hängt von Nachweisprozeß ab ...



Neutrino Energy (MeV)

Solar neutrino energy spectrum (Theorie!)

Nachweis von Sonnenneutrinos

• Radiochemisch:



Prinzip: Große Menge von ${}^{37}\text{Cl}$ oder ${}^{71}\text{Ga}$ (typischerweise in chem. Bindung) werden Sonnen- ν ausgesetzt. Nach Tagen bzw. Monaten wird das Material einer chemischen Extraktion von ${}^{37}\text{Ar}$ bzw. ${}^{71}\text{Ge}$ unterzogen und der Anteil dieser radioaktiven Isotope durch Vermessung des Zerfallssignals über mehrere Monate bestimmt. Halbwertszeiten: $\tau_{1/2}$

${}^{37}\text{Ar}$: 34.8 Tage

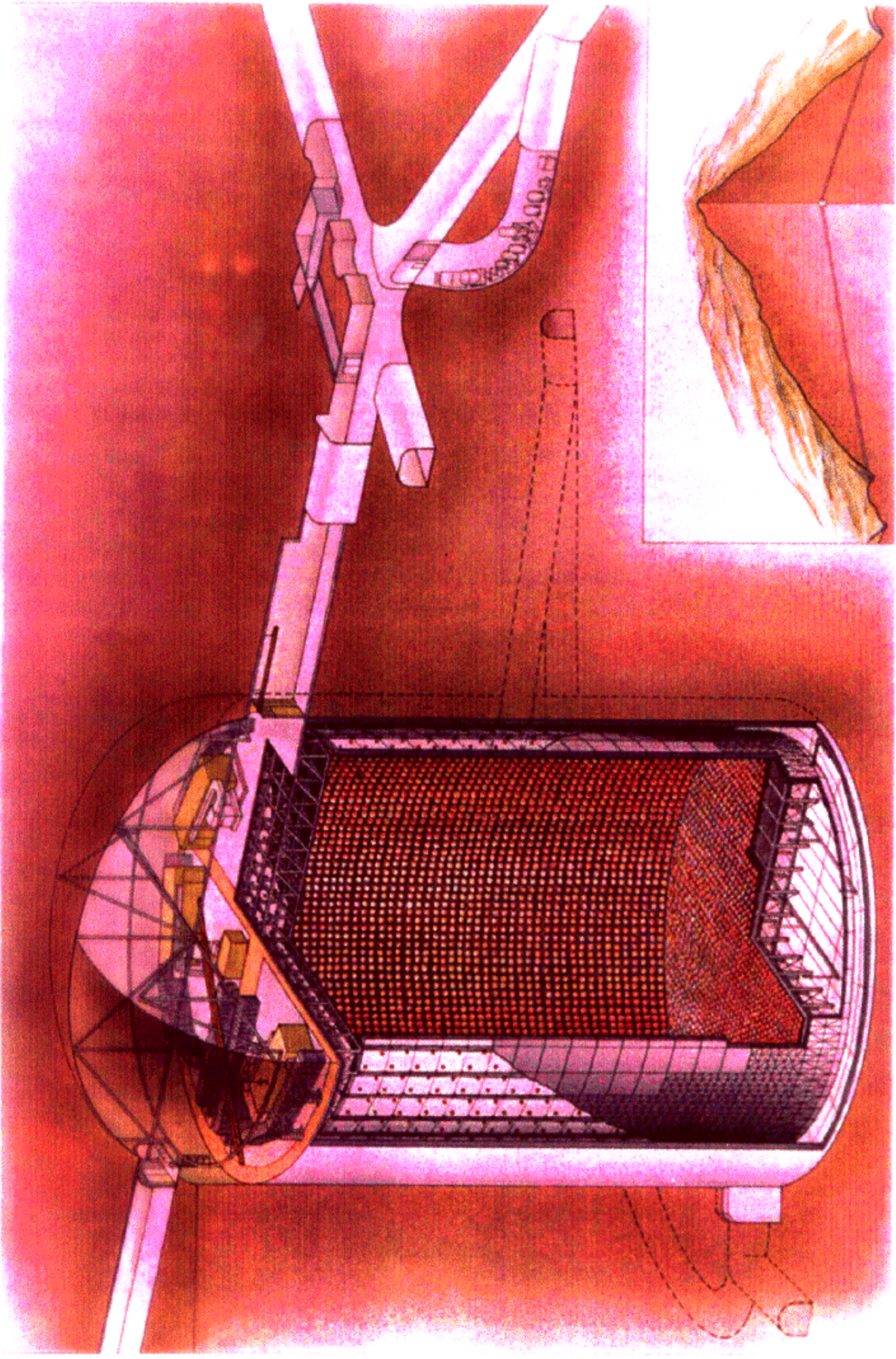
${}^{71}\text{Ge}$: 11.43 Tage

typ. Expositionszeiten: $2-3 \times \tau_{1/2}$

• Realzeit ν -Messung mittels

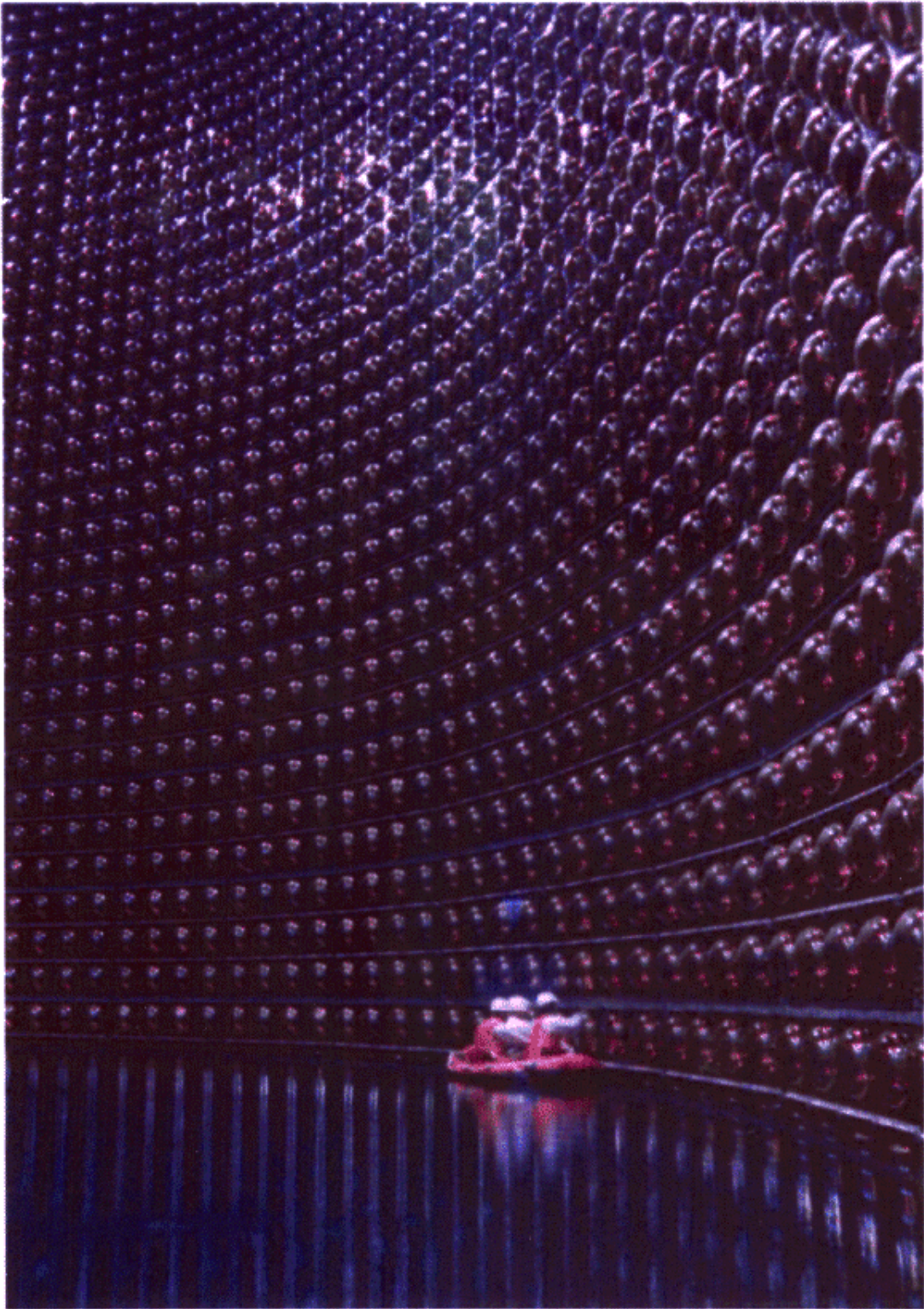
▶ Wasser-Čerenkov-Detektoren Schwelle: 5-7 MeV

$\nu_e - e^-$ -Streuung mit Beobachtung des e^- durch emittiertes Čerenkov-Licht in optisch dichtem H_2O



(\varnothing 39.3 m, 50000 feines Wasser)
Höhe 41.4 m, ~13000 Photomultiplier!

