

Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig
25. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



Kapitel 10.2: Neutrinophysik



Wolfgang Paulis Neutrino-Hypothese

- Vergleiche VL-12 Folie 3ff

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Cloriastrasse

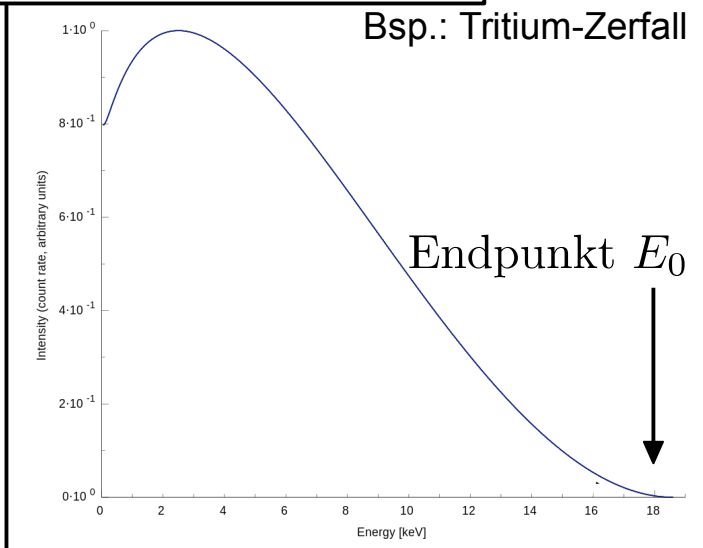
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich baldvöllst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz

Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
wie ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
Spin 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
ndigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
rossenordnung wie die Elektronenmasse sein und
er als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche
nn verständlich unter der Annahme, dass beim
Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
Summe der Energien von Neutron und Elektron

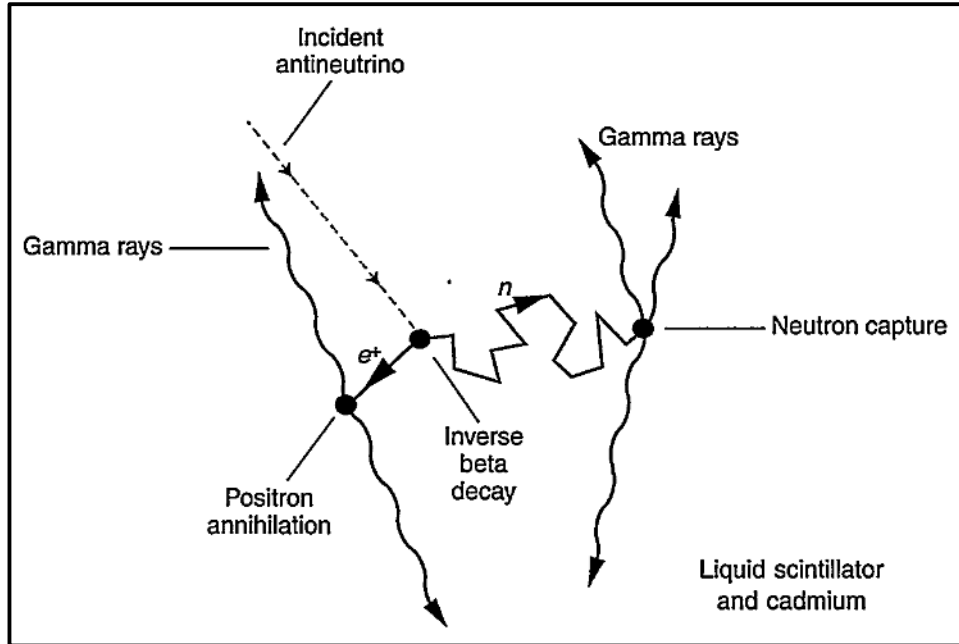
Kontinuierliches Spektrum
des β -Zerfalls

