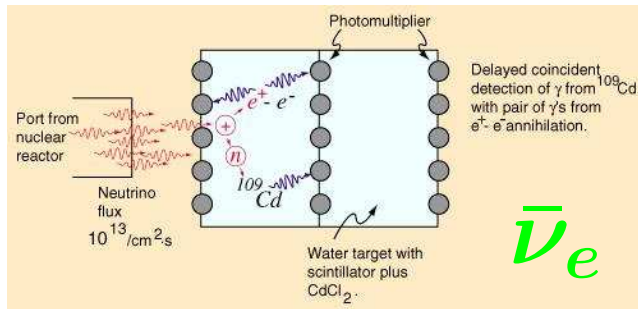




- 
1. Einführung
  2. Beschleuniger
  3. Detektoren
  4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
  5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
  6. CP-Verletzung im Standardmodell
  7. Proton- und Photonstruktur
  8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
  9. Das Higgs-Boson
  - 10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen**



# Zur Erinnerung - die drei Flavour-Eigenzustände



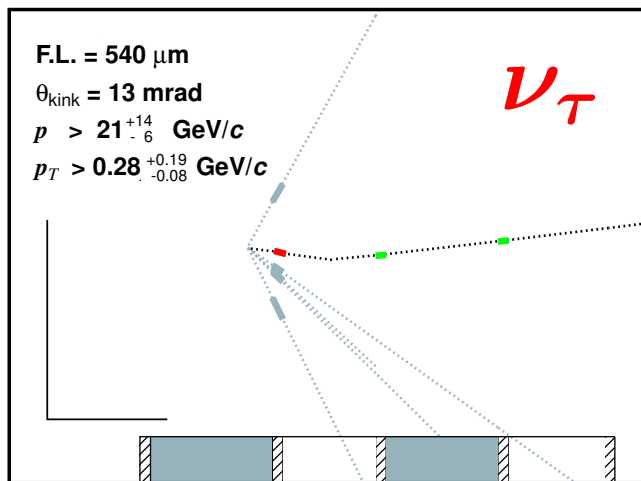
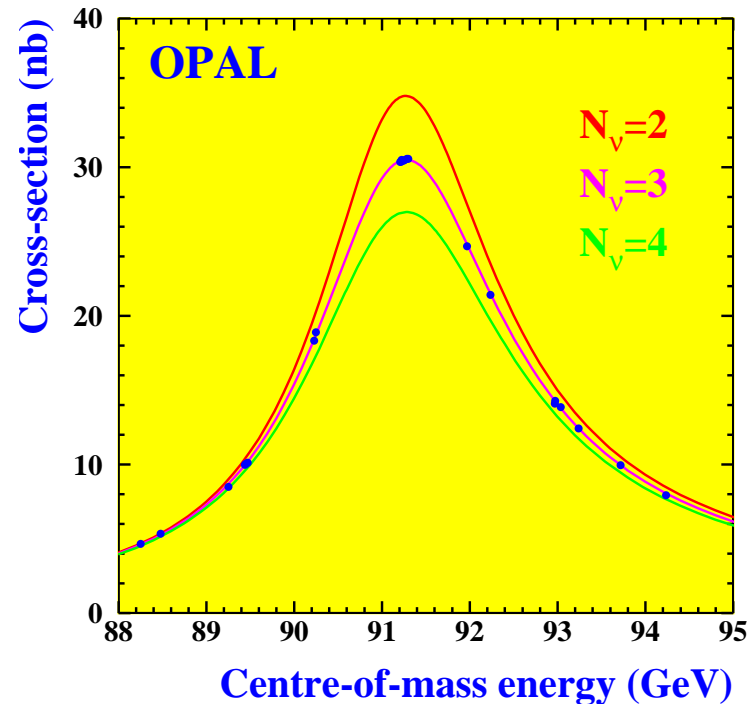
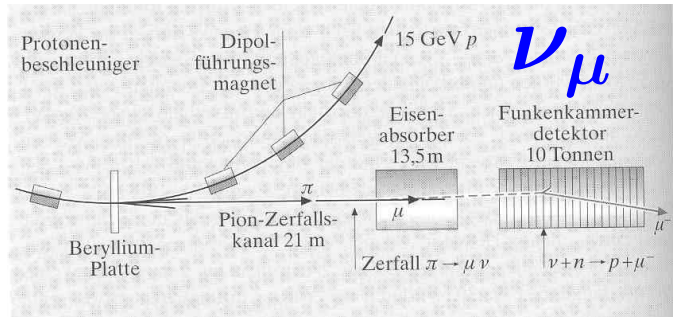
- Cowan et al. (1956):
- Danby et al. (1962):
- DONUT (2000):
- LEP (1990):

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

$$\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p + X$$

$$\nu_\tau \rightarrow \tau^- + X$$

Es gibt nur drei leichte Eigenzustände zur schwachen Wechselwirkung.



Im SM gibt es drei leichte Flavour-Eigenzustände.



# Die Massen- und Flavour-Eigenzustände

- Die Flavour-Eigenzustände sind Superpositionen der Massen-Eigenzustände:

$$|\nu_\alpha\rangle \equiv \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad \text{mit} \quad \alpha = e, \mu, \tau \quad \text{und} \quad i = 1, \dots, N.$$

- Drei Flavour  
⇒ MNS-Matrix 
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad \text{mit} \quad U = U_{23} U_{13} U_{12}$$

- Die Ausbreitung in Raum und Zeit wird durch die Massen-Eigenzustände bestimmt.

Wählt man  $\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{r}$  und benutzt  $m_i \ll p_i \equiv p \approx E$  und  $v = c$  so folgt

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p_i + \frac{m_i^2}{2E}, \quad \text{und damit} \quad |\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \vec{p}\vec{r})} |\nu_i(0)\rangle = e^{-i \frac{m_i^2 t}{2E}} |\nu_i(0)\rangle.$$

- Die Wechselwirkung mit Materie ist durch die Flavour-Eigenzustände gegeben.

Ein Beispiel ist die Neutrino-Elektron Streuung:  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$ .

- Die Wahrscheinlichkeit ein Neutrino, das zur Zeit  $t = 0$  als  $\alpha$  gestartet ist, im Zustand  $\beta$

zu finden ist:  $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 = |\sum_i U_{\beta i}^* e^{+i \frac{m_i^2 t}{2E}} U_{\alpha i}|^2 \cdot |\langle \nu_i | \nu_i \rangle|^2$

- Dieser Effekt ist analog zu den bereits besprochenen Oszillationen der Pseudoskalaren Mesonen und wird als Neutrino-Oszillation bezeichnet.

**Die Suche nach Neutrino-Massen ist ein sehr weites experimentelles Feld.**



# Natürliche und künstliche Neutrinoquellen

– Die Hauptquellen von Neutrinos sind:

- 1) **Atmosphärische Neutrinos** ( $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ ): Die Erdatmosphäre wird ständig von hoch-energetischer kosmischer Strahlung getroffen. Diese Strahlung besteht vornehmlich aus Photonen und Protonen, aber auch aus schweren Kernen. Beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre in  $\mathcal{O}(10)$  km Höhe entwickeln sich hadronische Schauer. Die Neutrinos entstehen hauptsächlich durch den Pion-Zerfall,  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \overset{(-)}{\nu}_\mu$  und  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \overset{(-)}{\nu}_\mu \overset{(-)}{\nu}_e$ .
- 2) **Sonnen-Neutrinos** ( $\nu_e$ ): Bei der Wasserstofffusion in der Sonne entstehen Neutrinos in der Reaktion  $4p \rightarrow \frac{4}{2}\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ .
- 3) **Supernova-Neutrinos** ( $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ ): Bei einer Supernova-Explosionen wie der Explosion der SN1987A gibt es einen sehr kurzern Ausbruch von Neutrinos aller Sorten.
- 7) **Natürliche Radioaktivität** ( $\nu_e, \bar{\nu}_e$ ): In den Beta-Zerfällen der Kerne wie  ${}^3_1\text{H}$ ,  ${}^{187}_{75}\text{Re}$  oder  ${}^{222}_{88}\text{Ra}$  entstehen  $\nu_e$  und  $\bar{\nu}_e$ .
- 4) **Beschleuniger-Neutrinos** ( $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ ): Durch Beschuss von Be- oder Al-Targets mit Protonen werden Pionen und Kaonen erzeugt. Aus deren Zerfällen erhält man  $\nu_\mu$  und  $\bar{\nu}_\mu$  mit einer geringen Beimischung von  $\nu_e$  und  $\bar{\nu}_e$  aus  $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \overset{(-)}{\nu}_e$  Zerfällen.
- 5) **Reaktor-Neutrinos** ( $\bar{\nu}_e$ ): In den Beta-Zerfällen schwerer Kerne im Kernreaktor entstehen Elektron-Antineutrinos,  $\bar{\nu}_e$ .

**Die verschiedenen Quellen und Experimente testen verschiedene Phasenraumbereiche.**



# Versuche der Messung absoluter Neutrino-Massen

– Es gibt drei Arten von Experimenten um absolute Neutrino-Massen zu messen.

1) Die Messung des Endpunktes des Spektrums der Elektronenergie im Tritium

Beta-Zerfall,  ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} e^- \bar{\nu}_e$ . Die obere Massengrenze ist  $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ .

2) Die Messung des Muon-Impulses im Zwei-Körper Zerfall des Pions in Ruhe:

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ . Die Neutrino-Masse ist:  $m_{\nu_\mu}^2 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi \sqrt{m_\mu^2 + p_\mu^2}$ .

Mit  $m_\mu = 105.658389 \pm 0.000034 \text{ MeV}$ ,  $m_\pi = 139.56995 \pm 0.00037 \text{ MeV}$

und einer Messung von  $p_\mu = 29.79200 \pm 0.00011 \text{ MeV}$  ergibt sich

$m_{\nu_\mu}^2 = -0.016 \pm 0.023 \text{ MeV}^2$  und damit eine obere Grenze von  $m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}$ .

3) Die Messung der Energie-Impuls Erhaltung im  $\tau$ -Zerfall mit n-Pionen,  $\tau^- \rightarrow n\pi\nu_\tau$ .

Aus der Energie des hadronischen Systems  $E_h^* = \frac{m_\tau^2 + m_h^2 - m_{\nu_\tau}^2}{2m_\tau}$  ergibt

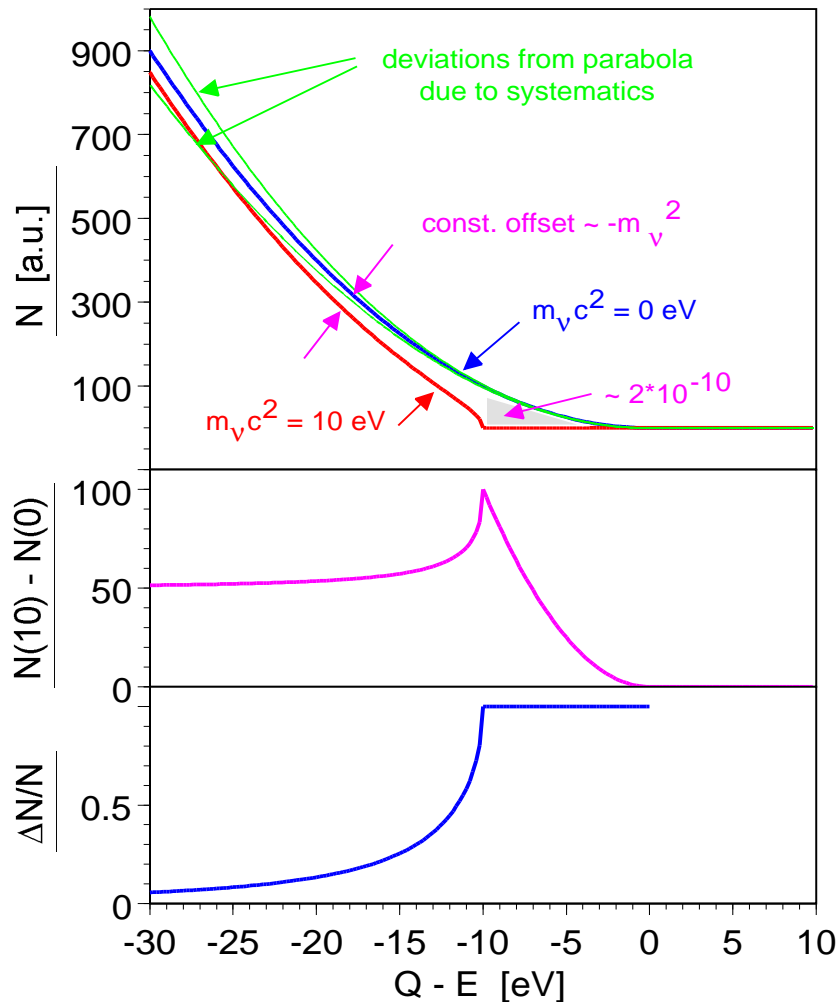
sich eine Massengrenze von  $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$ .

– In keinem der Experimente wurde eine endliche Masse gemessen und deswegen werden obere Schranken für die Neutrino-Massen angegeben.

**Die beste Einschränkung auf die Neutrino-Massen ergibt sich aus dem Tritium Beta-Zerfall.**



# Das Mainz Experiment - das Prinzip



$$-\frac{dN}{dE} = A \cdot F \cdot p(E + m).$$

$$\sum_j w_j E_j \sqrt{E_j^2 - m_{\nu_e}^2},$$

$$\text{mit } E_j = E_0 - V_j - E.$$

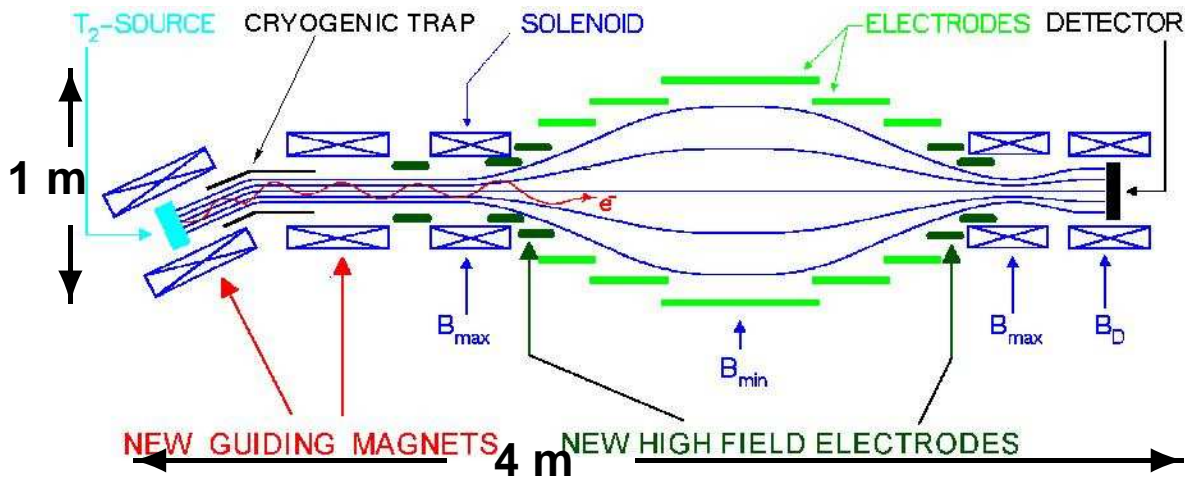
- Die Messung des Endpunktes des Spektrums der Elektronenergie im Zerfall  ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} e^- \bar{\nu}_e$  liefert die Neutrino-Masse.
- Der Zerfall hat eine Reihe positiver Eigenschaften:
  - 1) Ein niedriger Q-Wert  $E_0 = 18.6 \text{ keV}$  liefert eine hohe Sensitivität am Endpunkt.
  - 2) Die geringe Halbwertszeit  $T_{\frac{1}{2}} = 12.3 \text{ a}$  erlaubt die Nutzung dünner Quellen bei genügender Zählrate.
  - 3) Der Zerfall ist 'super-allowed', d.h. das Matrixelement ist unabhängig von der Elektronenergie.
  - 4) Die Elektronenhülle ist einfach und damit gibt es nur geringe Wechselwirkungen des  $e^-$  mit den Elektronen des Tochteratoms.

