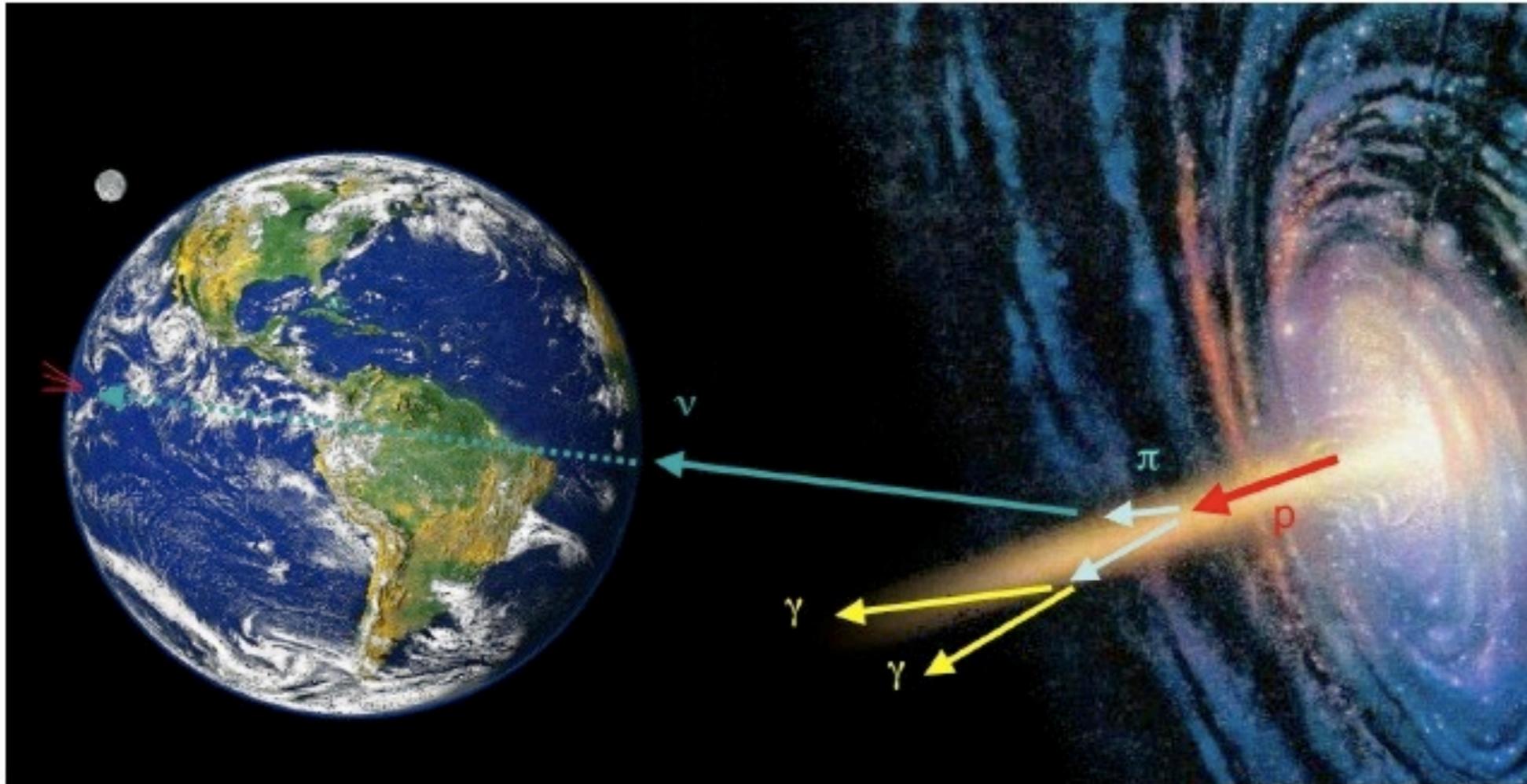


Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



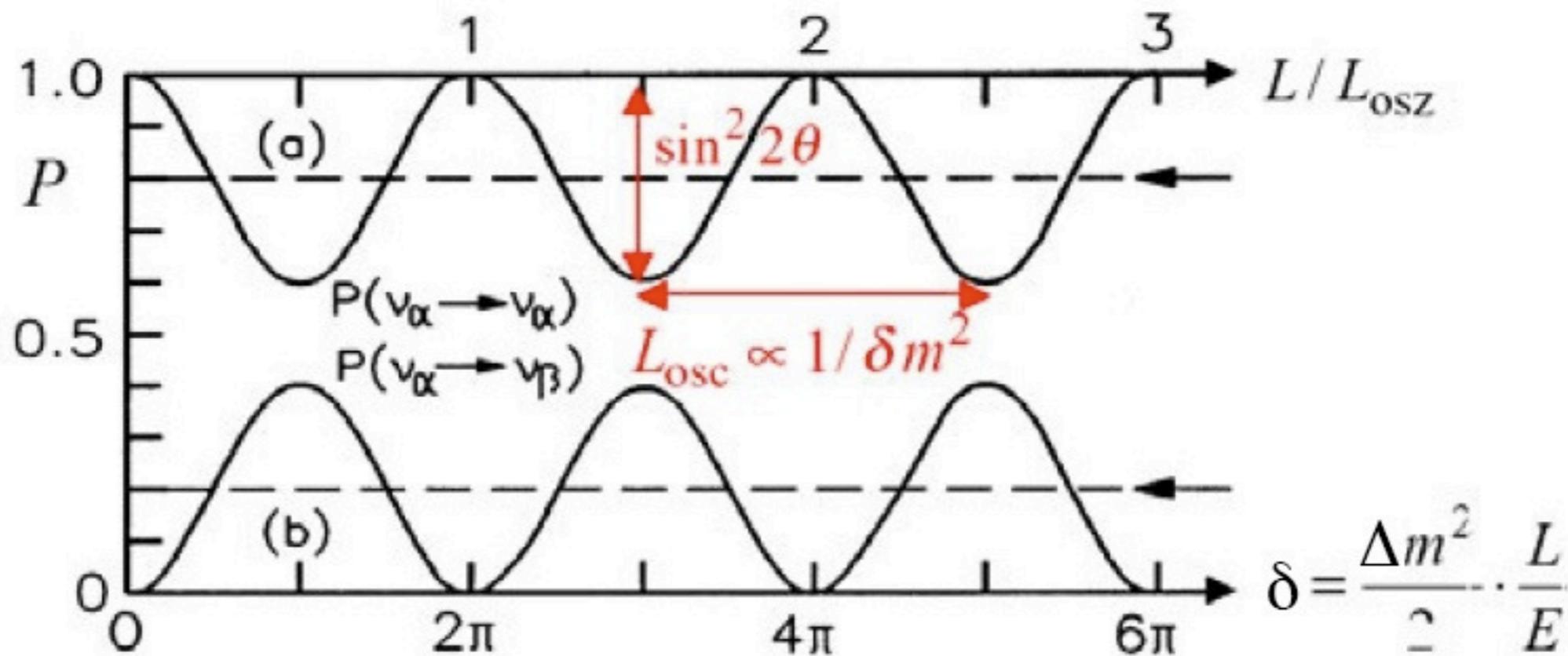
10. Neutrinos I - Solare & Reaktor-Neutrinos

24.06.2013



Kurze Erinnerung: Neutrino-Oszillationen

- Umwandlung von Neutrino flavors mit der Zeit - Massenunterschiede und Mischungswinkel bestimmen die Oszillation
 - Grosser Mischungswinkel = grosse Umwandlung
 - Grosser Massenunterschied = schnelle Oszillation



Kurze Erinnerung: Neutrino-Oszillationen

- Im zwei-Neutrino-Fall: Umwandlungswahrscheinlichkeit

$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L/\text{m}}{E/\text{MeV}} \right)$$

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$$

3-Neutrino-Fall: Drei Mischungswinkel, eine komplexe Phase

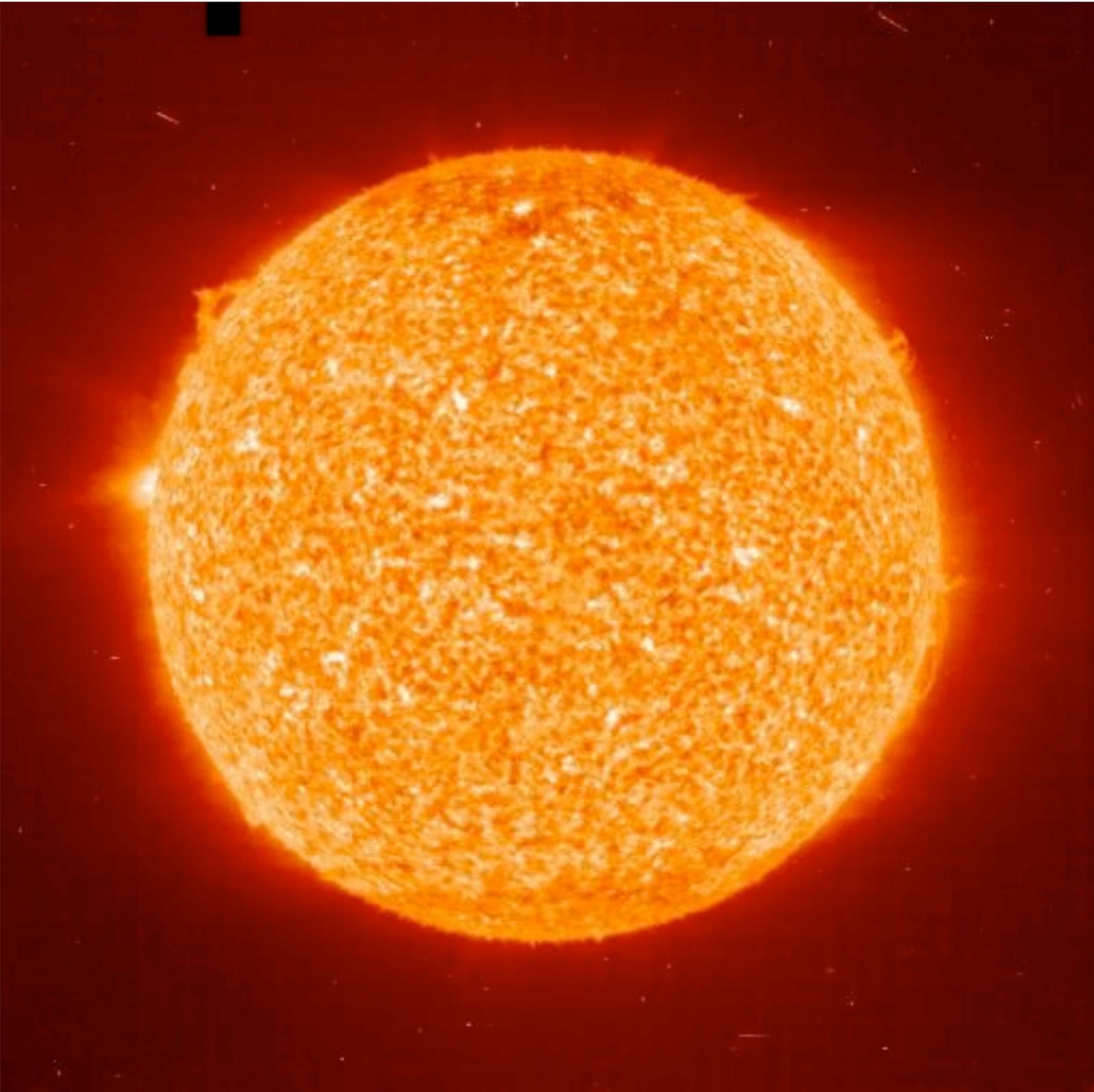
$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

CP-Verletzung im Bereich von Θ_{13}

$$= \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & \\ & 1 & s_{13} e^{-i\delta} \\ -s_{13} e^{i\delta} & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

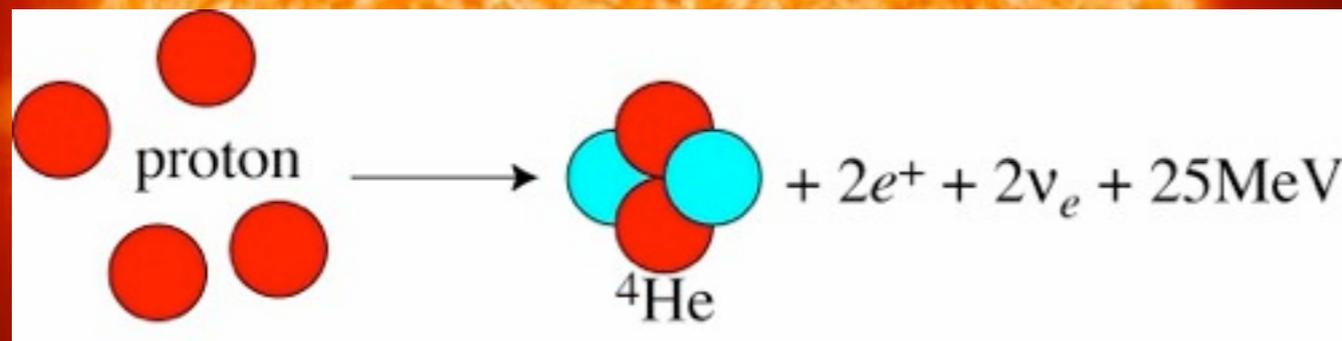
Neutrinos aus der Sonne

- Entstehen bei der Fusion von Wasserstoff in Helium (Umwandlung von Protonen in Neutronen)