Bsp.: Tritium-Zerfall

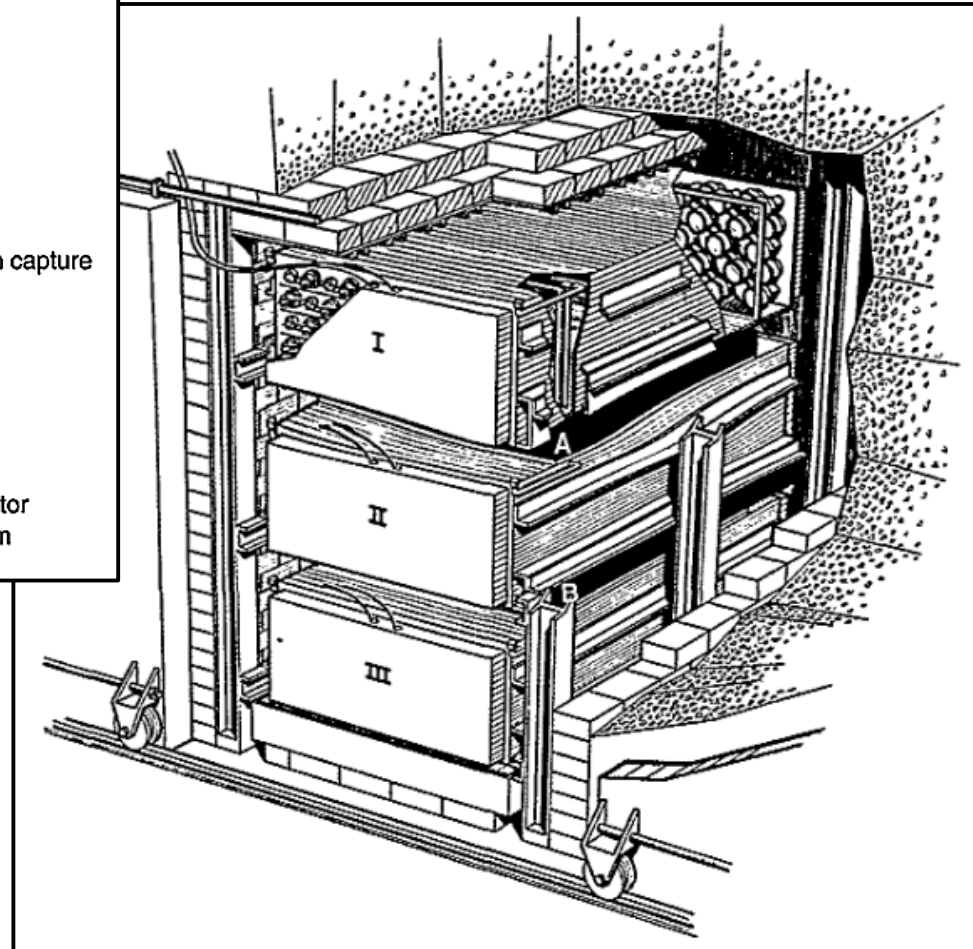


Neutrino nachweis

- Durch **inversen β -Zerfall**. (Anti-)Neutrinoquelle: Kernreaktor in Savannah River USA (F. Reines, C. Cowan 1956)

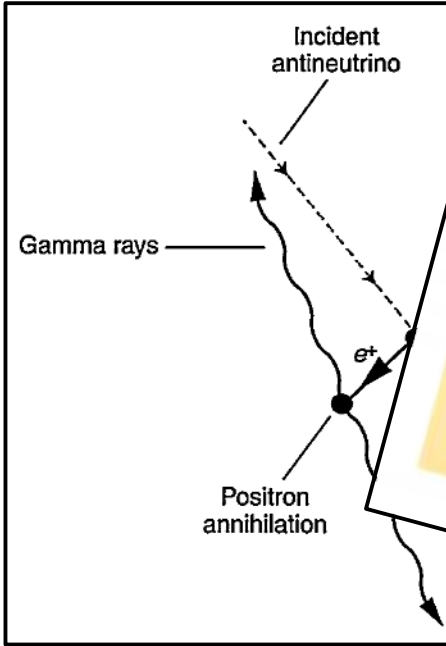


- Nachweis der 511 keV Photon-Koinzidenz der e^+e^- -Annihilation (+ charakteristische Röntgenstrahlung aus Neutroneinfang)