**Die Messung des Endpunktes ist sehr kompliziert.**



# Das Mainz Experiment - das Resultat

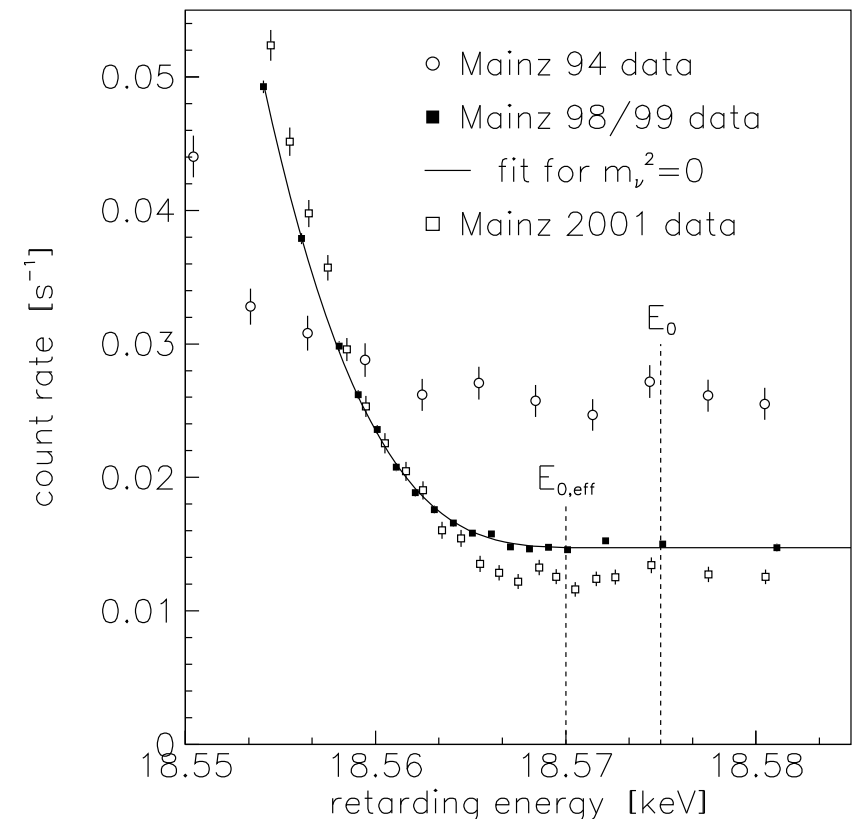
– Ein **MAC-E-Filter** = **M**agnetic **A**diabatic **C**ollimation followed by an **E**lectrostatic **F**ilter.



– Das Magnetfeld führt die Elektronen, die gegen das E-Feld anlaufen müssen.

– Die ersten Analysen lieferten signifikant negative Neutrino-Massenquadrate. Dies konnte schliesslich auf ein Aufrauen des Tritium-Films im Betrieb zurückgeführt werden.

– Mit verbesserter Kühlung ist dieser Effekt nun verschwunden und das aktuelle Resultat ist  $m_{\nu_e}^2 = (-1.2 \pm 2.2 \pm 2.1) eV^2$ , was zu einem Limit von  $m_{\nu_e} < 2.2 eV$  mit 95% CL führt.

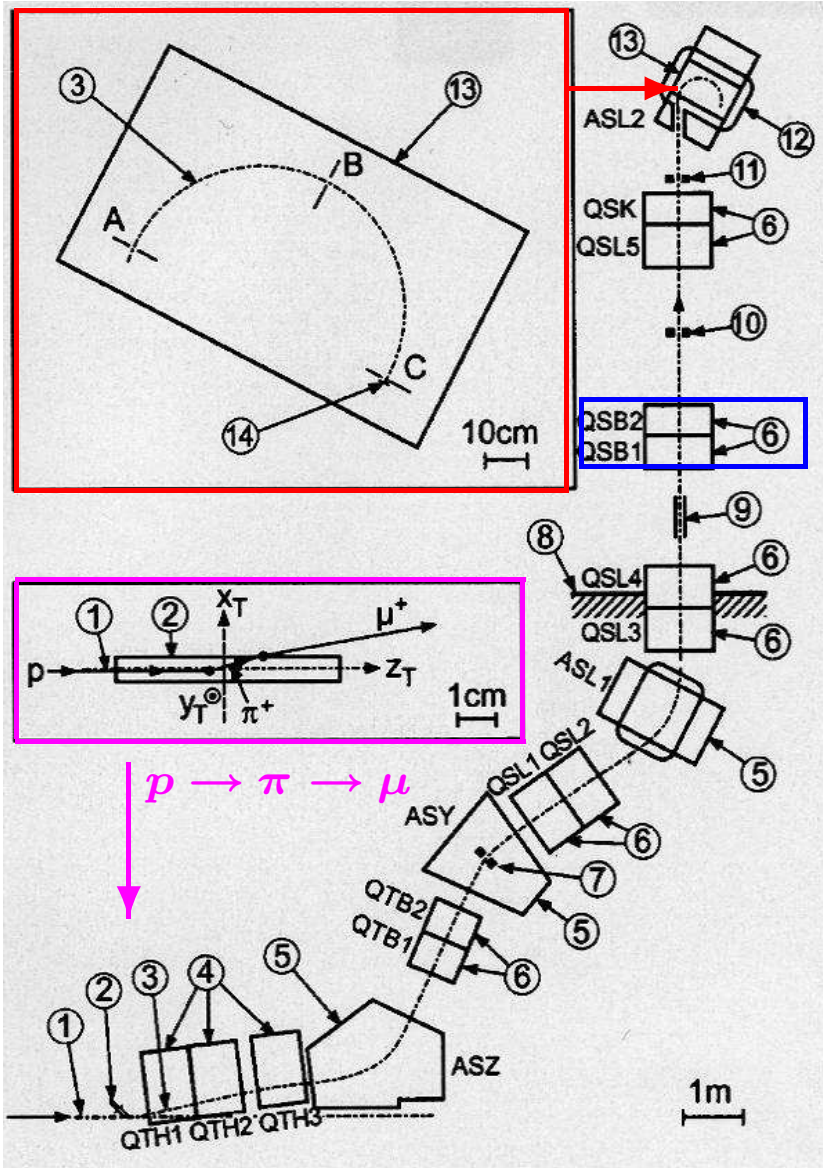


**Das Experiment liefert die stärkste Einschränkung der absoluten Neutrino-Masse.**

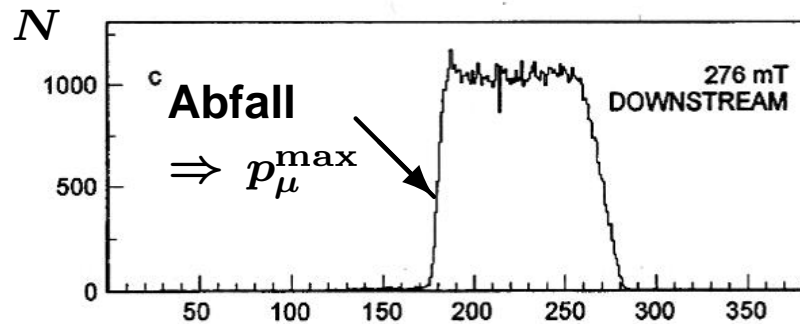




# Das Experiment zur Bestimmung der Masse des $\nu_\mu$



- Die Pionen werden in einem **Graphit-Target** gestoppt. Der Pion-Zerfall  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  findet nahe der Oberfläche statt. Damit reicht das Muon-Impulsspektrum bis zur kinematischen Grenze von  $p_\mu = 29.79$  MeV.
- Die **Quadrupole** filtern Positronen heraus.
- Das **Magnetspektrometer** mit  $B = 0.276$  T liefert  $p_\mu$  mit einer Auflösung von  $\Delta x = 50 \mu m \Rightarrow \frac{\Delta p_\mu}{p_\mu} = 7 \cdot 10^{-5}$ .



- Aus der Messung:  $m_{\nu_\mu}^2 = -0.016 \pm 0.023$  MeV folgt  $m_{\nu_\mu} < 170$  keV mit **90% CL**.

**Das dE/dx in Graphit ist die größte Unsicherheit.**





# Neutrino-Oszillationen - der Zwei-Flavour Fall

- Im Zwei-Flavour Fall, z.B.  $\nu_e, \nu_\mu$  reduziert sich die Maki-Nakagawa-Sakata Matrix auf:

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

- Die Wahrscheinlichkeit ein zur Zeit  $t = 0$  z.B. als  $\nu_e$  in der Sonne gestartetetes Neutrino zur Zeit  $t$ , also z.B. auf der Erde, auch als  $\nu_e$  wiederzufinden, ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} \langle \nu_e(t) | \nu_e(0) \rangle &= \left[ \cos \vartheta e^{+i \frac{m_1^2 t}{2E}} \langle \nu_1 | + \sin \vartheta e^{+i \frac{m_2^2 t}{2E}} \langle \nu_2 | \right] \left[ \cos \vartheta | \nu_1 \rangle + \sin \vartheta | \nu_2 \rangle \right] \\ P(\nu_e \rightarrow \nu_e) &= |\langle \nu_e(t) | \nu_e(0) \rangle|^2 = \left| \cos^2 \vartheta e^{+i \frac{m_1^2 t}{2E}} + \sin^2 \vartheta e^{+i \frac{m_2^2 t}{2E}} \right|^2 \\ &= \cos^4 \vartheta + \sin^4 \vartheta + \cos^2 \vartheta \sin^2 \vartheta \left( e^{+i \frac{m_1^2 - m_2^2 t}{2E}} - e^{-i \frac{m_1^2 - m_2^2 t}{2E}} \right) \\ &= 1 - 2 \cos^2 \vartheta \sin^2 \vartheta + 2 \cos^2 \vartheta \sin^2 \vartheta \cos\left(\frac{\Delta m^2 t}{2E}\right) \quad \text{mit} \quad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \\ &= 1 - \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right) \end{aligned}$$

- Damit ist die Oszillationswahrscheinlichkeit:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\vartheta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right)$$

- Mit  $200 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \equiv 1$  folgt  $1/\text{eV} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ .

Damit beträgt die Oszillationslänge:  $L = \pi \frac{4E}{\Delta m^2} \Rightarrow$

$$L = 2.5 \cdot \frac{E/\text{GeV}}{\Delta m^2/\text{eV}^2} \text{ km}$$

**Das Verhältnis  $L/E$  bestimmt die Sensitivität auf verschiedene Massenbereiche.**



# Neutrino-Oszillationen - der MSW Effekt

– Im Vakuum gelten die gekoppelten Bewegungsgleichungen

$$- i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \frac{\Delta m^2}{4E_\nu} \begin{pmatrix} \cos(2\vartheta) & \sin(2\vartheta) \\ \sin(2\vartheta) & -\cos(2\vartheta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ B & -A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}.$$

– In Materie gibt es  $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$  Vorwärts-Streuung durch  $Z$ -Austausch für  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , aber  $W$ -Austausch geht nur mit  $\nu_e$ . Dies ändert die Bewegungsgleichungen zu:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A + V(x) & B \\ B & -A \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \text{ mit } V(x) = \pm \sqrt{2} G N_e(x) \text{ mit } +/- \text{ für } \nu_e / \bar{\nu}_e$$

– Aus  $\Delta m_m^2 \sin(2\vartheta_m) = \Delta m^2 \sin(2\vartheta)$  ergibt sich damit in Materie:

$$\Delta m_m^2 = \Delta m^2 \sqrt{\left( \cos(2\vartheta) - \frac{2E_\nu}{\Delta m^2} V(x) \right)^2 + \sin^2(2\vartheta)}$$
$$\sin^2(2\vartheta_m) = \frac{\sin^2(2\vartheta)}{\left[ \cos(2\vartheta) - \frac{2E_\nu}{\Delta m^2} V(x) \right]^2 + \sin^2(2\vartheta)}$$

– Trotz kleinem Mischungswinkel im Vakuum kann die Oszillationsamplitude in Materie maximal werden,  $\sin^2(2\vartheta_m) = 1$  für  $\cos(2\vartheta) = \frac{2E_\nu}{\Delta m^2} V(x)$ .

**Der Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein Effekt ergibt resonante Neutrino-Übergänge in Materie.**



## Der Stand der Dinge

---

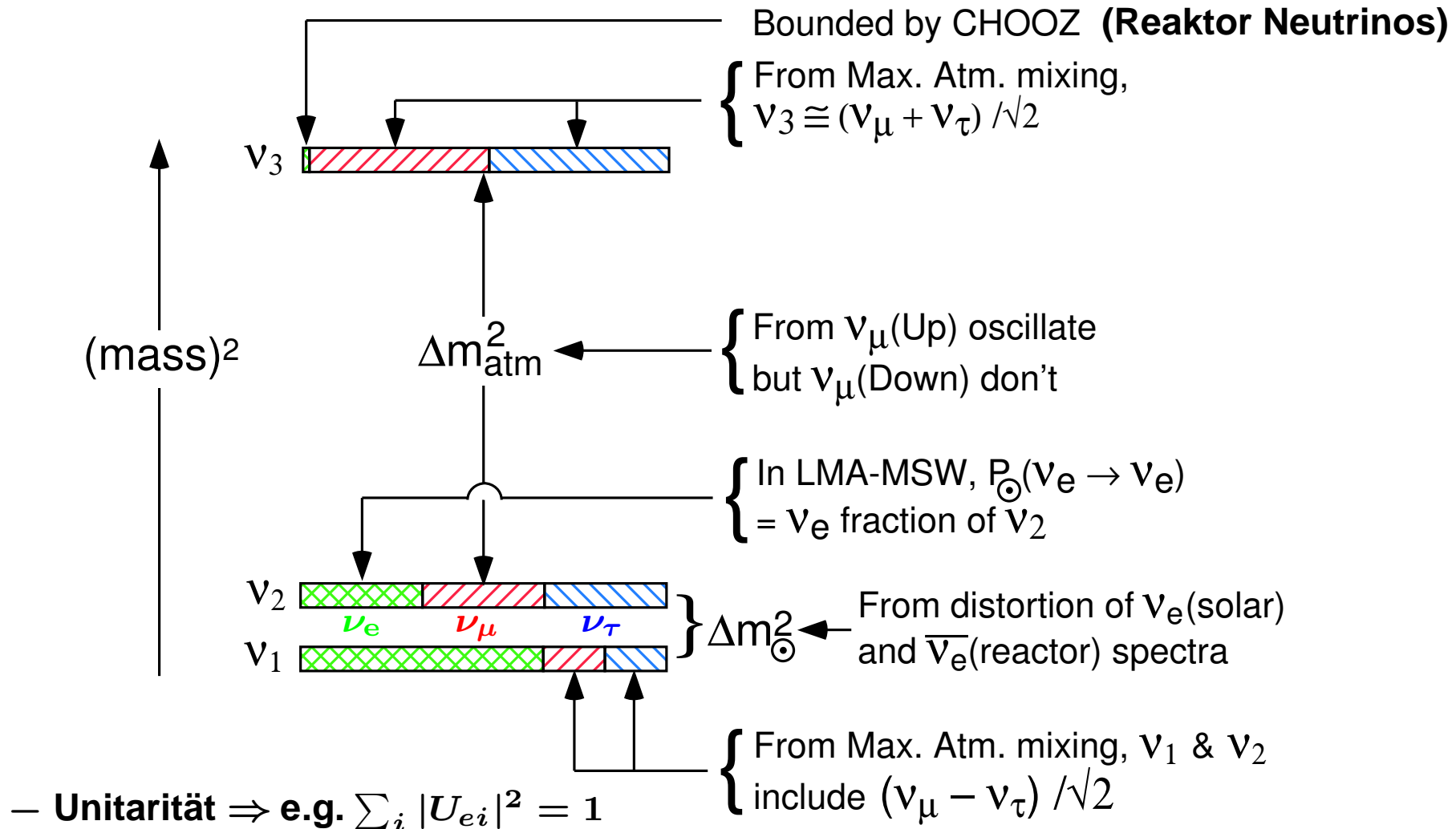
---

- Es kommen zu wenig Sonnen-Neutrinos auf der Erde an (Cl-Experiment, Super-Kamio-kande, SAGE, GALLEX/GNO, SNO, . . .). Erklärbar durch  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$  Oszillationen mit ( $\Delta m^2 \approx 10^{-5} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2(2\vartheta) \approx 1$ ).
- Es kommen zu wenig atmosphärische  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$  auf der Erde an (Super-Kamiokande, Macro, Soudan2). Erklärbar durch  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen mit ( $\Delta m^2 \approx 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2(2\vartheta) \approx 1$ ).
- In einem Strahl von  $\bar{\nu}_\mu$  wurden  $\bar{\nu}_e$  Neutrinos gefunden (LSND). Erklärbar durch  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ -Oszillationen mit ( $\Delta m^2 > 10^{-1} \text{ eV}^2$ ,  $10^{-3} < \sin^2(2\vartheta) < 1$ ). Allerdings wurde dieser Effekt nur im LSND Experiment gesehen. Außerdem wurde ein großer Teil des erlaubten Bereichs von anderen Experimenten (Karmen, Nomad, Chorus) ausgeschlossen. Aus  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  und  $\Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2 = \Delta m_{13}^2$  folgt, dass nur zwei  $\Delta m_{ij}^2$  unabhängig sind. Deswegen erzwingt die Beschreibung des LSND Resultats zusätzlich eine sterile (nicht schwach-wechselwirkende) Neutrino-Sorte. Das MiniBooNE Experiment nimmt bereits Daten und wird diesen experimentellen Widerspruch auflösen. Wegen des Widerspruchs wird dieses Ergebnis hier nicht im Detail besprochen.