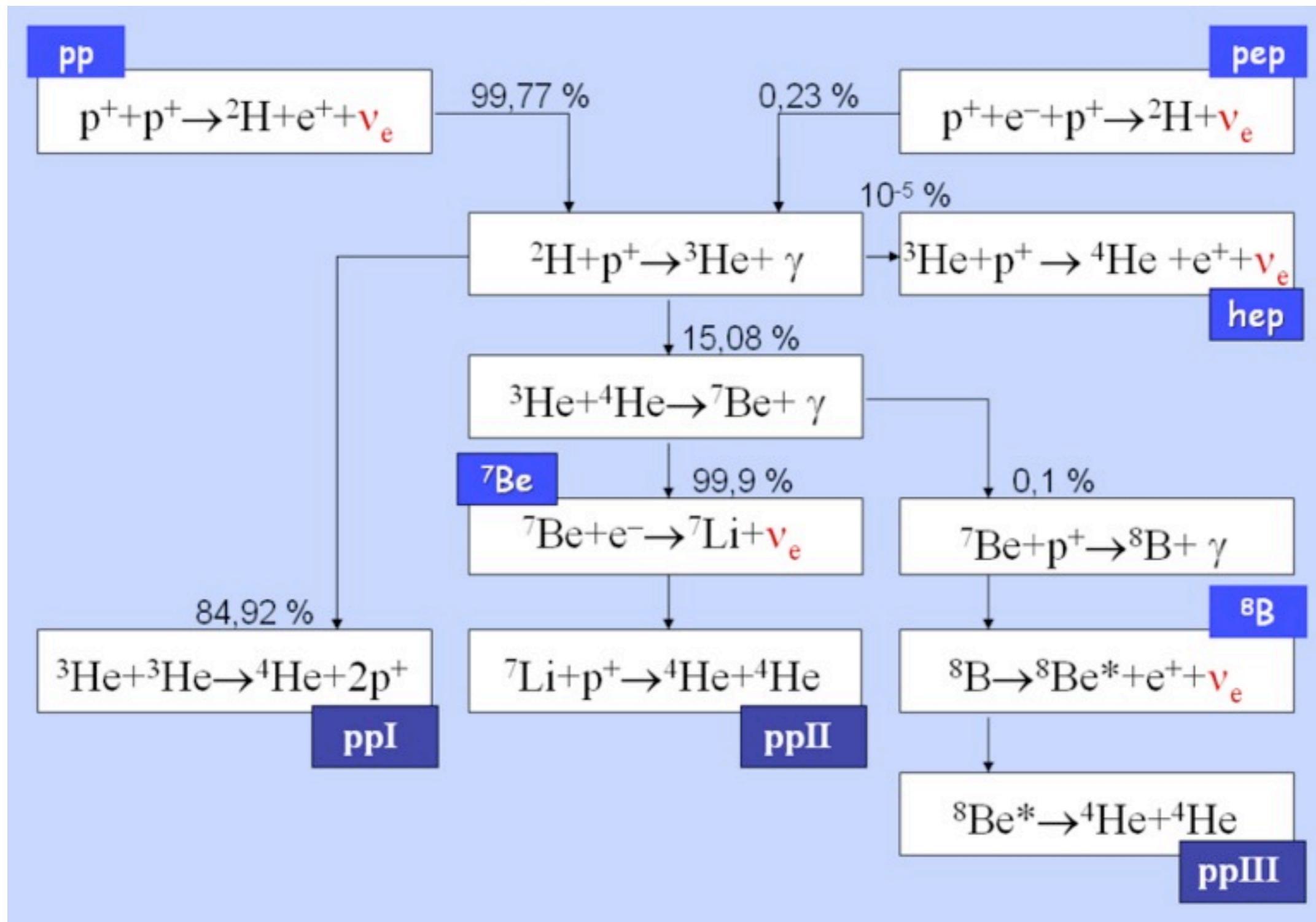
Neutrinos aus der Sonne

- Entstehen bei der Fusion von Wasserstoff in Helium (Umwandlung von Protonen in Neutronen)



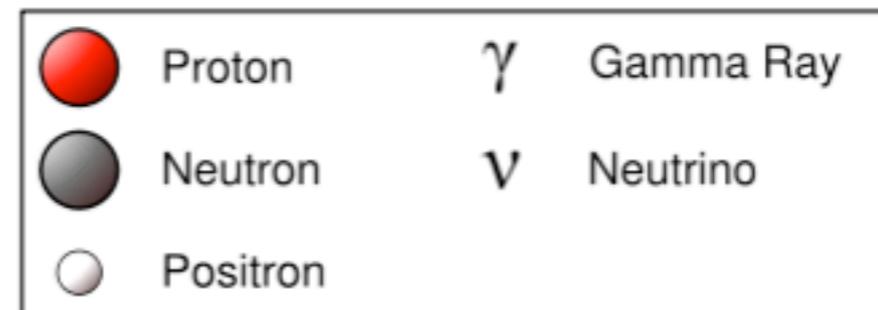
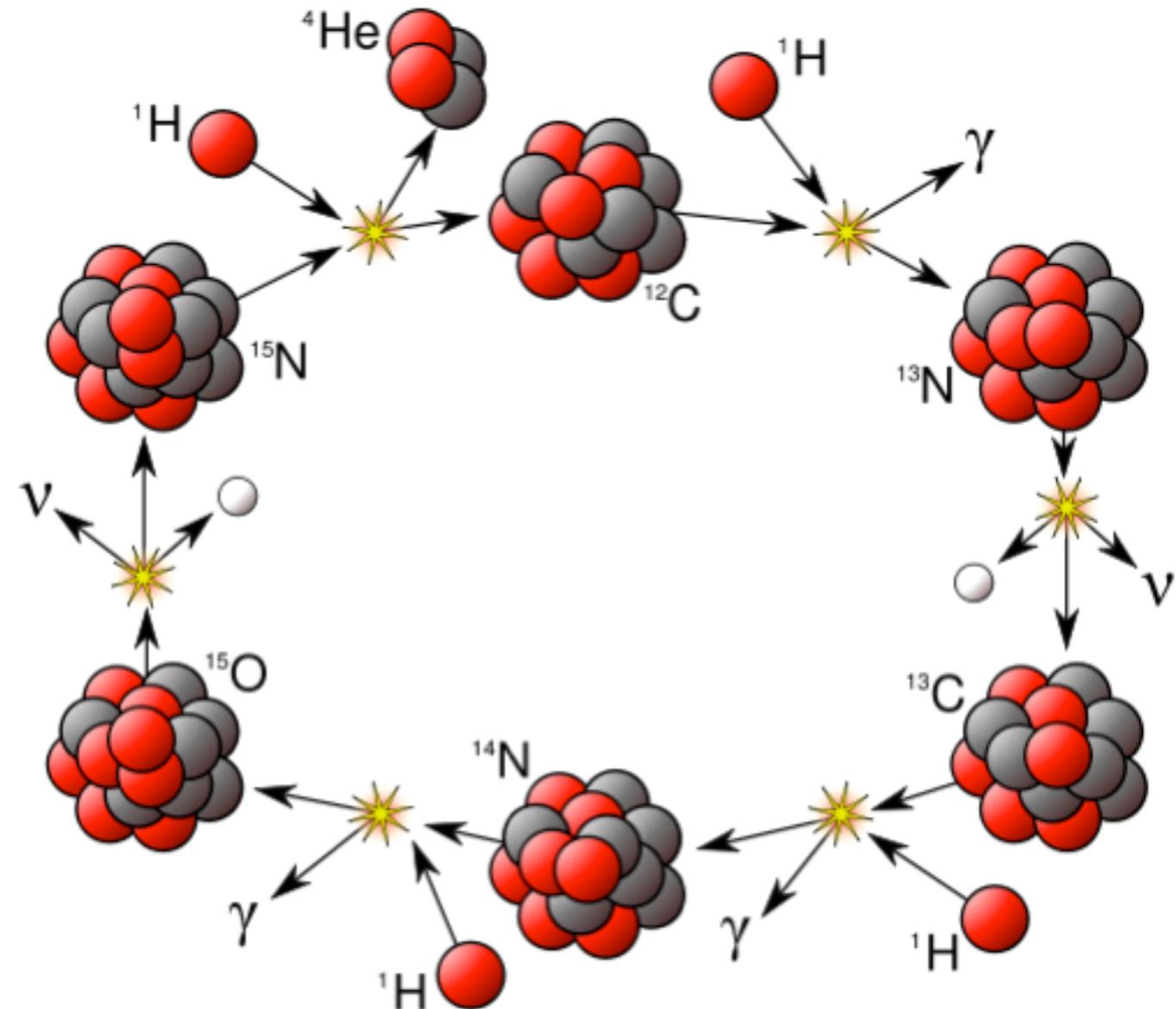
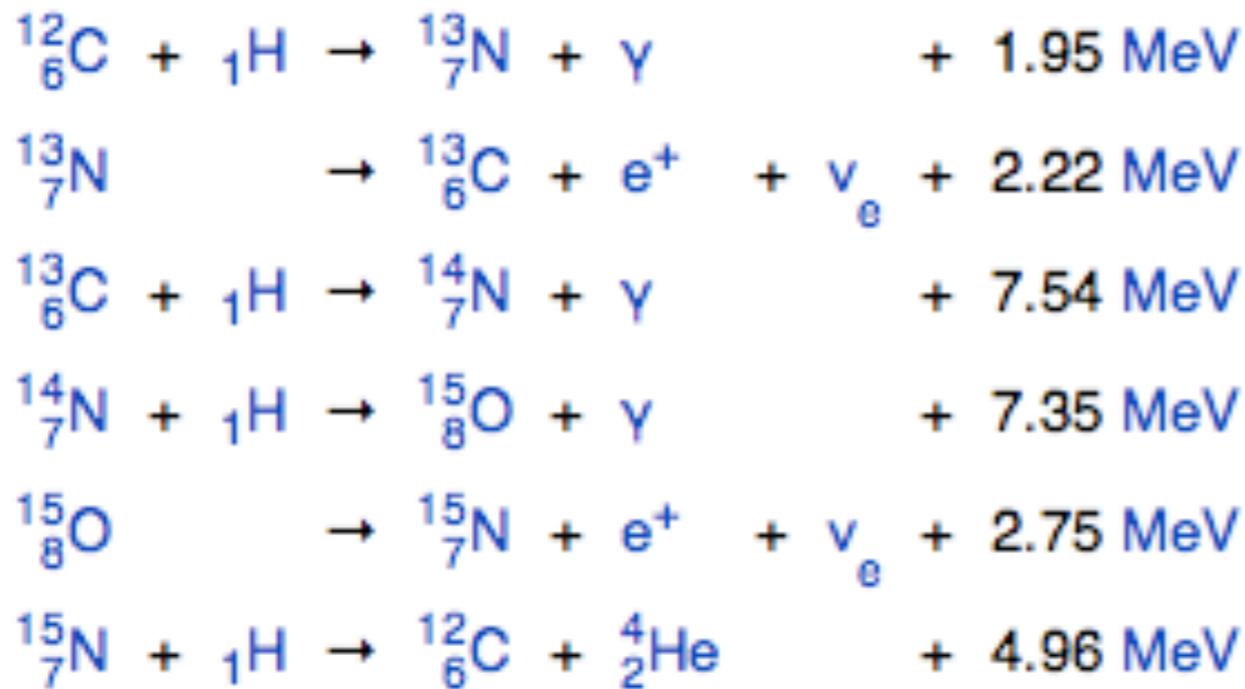
$$\Phi_\nu = \frac{2L_{\text{sun}}}{25\text{MeV}} \frac{1}{4\pi(1\text{AU})^2} = 7 \cdot 10^{10} \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Kernfusion in der Sonne - pp-Kette



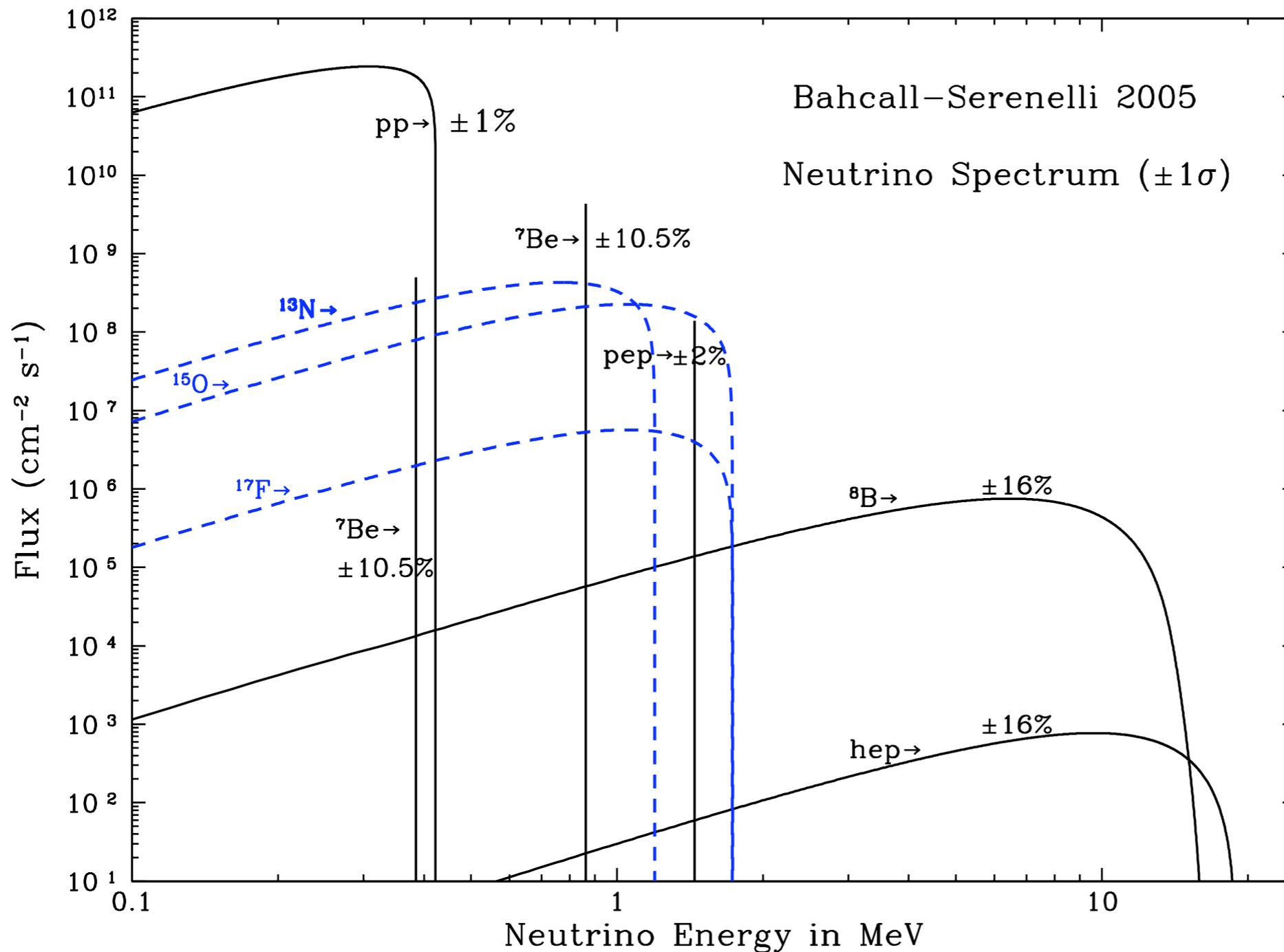
- Neutrino-Emission aus verschiedenen Reaktionen mit unterschiedlichen Energien