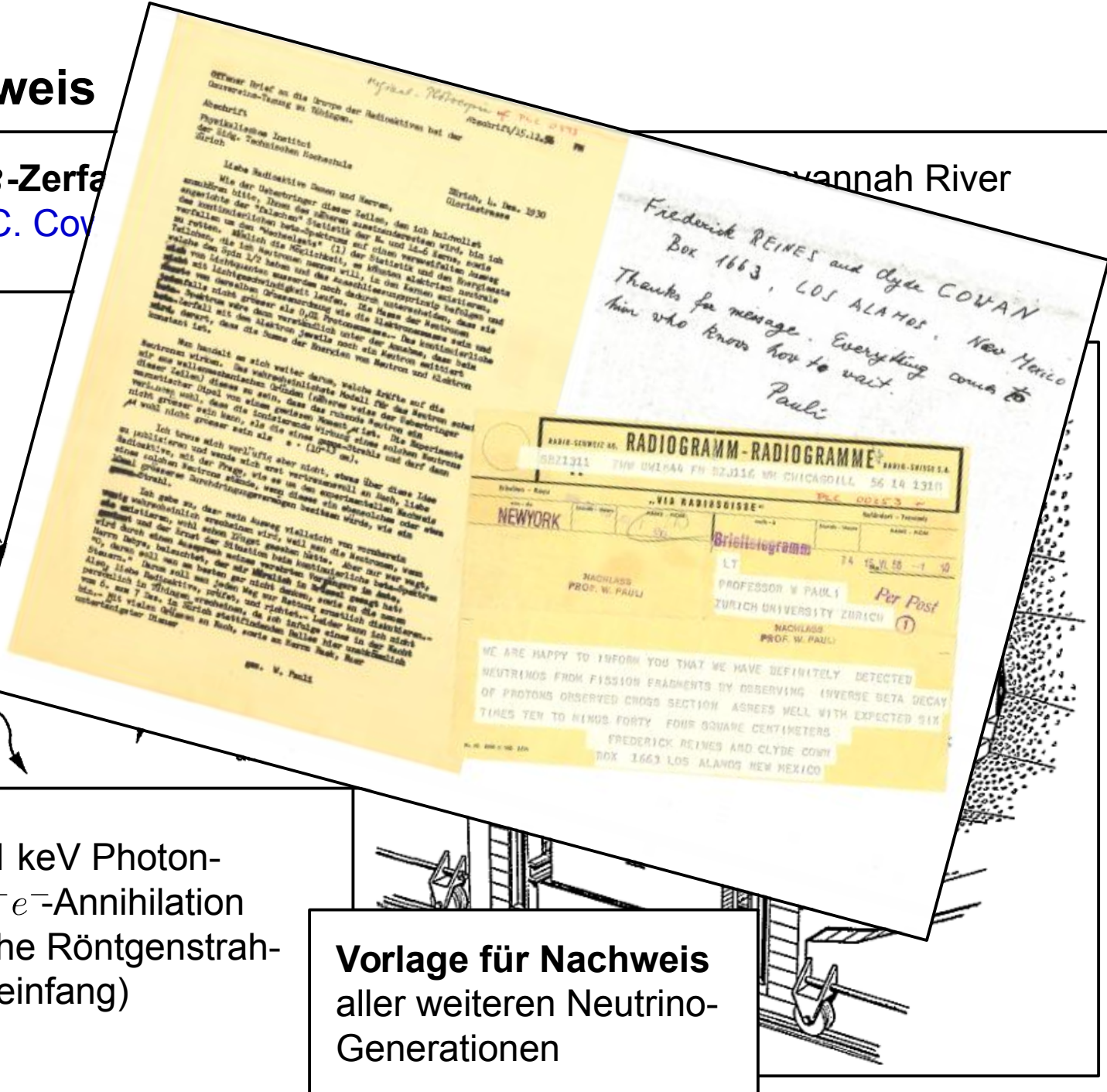


Neutrino nachweis

- Durch inversen β -Zerfall
USA (F. Reines, C. Cowan)



- Nachweis der 511 keV Photon-Koinzidenz der e^+e^- -Annihilation (+ charakteristische Röntgenstrahlung aus Neutroneneinfang)