**Neutrino-Oszillationen bei solaren and atmosphärischen Neutrinos sind klar gesehen.**



# Die Lösung im Drei-Flavour Szenario

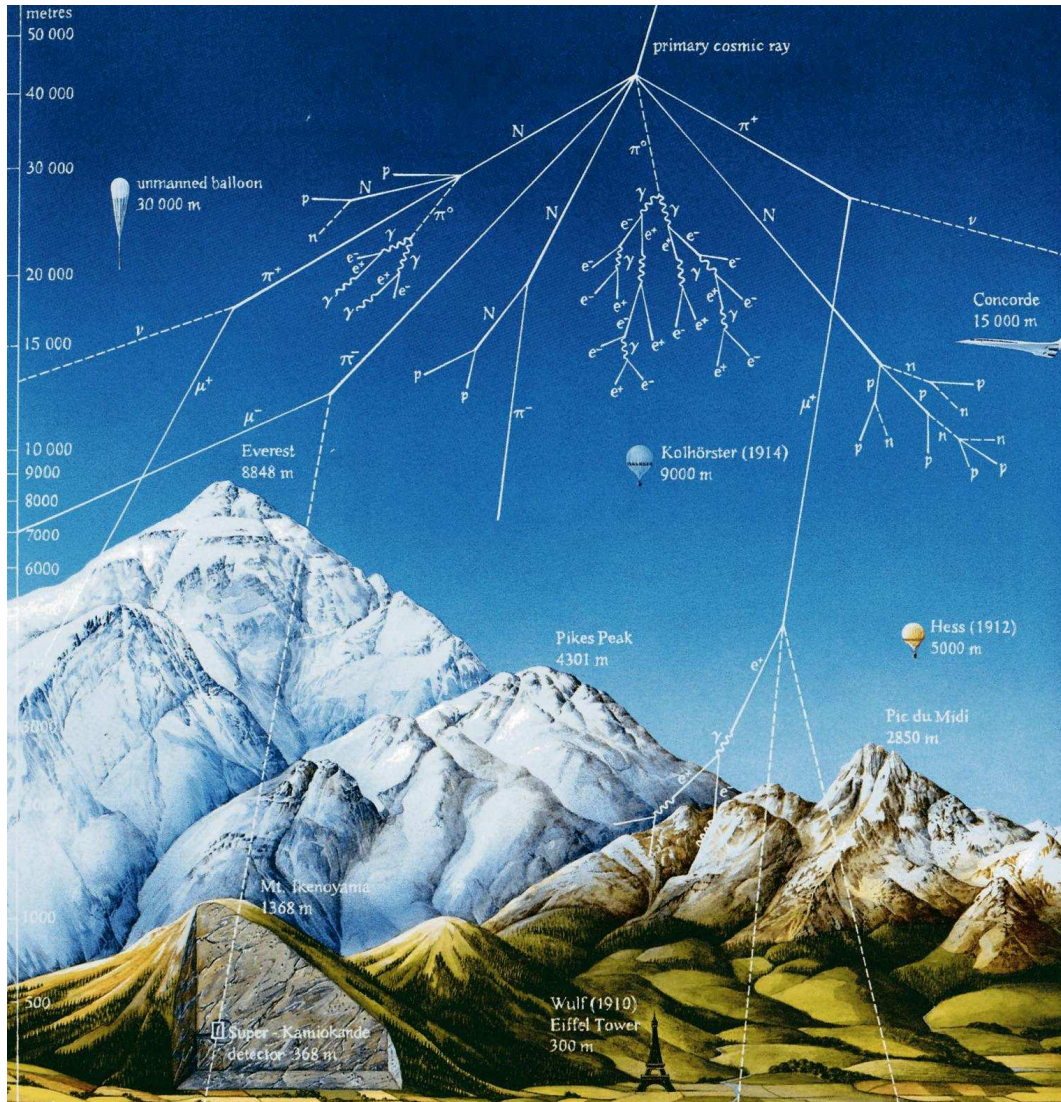


**Dieses Muster erklärt die Beobachtungen (außer LSND) durch Neutrino-Oszillationen.**





# Die Entstehung atmosphärischer Neutrinos

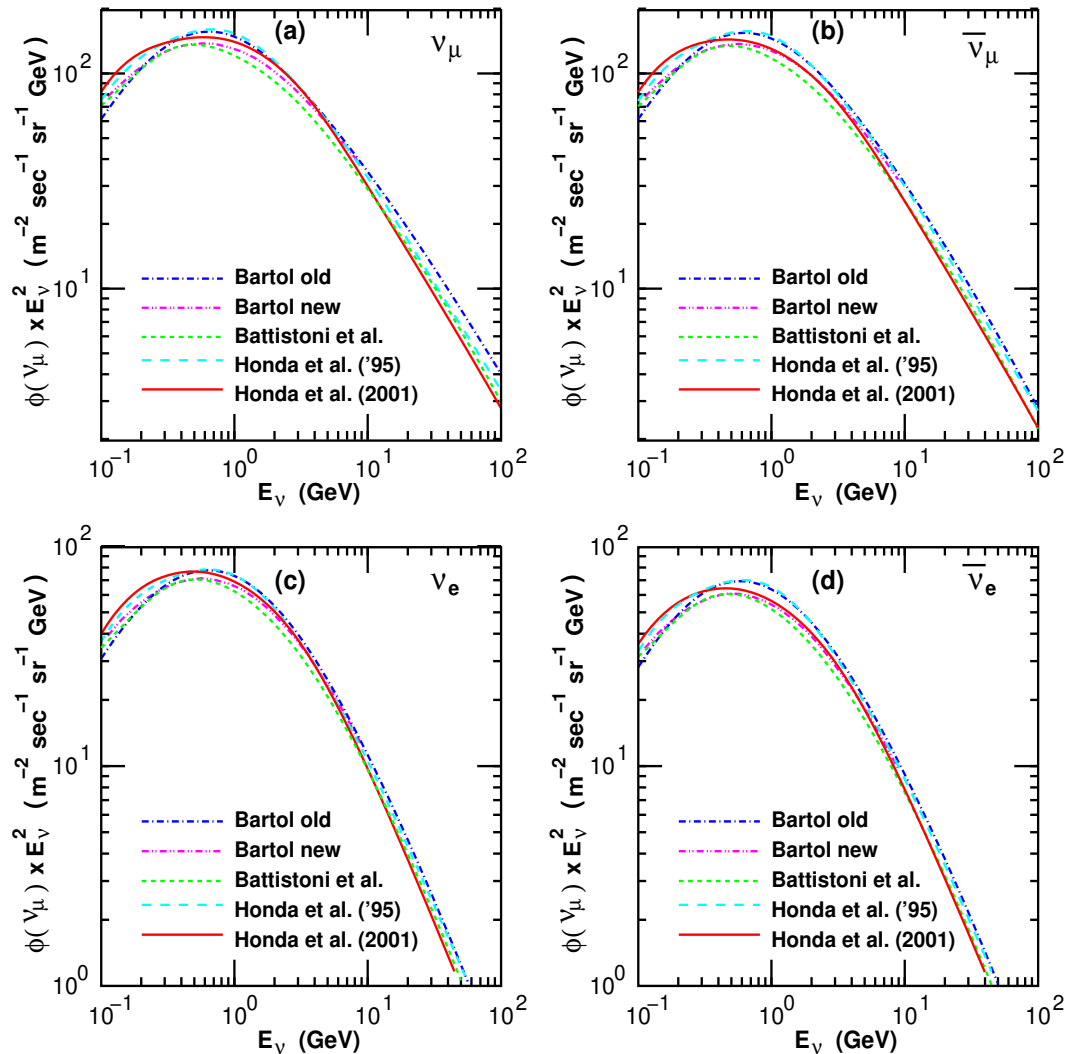


- Die wichtigste Reaktion der Neutrino-Produktion ist  $p + \mathcal{N} \rightarrow \pi^\pm / K^\pm + X$ .
- Aus  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu^{(-)}$ ,  $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_\mu^{(-)} \nu_e^{(-)}$  und falls alle Muonen zerfallen ergibt sich  $\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} = 2$  und  $\frac{\bar{\nu}_\mu}{\nu_\mu} = 1$ .
- Da im Schauer mehr  $\pi^+$  als  $\pi^-$  erzeugt werden erwartet man  $\frac{\bar{\nu}_e}{\nu_e} < 1$ .
- Der Fluss der verschiedenen Neutrino-sorten wird von mehreren Gruppen durch detaillierte Schauersimulationen für die Orte der Experimente vorhergesagt.

**Der Entstehungsprozess ist sehr komplex.**



# Das Spektrum atmosphärischer Neutrinos



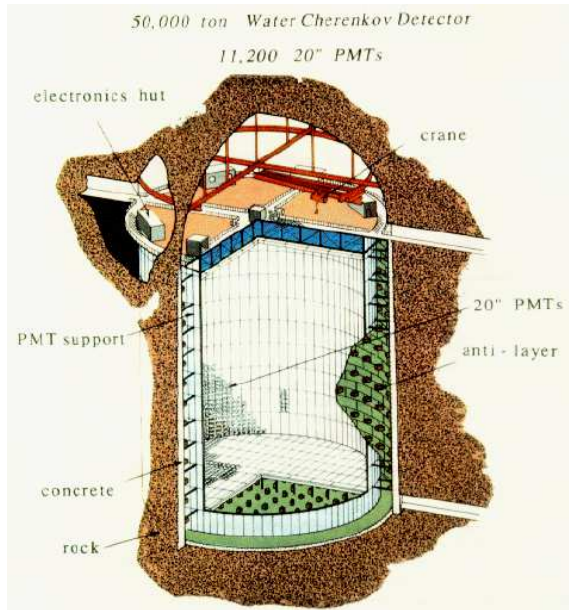
- Den absoluten Fluss kennt man nur auf etwa 20% genau.
- Das Fluss-Verhältniss ist besser bekannt. Die Unsicherheit ist hier nur etwa 5%.
- Der Fluss hängt von vielen Parametern ab, z.B. von der Weglänge die das Neutrino in der Atmosphäre zurücklegt, vom Magnetfeld der Erde am Ort des Experimentes und dem  $\pi/K$  Verhältnis.

**Die kleinste theoretische Unsicherheit hat man bei der Messung des Verhältnisses.**

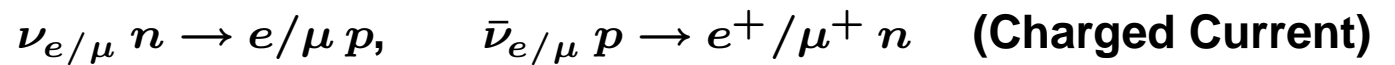




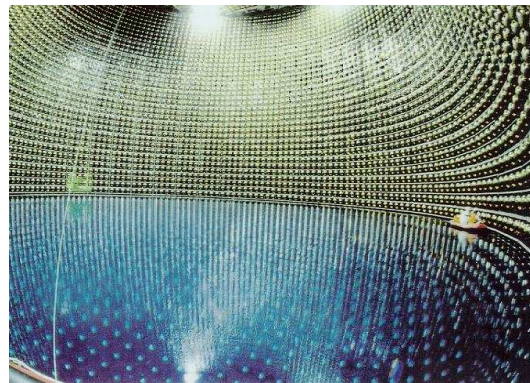
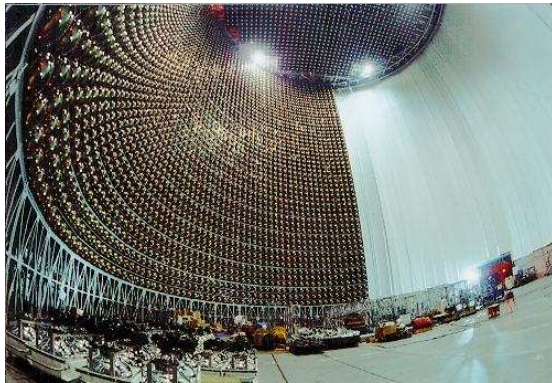
# Das Super-Kamiokande Experiment - SK



- Die Überdeckung von SK ist ca. 2800 mWe (Wasser equivalent).
- Die Masse ist 50 kt, mit 25 kt fiducial Volumen.
- Es gibt **11.1k** (**1.9k**) PMTs im **inneren** (**äußeren**) Detektor.
- Man unterscheidet zwischen **FC** und **PC** Ereignissen.
- Die Nachweis-Reaktionen atmosphärischer Neutrinos sind:



**Debris von 7800 PMTs**

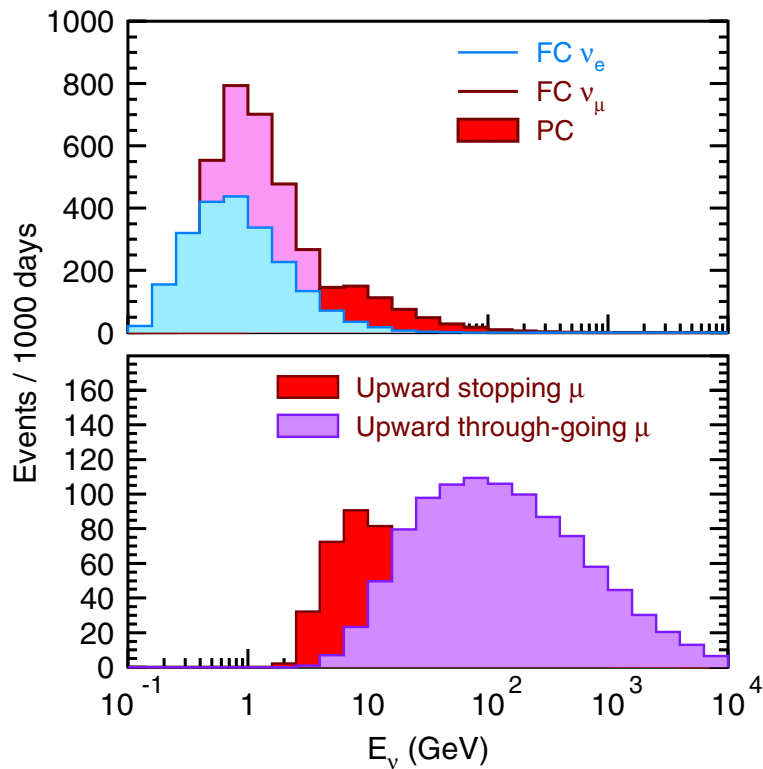


- Das SK-Experiment im Teilaufbau, teilgeflutet und teilweise zerstört durch PMT Implosion.