Kernfusion in der Sonne - CNO-Zyklus



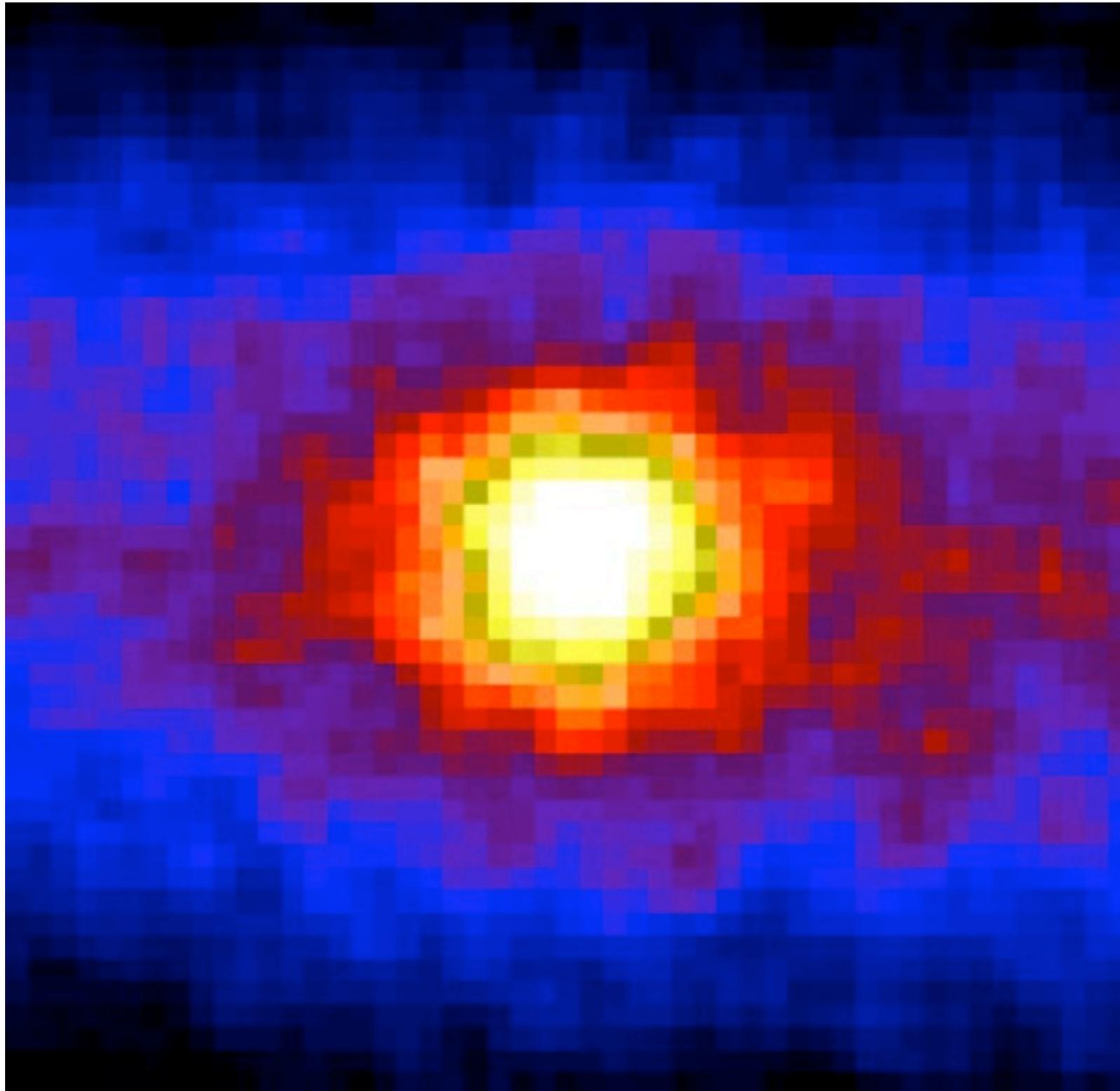
- Der CNO-Zyklus (Bethe-Weizsäcker) dominiert in schweren Sternen
- In der Sonne: ca. 1.7% des ${}^4\text{He}$ durch CNO, der Rest aus pp

Das Neutrino-Spektrum der Sonne



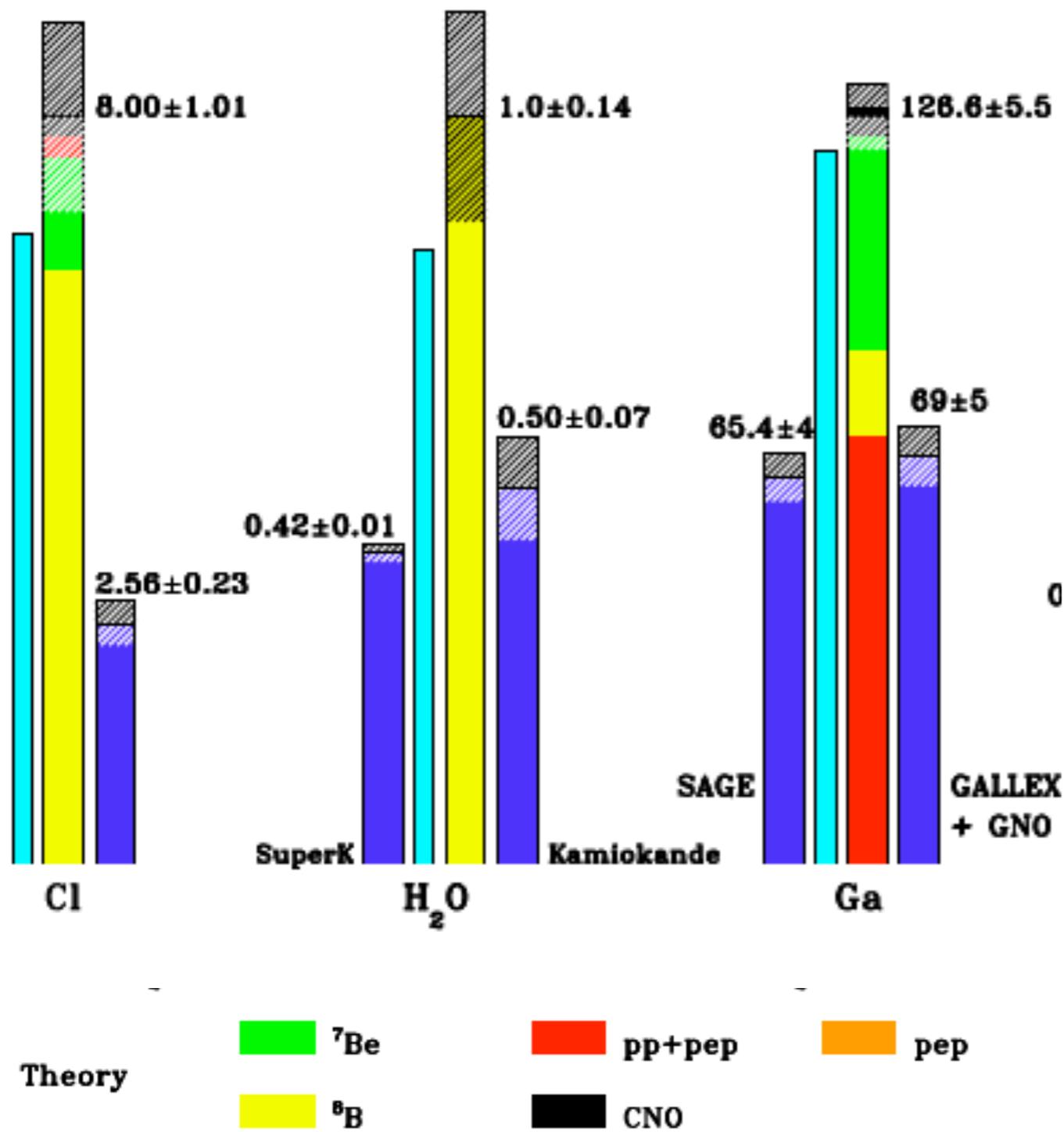
Die meisten Neutrinos sind bei niedriger Energie ($< \sim 400$ keV) !
Direkter Nachweis schwierig!

Das Neutrino-Bild der Sonne



- Gesehen mit Super-Kamiokande
 - ^8B Neutrinos, mit Cherenkov-Strahlung im Wasser (durch die resultierenden e^-) nachgewiesen: Gibt Richtungsinformation!

Das Solare Neutrino-Rätzel - Geschichte

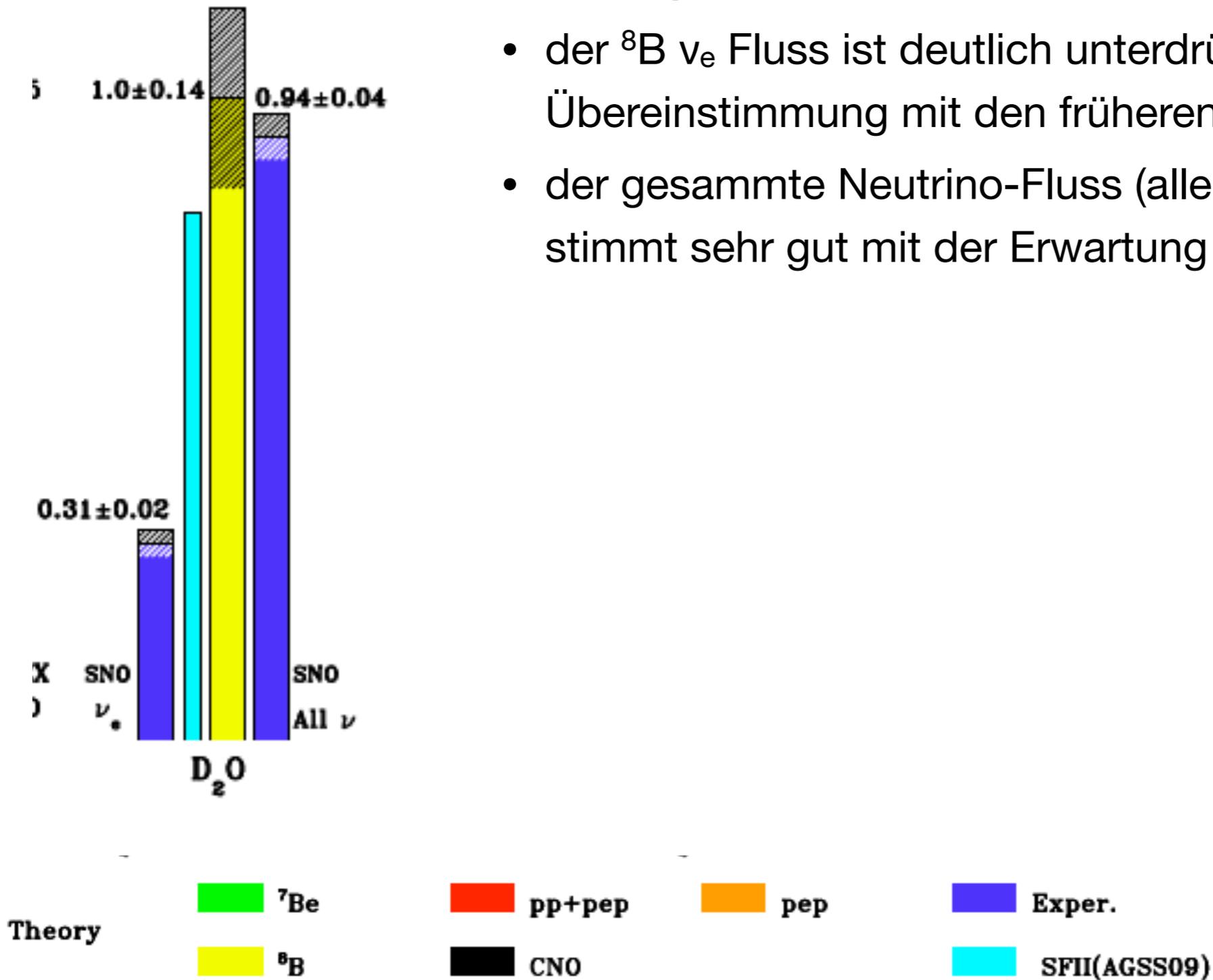


- Cl und Ga-Experimente sind “chemisch”: Erzeugung von Radio-Nukliden durch Neutrino-Exposition
 - Sensitivität für die einzelnen Neutrino-Quellen hängt von der Energieschwelle ab
- SuperK: Wasser-Cherenkov: Nur ^8B Neutrinos - hohe Energieschwelle
- ▶ Grosses Defizit beobachtet!

Das Solare Neutrino-Rätsel - Die Lösung

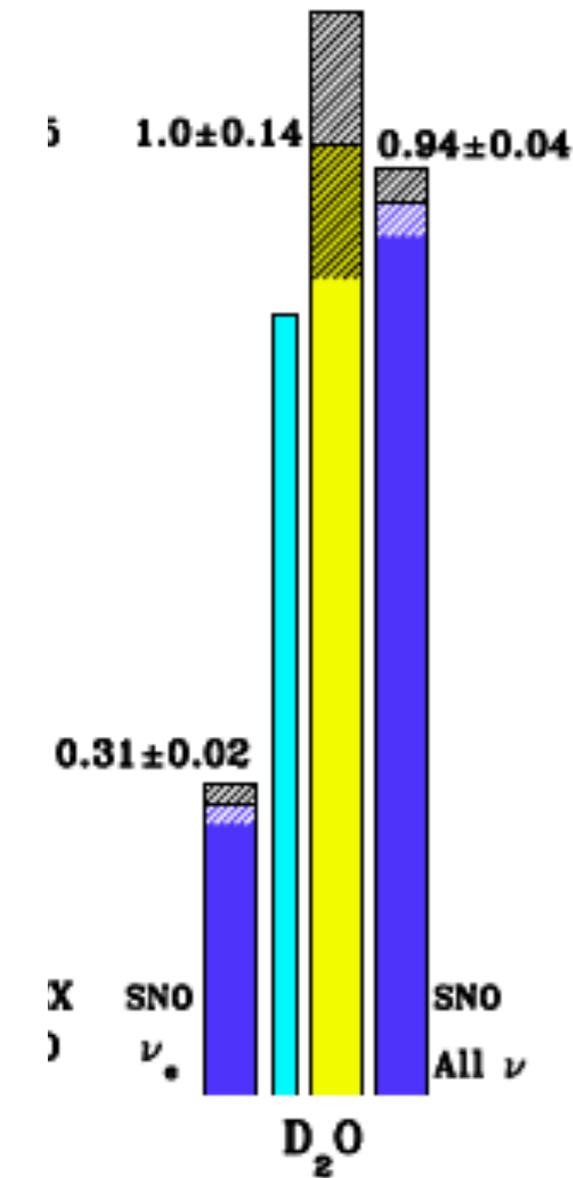
- Messung von SNO:

- der ^8B ν_e Fluss ist deutlich unterdrückt, in Übereinstimmung mit den früheren Experimenten
- der gesamte Neutrino-Fluss (alle Flavors, ^8B - Energie) stimmt sehr gut mit der Erwartung überein