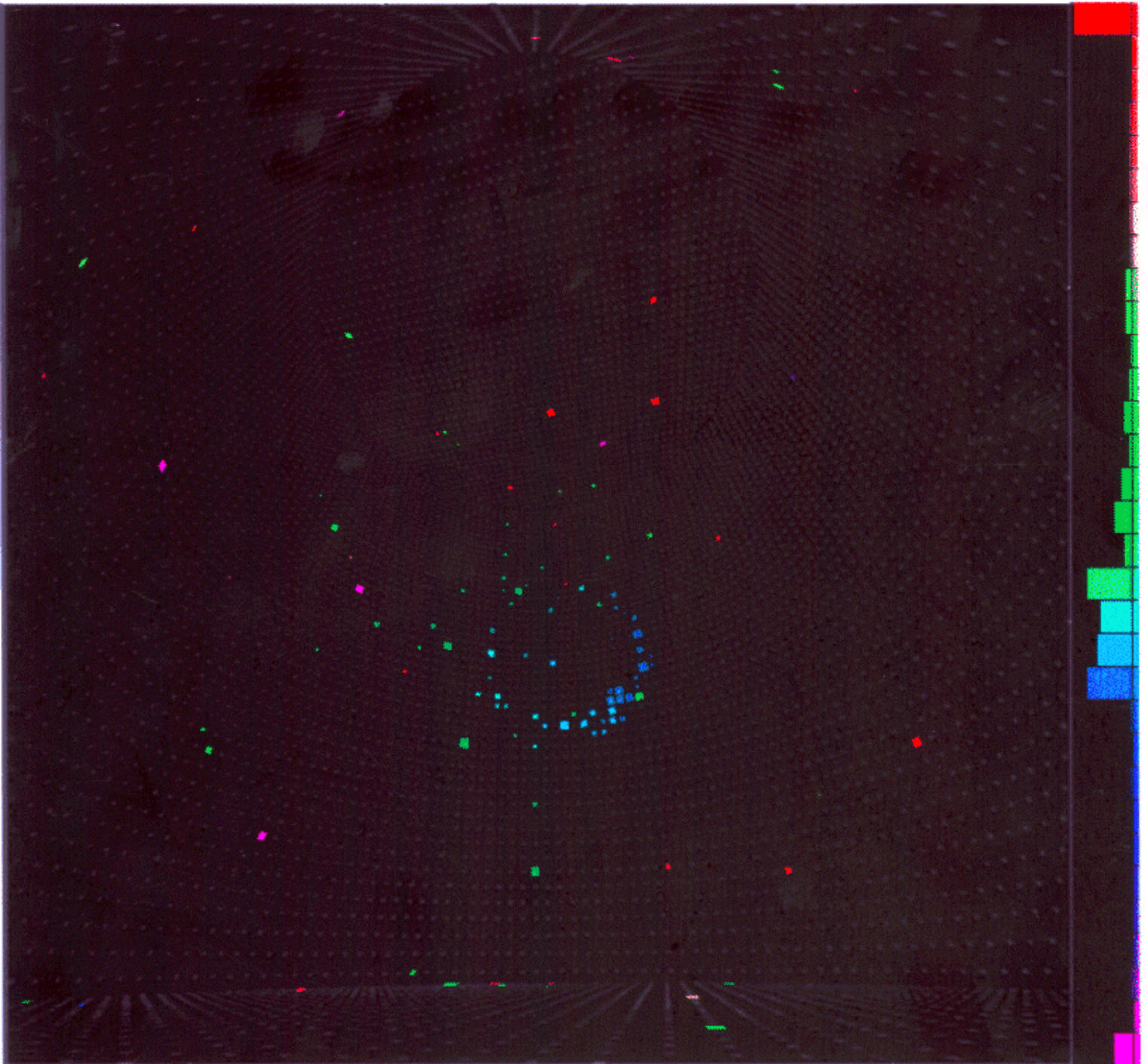
Superkamiokande (Japan)



Čerenkov-Ring eines Sonnen-Neutrinos

Neutrinoenergie $\approx 12.5 \text{ MeV}$

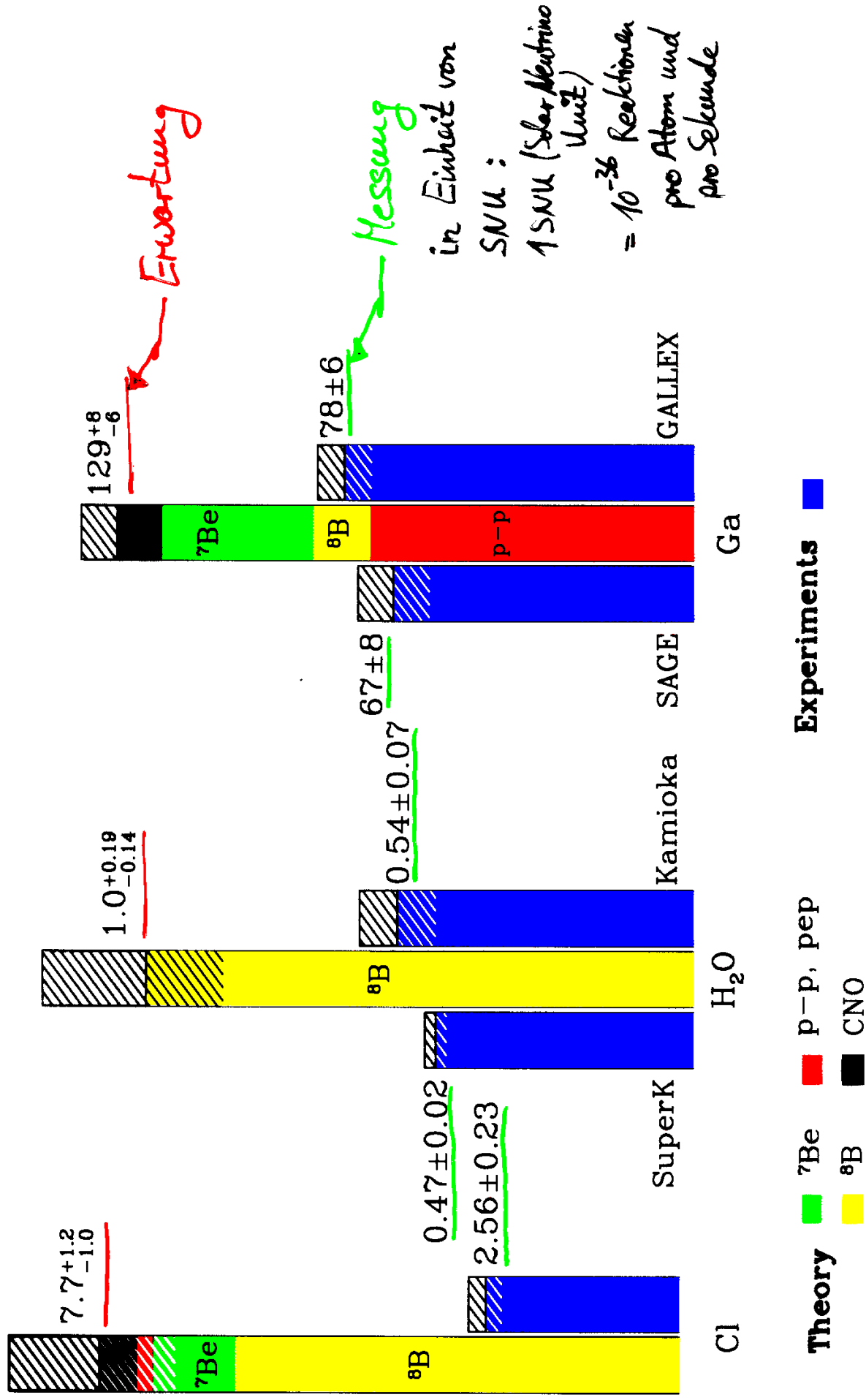
Farbskala ist Ankunftszeit der Photonen ($\approx 5 \text{ ns}$ je Farbe) \rightarrow



Sonnen-Neutrino-Fluss

Total Rates: Standard Model vs. Experiment

Bahcall-Pinsonneault 98



3 Probleme der Sonnen-Neutrinos

- 1) Unterschied bei ^{37}Cl -Experimenten, die seit fast zwei Jahrzehnten einen Neutrinofluß messen, der etwa einen Faktor drei zu gering ist.
- 2) (Super-)Kamiokande ist nur auf Neutrinos aus ^8B sensitiv, mißt aber einen Fluß, der um einen Faktor zwei zu gering. Da ^{37}Cl -Experimente eine geringere Schwelle besitzen und daher einen größeren Teil des ^8B -Spektrums vermessen, sind die ^8B -Neutrinoflüsse bei geringeren Energien noch stärker reduziert.
- 3) Die ^{71}Ga -Experimente finden aufgrund der niedrigen Schwelle einen ν -Fluß, der vollständig durch pp- und ^8B erklärt werden kann. Es scheint keine Neutrinos aus ^7Be im Spektrum zu geben, deren Existenz aber zwingend erforderlich ist, weil ^8B aus ^7Be fusioniert wird.

Problem der atmosphärischen Neutrinos

- Teilchen der kosmischen Strahlung erzeugen durch Wechselwirkung in der (oberen) Atmosphäre einen Schauer von sekundären Teilchen, insbesondere Pionen. Die geladenen Pionen zerfallen



und auch die Myonen zerfallen



auf ihrem Weg durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche. Diese Prozesse liefern ein Anzahlverhältnis:

$$\frac{\# \text{ Myon-Neutrinos}}{\# \text{ Elektron-Neutrinos}} \approx 2$$

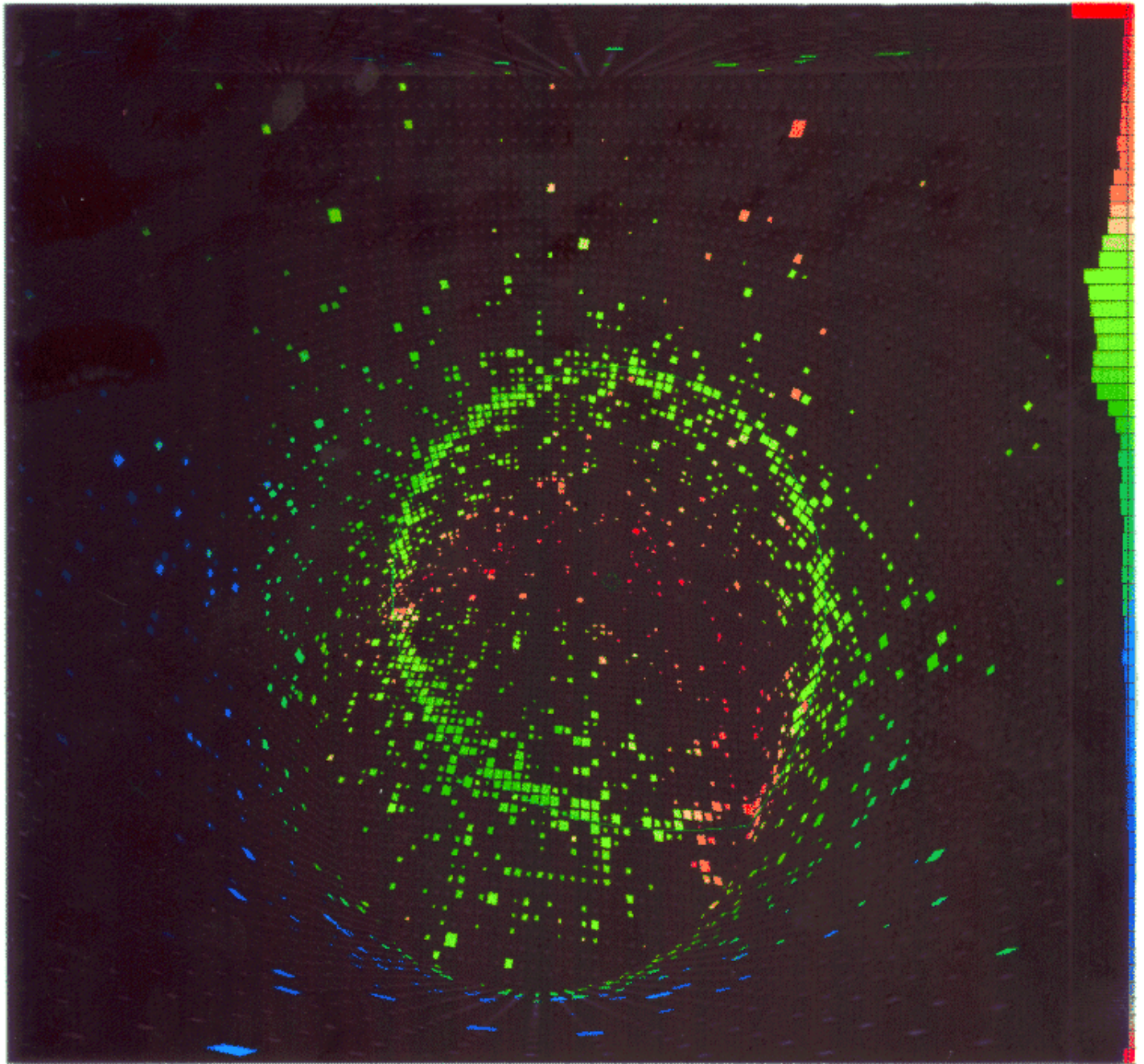
- Messung dieses Anzahlverhältnisses (z.B. mit dem Wasser-Cerenkov-Detektor Kamiokande) ergab Werte, die nur $(68 \pm 9)\%$ der Erwartung entsprechen. Dies wurde sowohl für hochenergetische Neutrinos ($> 1.33 \text{ GeV}$) als auch niederenergetische ($< 1.33 \text{ GeV}$) beobachtet.