**Das Super-Kamiokande Experiment hat ein sehr bewegtes Leben.**



# Die Ereignisklassen in Super-Kamiokande



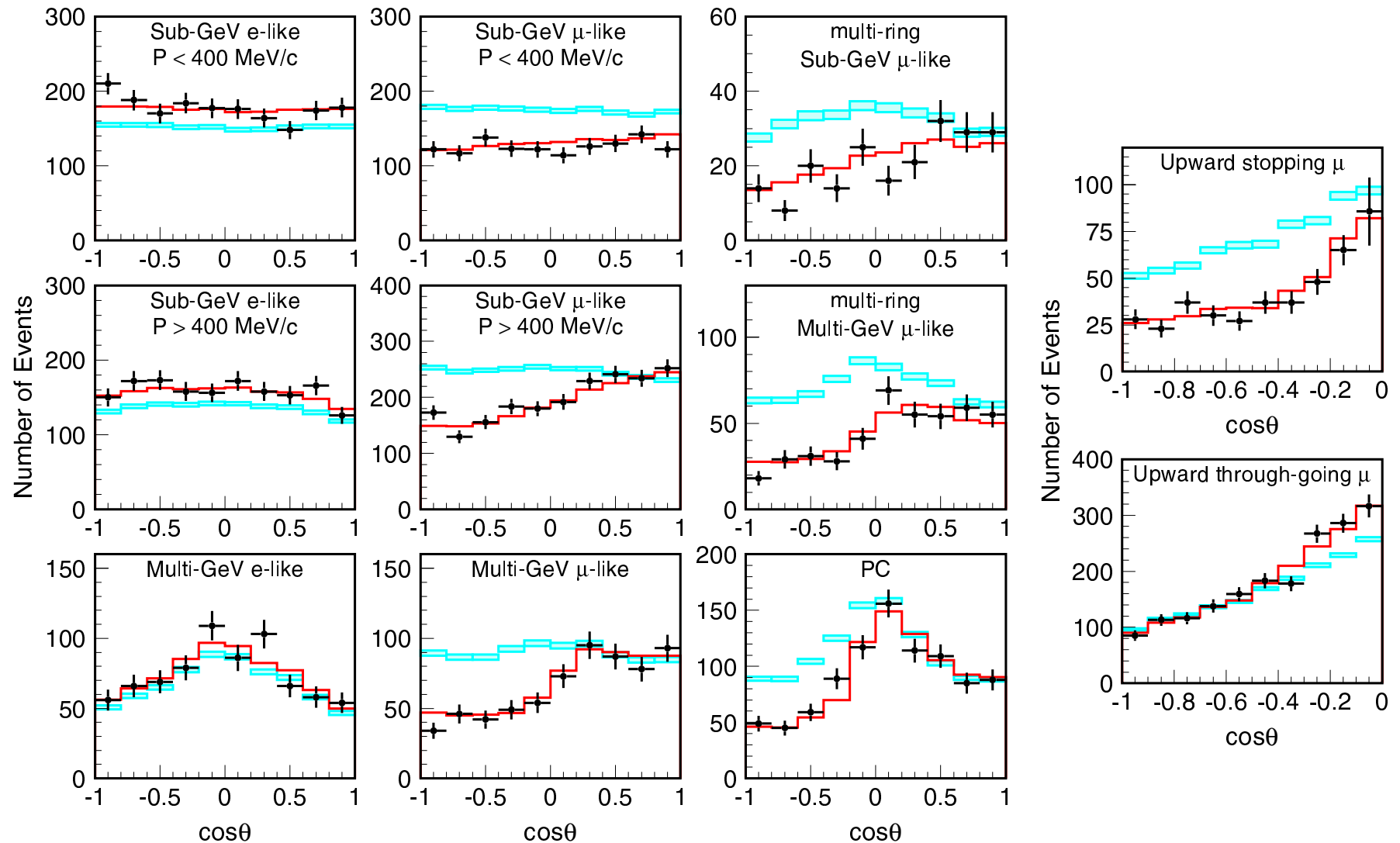
	DATA	MC	Purity
Sub-GeV 1-ring e-like	3353	2978.8	88.0%
Multi-GeV 1-ring e-like	746	680.5	82.6%
Sub-GeV 1-ring $\mu$ -like	3227	4212.8	94.5%
Sub-GeV Multiring $\mu$ -like	208	322.6	90.5%
Multi-GeV 1-ring $\mu$ -like	651	899.9	99.4%
Multi-GeV Multiring $\mu$ -like	439	711.9	95.0%
Partially Contained $\mu$	647	1034.5	97.3%
Stopping Upward $\mu$	417.7	721.4	~100%
Throughgoing Upward $\mu$	1841.6	1684.4	~100%

*11530 events used (80%)  
in oscillation analysis*

**Ein große Anzahl von Ereignissen variabler Energie zum Studium von  $\nu$ -Oszillationen.**



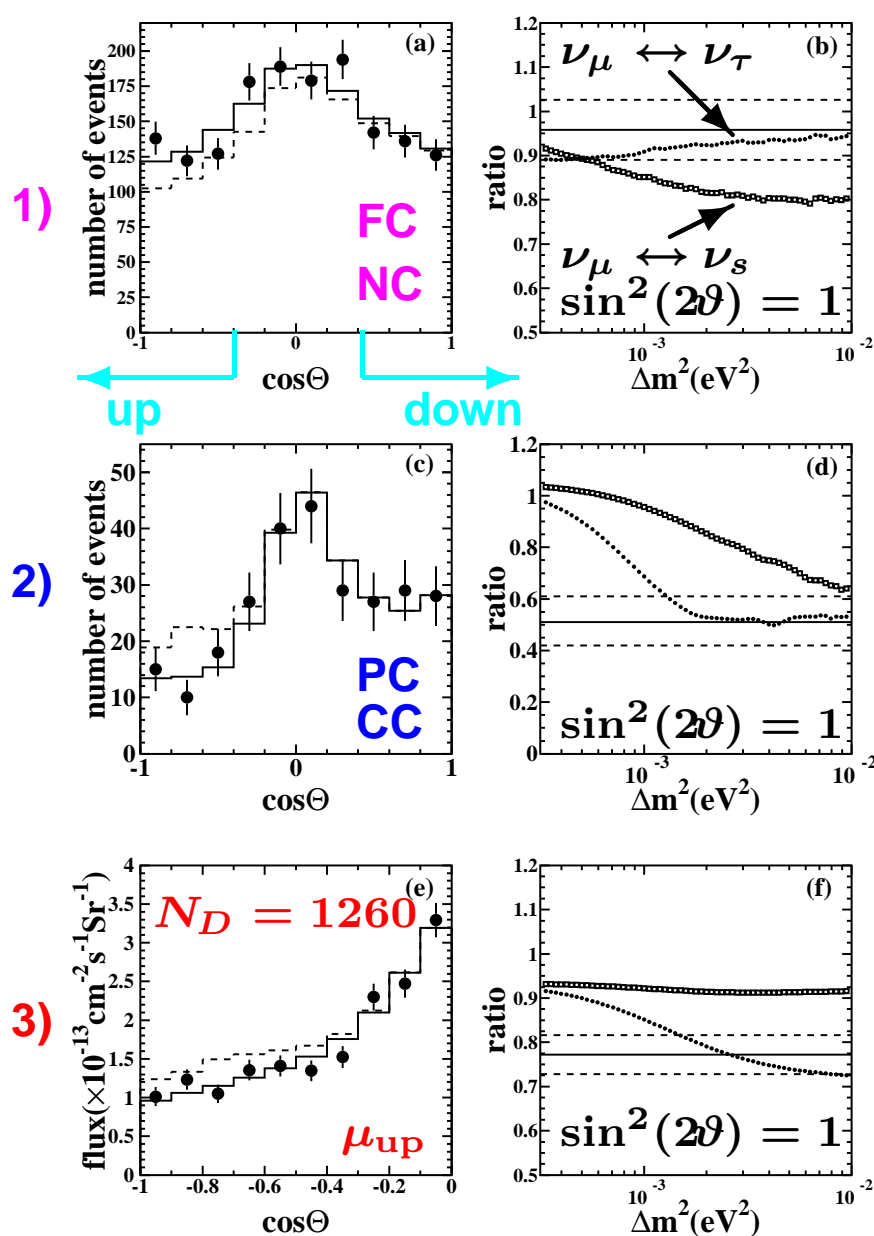
# Aktuelle Ereignisverteilungen von Super-Kamiokande



**Eine klare Diskrepanz zur Vorhersage ohne  $\nu$ -Oszillationen.**



# Publizierte Analyse $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ versus $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_s$ Oszillationen

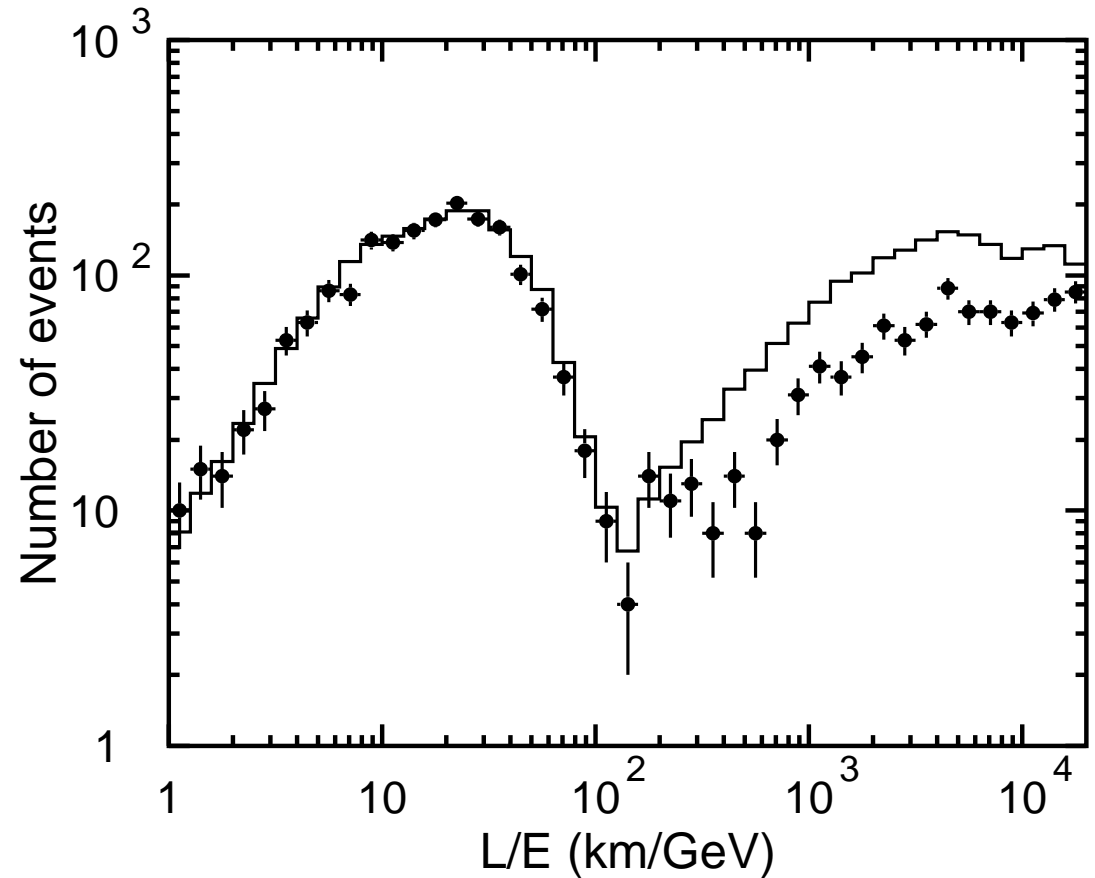
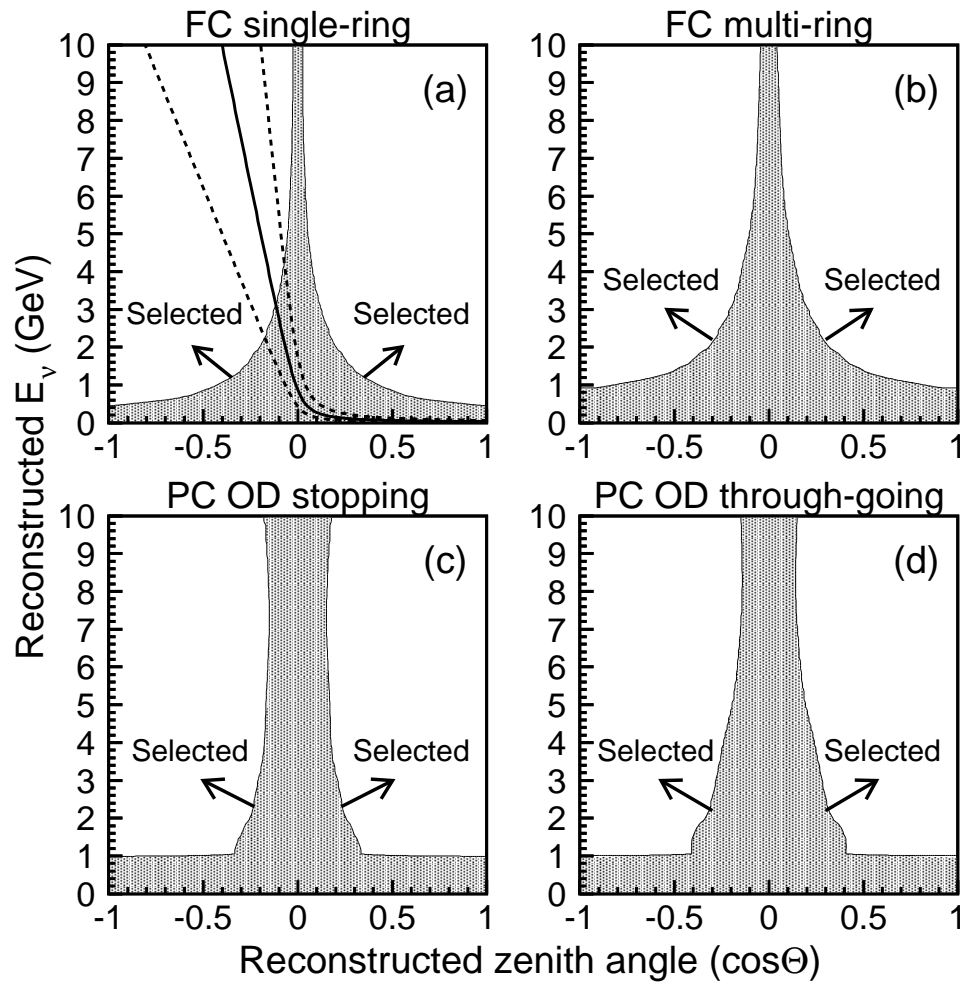


- Die Testgröße ist  $\frac{(\frac{\nu_\mu}{\nu_e})_D}{(\frac{\nu_\mu}{\nu_e})_M}$  für up- und down-going Neutrinos, also Neutrinos die durch die Erd-Materie oder nur durch die Erd-Atmosphäre geflogen sind.
- Drei Datensätze wurden auf  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  und  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_s$  Oszillationen untersucht:
  - 1) Fully contained (FC) neutral current (NC) Ereignisse mit  $\langle E_\nu \rangle \approx 1 \text{ GeV}$ .
  - 2) Partially contained (PC) charged current (CC)  $\nu_\mu$  Ereignisse mit  $\langle E_\nu \rangle \approx 10 - 20 \text{ GeV}$ .
  - 3) Upward going Muonen  $\mu_{up}$  mit  $\langle E_\nu \rangle \approx 100 \text{ GeV}$ .
- Alle Daten sind besser mit  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen verträglich. Den besten Fit erhält man für die Parameter ( $\Delta m^2 \approx 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2(2\vartheta) \approx 1$ ), durchgezogene Linien in linken Histogrammen.

**Klare Präferenz für  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen.**



# Die aktuelle L/E Analyse von $\nu_\mu$ -Ereignissen



– Die 70% Konturen in  $L/E_\nu$  Auflösung.