Vorlage für Nachweis
aller weiteren Neutrino-Generierungen

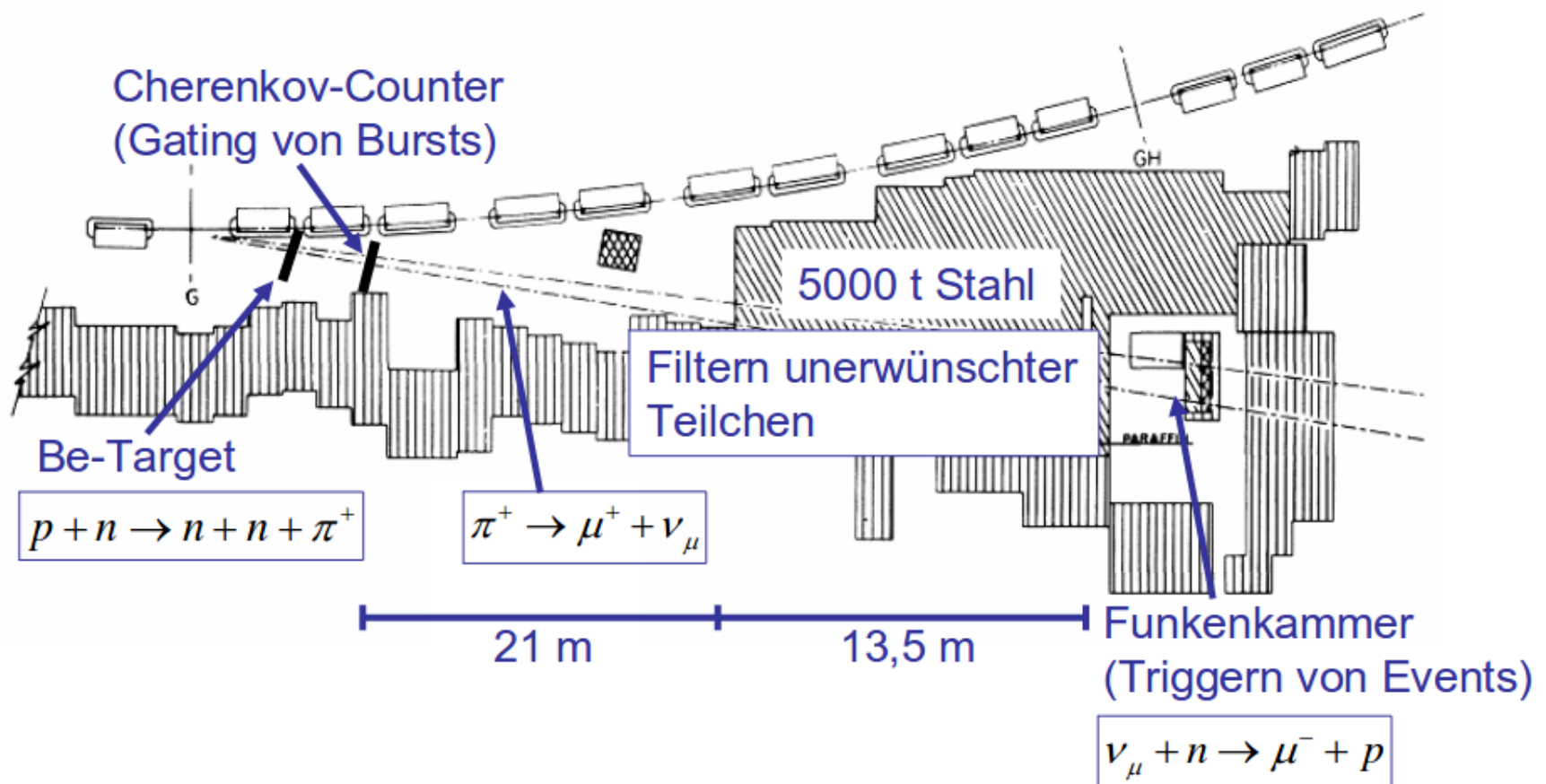
Yanah River

Friederich REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.
Pauli

RADIOGRAMM-RADIOGRAMME
NEW YORK
BRITTELEGRAMM
NACHLASS PROF. W. PAULI
Per Post
WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS
FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

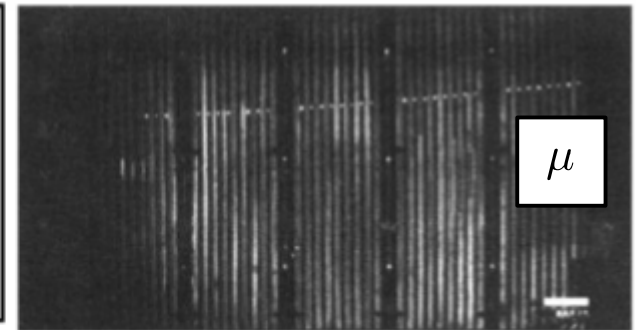
Nachweis Myon-Neutrinos

- AGS Beschleuniger am BNL ([Lederman, Schwartz, Steinberger, 1962](#))
- Erzeugung eines fokussierten ν_μ -Strahls (vgl [VL-23 Folie 4](#))
 - Hier: 15 GeV Protonen auf Be-Target \rightarrow Erzeugung von $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$