↖ beinhaltet notwendige Korrekturen wie z.B. Meßempfindlichkeit...

Elektron-Neutrino-Signal in Kamiokande



Elektron unterliegt starkem Energieverlust durch Bremsstrahlung
→ Čerenkov-Lichtringe sind ausgefranst

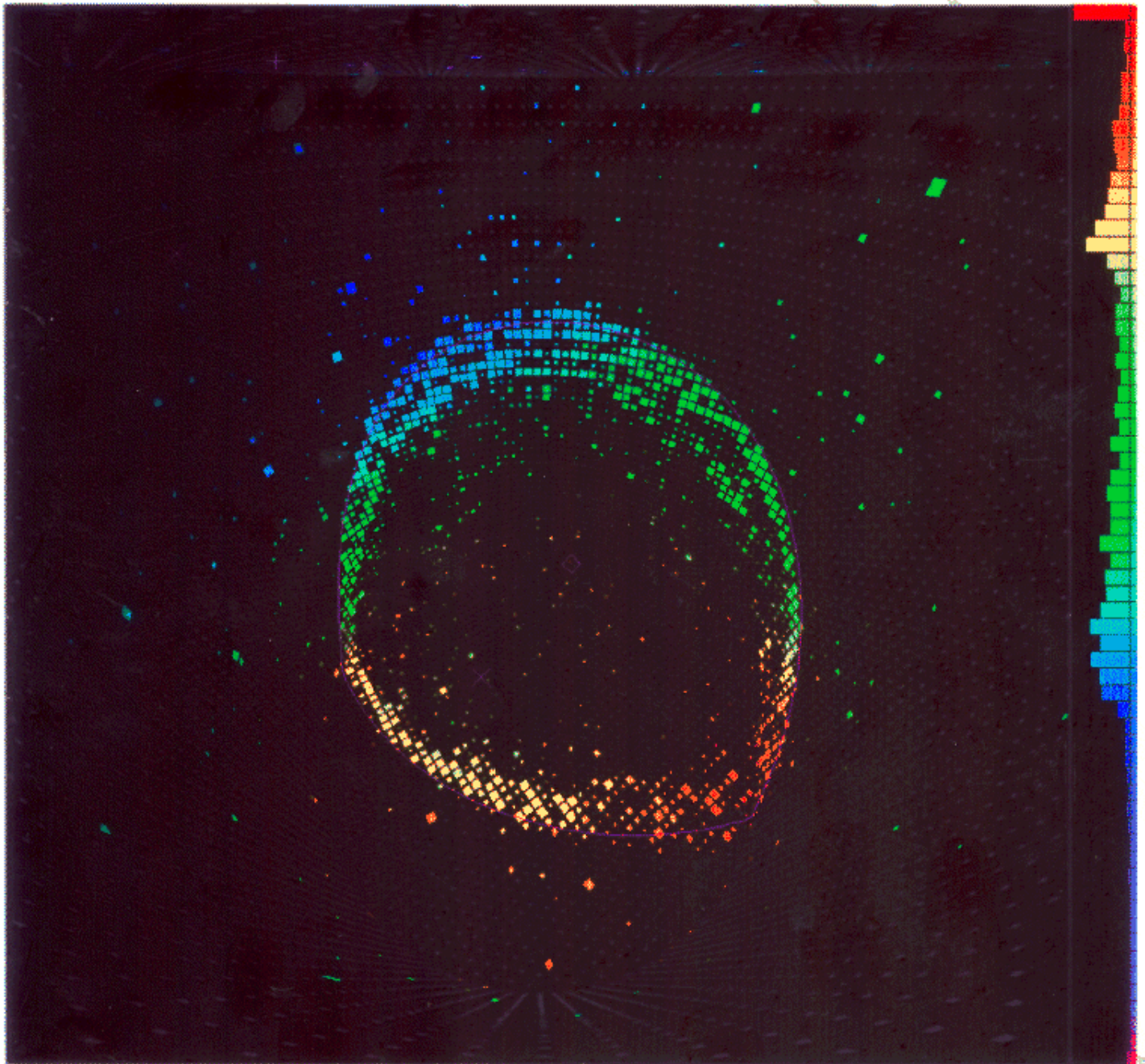


Myon-Neutrino-Signal in Kamiokande



(u aus Proton
oder Neutron)

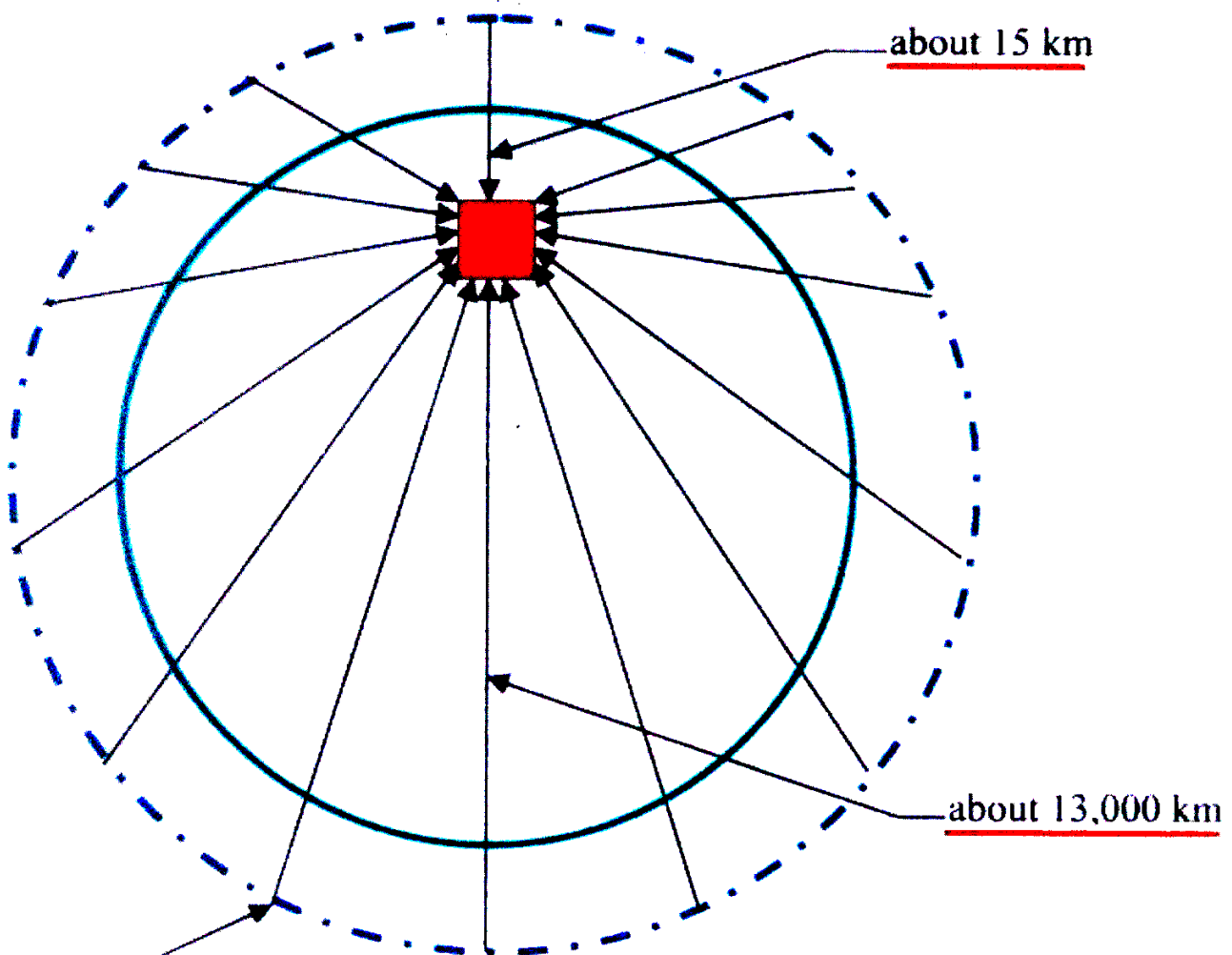
Myonen liefern scharfe Čerenkov-Lichttringe



Richtungsabhängigkeit des $\nu_e \div \nu_\mu$ -Flusses

Sobel - 0

Study Angular Distributions of ν_μ and ν_e with Super-Kamiokande



Neutrinos produced in the atmosphere at
~15 km altitude...

travel through the earth and interact in the
detector.

What do we see?