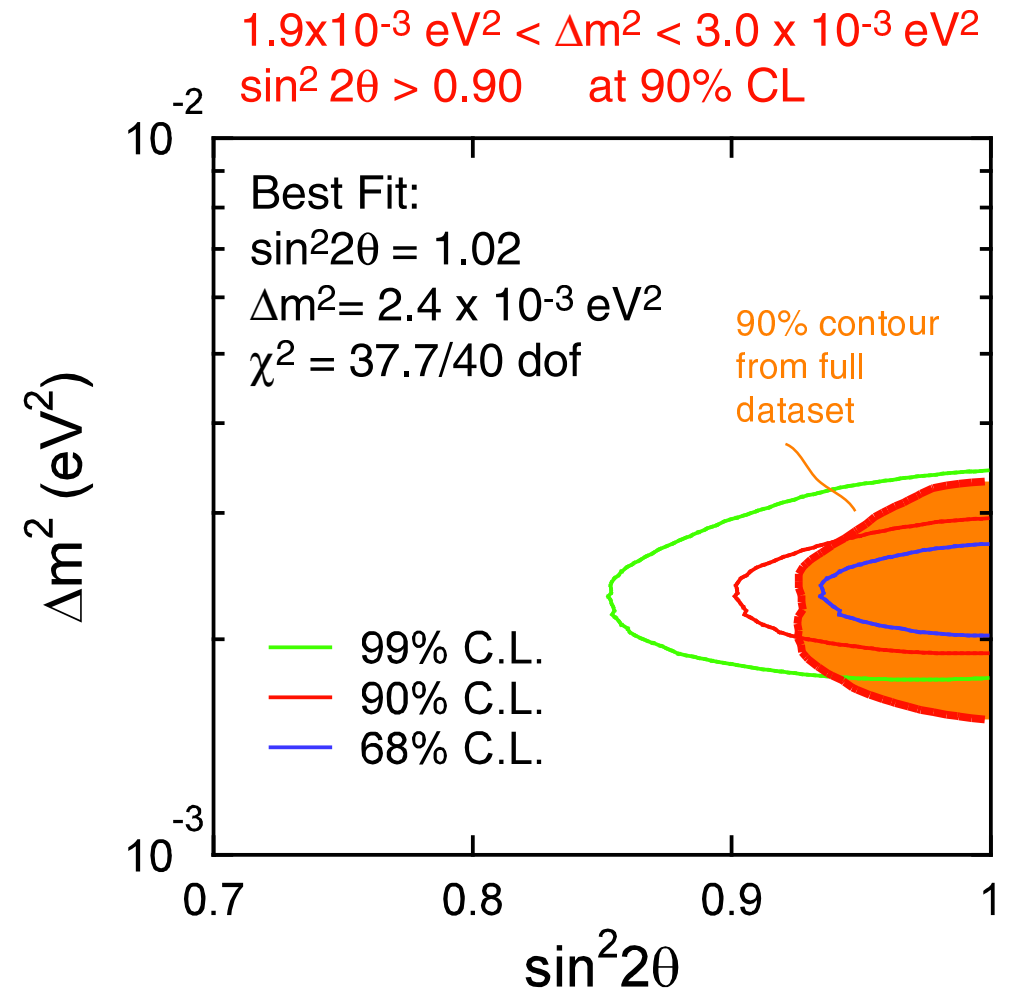
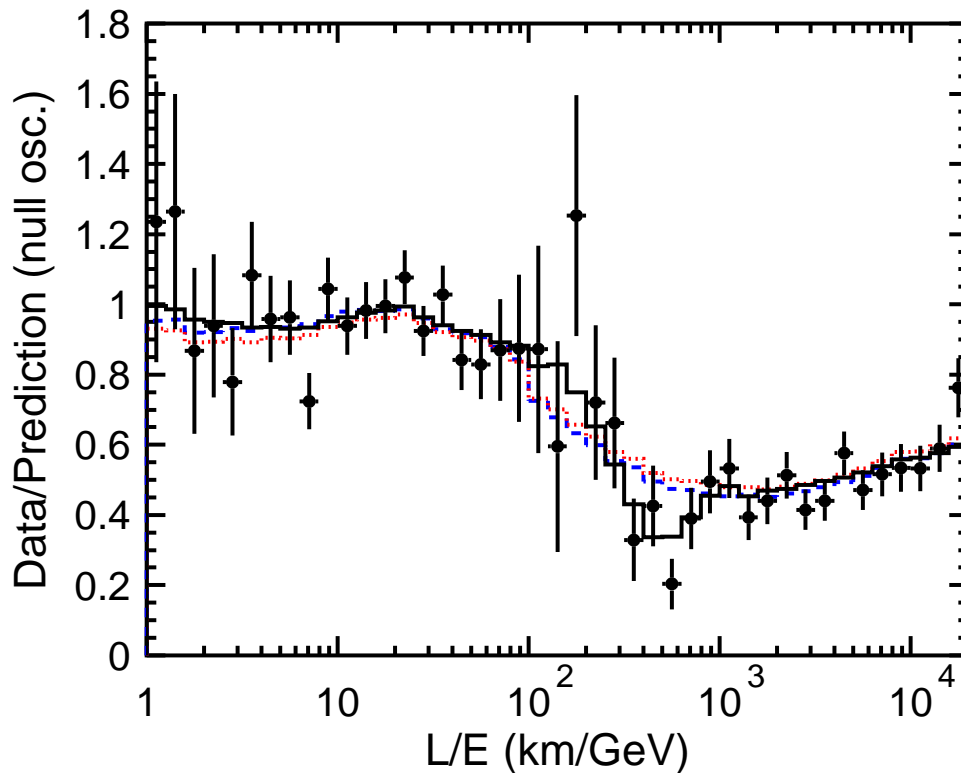
– Die Ereignisverteilung in  $L/E_\nu$

**Eine klare Diskrepanz zur Vorhersage ohne  $\nu$ -Oszillationen für upward Neutrinos.**





# Die Interpretation durch $\nu$ -Oszillationen

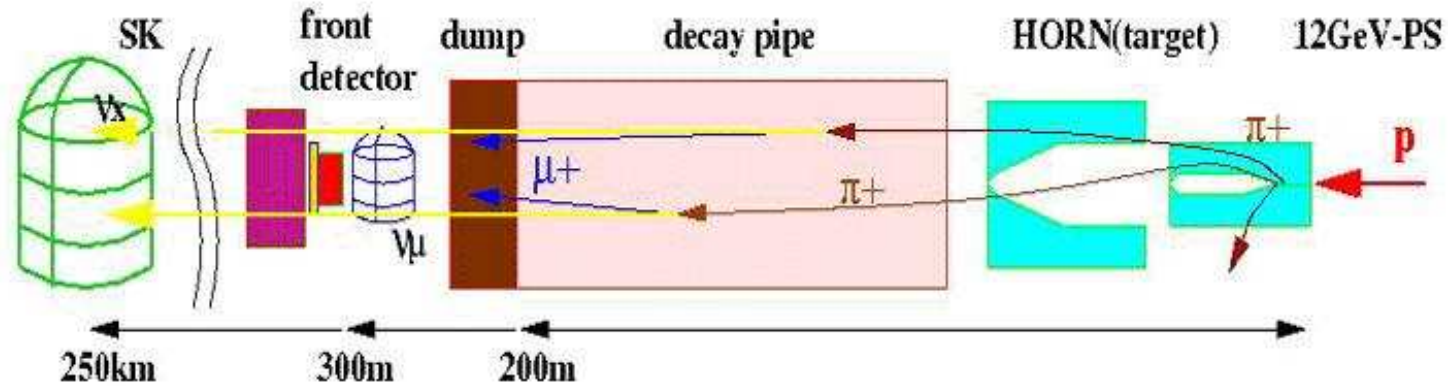


**Eine Präferenz für maximale Mischung aus Oszillationen atmosphärischer Muon-Neutrinos.**





## K2K - der Test mit Beschleuniger-Neutrinos

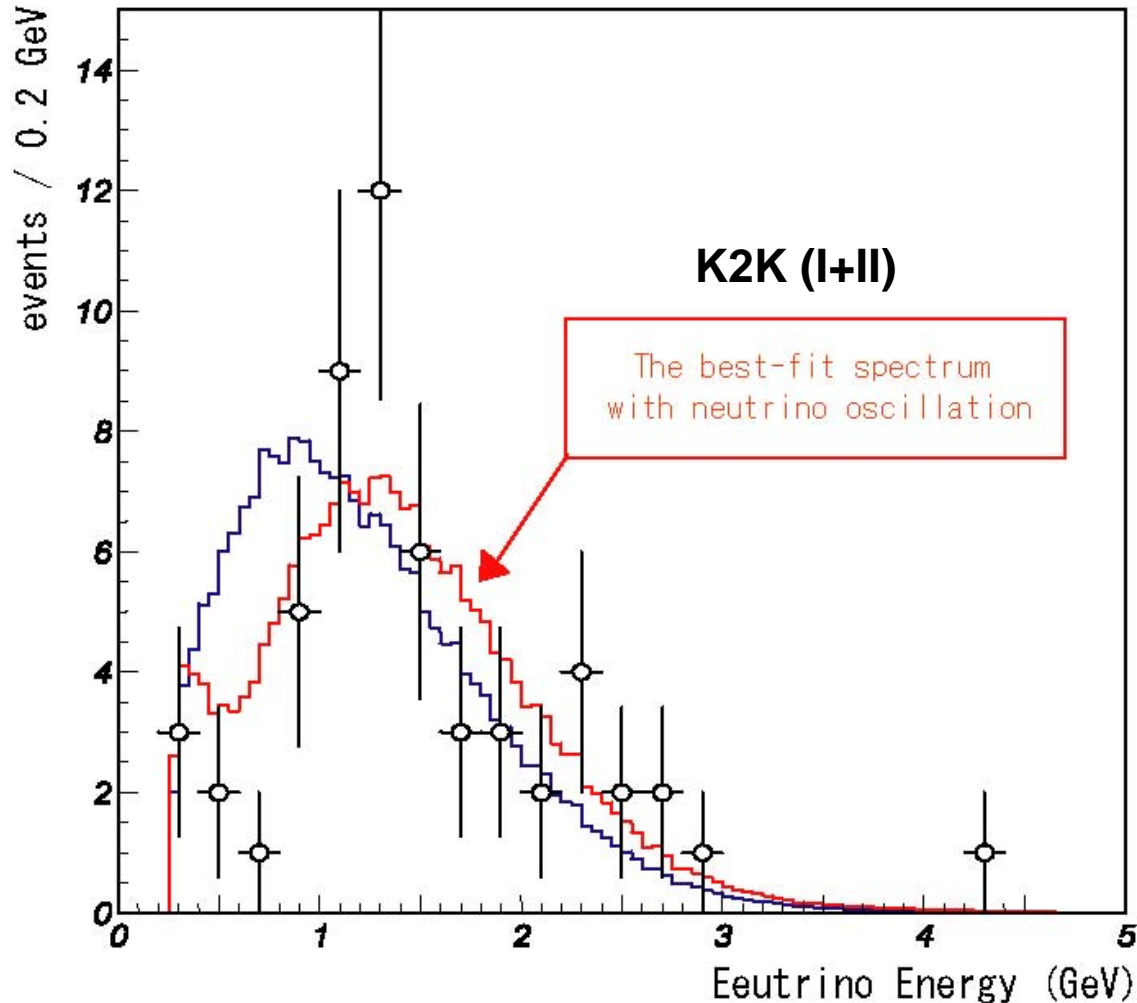


- Im K2K Experiment werden Beschleuniger-Neutrinos von KEK zum Kamiokande Detektor gesandt. Alle 2.2 s wird ein 12 GeV p-Strahl von 1.1  $\mu s$  Länge auf ein Al-Target gelenkt.
- Der Neutrinostrahl aus den  $\pi^+$  Zerfällen ist zu 98%  $\nu_\mu$  mit  $\langle E_{\nu_\mu} \rangle = 1.3$  GeV.
- In 300 m Entfernung ist ein zu Kamiokande baugleicher Detektor mit einer geringen Masse von 1 kt aufgestellt. Damit wird der von KEK ausgehende Neutrinosfluss bestimmt, und eine erwartete totale Zählrate im 250 km entfernten Super-Kamiokande Detektor von  $79.1^{+6.2}_{-5.4}$  bzw (150.9) Ereignissen für K2K I(I+II) mit  $4(8) \cdot 10^{18}$  p on target vorhergesagt.
- Im SK Detektor werden die Neutrinos durch die CC Reaktion  $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$  nachgewiesen.

**Ein man-made Neutrinostrahl zur Überprüfung des Defizits atmosphärischer Muon-Neutrinos.**



# K2K - das Resultat

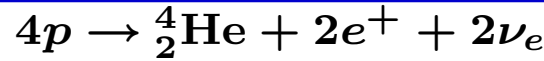


- Die Messung in einem Zeitfenster von  $1.5 \mu s$  nach jedem Protonpuls ergibt insgesamt 56 (108) Ereignisse bei einer Vorhersage von  $79.1^{+6.2}_{-5.4}$  (150.9) Ereignissen für K2K I(I+II).
- Die statistische Wahrscheinlichkeit der Konsistenz ist  $1.3(0.011)\%$ .
- Unter der Annahme, dass die  $\nu_\mu$  in  $\nu_\tau$  oszilliert sind, findet man als Lösung:  
I:  $\Delta m^2 = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2(2\theta) = 1$   
I+II:  $\Delta m^2 = 2.73 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ ,  $\sin^2(2\theta) = 1$
- Diese Parameter beschreiben sowohl die Rate, als auch die Energieverteilung der beobachteten Ereignisse.

**Ein wunderbare Bestätigung des Defizits atmosphärischer Muon-Neutrinos.**

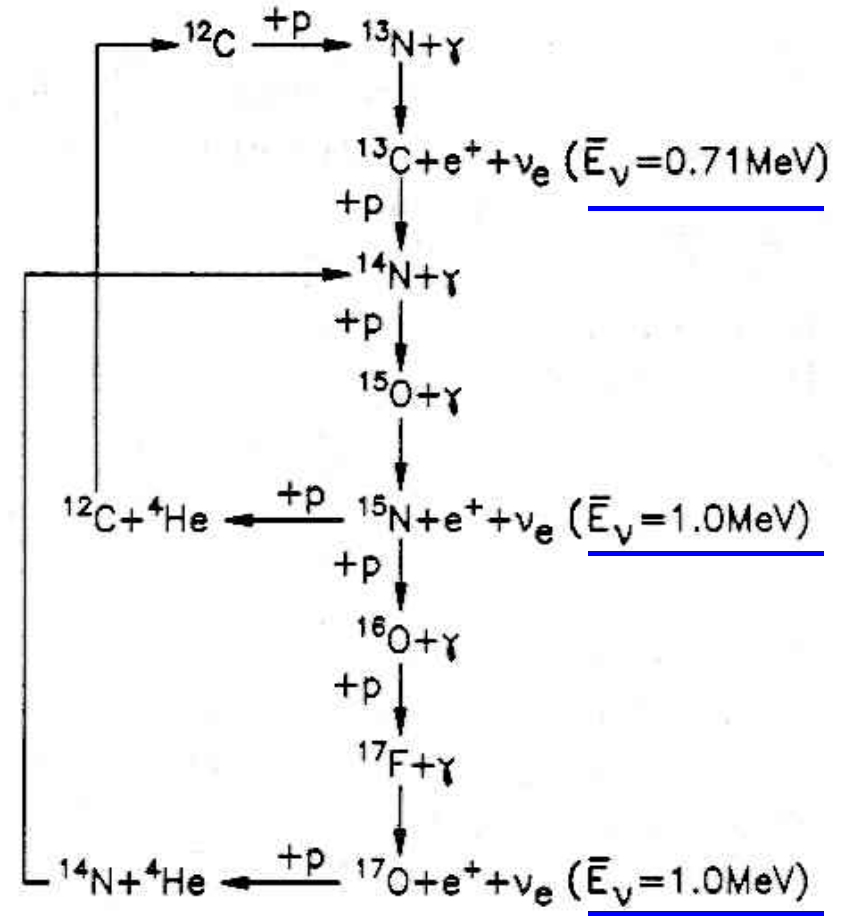
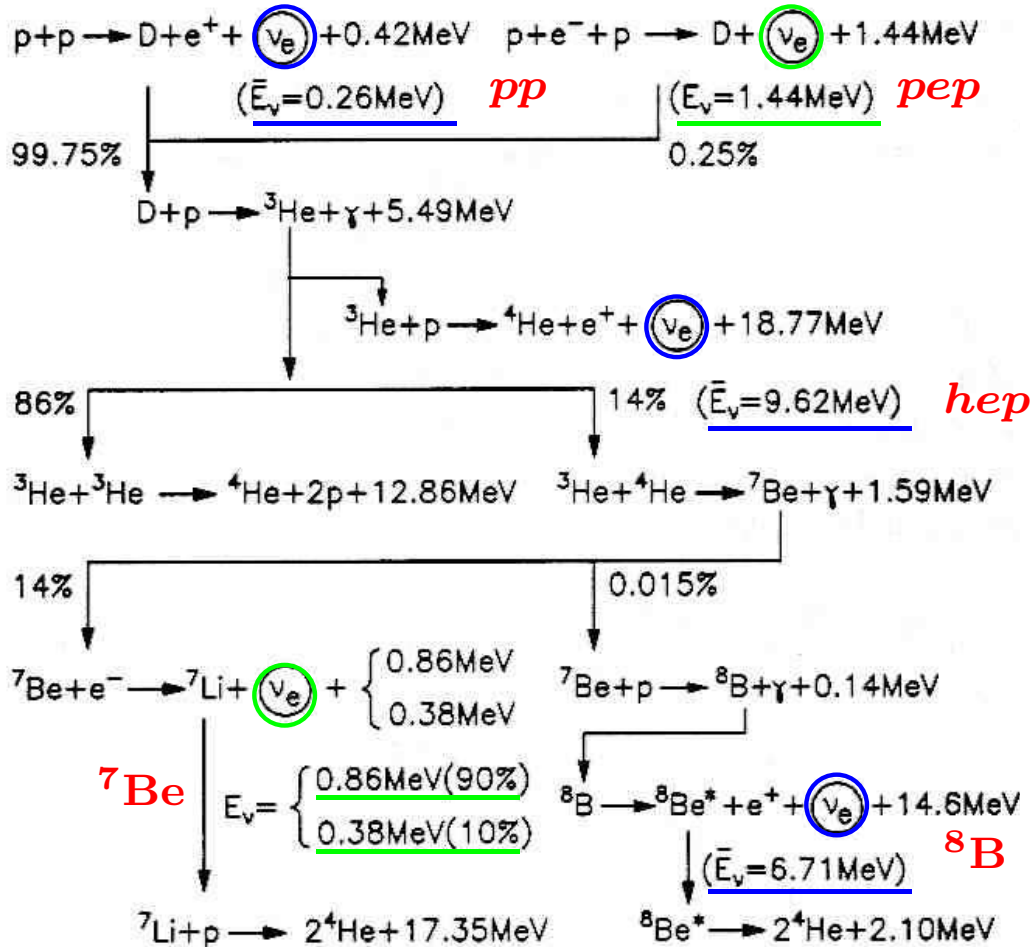