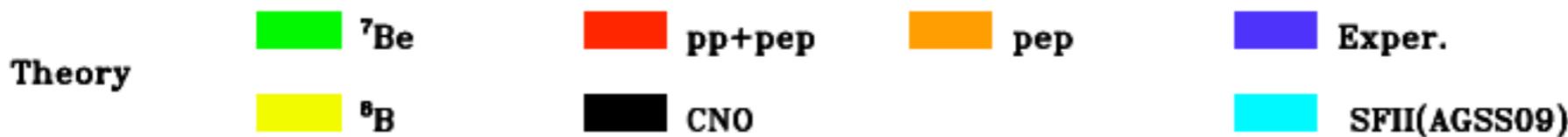


Das Solare Neutrino-Rätsel - Die Lösung

- Messung von SNO:
 - der ^8B ν_e Fluss ist deutlich unterdrückt, in Übereinstimmung mit den früheren Experimenten
 - der gesamte Neutrino-Fluss (alle Flavors, ^8B - Energie) stimmt sehr gut mit der Erwartung überein

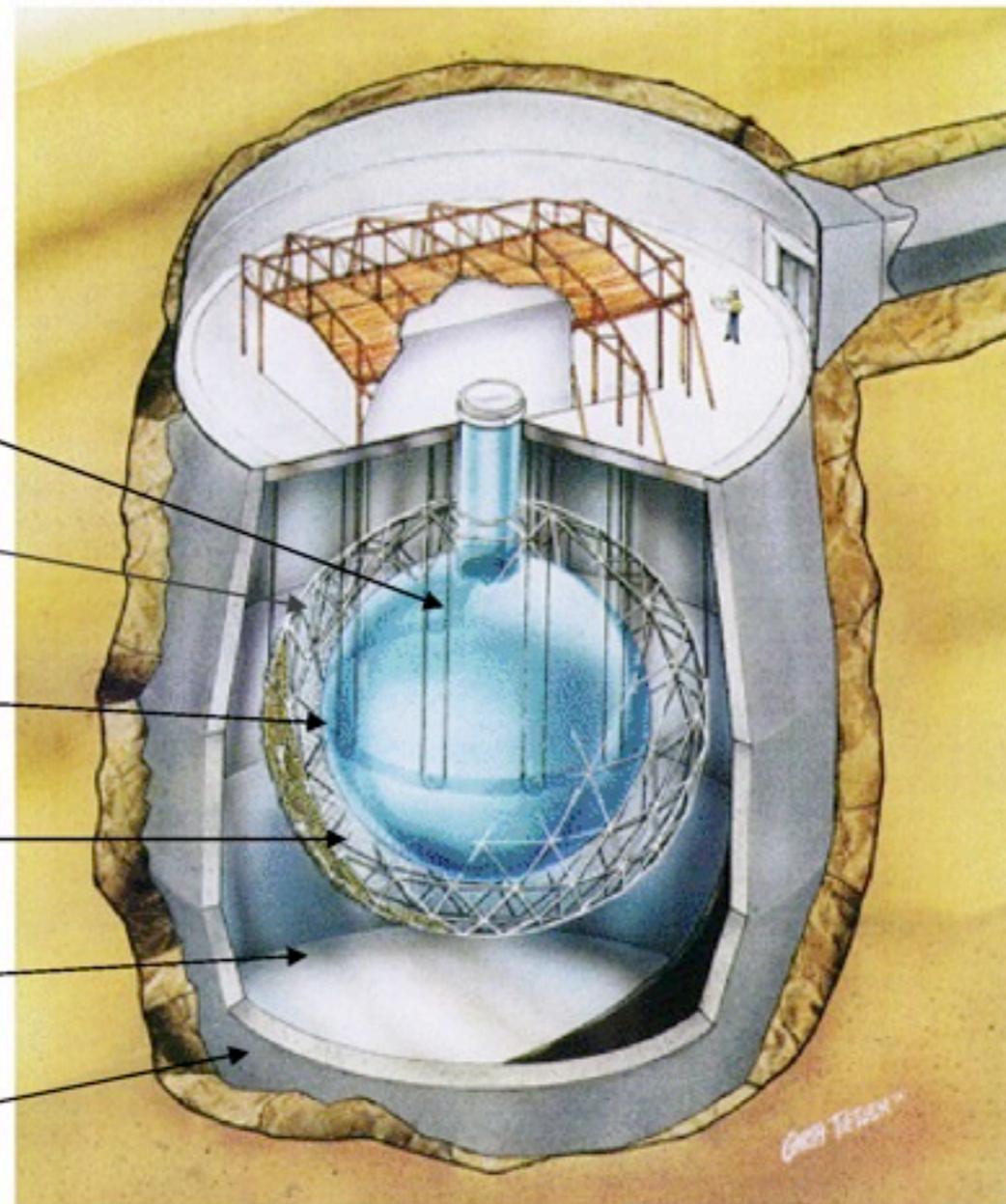
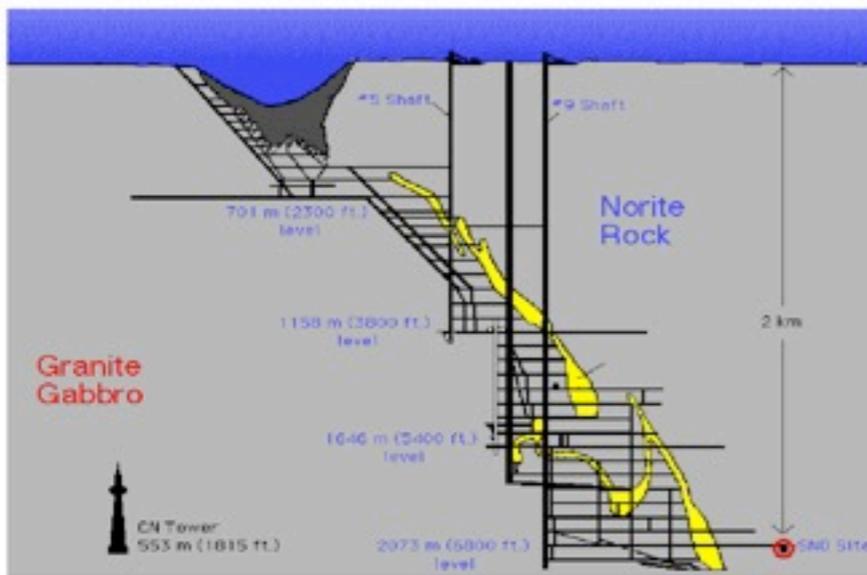


Beweist, dass die Neutrinos nicht verschwinden (oder fehlen), sondern sich in andere Flavors umwandeln, die von den ersten Experimenten nicht nachgewiesen werden konnten!



Die SNO-Messung - Wie es funktioniert

Sudbury Neutrino Observatory



Cherenkov -
Detektor mit
schwerem
Wasser

1000 tonnes D₂O

Support Structure
for 9500 PMTs,
60% coverage

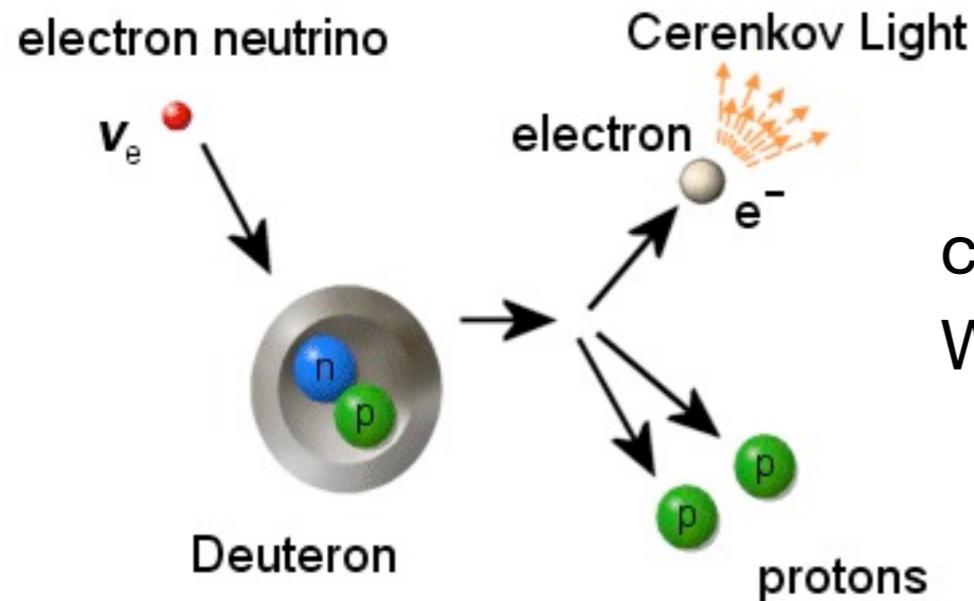
12 m Diameter
Acrylic Vessel

1700 tonnes Inner
Shielding H₂O

5300 tonnes Outer
Shield H₂O

Urylon Liner and
Radon Seal

Die SNO-Messung - Wie es funktioniert

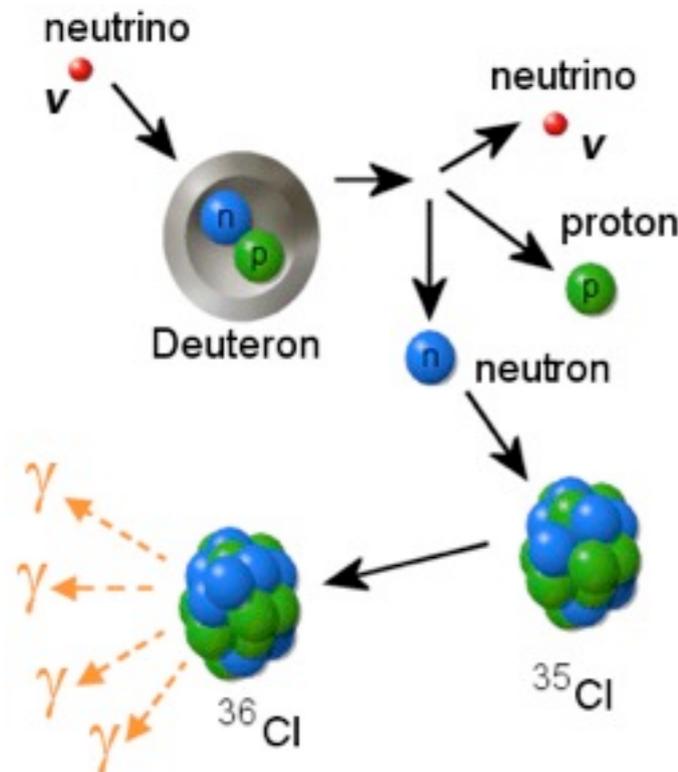


charged current:
W-Austausch

- Nur Elektron-Neutrinos:
Für alle anderen ist die Energieschwelle zu hoch (das entsprechende Lepton muss erzeugt werden)

$$\Phi_{CC}^{SNO} = 1.59_{-0.07}^{+0.08} {}_{-0.08}^{+0.06} \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

- Geht gleichermassen für alle Neutrino-Flavors
 - Zusatz von Cl (Kochsalz), um auf die entstehenden Neutronen sensitiv zu sein

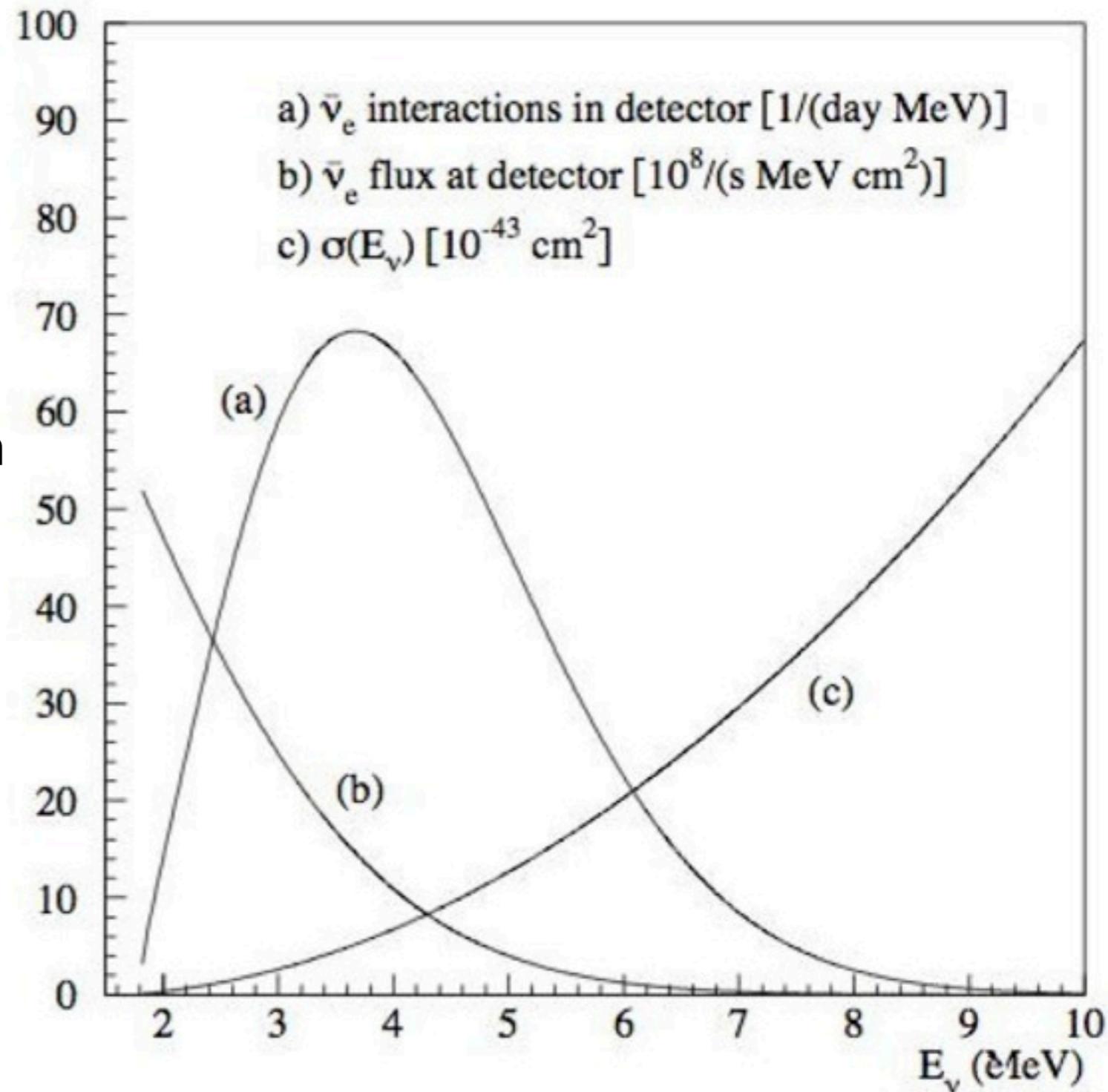


neutral current:
Z-Austausch

$$\Phi_{NC}^{SNO} = 5.21 \pm 0.27 \pm 0.38 \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