Super-K
Sobel

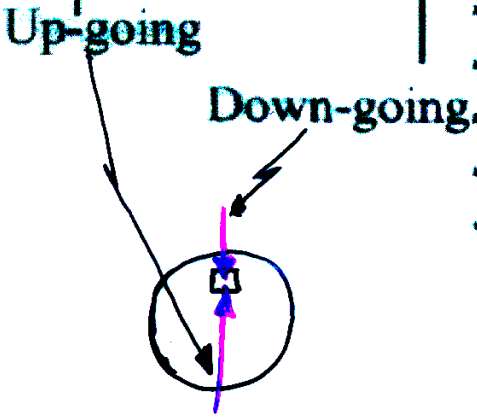
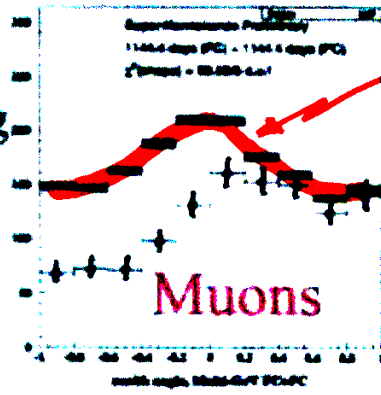
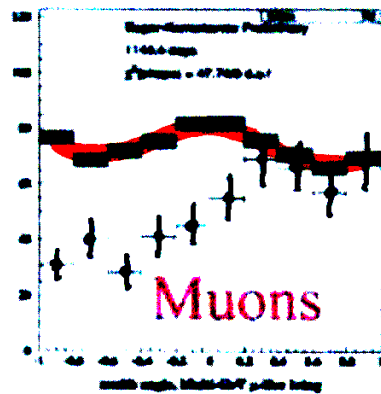
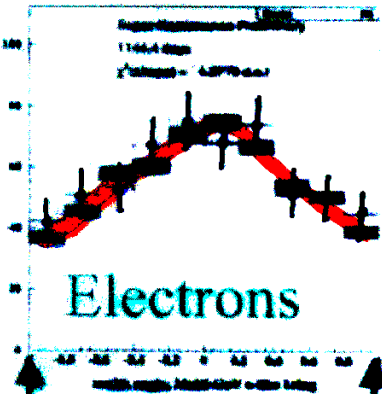
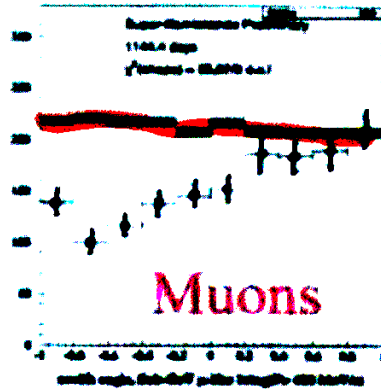
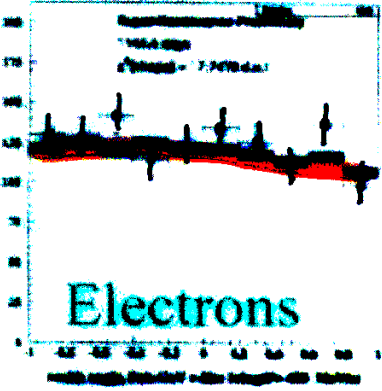
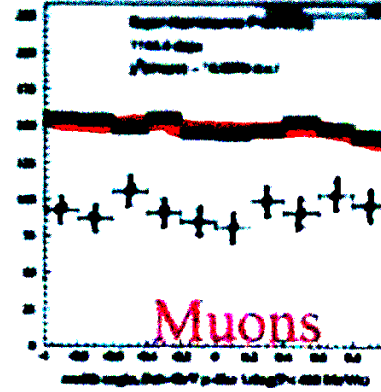
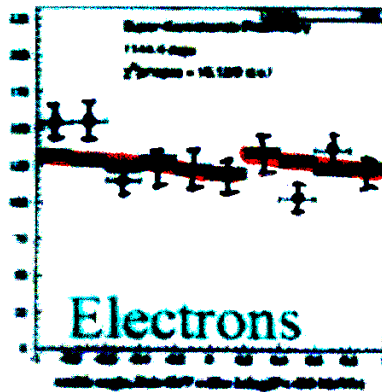
Anzahl der beobachteten Reaktionen

Sub-GeV
E < 400 MeV

Sub-GeV
E > 400 MeV
E < 1.33 GeV

Multi-GeV
E > 1.33 GeV

FC+PC events
E > 1.33 GeV



Erwartung

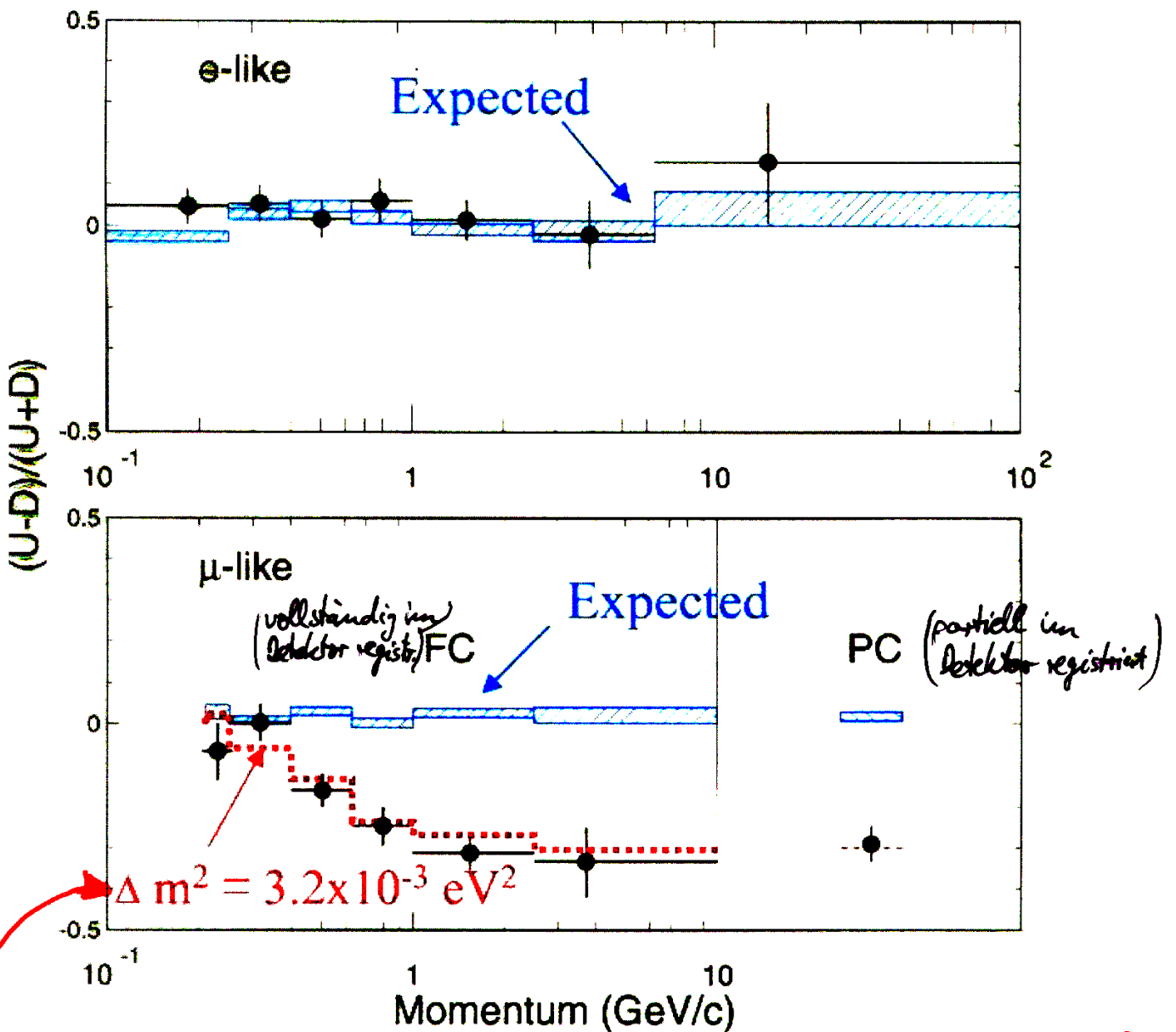
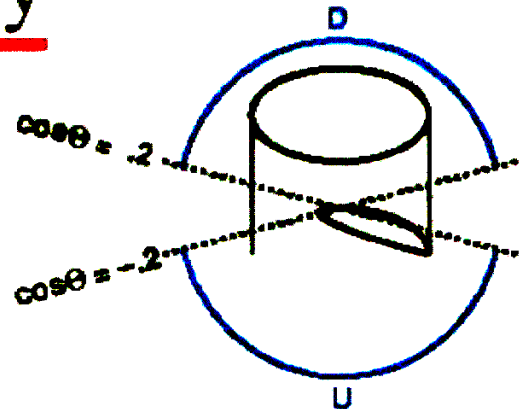


Elektron-Neutrinos \approx Erwartung
 Myon-Neutrinos \ll Erwartung

umso mehr $\frac{1}{2}$
 je länger ihre
 Flugstrecke ist

Up-Down Asymmetry

VS.
Momentum



Vorhersage falls $m_{\nu\mu} \neq 0$ und $(m_{\nu\mu}^2 - m_{\nu\tau}^2) = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$
d.h. ν -Oszillation

Neutrino-Oszillationen

Wenn Neutrinos Masse $\neq 0$ haben, dann sind möglicherweise

Masseneigenzustände \neq Eigenzustände bzgl. schwacher Ww.

\Rightarrow z.B.

$$\nu_1 \cdot \cos\theta + \nu_2 \cdot \sin\theta = \nu_e$$

$$-\nu_1 \sin\theta + \nu_2 \cdot \cos\theta = \nu_\mu$$

Hat man dann einen reinen ν_e -Strahl zur Zeit $t_0=0$, können Oszillationen zwischen den Leptonzahl-Eigenzuständen ν_e, ν_μ auftreten, in ähnlicher Weise wie für die Strangeness-Eigenzustände im K^0 -System. Die Wahrscheinlichkeit, nach einer Zeit $t > t_0=0$ ein ν_μ im ν_e -Strahl zu finden, ist

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \frac{\sin^2 2\theta}{2} \cdot \left[1 - \cos(E_1 - E_2) \cdot t/\hbar \right]$$

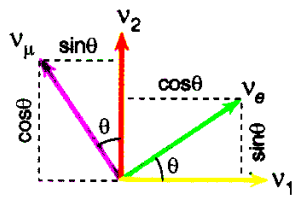
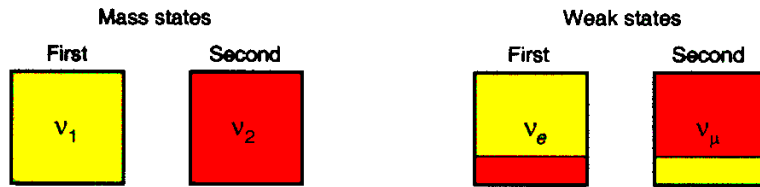
↑
Energien von ν_1 und ν_2

$$\approx \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 c^4}{E_\nu} \cdot L \right)$$