# Sonnen-Neutrinos - die Reaktionsketten



pp-Kette

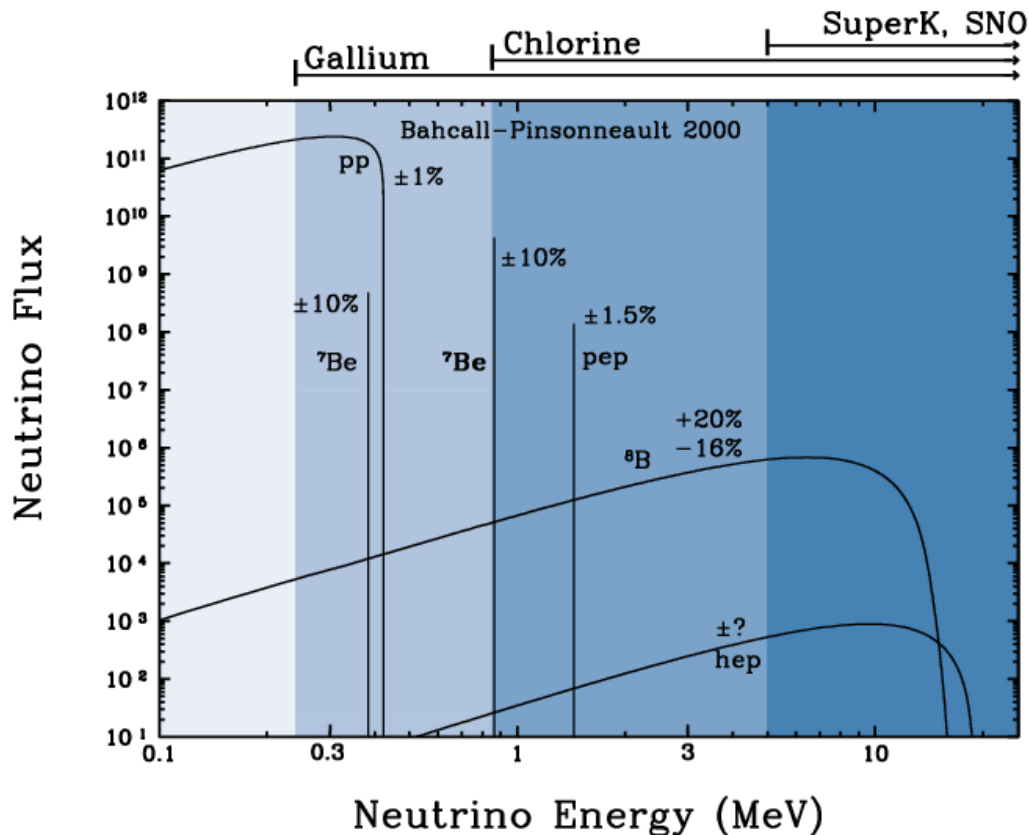
CNO-Zyklus



Die Reaktionsketten enthalten Neutrinospektren und monoenergetische Neutrinos.



# Das Spektrum der Sonnen-Neutrinos



- Die Neutrinos entstehen im Kern der Sonne  $R < 0.3R_{\odot}$  bei  $T \approx 1.56 \cdot 10^7$  K.
- Sie fliegen durch ca.  $7 \cdot 10^5$  km Sonnenmaterie,  $1.5 \cdot 10^8$  km Vakuum und bis zu  $1.3 \cdot 10^4$  km Erdmaterie.
- Die meisten Neutrinos stammen aus der pp-Kette (91%) allerdings bei niedriger Energie. Die  $^8\text{B}$  Neutrinos sind selten, (0.01%) haben aber hohe Energien.
- Der Nachweis geschieht durch  $\nu_e$ -Einfang  $\nu_e + A(Z) \rightarrow e^- + B(Z + 1) \Leftrightarrow A(\nu_e, e)B$ , oder durch  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$  bzw. durch  $\nu_e d \rightarrow ppe^-$  und  $\nu_e d \rightarrow pn\nu_e$  Streuung.
- Die Vorgänge in der Sonne werden durch das

Standard-Sonnenmodell (SSM) beschrieben. Pioniere sind Bahcall & Ullrich. Das SSM beschreibt die Zusammensetzung ( $H/He/Z > 2 = 34\%/64\%/2\%$ ), die Temperatur, ....

- Das SSM sagt einen Flussdichte auf der Erde von  $\Phi_{\nu_e} = 6.6 \cdot 10^{10} \nu_e/\text{cm}^2\text{s}$  voraus.

**Das Studium der Sonnen-Neutrinos erlaubt einen Blick in das Innerste unserer Sonne.**



# Das Sonnen-Neutrinos Rätsel

– Die Nachweis der  $\nu_{\odot}$  geschieht durch **radiochemische** und **Echzeit** Experimente:

$${}^{71}\text{Ga} (\nu_e, e^-) {}^{71}\text{Ge} \quad E_{\nu} > 0.23 \text{ MeV} \quad (\text{Gallex/GNO, Sage})$$

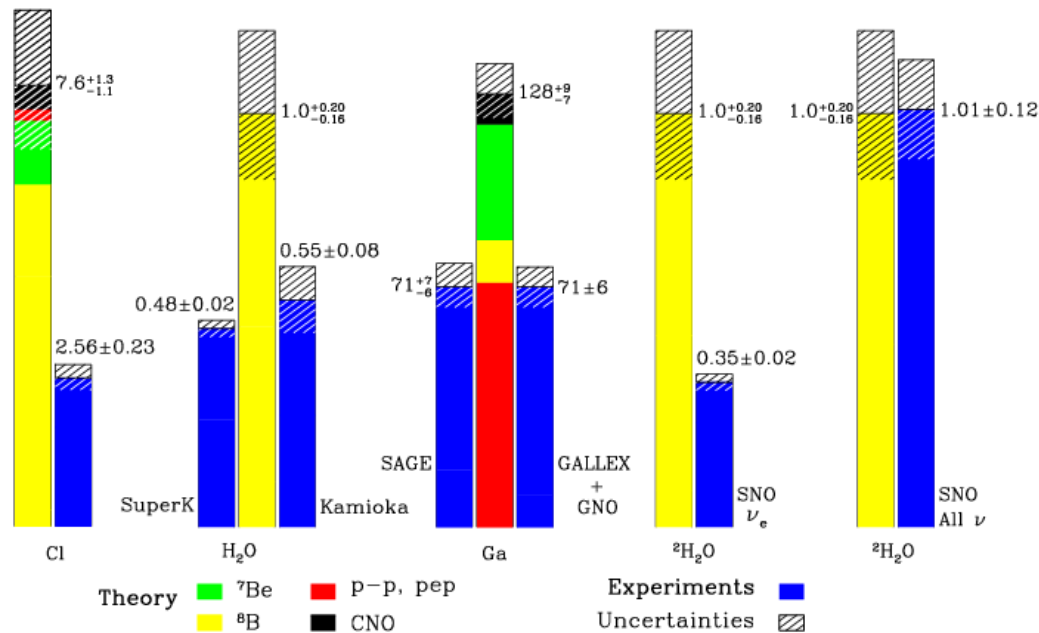
$${}^{37}\text{Cl} (\nu_e, e^-) {}^{37}\text{Ar} \quad E_{\nu} > 0.82 \text{ MeV} \quad (\text{Homestake})$$

$$\nu_e d \rightarrow p p e^- (p n \nu_e), \nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^- \quad E_{\nu} > 2.2 \text{ MeV} \quad (\text{SNO})$$

$$\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^- \quad E_{\nu} > 5.5 \text{ MeV} \quad (\text{Superkamiokande})$$

– Alle beobachten ein Defizit an Sonnen-Neutrinos im Vergleich zum SSM.

Total Rates: Standard Model vs. Experiment  
Bahcall-Pinsonneault 2000



– 1SNU = ein  $\nu_e$ -Einfang pro sec in  $10^{36}$  Target-Atomen.

– Die **Echzeit** Experimente messen im Wesentlichen den <sup>8</sup>B-Fluss, die **radiochemischen** Experimente sehen auch <sup>7</sup>Be-Neutrinos und für <sup>71</sup>Ga sogar *pp*- und *pep*-Neutrinos.

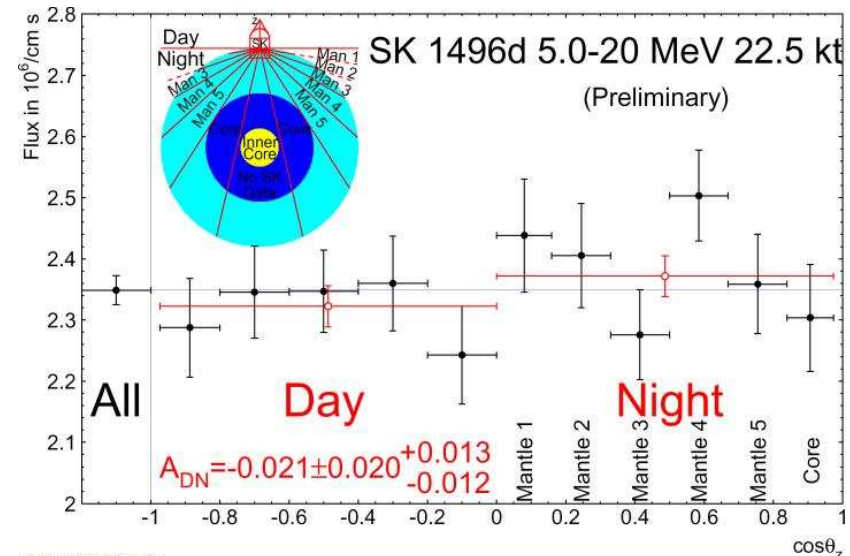
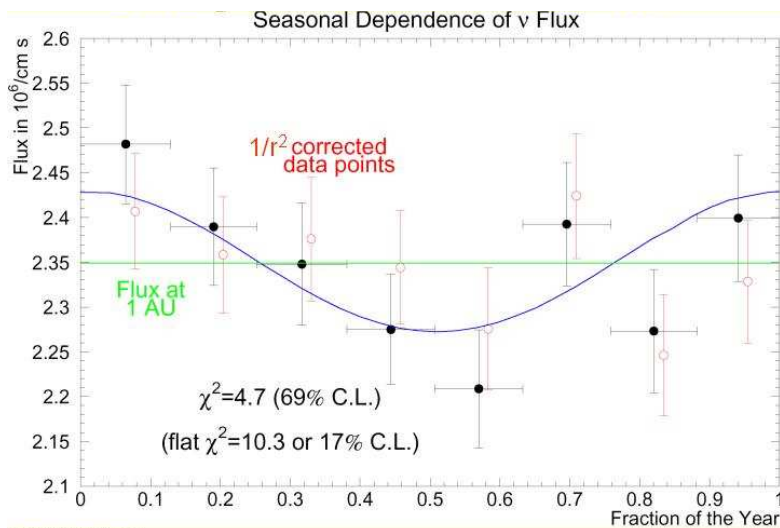
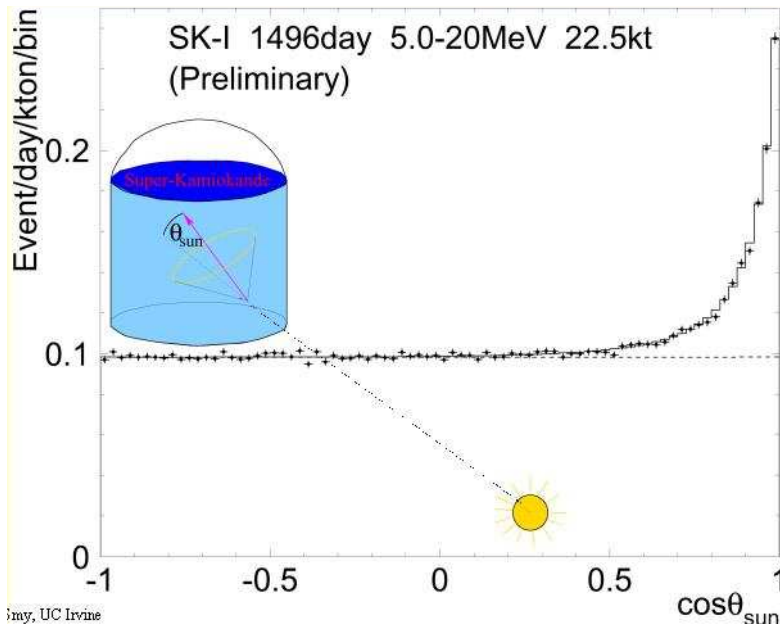
**Es werden zu wenig  $\nu_e$  gesehen.**





# Sonnen-Neutrinos in Super-Kamiokande

- Bei etwa 15 Ereignissen pro Tag ist die Neutrino-Richtung mit  $\nu_e$  von der Sonne verträglich.
- Die jährliche Variation ist mit der Exzentrizität der Bahn der Erde um die Sonne verträglich.
- Es gibt keinen signifikanten Tag-Nacht Effekt, also kein MSW Effekt für Sonnen-Neutrinos in der Erde.

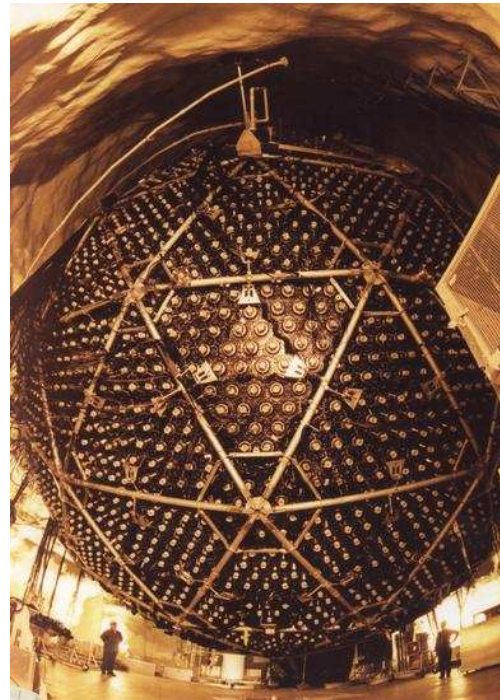
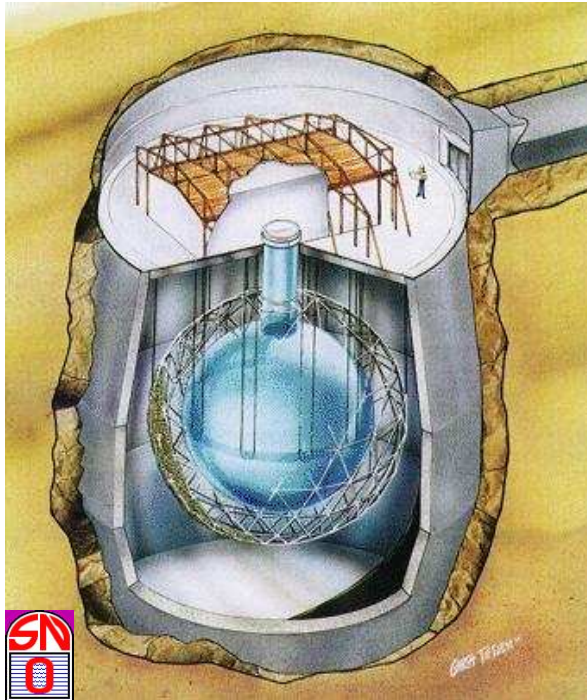


**Die Sonne ist klar sichtbar in ihrem Neutrino-'Licht'.**



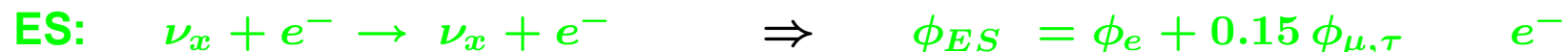
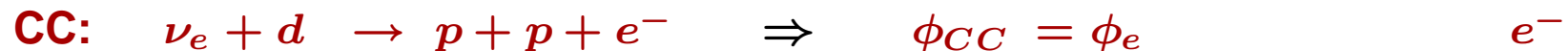


# Das Sudbury Neutrino Observatory - SNO



- Die Überdeckung ist 6100 mWe.
- Das sensitive Material sind 1000 t schweres Wasser,  $D_2O$ . Das Wasser befindet sich in einer durchsichtigen Acryl-Kugel von  $R_{AV} = 6$  m Radius und wird mit 9456 PMTs beobachtet.
- Die Kugel befindet sich in einer zweiten Kugel mit  $R = 8.9$  m und einem Stahl-tank. Beide sind mit  $H_2O$  gefüllt.