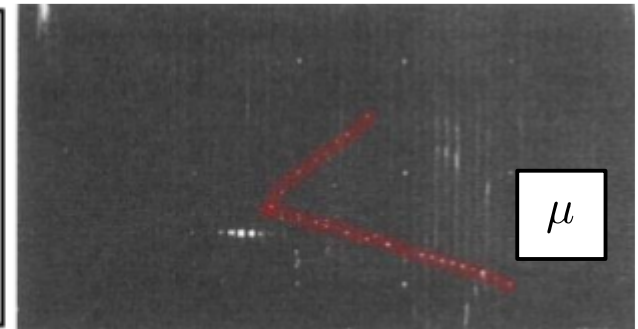
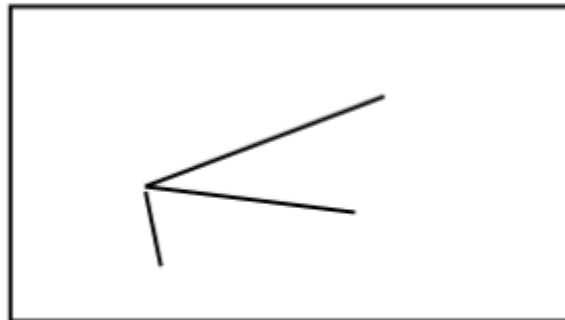


Ereignis-Klassifikation

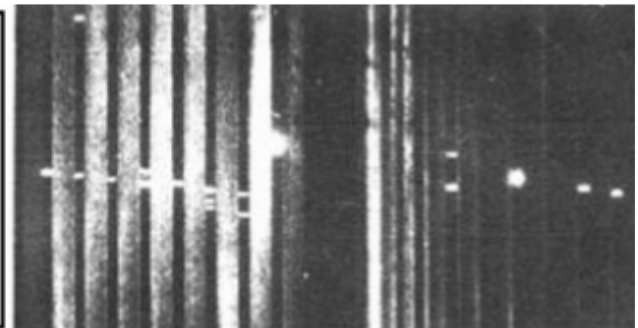
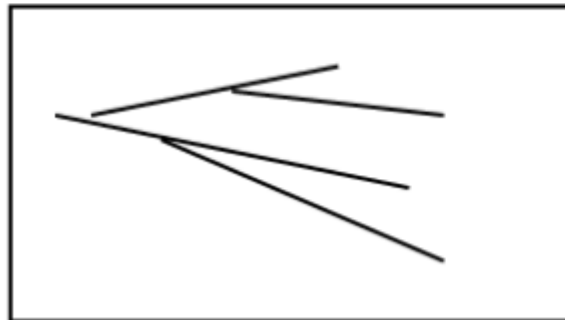
- Single long/short track event



- Vertex event



- Shower event (e oder p)

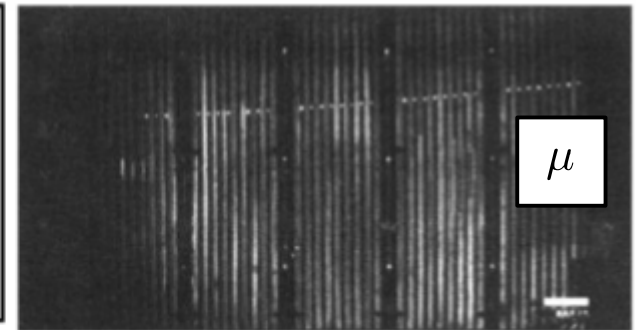


Ereignis-Klassifikation

- Single long/short track event

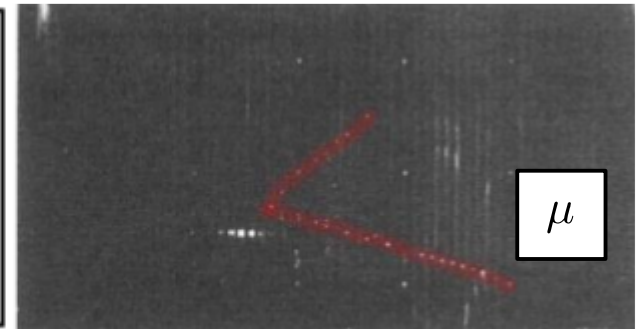
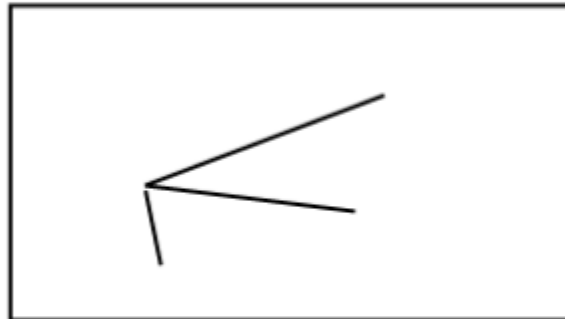
49 evts (short single track)