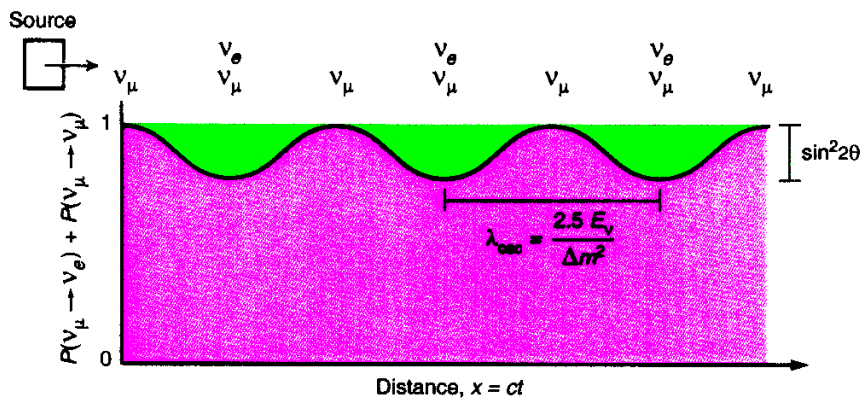
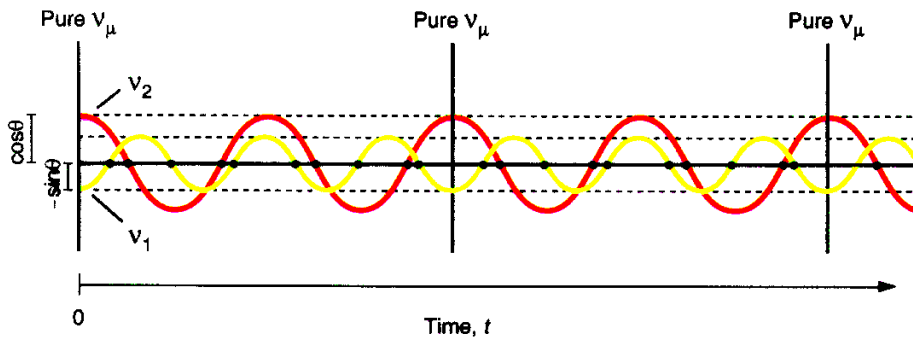
(Δm^2 in eV^2 , E in MeV, L in m)

$$E = \frac{1}{2}(E_1 + E_2), \quad p_1 = p_2$$

Neutrino-Oscillation



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

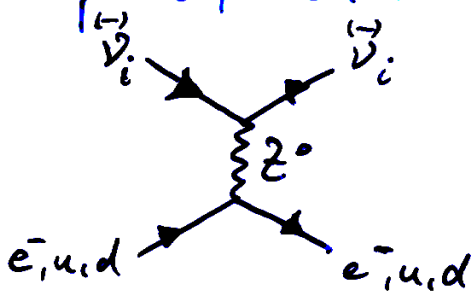


■ Probability that ν_μ has become ν_e
■ Probability that ν_μ is still ν_μ

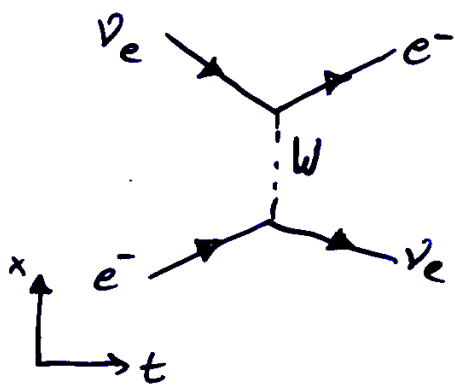
Neutrino-Oszillationen

▷ System der ν -Mischung kann von 2 Neutrinosorten ν_1, ν_2 auf drei erweitert werden ν_1, ν_2, ν_3 , wobei drei Mischungswinkel auftreten.

▷ Wenn Neutrino-Mischung auftritt, kann auch die Materie, welche ein ν auf seinem Weg durchquert, bedeutsam werden. Der Grund:



existiert für alle Neutrinos, $i = e, \mu, \tau$



existiert nur für Elektron-Neutrino ν_e
(Myon ist mit $m_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$ zu schwer, um mit den verfügbaren Energien erzeugt zu werden)

Da die Ausbreitung der ν in Materie analog wie die von Licht aufgefaßt werden kann, bedeutet der zusätzlich mögliche W -Austausch eine Änderung des "Brechungsindex" von Materie für ν_e gegenüber $\bar{\nu}_e, \vec{\nu}_\mu$ und $\vec{\nu}_\tau$.

→ **MSW-Effekt** (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein 1978-85)

MSW-Effekt ...

... führt zu geändertem Mischungswinkel und Massendifferenz von ν_1 und ν_2 in Materie:

$$\Delta m_m^2 = \Delta m^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{A}{\Delta m^2} - \cos 2\theta\right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

$$\sin 2\theta_m = \sin 2\theta / \sqrt{\left(\frac{A}{\Delta m^2} - \cos 2\theta\right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

wobei A den Unterschied der "Brechungsindizes" für ν_e und ν_μ bezeichnet:

$$A = \frac{1}{2k^2} \cdot (n_{\nu_\mu} - n_{\nu_e})$$

Wellenzahl k "Brechungsindizes"

ν -Oszillation als Lösung der Probleme?

Sonnen-Neutrinos

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu \text{ oder } \nu_\tau \text{ (oder } \nu_x)$$

Überlebens-
wahrschein-
lichkeit für
Elektron-Neutrinos
 $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
beobachtbare
pp ν 's

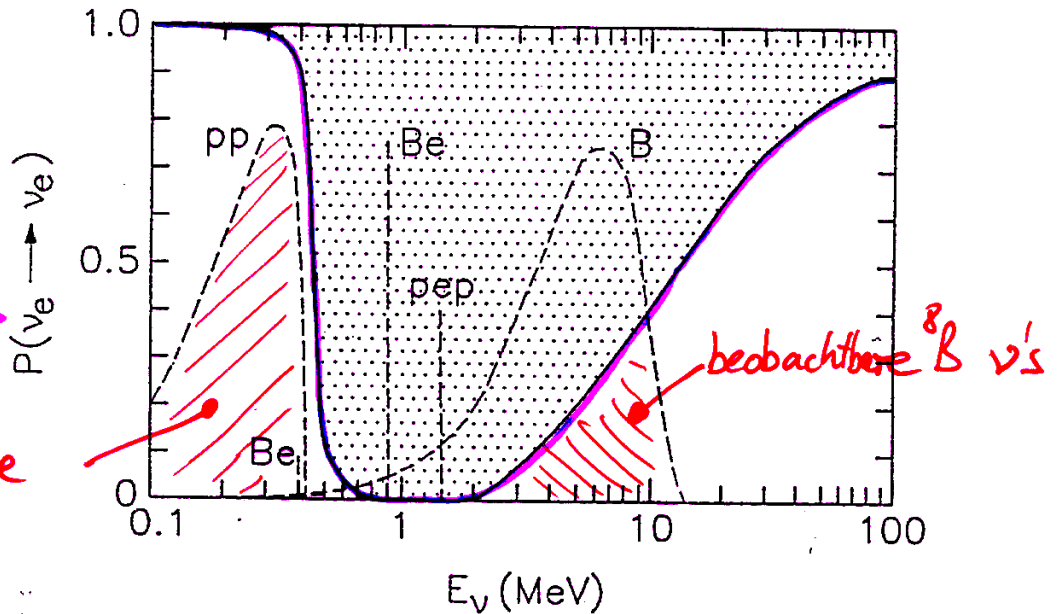


Abbildung 13: Überlebenswahrscheinlichkeit $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$ gegen Energie E_ν für $\delta m^2 \approx 6 \cdot 10^{-6}$, $\sin^2 2\theta \approx 0.007$ (small-angle solution)

$$\Rightarrow \begin{cases} \Delta m^2 \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ eV}^2/c^4 & ; \sin^2 2\theta \approx 0.005 \\ \Delta m^2 \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2/c^4 & ; \sin^2 2\theta \approx 0.25 \end{cases}$$