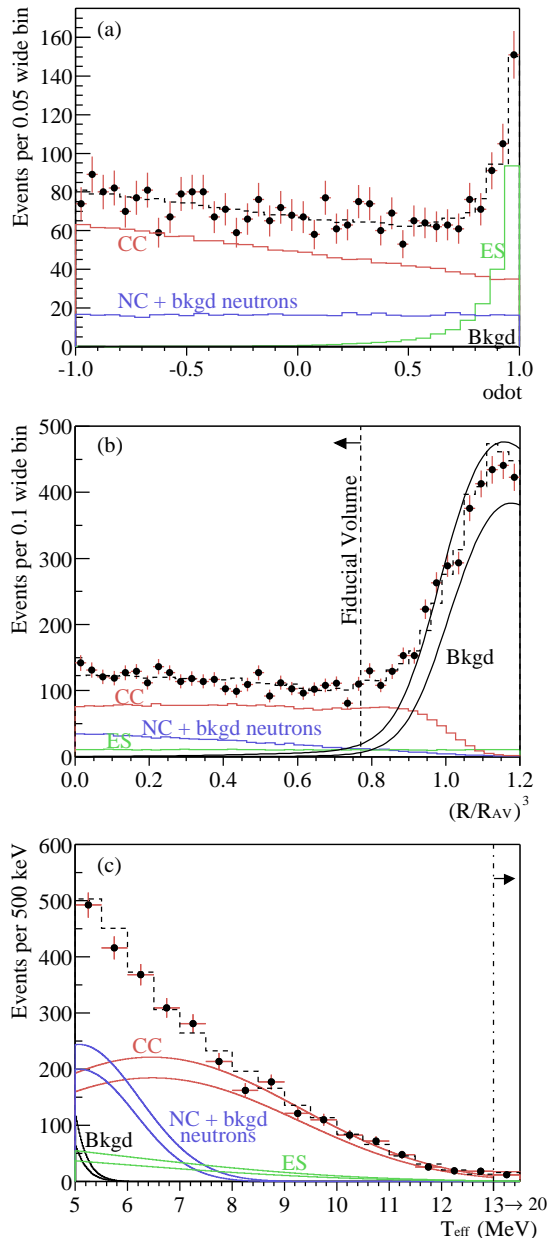
– Der Nachweis der  $^8B$  Neutrinos geschieht über die folgenden Reaktionen:



**Durch geeignete Kombination der Messungen lassen sich die zwei Flüsse bestimmen.**



# SNO - die Datenanalyse



- Der Untergrund stammt von kosmischer Strahlung und natürlicher Radioaktivität ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ).
- Die drei Messgrößen sind der Zenitwinkel,  $\cos \theta_{\odot}$ , der Radius,  $R/R_{AV}$ , und die effektive kinetische Energie,  $T_{\text{eff}}$ .
- Der Untergrund und die drei Reaktionen haben alle unterschiedliche Verteilungen in diesen Variablen und werden simultan, unter Benutzung der Effizienzen, angefitet.
- Das Resultat der Anpassung ist:

Alle:  $N = 2928$        $[\phi] = 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

**CC:**  $N = 1968$        $\phi_{CC} = 1.76 \begin{matrix} +0.06 \\ -0.05 \end{matrix} (\text{stat}) \begin{matrix} +0.09 \\ -0.09 \end{matrix} (\text{sys})$

**NC:**  $N = 577$        $\phi_{NC} = 5.09 \begin{matrix} +0.44 \\ -0.43 \end{matrix} (\text{stat}) \begin{matrix} +0.46 \\ -0.43 \end{matrix} (\text{sys})$

**ES:**  $N = 264$        $\phi_{ES} = 2.39 \begin{matrix} +0.24 \\ -0.23 \end{matrix} (\text{stat}) \begin{matrix} +0.12 \\ -0.12 \end{matrix} (\text{sys})$

- Aus diesen Messungen folgen dann  $\phi_e$  und  $\phi_{\mu, \tau}$ .

**Die erste Trennung von NC und CC-Prozessen der  $\nu_{\odot}$**

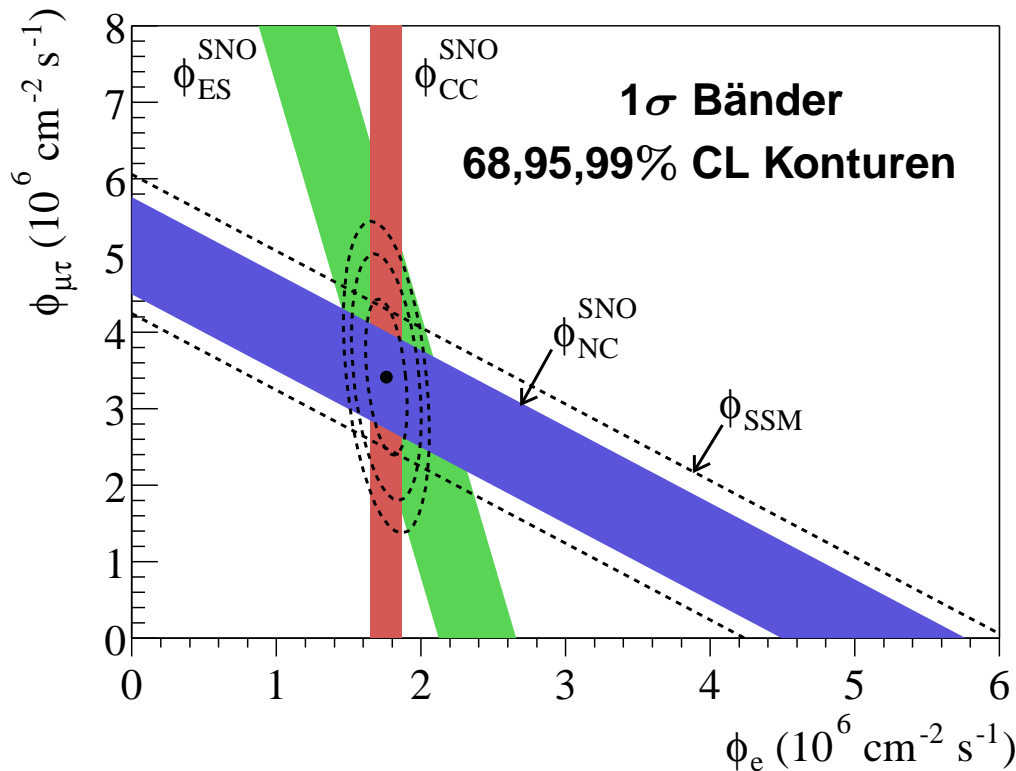


# SNO - die Messung der Neutrino-Flüsse in D<sub>2</sub>O

$$\phi_{CC} = \phi_e$$

$$\phi_{NC} = \phi_e + \phi_{\mu,\tau}$$

$$\phi_{ES} = \phi_e + 0.15 \phi_{\mu,\tau}$$



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

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

- Das SNO Resultat für die ES Reaktion  $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$  ist konsistent mit dem SK Wert von  $\phi_{ES}^{SK} = 2.32 \pm 0.09$

**Das bedeutet das SNO funktioniert.**

- Falls nur  $\nu_e$  bei SNO eintreffen gilt  $\phi_{NC} = \phi_{CC} = \phi_{ES}$ . Der gemessene  $\phi_{\mu,\tau}$  Fluss ist aber  $5.3\sigma$  von Null verschieden.

**Das ist der Beweis der  $\nu_e$ -Oszillationen.**

- Der totale Fluss der einfallenden Neutrinos ist  $\phi_{NC} = 5.09^{+0.44}_{-0.43} (\text{stat})^{+0.46}_{-0.43} (\text{sys})$

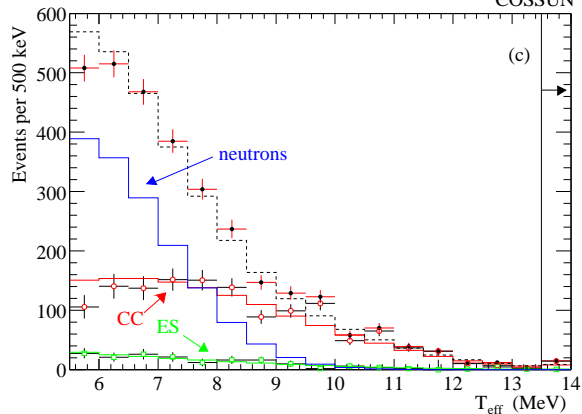
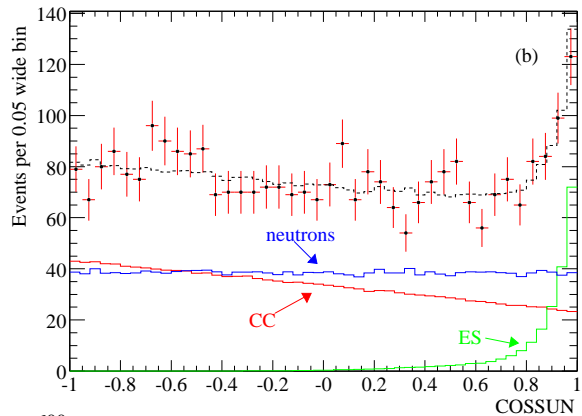
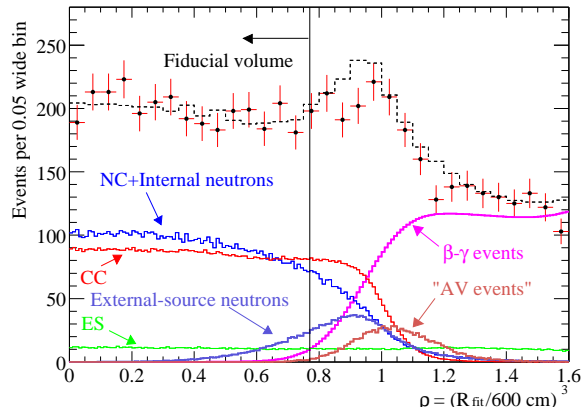
Die SSM Vorhersage ist  $\phi_{NC} = 5.05^{+1.01}_{-0.81}$

**Diese Übereinstimmung ist ein Triumph des SSM.**

**Das Sonnen-Neutrino Rätsel ist gelöst**



# SNO - die Messung der Neutrino-Flüsse, die Salzphase



- Durch Zugabe von 2t NaCl wird die Effizienz für die Neutroneneinfangreaktion erhöht. Der Einfang erfolgt nun an D<sub>2</sub> und Cl. Dadurch lässt sich  $\phi_{NC}$  genauer messen.
- Der Untergrund nimmt zum Rand hin stark zu, und kommt von externen Neutronen,  $\beta$  und  $\gamma$  Strahlern, und von dem inneren Acryltank (AV).
- Die Spektren der drei Reaktionen sind sehr verschieden.
- Das Resultat der Anpassung ist:

Alle:	$N = 2939$	$[\phi] = 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
CC:	$N = 1340$	$\phi_{CC} = 1.70^{+0.07}_{-0.07}(\text{stat})^{+0.09}_{-0.10}(\text{sys})$
NC:	$N = 1344$	$\phi_{NC} = 4.90^{+0.24}_{-0.24}(\text{stat})^{+0.29}_{-0.27}(\text{sys})$
ES:	$N = 170$	$\phi_{ES} = 2.13^{+0.29}_{-0.28}(\text{stat})^{+0.15}_{-0.08}(\text{sys})$

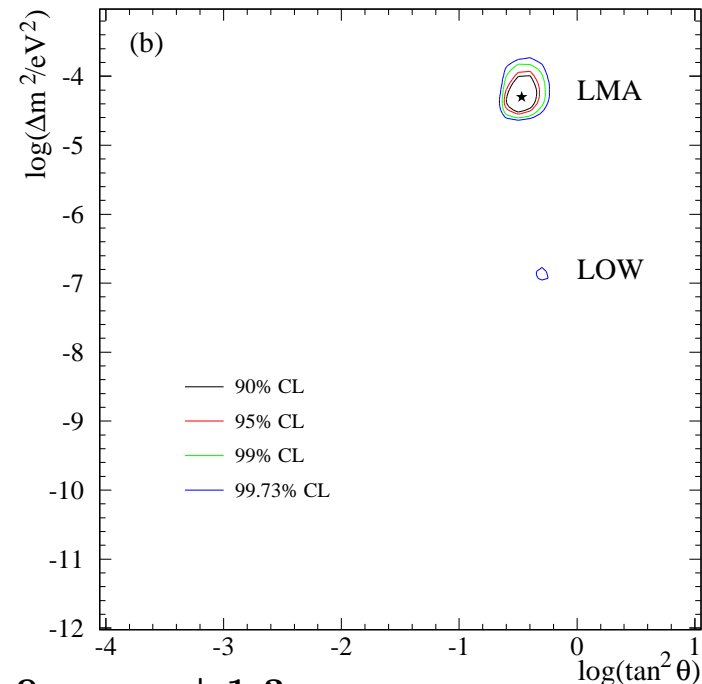
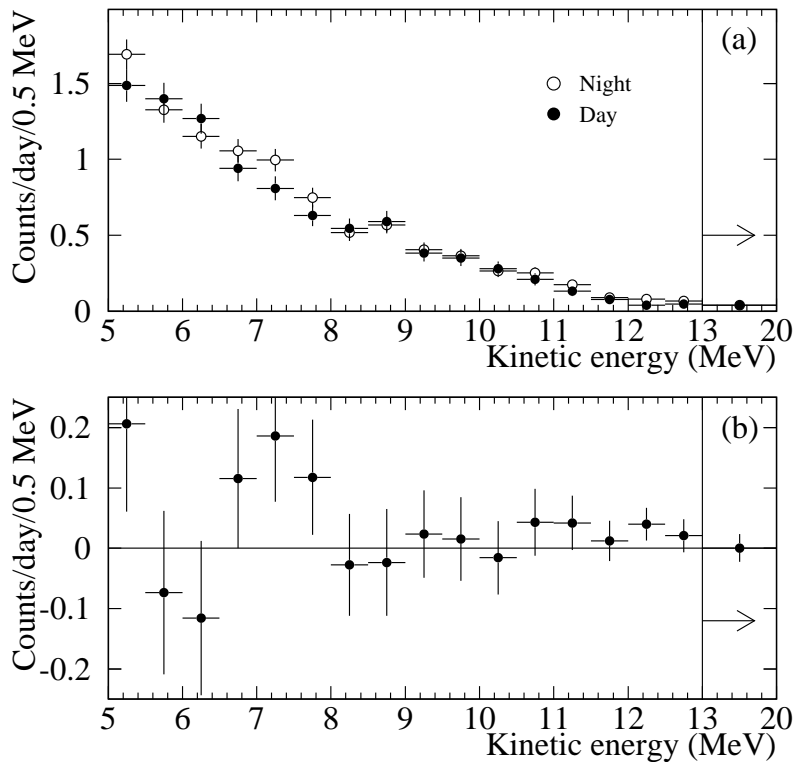
**Eine konsistente und genauere Messung der NC Reaktion.**



# SNO - die Tag/Nacht Asymmetrie

- Die Tag/Nacht Asymmetrie testet den MSW Effekt der  $\nu_{\odot}$  beim Durchgang durch die Erde.

- Die erlaubten Bereiche des SNO Experiments.
- Unter Einbeziehung der Resultate von Homestake Gallex/GNO, Sage und der Tag/Nacht Asymmetrie von SK, sowie den SSM Flüssen für  $pp$ ,  $pep$  und  ${}^7\text{Be}$  Neutrinos schrumpft der erlaubte Bereich.



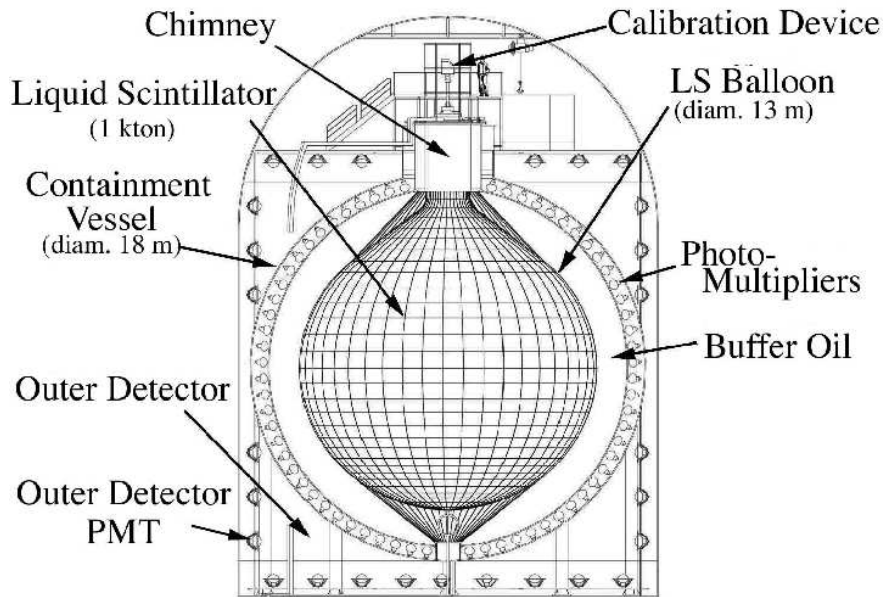
- Es wurde eine kleine von Asymmetrie  $A_e = 7.0 \pm 4.9 \text{ (stat)} \pm 1.3 \text{ (sys)}$  gesehen.