34 evts (long single track)



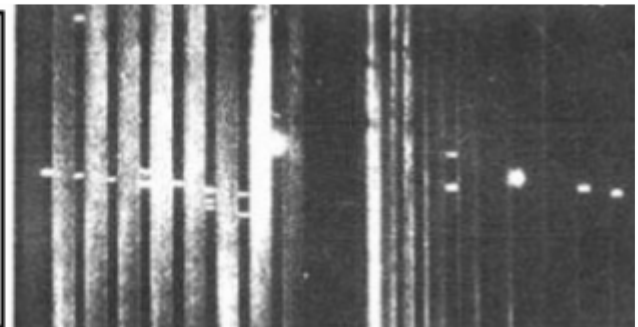
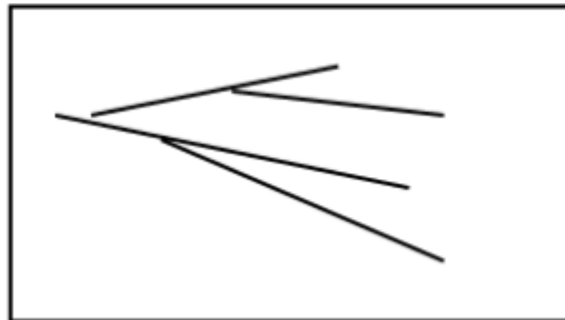
- Vertex event

22 evts



- Shower event (e oder p)

8 evts



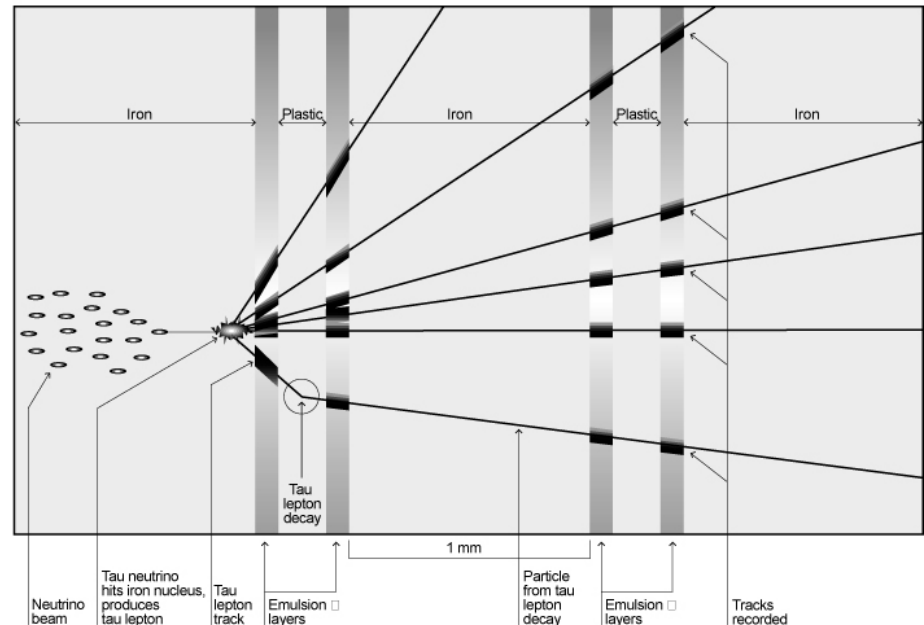
56 evts (klar identifiziert mit Myonen)

Signifikant größerer Nachweis von Myonen als von Elektronen $\rightarrow \nu_{\mu} \neq \nu_e$

Nachweis Tau-Neutrinos

- Nach Entdeckung des τ -Leptons (SLAC 1979, Martin L. Perl) → schwacher Isospin Partner erwartet
- Erzeugung eines fokussierten ν_τ -Strahls (vgl VL-23 Folie 4)
 - Hier: 800 GeV Protonen auf W-Target → Erzeugung von $D_s^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$
- Nachweis mit Detektor Donut (FNAL, 2000)