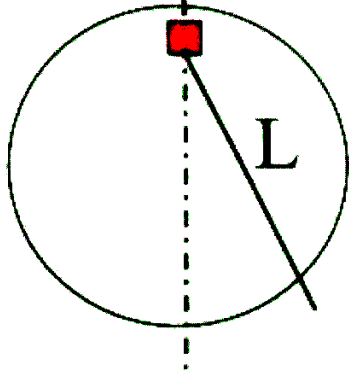
"Kleinwinkel-Lösung SMA" \leftarrow

"Großwinkel-Lösung LMA" \leftarrow

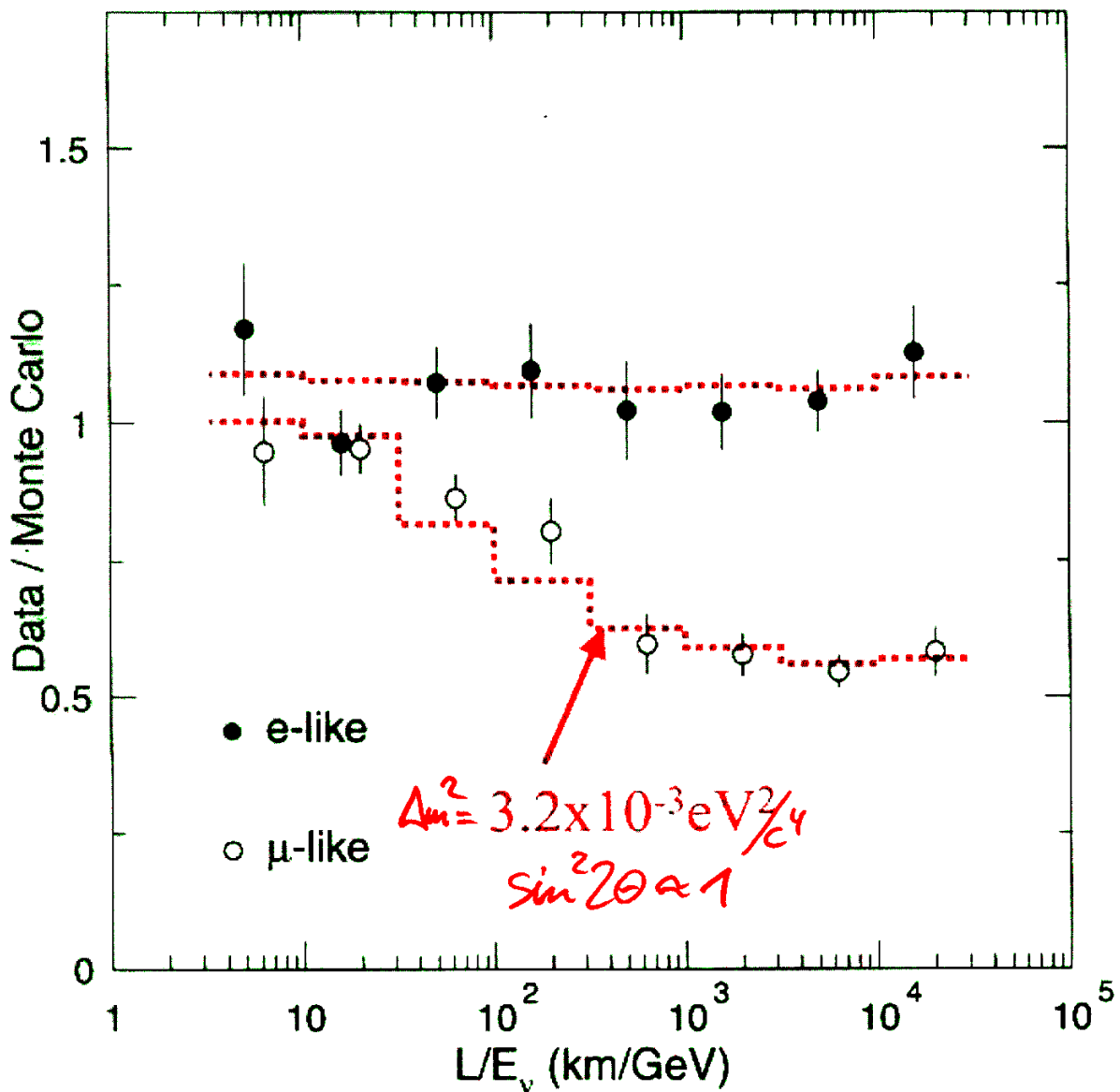
Atmosphärische Neutrinos

$$\Delta m^2 \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ eV}^2/c^4 ; \sin^2 2\theta \approx 1$$

Bin data as a function of L/E_ν



$$P_{\nu\nu'} = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E_\nu)$$



$\bar{\nu}_e$ - Appearance - Experimente

- **LSND** (Los Alamos, U.S.A.) sieht **Signal von νe^+**
in Koinkidenz mit Photon aus Neutroneneinfang

Interpretation als ν -Oszillation läßt verschiedene Bereiche von Δm^2 und $\sin^2 2\theta$ zu
→ Δm^2 vs. $\sin^2 2\theta$ Diagramm

- **KARMEN** (Rutherford, U.K.) sieht **kein Signal von νe^+**
→ Ausschlußgrenzen im Δm^2 - $\sin^2 2\theta$ - Parameter-
raum

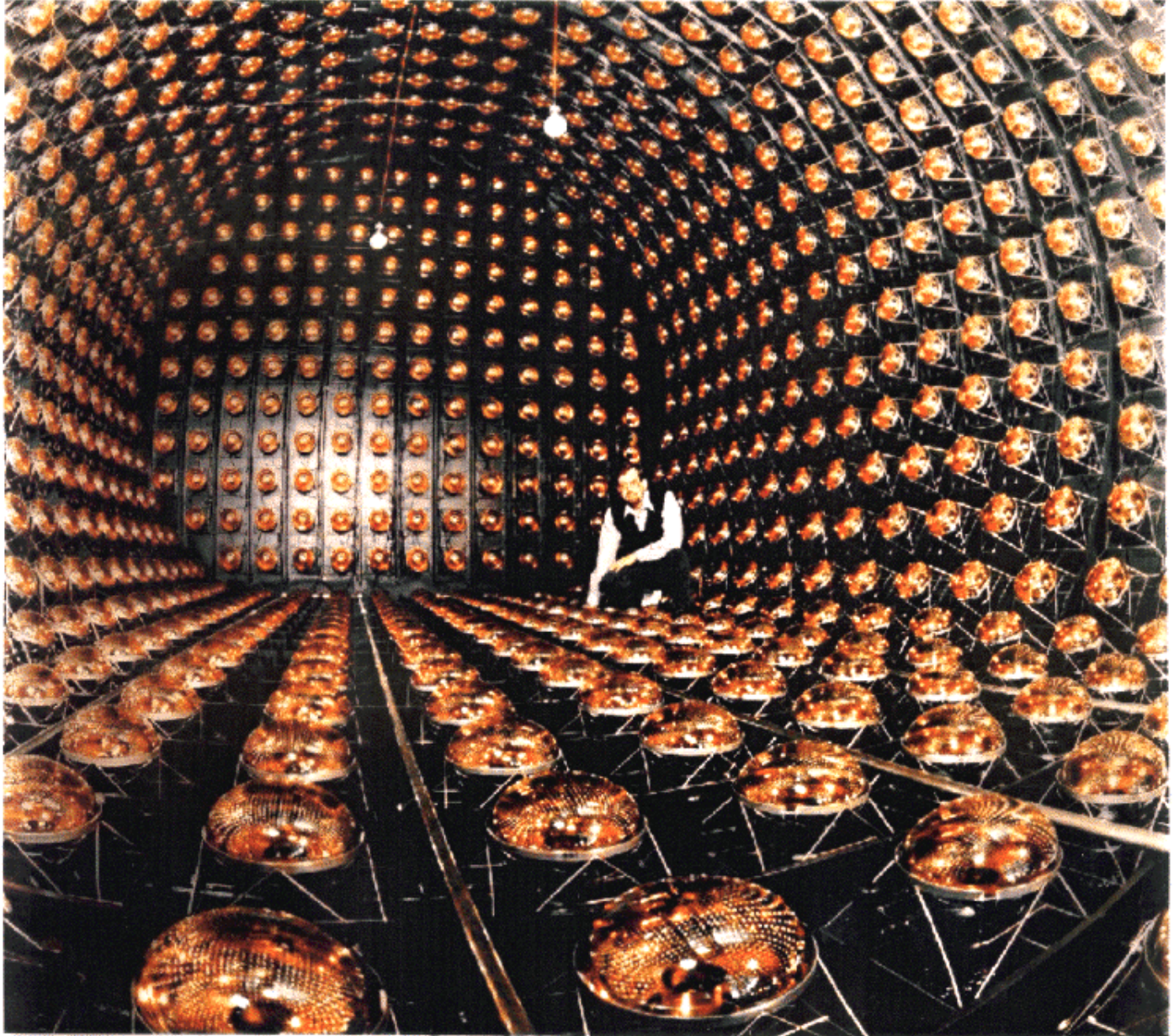
- weitere Experimente ohne Signal für ν -Oszillationen

⇒ LSND - Beobachtung muß noch von unabhängigem Experiment bestätigt werden!

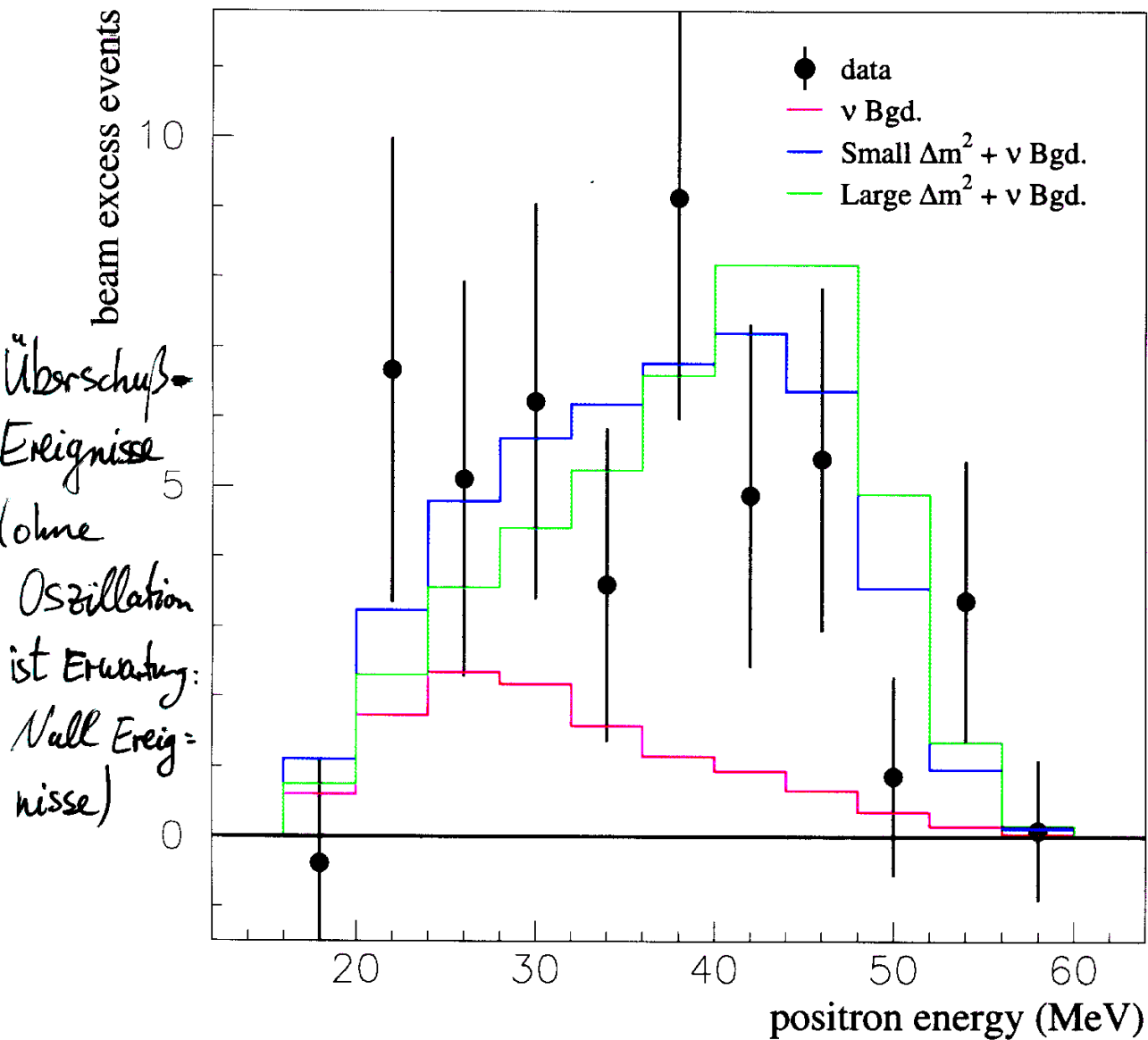
All diese Experimente haben Basislängen (= Abstand zwischen Erzeugungsort des Neutrinos und Nachweisort) von einigen 10 m bis zu ca. 1 km → short baseline experiments