Neutrinos aus Reaktoren

- Entstehung neutronenreicher instabiler Isotope in der Uranspaltung
- ▶ Beta-Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu_e$
- Spektrum dominiert von niedrigen Energien
- Wirkungsquerschnitt steigt mit der Energie, hohe Energieüberträge sind einfacher zu nachzuweisen: Maximum im Detektor bei ~ 4 MeV

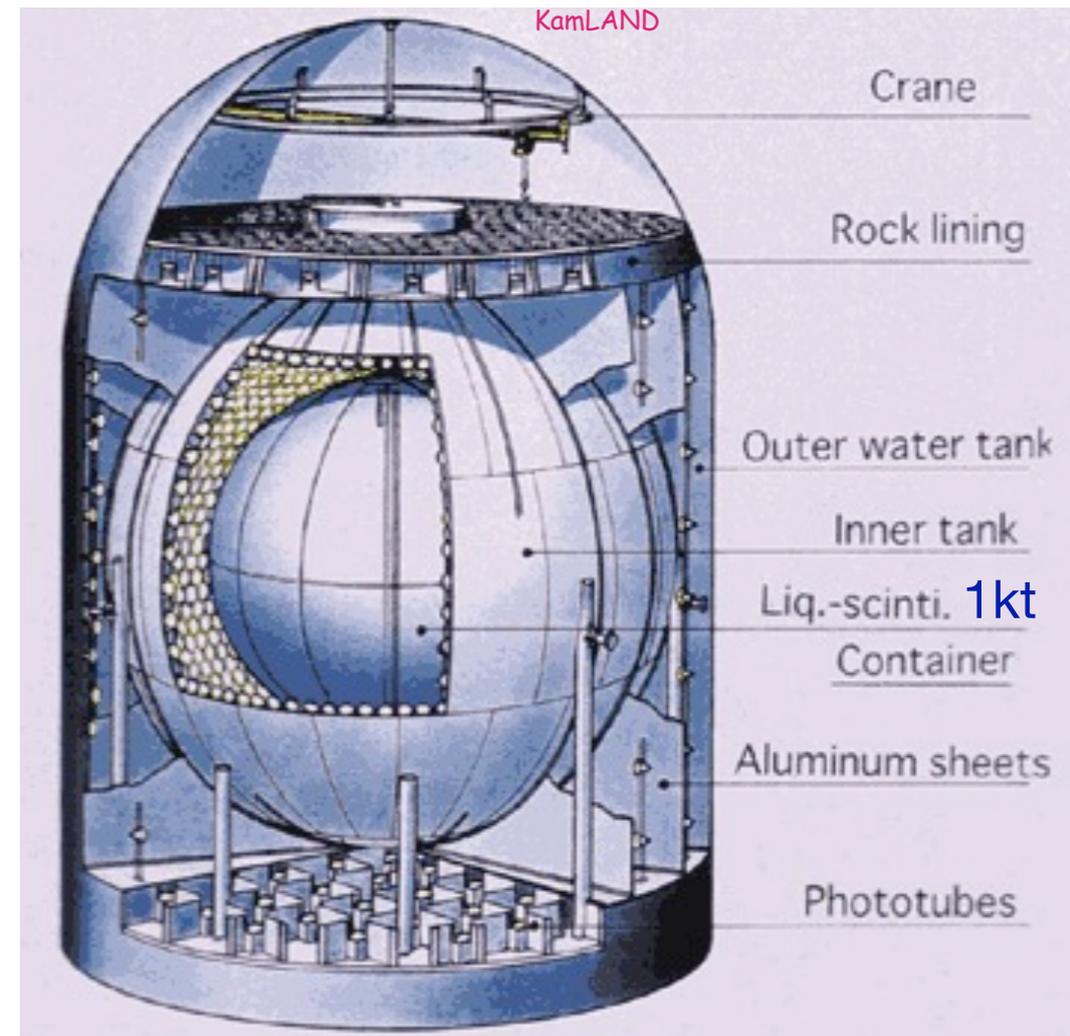


Messung mit Reaktoren - KamLAND

- Neutrinos aus Reaktoren sind Anti-Elektron-Neutrinos, Energien im MeV - Bereich: Im Prinzip können ähnlich Untersuchungen wie für Solare Neutrinos gemacht werden!
 - “Disappearance” - Experiment: Verringerung des Anti-Elektron-Neutrino Flusses:

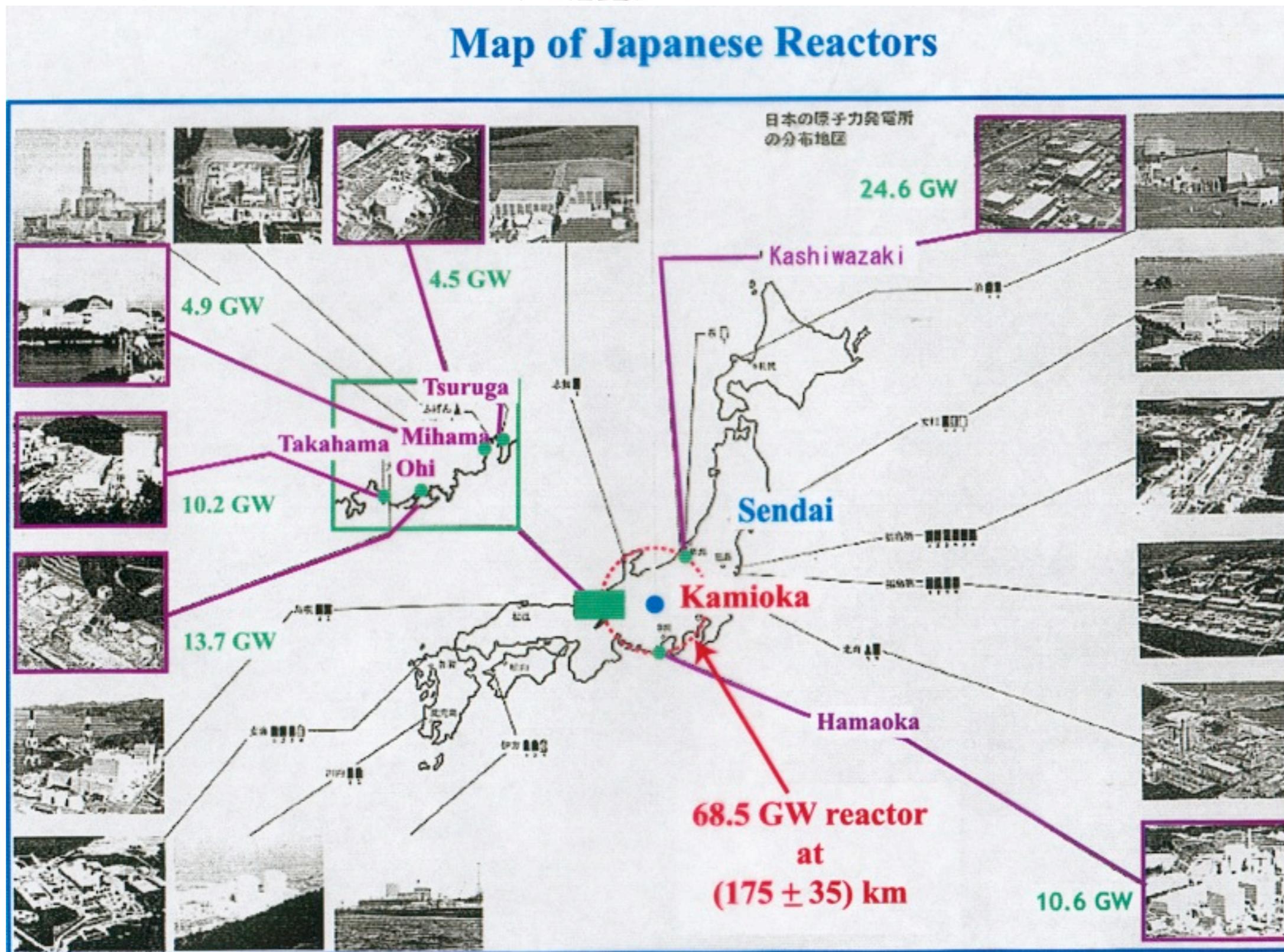
$$P_{surv} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2 c^4}{\text{eV}^2} \frac{\text{GeV}}{E_\nu} \frac{L}{\text{km}} \right)$$

Funktioniert nur gut für relativ grosse Mischungswinkel, erfordert lange Baselines bei kleinen Massenunterschieden (und kleine Neutrino-Energien, die experimentell schwierig sind): Sehr hoher Neutrino-Fluss nötig!



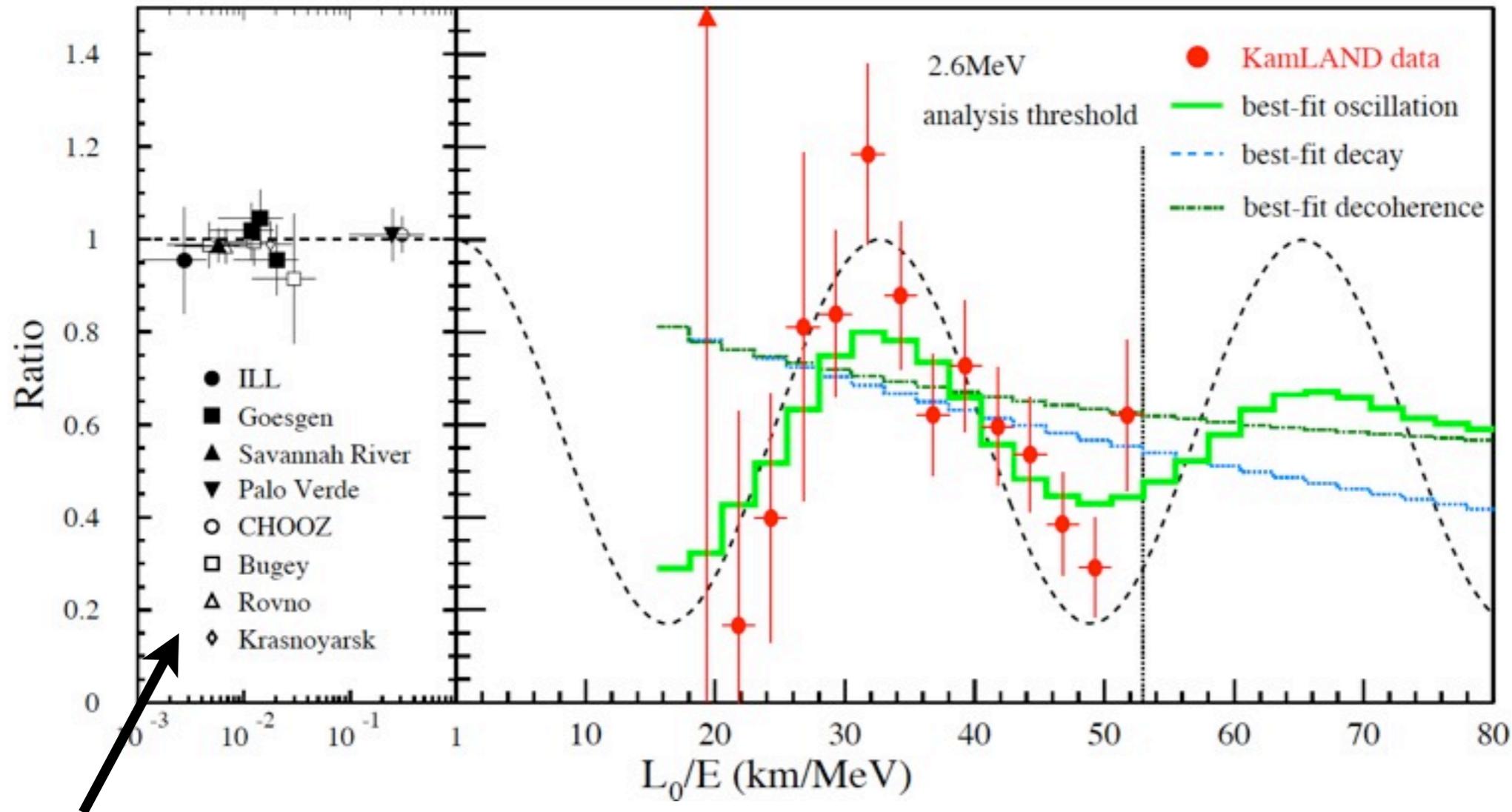
Nachweis von Anti- ν_e in Flüssig-Szintillator-Detektor:
 $\text{Anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma\gamma$

KamLAND - Umgeben von Reaktoren



- Mittlere Baseline: 180 km

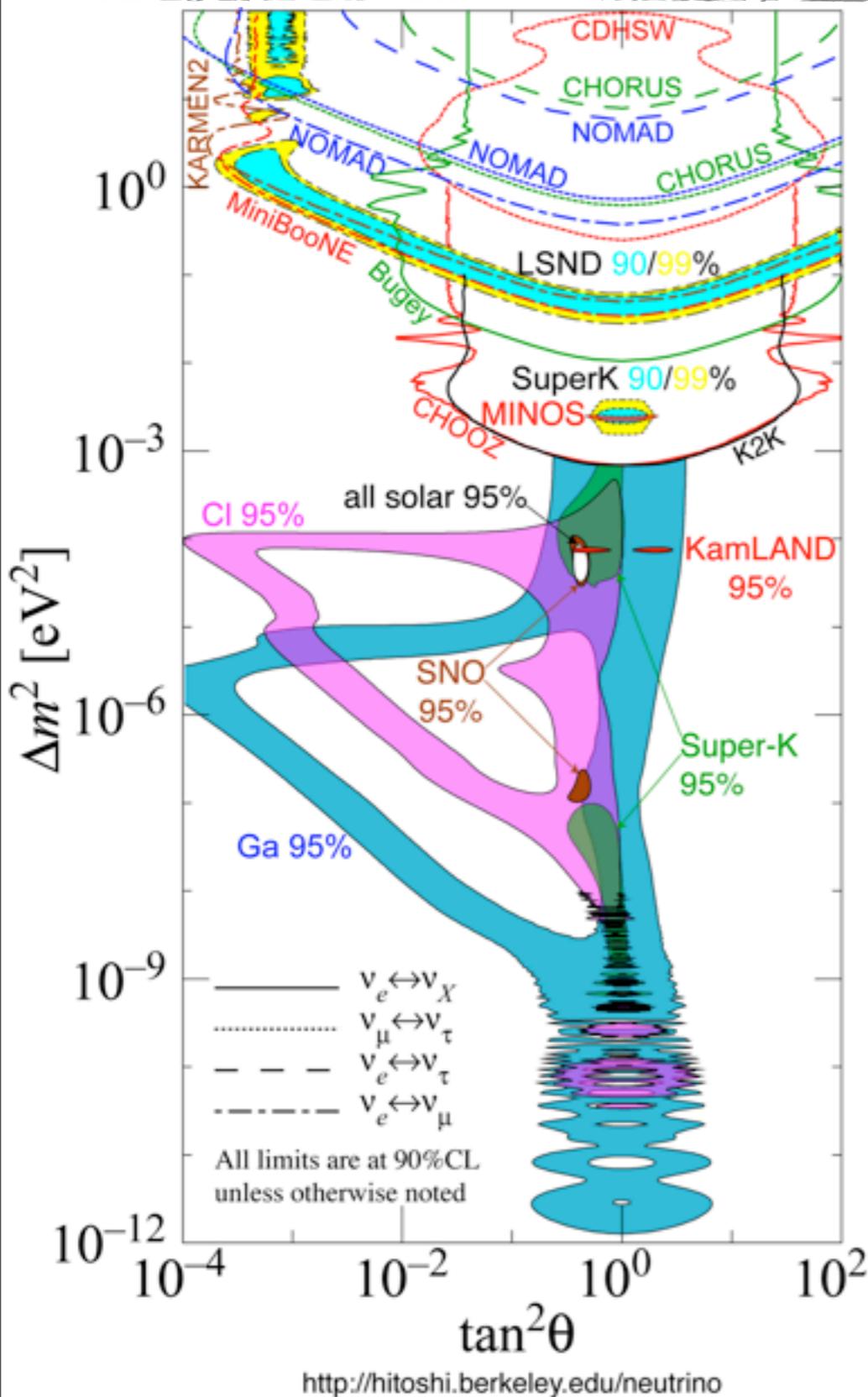
KamLAND - Ergebnis



Frühere Reaktorexperimente mit kurzer Baseline: Die Modellierung des Neutrino-Flusses der Reaktoren auf Basis der thermischen Leistung ist ok!