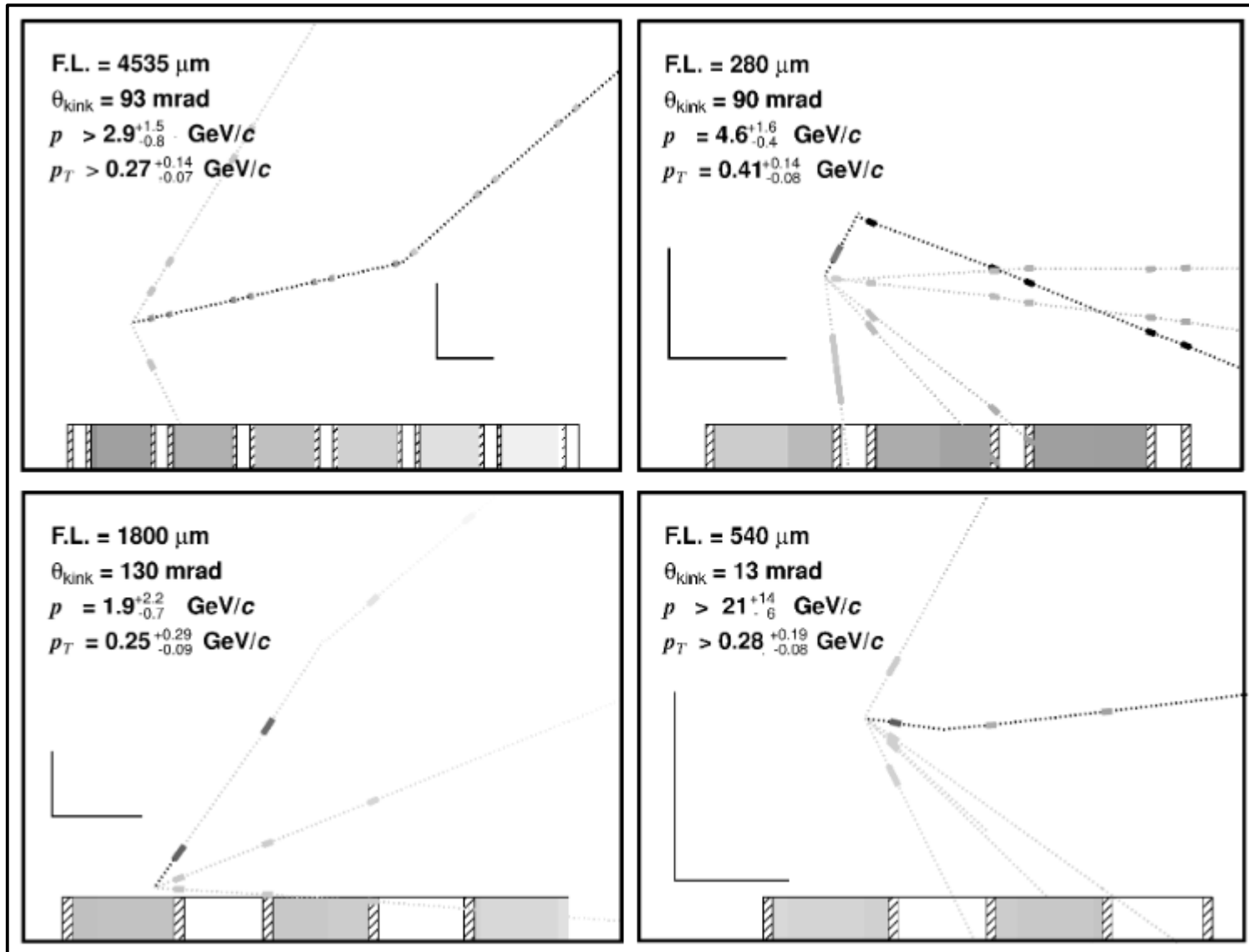
- $\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p$
 $\bar{\nu}_\tau + p \rightarrow \tau^+ + n$
- $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$ BR 18%
 $\tau \rightarrow e \nu \nu$ BR 18%
 $\tau \rightarrow \text{single track } \nu$ BR 86%
- $c\tau_\tau = 86 \mu\text{m}$; $\gamma c\tau_\tau \approx 2.3 \text{ mm}$
 (in Donut)
- Spur mit **frühem Knick** in Emulsion mit hoher räumlicher Auflösung



Of one million million tau neutrinos crossing the DONUT detector, scientists expect about one to interact with an iron nucleus.