LSND - Detektor (Los Alamos)

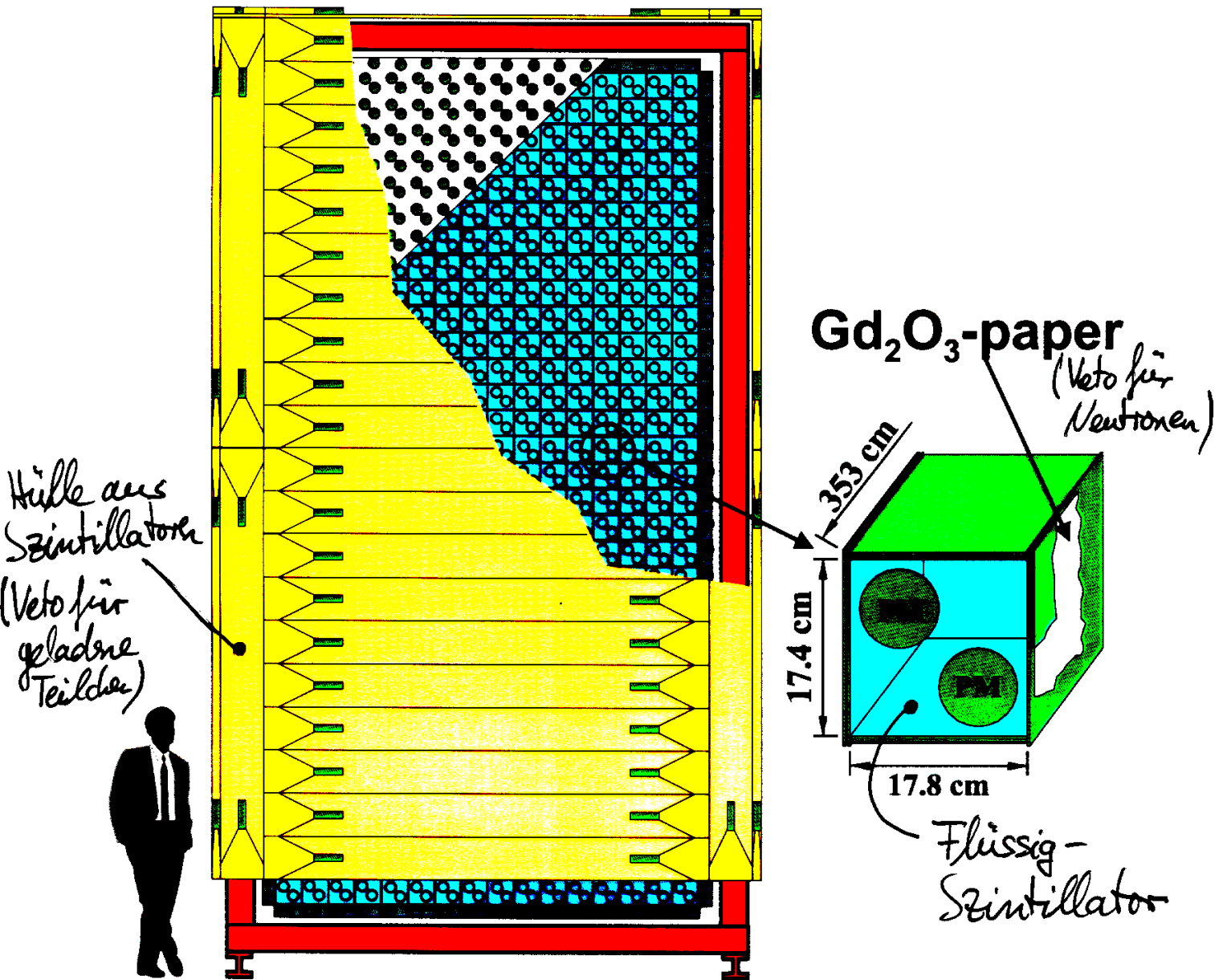
Tank mit reinem Mineralöl gefüllt, Čerenkov-Licht geladener Teilchen wird durch Photomultiplier gemessen