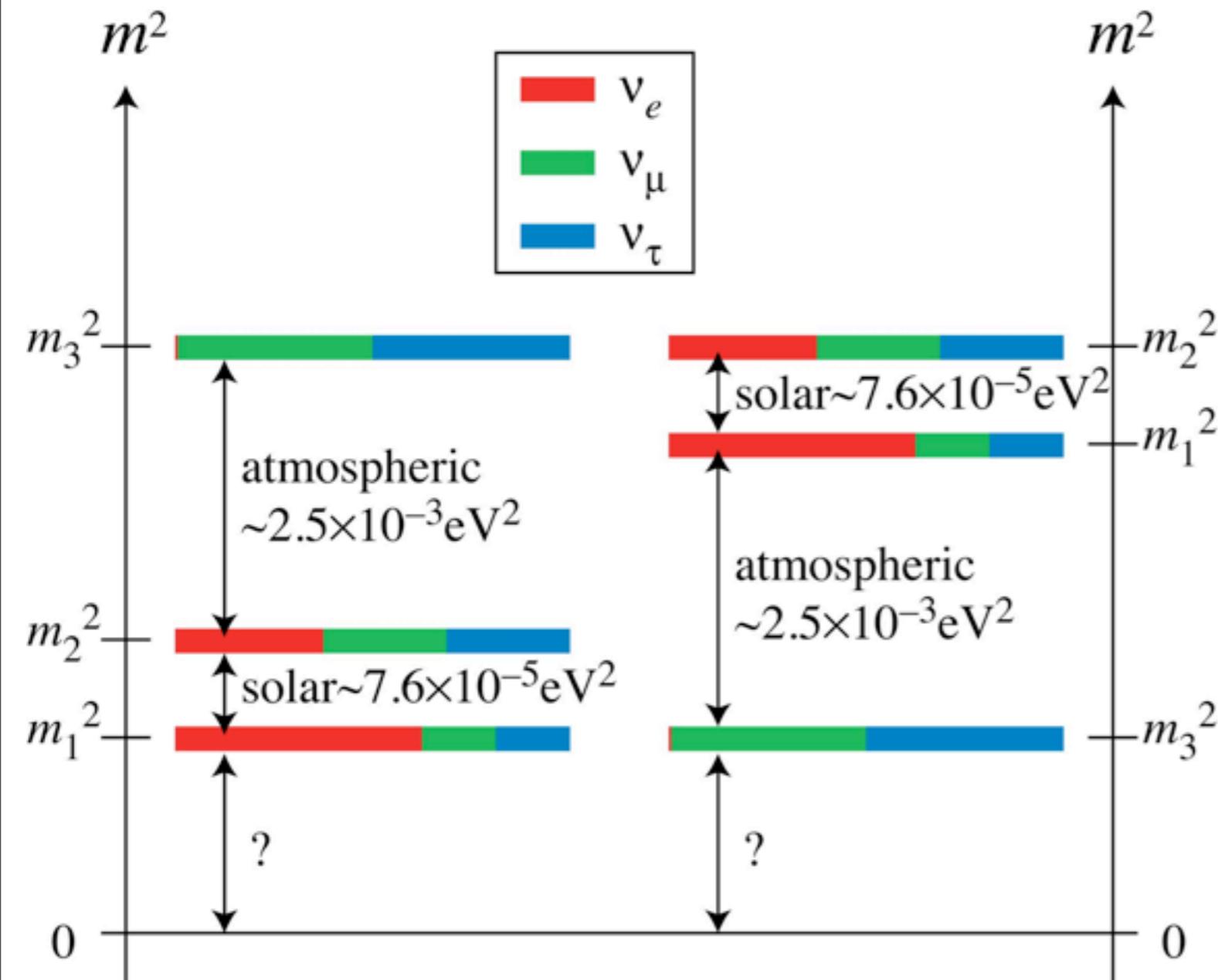
- Eindeutige Messung von Oszillationen in Reaktor-Neutrinos!

Solare / Reaktor Neutrinos: Alles zusammen



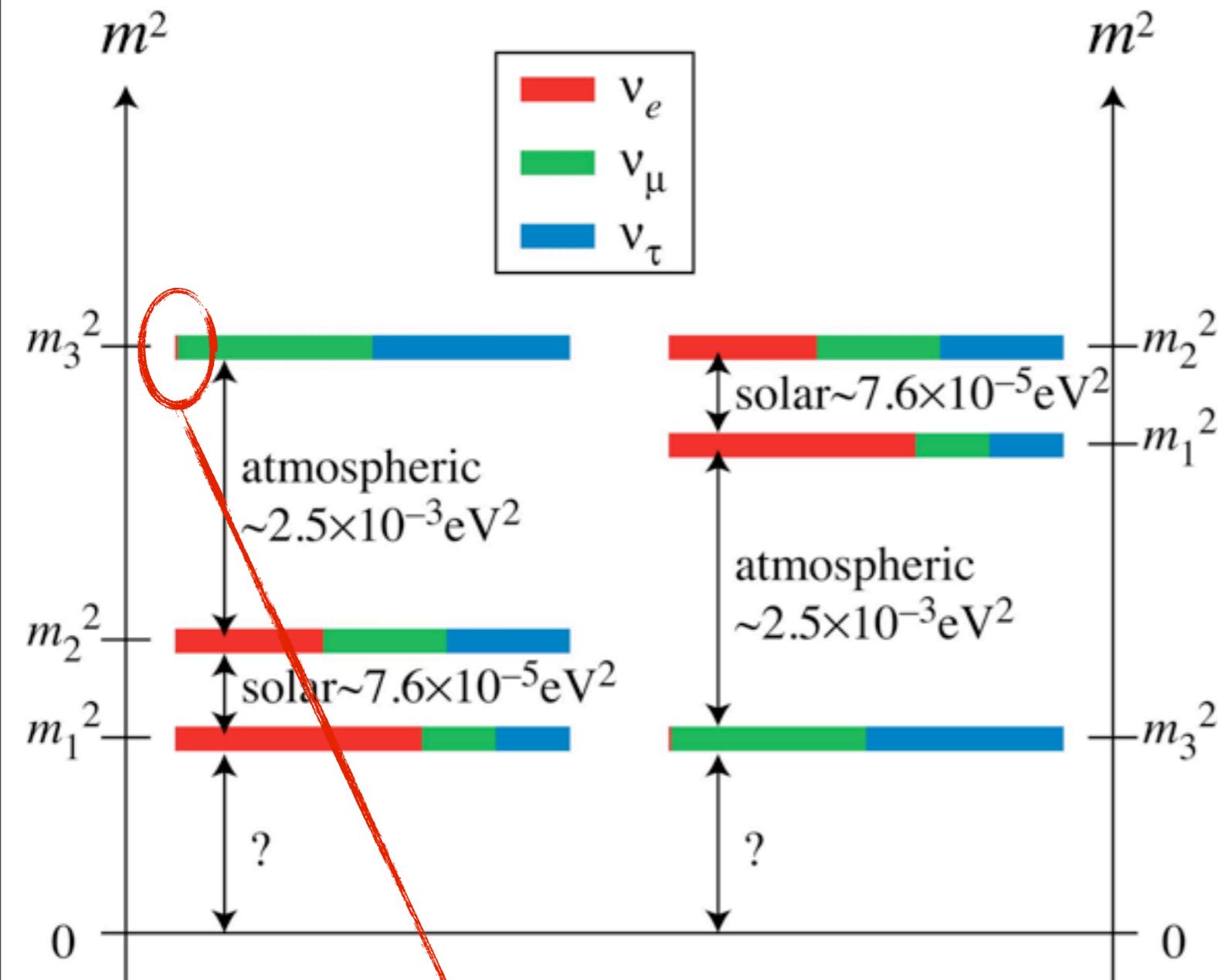
- Nach den SNO-Messungen blieben noch zwei Lösungen für die Massenunterschiede übrig - Lange Baseline von der Sonne!
- Mit KamLAND kann die Ambiguität aufgelöst werden!
- $\Delta m^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (entspricht 8.6 meV)
- $\sin^2 2\theta \sim 0.86$ ($\sim 30^\circ$)

Das Ganze Bild der Neutrinos



- Die Kombination mit atmosphärischen und Beschleuniger-Neutrinos (nächste Woche!) ergibt das ganze Bild:
 - Ein grosser und ein kleiner Massenunterschied (wir wissen noch nicht, wie die Anordnung ist)
 - ▶ Schnelle Oszillation mit Δm_{23} , langsame Oszillation mit Δm_{12}

Das Ganze Bild der Neutrinos



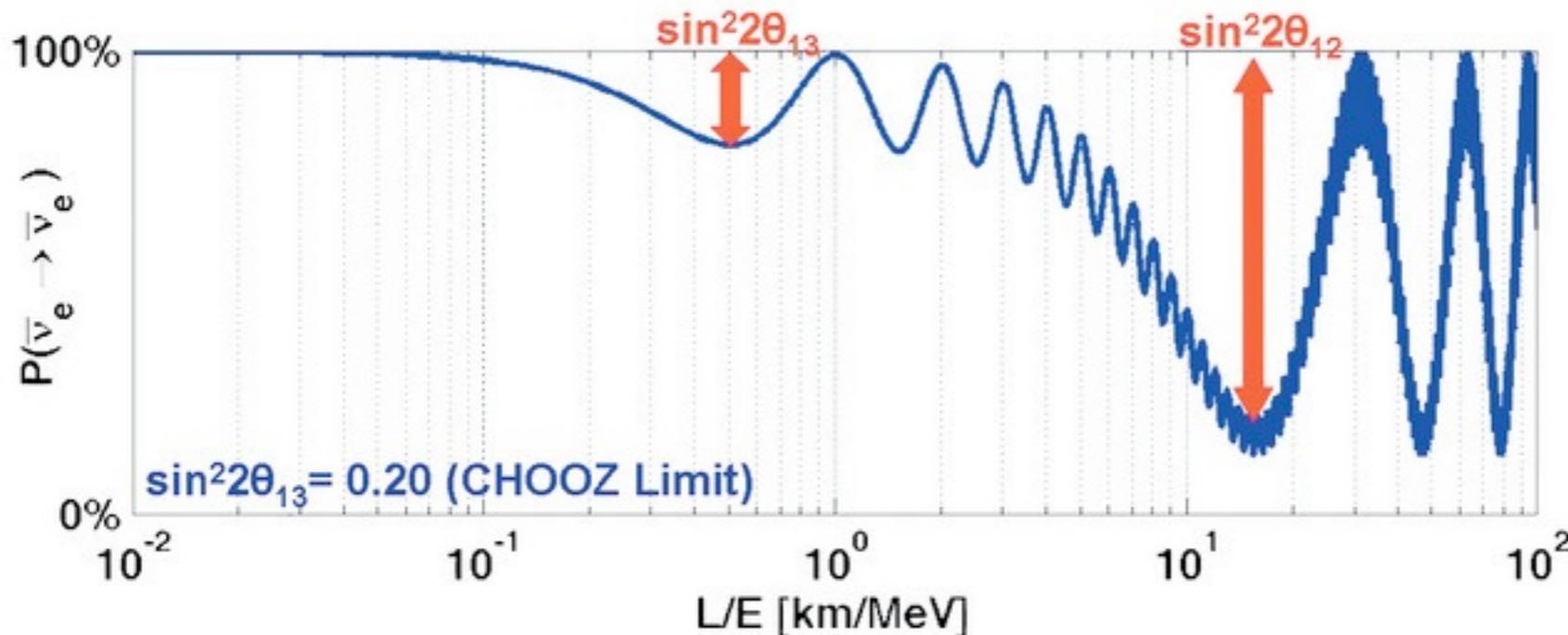
Eine offene Frage: Der letzte Mischungswinkel θ_{13}

- Die Kombination mit atmosphärischen und Beschleuniger-Neutrinos (nächste Woche!) ergibt das ganze Bild:
 - Ein grosser und ein kleiner Massenunterschied (wir wissen noch nicht, wie die Anordnung ist)
 - ▶ Schnelle Oszillation mit Δm_{23} , langsame Oszillation mit Δm_{12}

Die Messung von θ_{13} mit Reaktoren

$$\begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ & 1 \\ -s_{13}e^{i\delta} & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

- Die Oszillationen werden durch Δm_{13} bestimmt, welches (fast) identisch mit Δm_{23} ist. Schnelle Oszillation, überlagert die Δm_{12} Oszillation
- Die Amplitude dieser Oszillation wird durch θ_{13} gegeben
- An Reaktoren: Messung des Verschwindens von Anti- ν_e - eine schnelle Modulation der langsamen Δm_{12} Oszillation
- Ganz entscheidend: Gute Kontrolle des totalen Neutrino fluxes vor der Oszillation!