**Die Large Mixing Angle Lösung zur Erklärung der  $\nu_{\odot}$ -Oszillationen wird stark bevorzugt.**

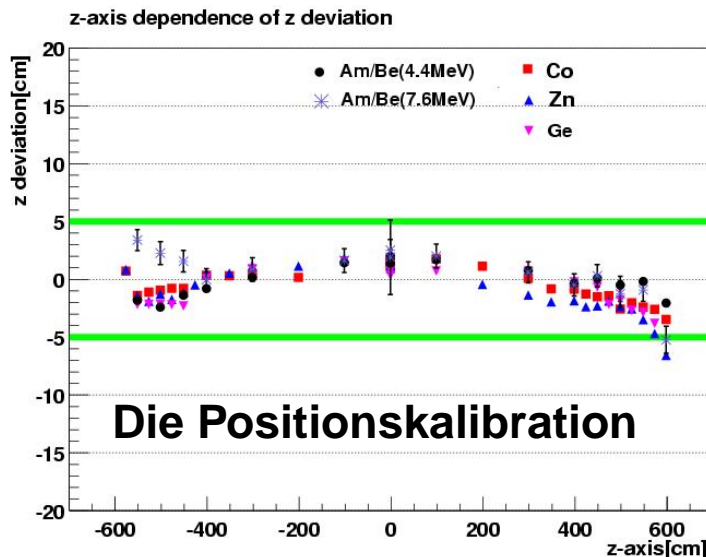




# KamLAND - der Test mit Reaktor-Neutrinos



- Der **Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detektor** untersucht  $\bar{\nu}_e$ -Reaktor Neutrinos die zu 80% aus 26 japanischen Kernreaktoren stammen die sich in einem Abstand von  $L = 138 - 214$  km mit  $\langle L \rangle = 180$  km befinden.
- Das sensitive Material ist ein flüssiger Szintillator mit 1 kt Masse, der von 1879 PMTs beobachtet wird.
- Die Nachweis-Reaktion ist  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$  mit einer Schwellenenergie von  $E_\nu > 1.8$  MeV.
- Das Signal ist ein promptes  $e^+$  in einer verzögerten Koinzidenz mit einem 2.2 MeV Photon aus dem Neutron-Einfang am Proton.
- Leistung und Abbrand der Reaktoren muss genau bekannt sein.
- Die Vorhersage ist  $365.2 \pm 23.7$   $\bar{\nu}_e$ -Signal- und  $7.5 \pm 1.3$  Untergrund-Ereignisse.

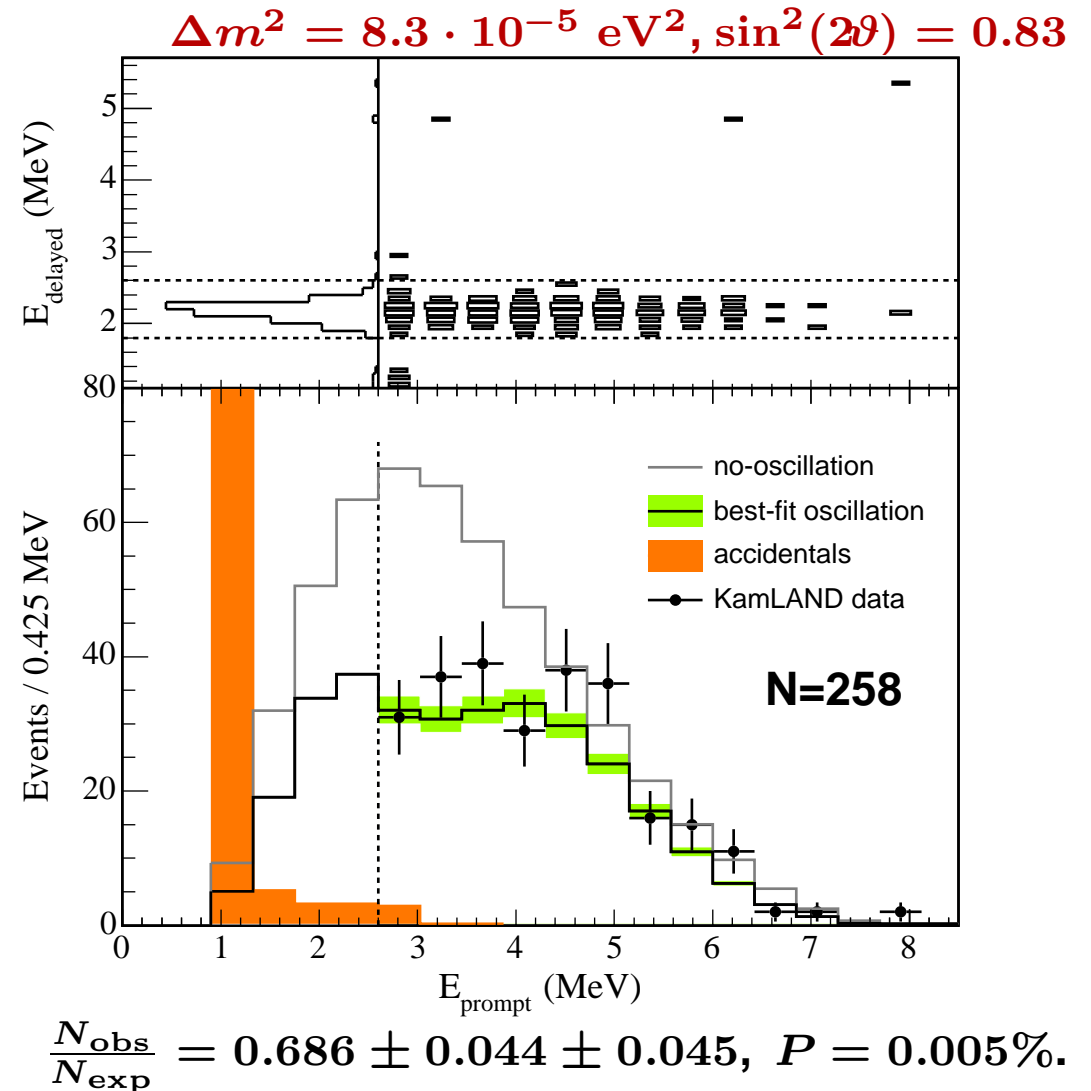
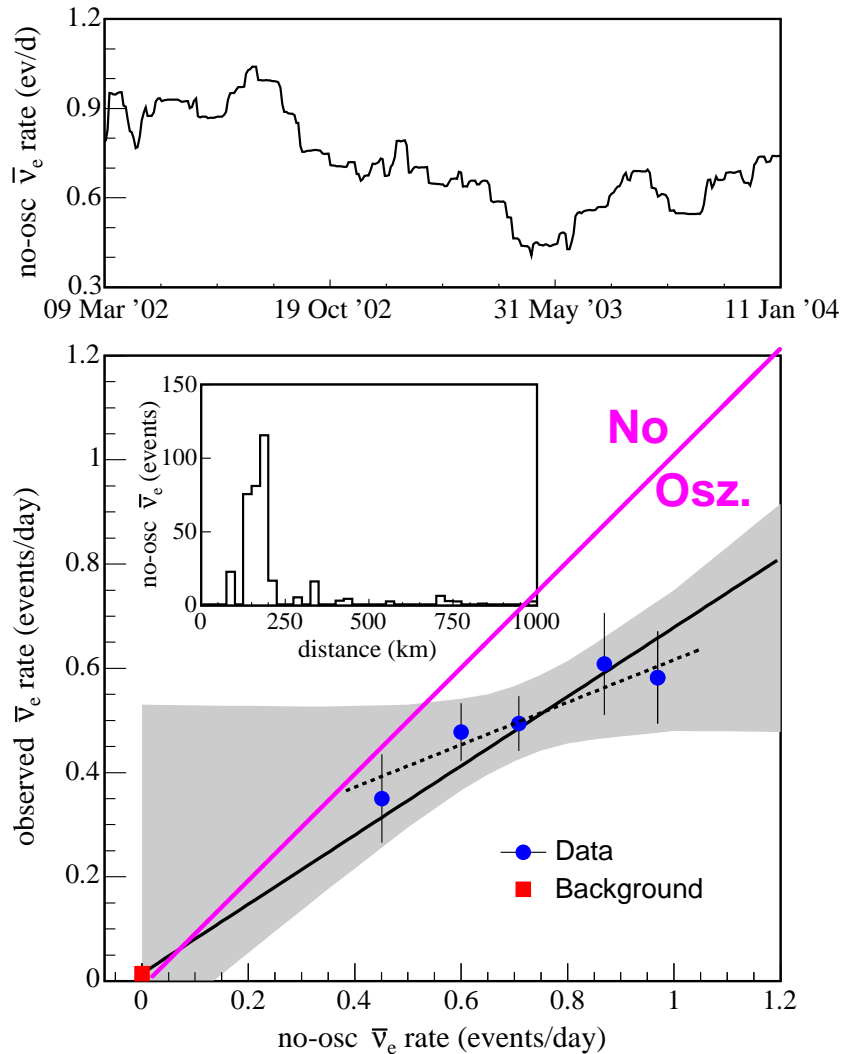


**KamLAND erlaubt den Test der  $\nu_\odot$ -Oszillationen.**





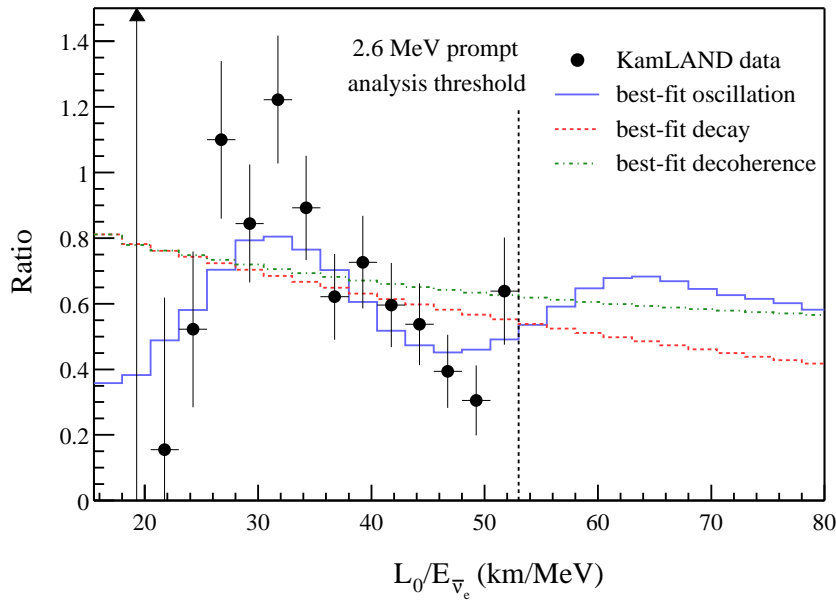
# KamLAND - die Ereignisverteilungen



**Erste klare Messung des Verschwindens von  $\bar{\nu}_e$  Reaktorneutrinos.**



# KamLAND - das Resultat



– Das Verhältnis der 'L/E' Verteilungen der gesehen und erwarteten Ereignisse ohne  $\nu$ -Oszillationen zeigt eine klare Oszillationssignatur, konsistent mit Neutrinooszillationen für einen fiktiven Reaktor in 180 km Entfernung.

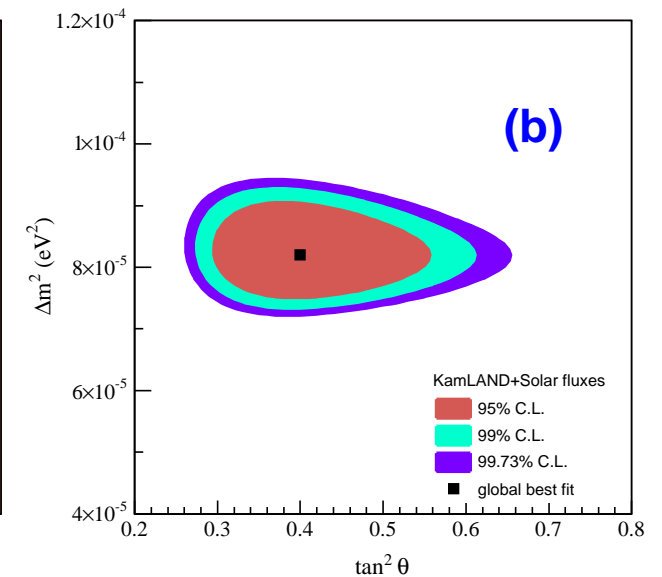
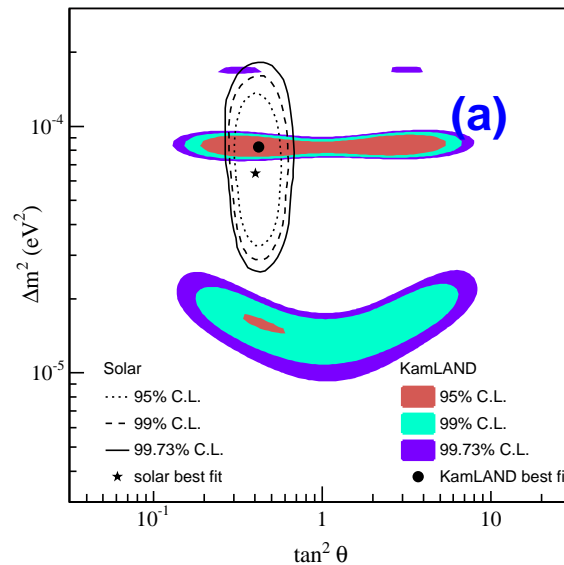
Ausschlußgrenzen für:

(a) KamLAND (farbige Gebiete)

+ Sonnenneutrinos (Linien)

(b) Mit zusätzlicher Forderung von

CPT Invarianz



– Der beste Fit:  $\Delta m^2 = 8.2^{+0.6}_{-0.5} \cdot 10^{-5} eV^2$ ,  $\tan^2 \vartheta = 0.40^{+0.09}_{-0.07}$

**Reaktor  $\bar{\nu}_e$ -disappearance und Sonnen-Neutrino-Defizit sind miteinander verträglich.**



## Zusammenfassung

---

---

- Im Standardmodell sind die Neutrinos masselos. Eine endliche Neutrino-Masse erzwingt Physik jenseits des Standardmodells.
- Es konnten bis heute keine absoluten Neutrino-Massen bestimmt werden. Die Grenzen aus direkten Messungen sind  $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ ,  $m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}$  und  $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$ .
- Neutrino-Oszillationen können auftreten wenn mindestens ein Neutrino Masse hat und der Mischungswinkel endlich ist. Sie sind sensitiv auf quadratische Massendifferenzen,  $\Delta m_{ij}^2$ .
- LSND beobachtet das Auftreten  $\bar{\nu}_e$  in einem Strahl von  $\bar{\nu}_\mu$ . Dieses Resultat ist erklärbar durch  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ -Oszillationen mit  $\Delta m^2 > 10^{-1} \text{ eV}^2$  und  $10^{-3} < \sin^2(2\vartheta) < 1$ , konnte aber nicht durch andere Experimente bestätigt werden.
- In drei Experimenten wurde ein Defizit atmosphärischen  $\nu_\mu$ -Neutrinos, erklärbar durch  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ -Oszillationen, nachgewiesen. Der beste Fit an die Daten liefert  $\Delta m^2 \approx 10^{-3} \text{ eV}^2$  und  $\sin^2(2\vartheta) \approx 1$ .
- Fünf Experimente mit unterschiedlicher Technik sehen ein signifikantes Defizit von  $\nu_\odot$ . Das SSM ist in der Lage den Gesamtfluss  $\phi_e + \phi_{\mu,\tau}$  zu beschreiben. Auch dieses Ergebnis ist erklärbar durch  $\nu$ -Oszillationen. Dieses Resultat wurde durch das Verschwinden von  $\bar{\nu}_e$  Reaktor- Neutrinos, also einer Messung mit einer anderen Neutrino-Quelle, verifiziert. Der beste Fit an alle Daten liefert  $\Delta m^2 = 8.2 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$  und  $\sin^2(2\vartheta) = 0.90$ .
- Die Aufgabe zukünftige Experimente ist die genaue Bestimmung der Massendifferenzen,  $\Delta m_{ij}^2$ , und Mischungswinkel,  $\sin^2(2\vartheta_{ij})$ .