Signal für $\bar{\nu}_e$ -Auftreten bei LSND



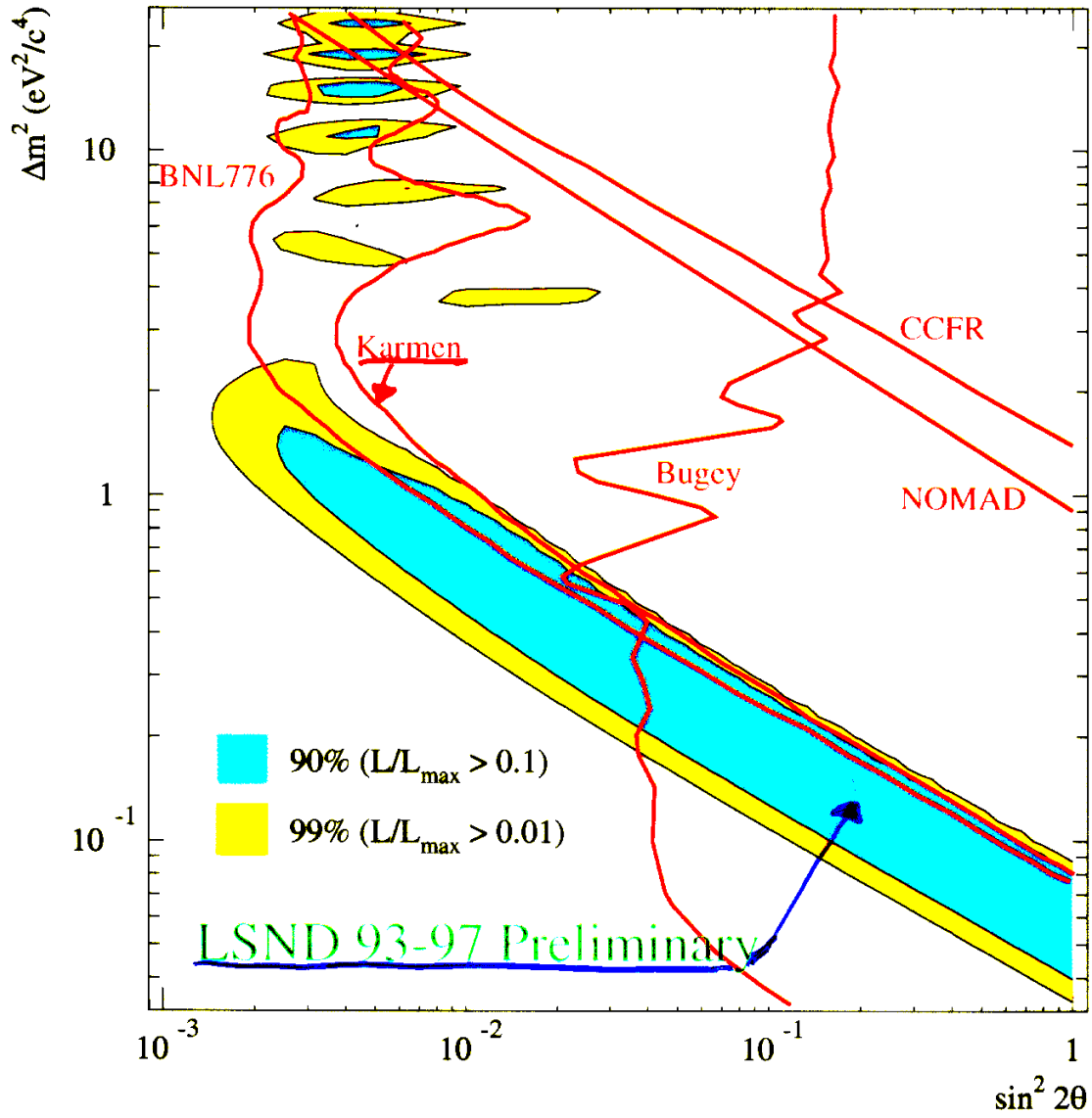
KARMEN detector



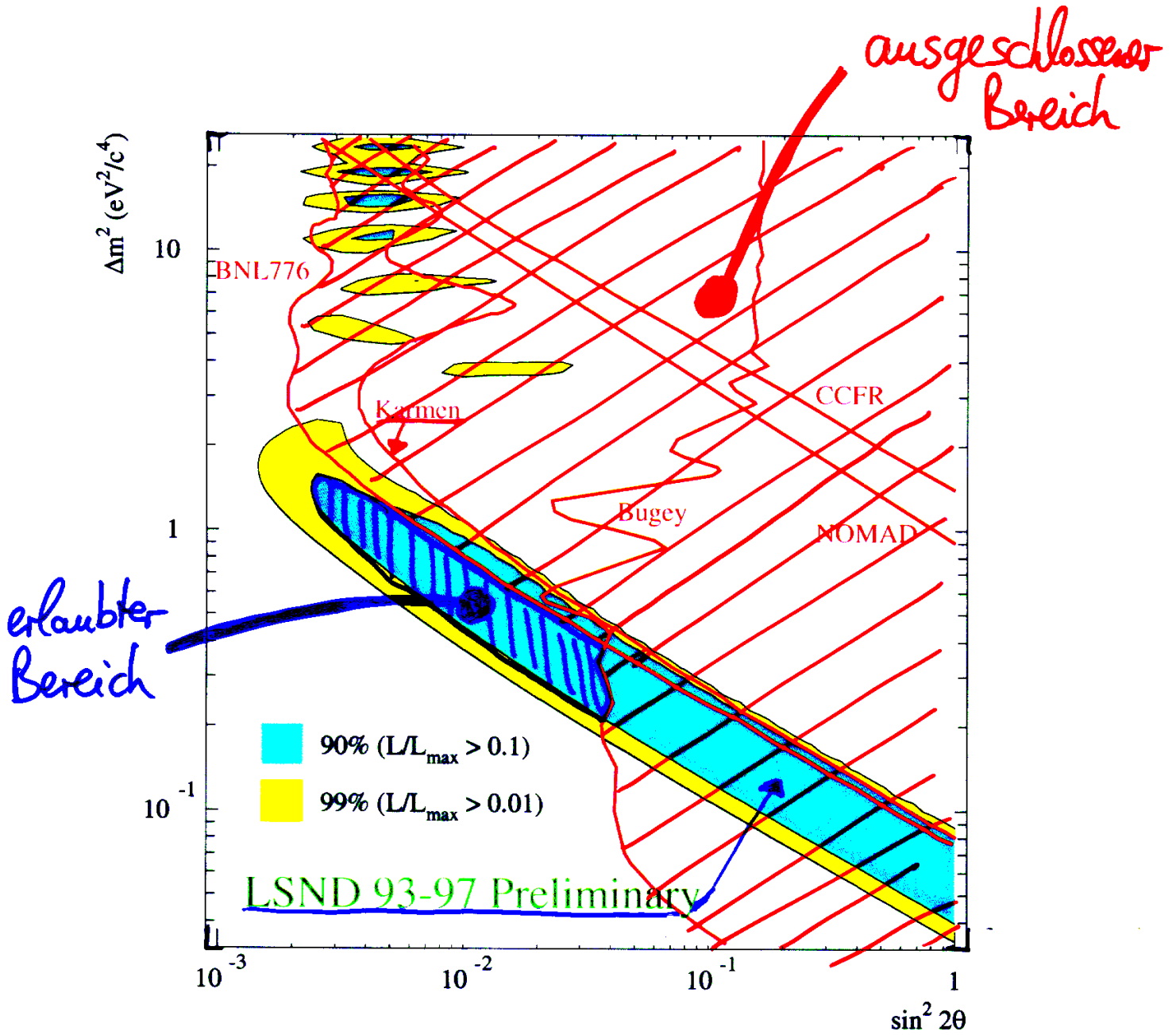
96% active volume of ¹²C and p

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

$\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$ - Diagramm



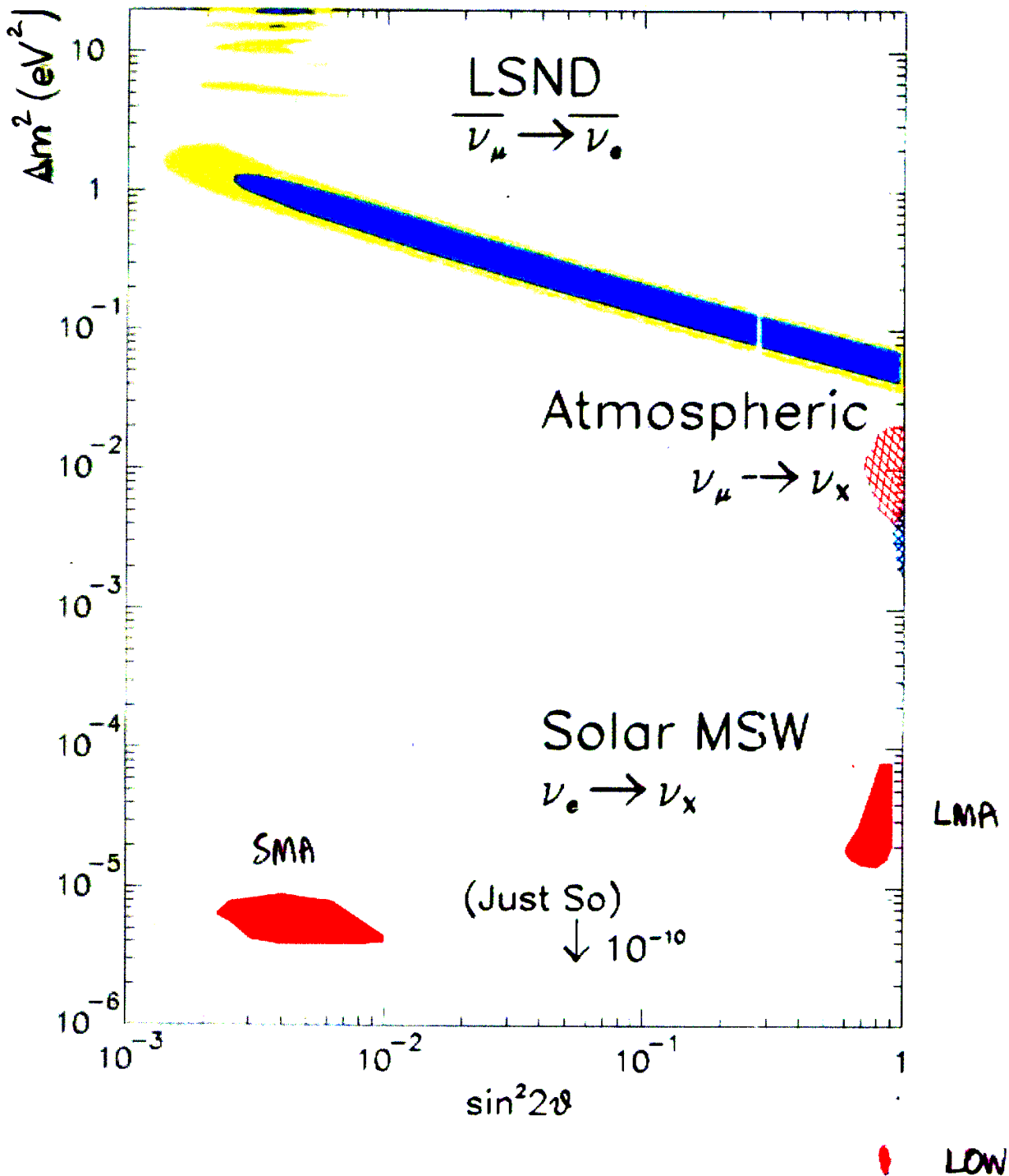
$\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$ - Diagramm



Ergebnisse zu ν -Oszillationen in $\Delta m^2 - \sin^2 2\theta$

Fits to ν Oscillations

before Neutrino 2000 conference



Appearance-Experimente mit langer Basislänge

- **K2K** (KEK \rightarrow Kamioka, Japan)

Basislänge $L \approx 250$ km

Neutrino-Energie $\langle E_\nu \rangle = 1.4$ GeV

Ende 1998 gestartet; erste Ereignisse registriert, Energie reicht nur, um $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ disappearance zu studieren; ν_μ -Defizit deutet sich an

- **MINOS** (Fermilab \rightarrow Sudan, U.S.A.)

Basislänge $L \approx 730$ km

Neutrino-Energie $\langle E_\nu \rangle \approx 10$ GeV

Beginn in ~ 2003 ;

Energie würde genügen, um ν_τ -appearance ($\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p$) zu beobachten

- **CERN \rightarrow Gran Sasso (CH, I)**

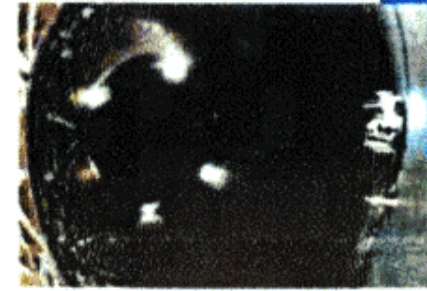
Basislänge $L \approx 740$ km

Neutrino-Energie $\langle E_\nu \rangle \approx 20$ GeV

Beginn später als 2005;

ν_τ -appearance beobachtbar

K2K (KEK-to-Kamioka)



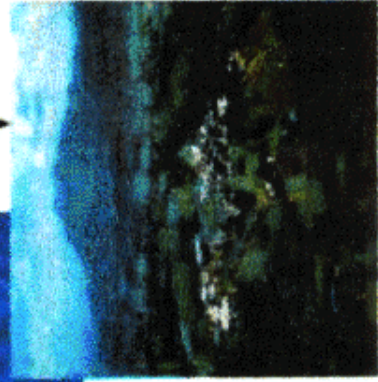
Super Kamiokande

Water Cherenkov detector

Total mass: 50 kton

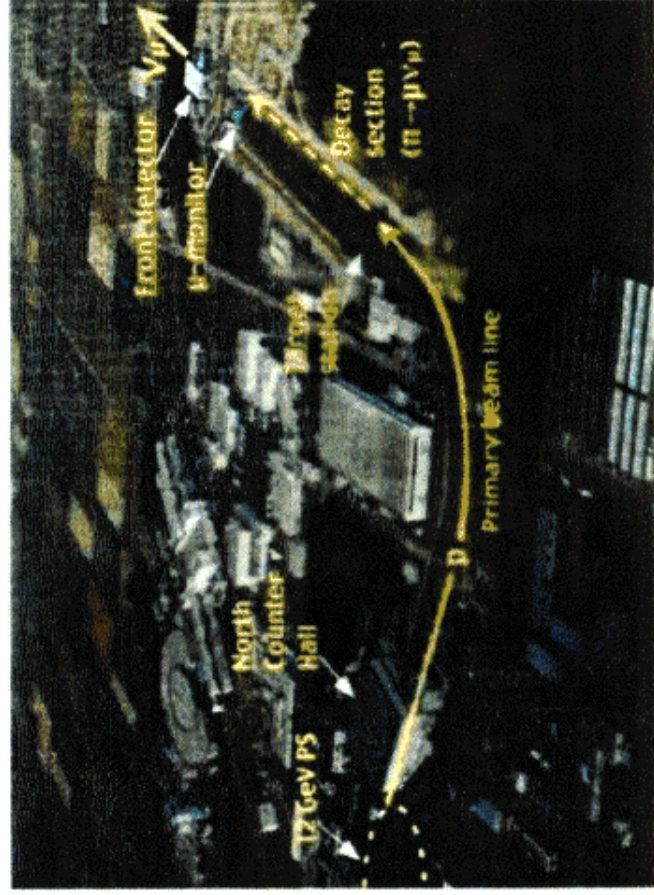
Inner mass: 32 kton

Fiducial mass: 22.5 kton



KEK

- Accelerator: 12 GeV proton synchrotron
 - Beam intensity: 6×10^{12} protons / pulse
 - Repetition: 1 pulse / 2.2 sec
 - Pulse width: 1.1 μ s (9 bunches)
- Horn-focused wide-band beam
 - Average neutrino energy: 1.4 GeV $\rightarrow \nu_{\mu} - \nu_{\tau}$ disappearance
- Near detector: 300 m from the target
- Far detector (Super-Kamiokande): 250 km from the target
- Goal: 10^{20} protons on target



Das MINOS-Experiment



Soudan

Duluth

MN

WI

Madison

IA

Fermilab

IL

IN

MO

MI

Lake Superior

Lake Michigan

Fazit

- Neutrino-Massen nur nach oben beschränkt; Werte $\neq 0$ sind möglich, jedoch Massen vermutlich sehr gering ($< 10^{-9} \cdot m_{\text{proton}}$)
- Neutrino-Oszillationen könnten die Probleme der Sonnen-Neutrinos und atmosphärischen Neutrinos lösen
- Ein Experiment hat Anzeichen für das Er-
scheinen einer anderen ν -Spezies in einem ν -Strahl gefunden, konnte aber bisher von anderen Experimenten weder bestätigt noch
falsifiziert werden
- Mehrere Experimente mit großen Abständen zwischen Erzeugung- und Nachweisort der Neutrinos sind in Vorbereitung (+ eines schon aktiv)