Daya Bay - Das genaueste Experiment für θ_{13}



Adjacent mountains with horizontal access provide 860 (250) m.w.e cosmic shielding.

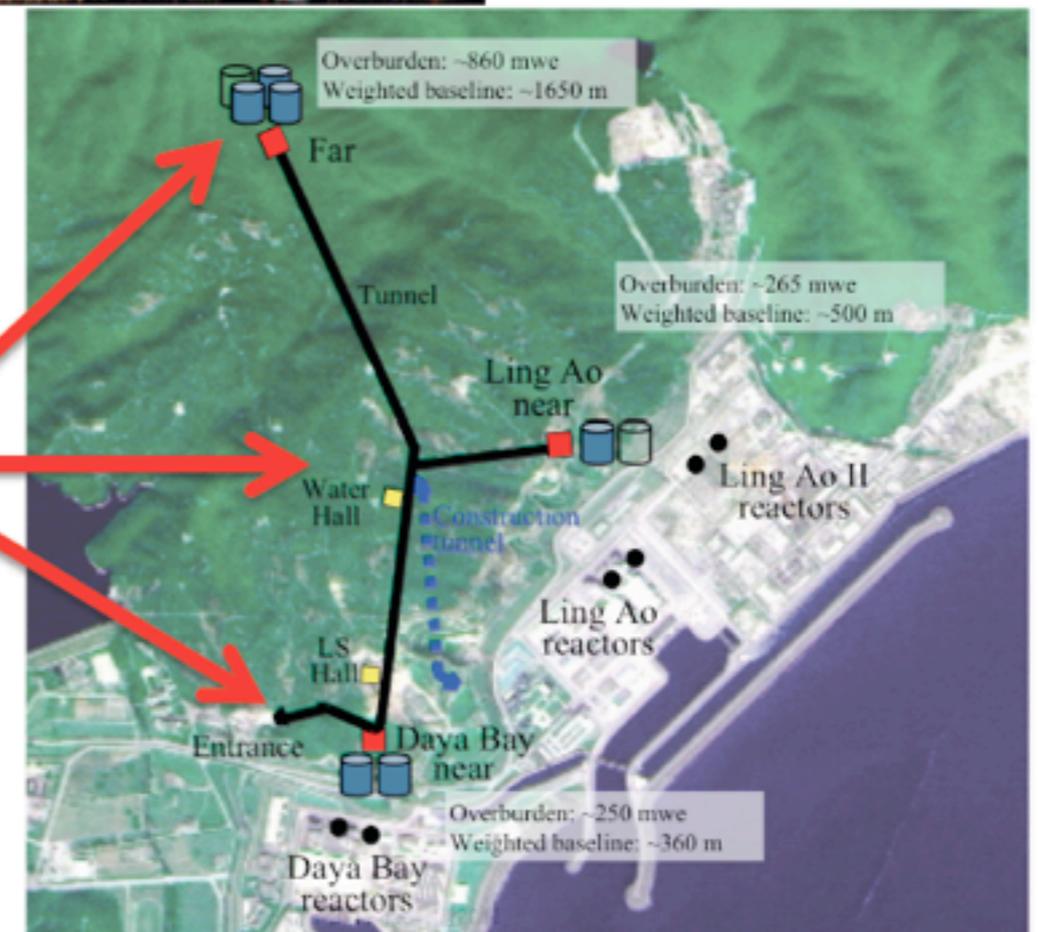
Daya Bay

Ling Ao I + II

6 commercial reactor cores with 17.4 GW_{th} total power.

6 Antineutrino Detectors (ADs) give 120 tons total target mass.

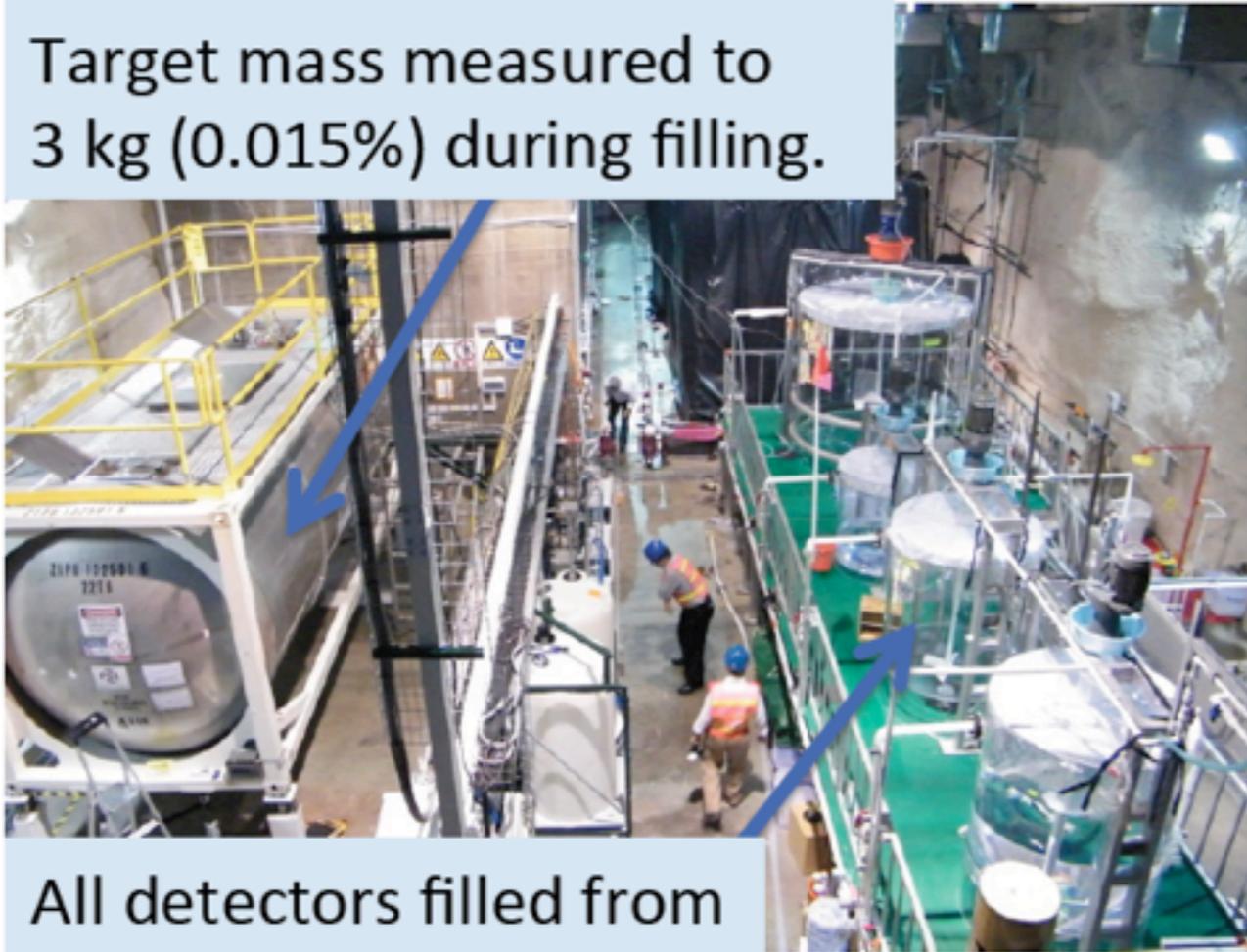
Via GPS and modern theodolites, relative detector-core positions known to 3 cm.



Daya Bay - Die Detektoren

6 'functionally identical' detectors:
Reduce systematic uncertainties

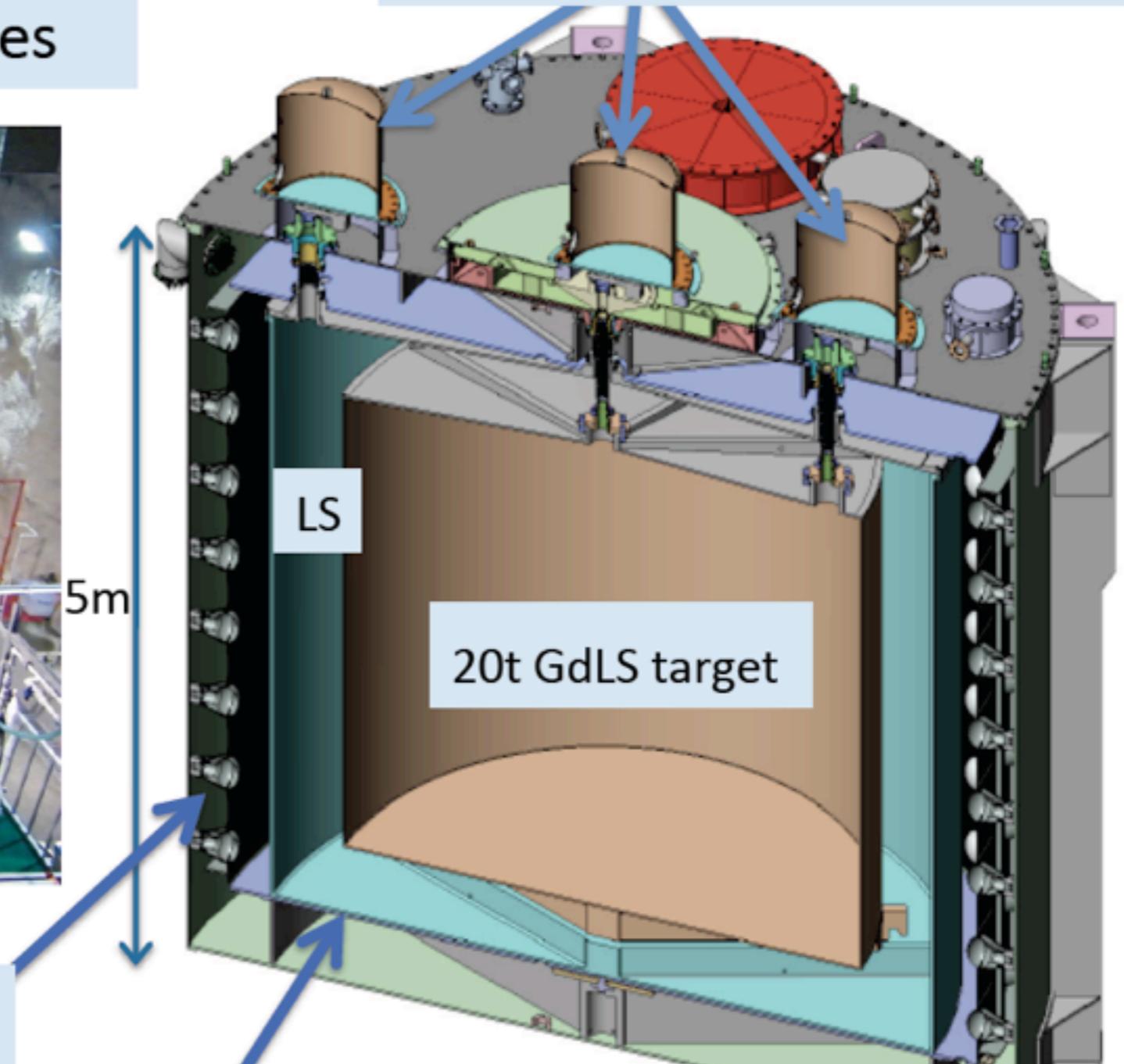
Target mass measured to
3 kg (0.015%) during filling.



All detectors filled from
common GdLS tanks.

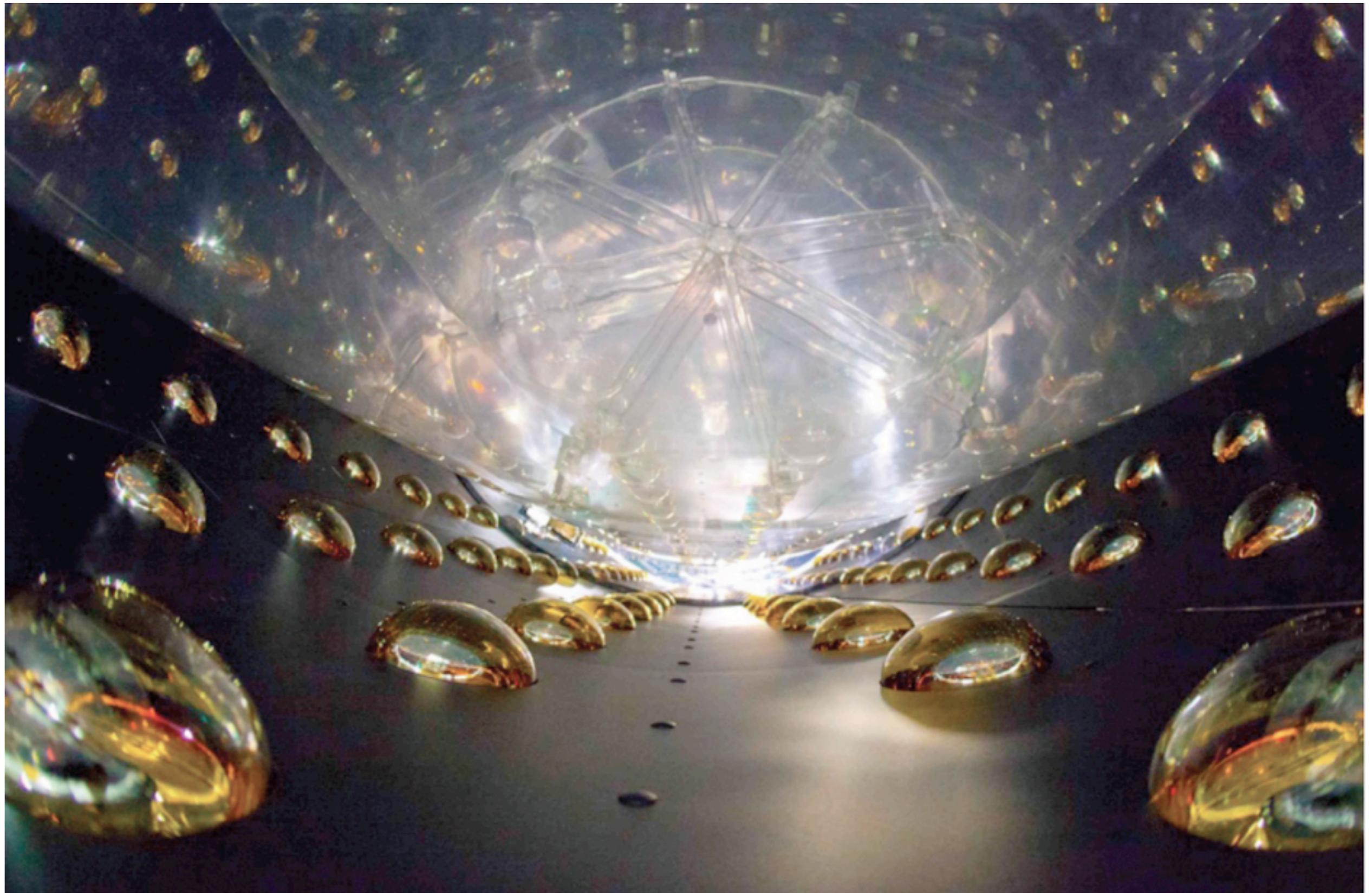
192 8" PMTs detect light
in target, ~ 163 p.e./MeV.

Calibration robots insert
radioactive sources and LEDs.

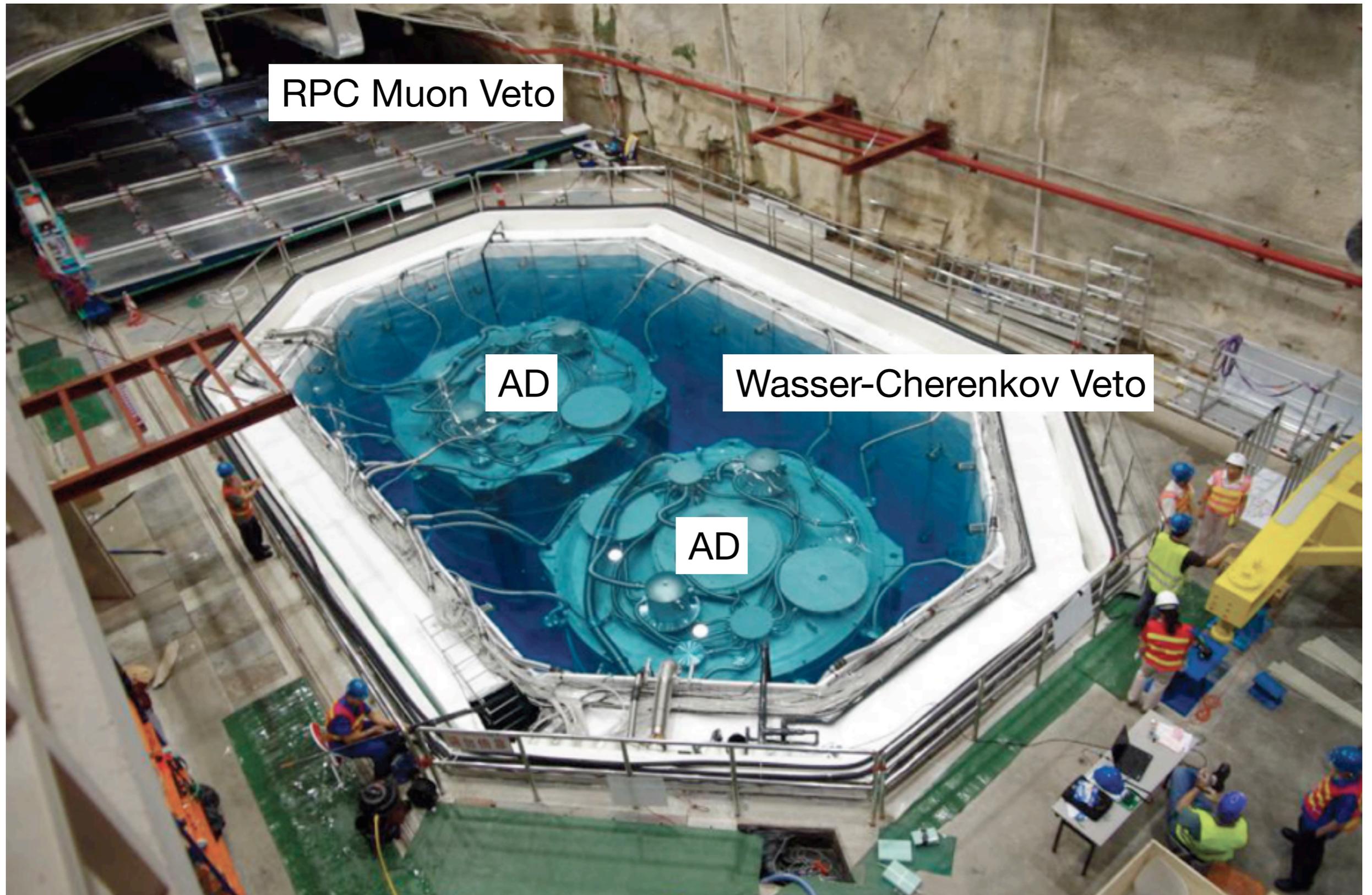


Reflectors improve light collection uniformity.

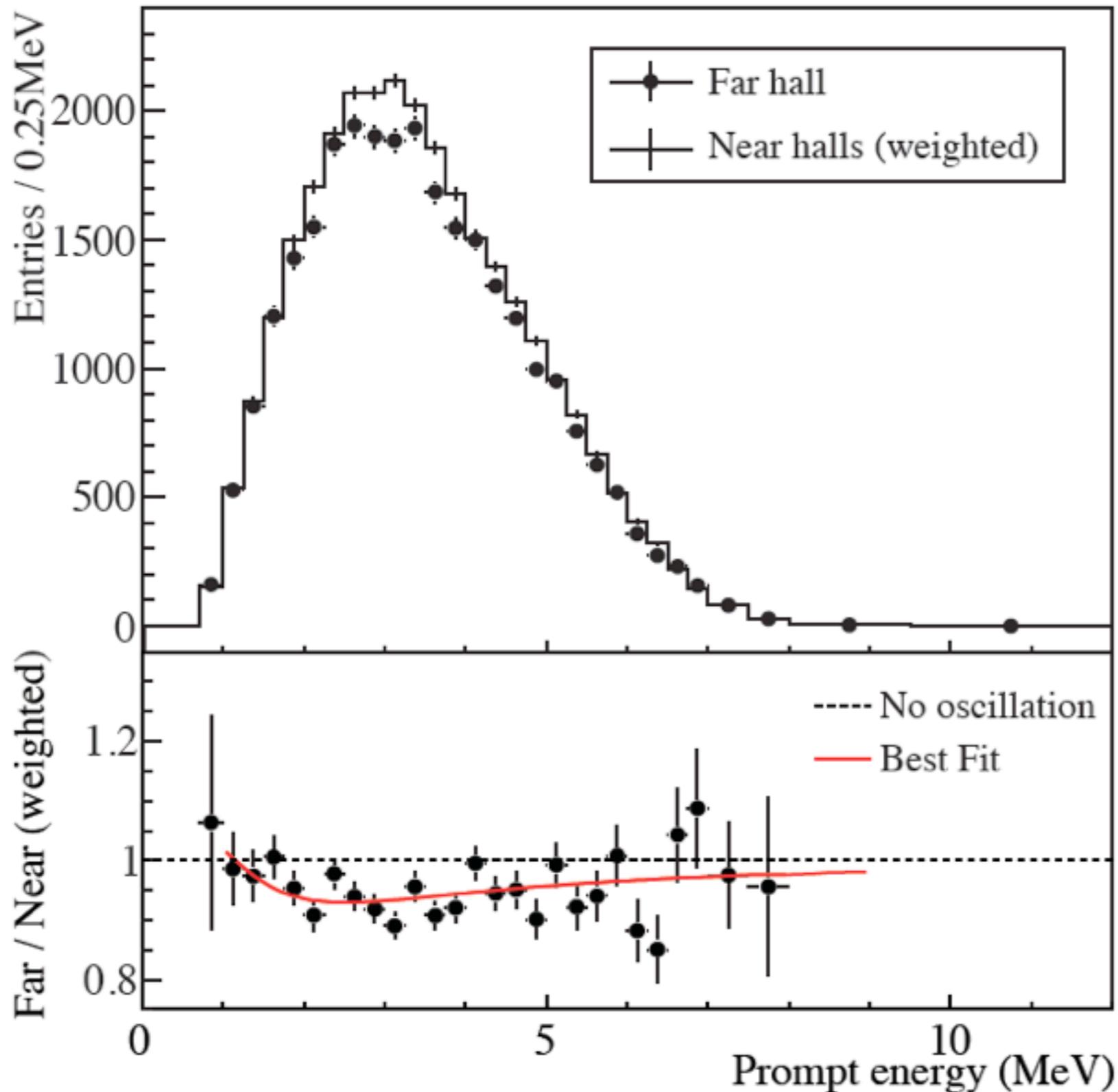
Daya Bay - Die Detektoren



Daya Bay - Die Detektoren

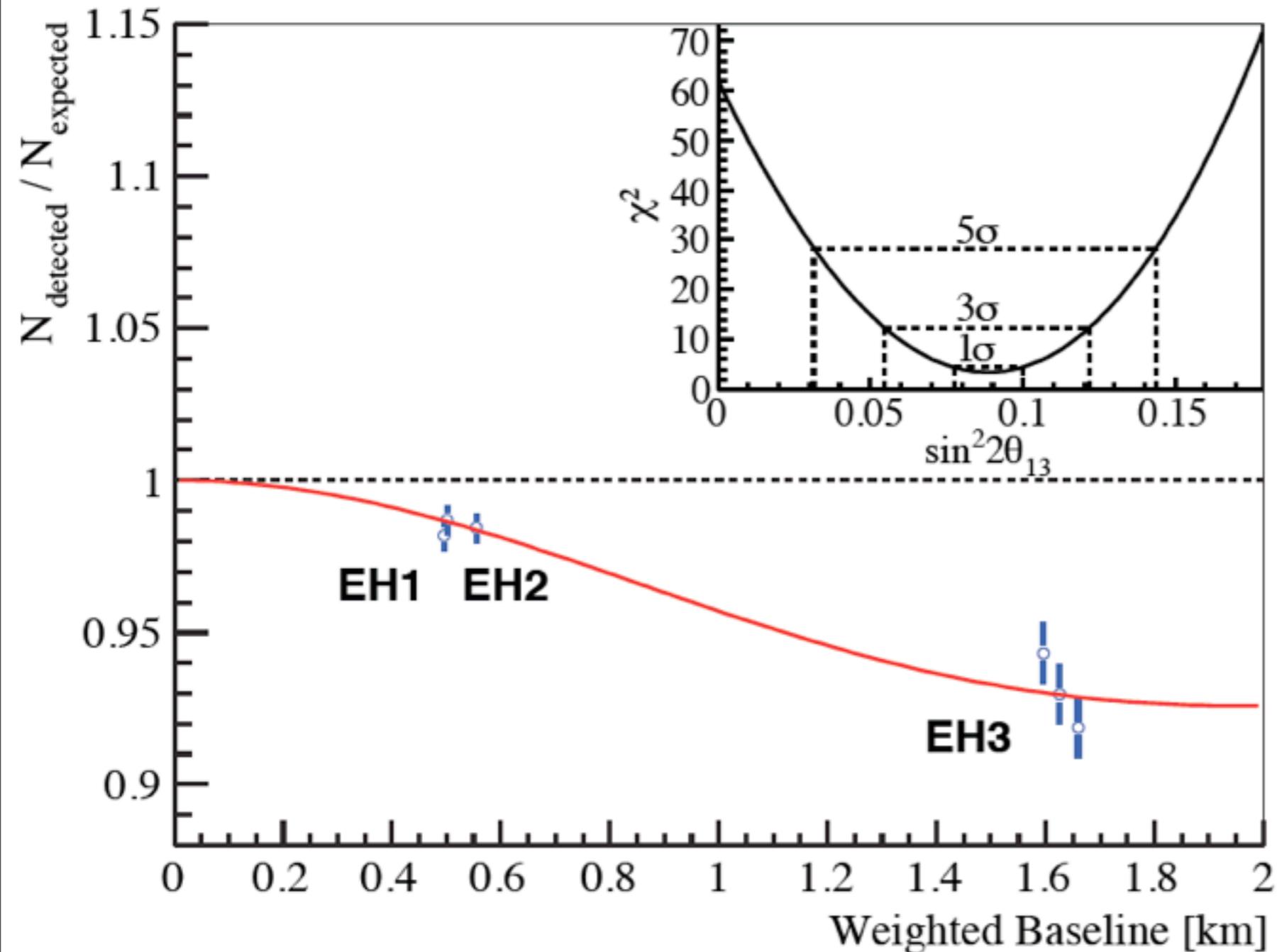


Daya Bay - Ergebnis



- Deutliches Signal eines Neutrino-Defizits im Far Detector - Hinweis auf Oszillationen mit hoher Frequenz (grosser Massenunterschied)

Daya Bay - Messung von θ_{13}



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.089 \pm 0.010 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}$$

- Die aktuell genaueste Messung von θ_{13}
- Sehr signifikant von 0 verschieden, und überraschend gross: Falls sie existiert ist CP-Verletzung im Neutrinosektor experimentell zugänglich!

Die nächsten Schritte für Daya Bay:

- Genauere Messung von θ_{13}
- Messung von Δm_{13}^2

Zusammenfassung

- Die Sonne ist eine sehr starke Neutrinoquelle: Elektron-Neutrinos, im mit Energien im 100 keV bis 10 MeV - Bereich
- Über viele Jahrzehnte wurde ein Defizit solarer Neutrinos beobachtet: Interpretation als Neutrino-Oszillation
 - Experimente der letzten ~ 10 Jahre haben zweifelsfrei bestätigt, dass die Neutrinos nicht “verschwinden”, sondern in andere Flavors oszillieren
- Neutrinos aus Kernreaktoren (Elektron-Anti-Neutrinos im MeV - Bereich)
 - Haben die Oszillationen bestätigt und genaue Messungen der Parameter ermöglicht
 - Bieten Zugang zur Messung des “spannensten” Mischungswinkels θ_{13}
Aktuelle Messung: $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.09$ - überraschend gross: CP - Verletzung im Neutrino-Sektor kann untersucht werden (falls es sie gibt)

Zusammenfassung

- Die Sonne ist eine sehr starke Neutrinoquelle: Elektron-Neutrinos, im mit Energien im 100 keV bis 10 MeV - Bereich
- Über viele Jahrzehnte wurde ein Defizit solarer Neutrinos beobachtet: Interpretation als Neutrino-Oszillation
 - Experimente der letzten ~ 10 Jahre haben zweifelsfrei bestätigt, dass die Neutrinos nicht “verschwinden”, sondern in andere Flavors oszillieren
- Neutrinos aus Kernreaktoren (Elektron-Anti-Neutrinos im MeV - Bereich)
 - Haben die Oszillationen bestätigt und genaue Messungen der Parameter ermöglicht
 - Bieten Zugang zur Messung des “spannensten” Mischungswinkels θ_{13}
Aktuelle Messung: $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.09$ - überraschend gross: CP - Verletzung im Neutrino-Sektor kann untersucht werden (falls es sie gibt)

Nächste Vorlesung: 01.07.,

“Neutrinos II - Atmosphärische und Beschleuniger-Neutrinos”, F. Simon