Nachweis Tau-Neutrinos

Die vier Kandidaten zur Zeit der Veröffentlichung der Entdeckung



Neutrinoquellen

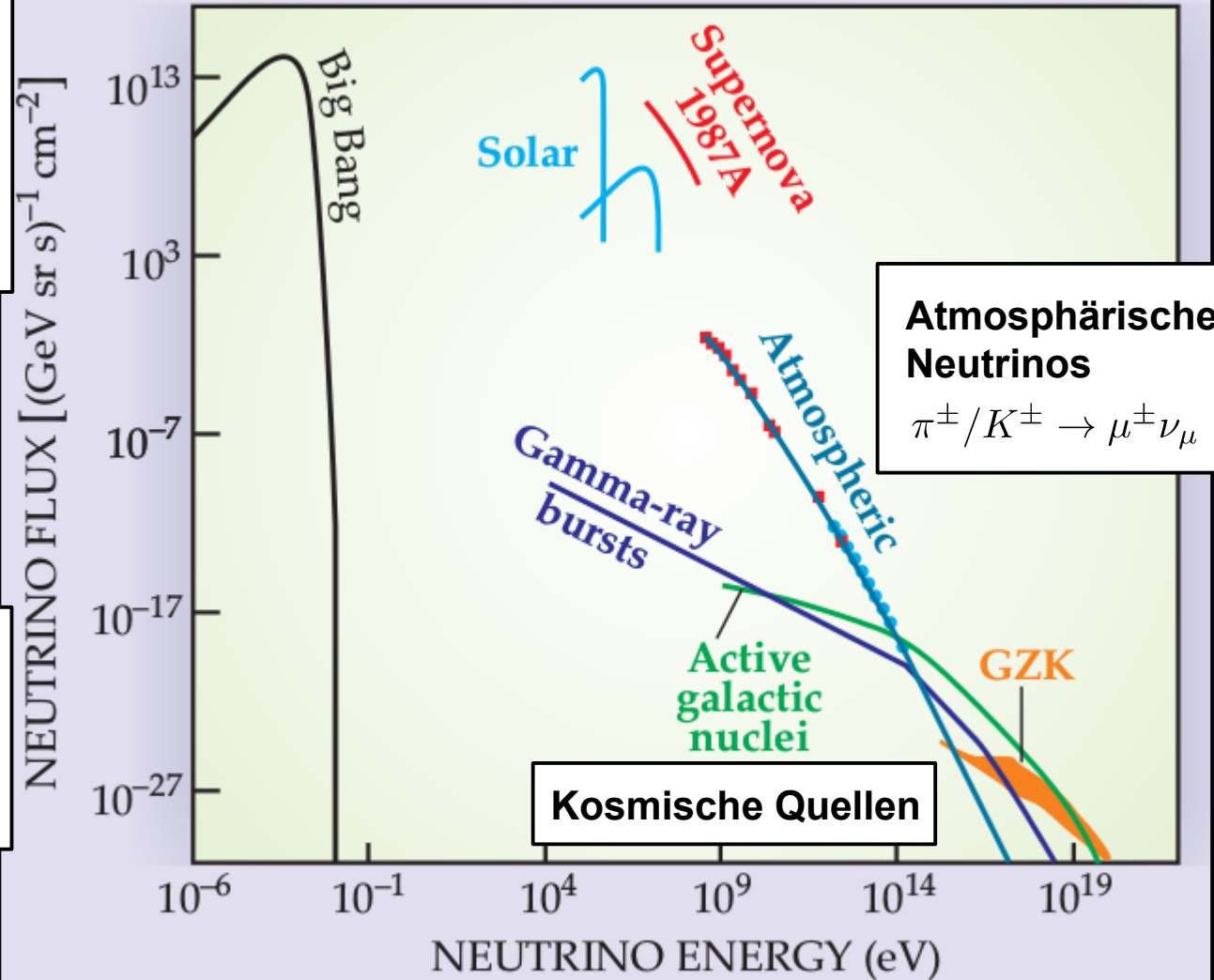
Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

Kernfusion in Sternen & Supernovae



Atmosphärische Neutrinos

$$\pi^\pm / K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$$

Neutrinoquellen

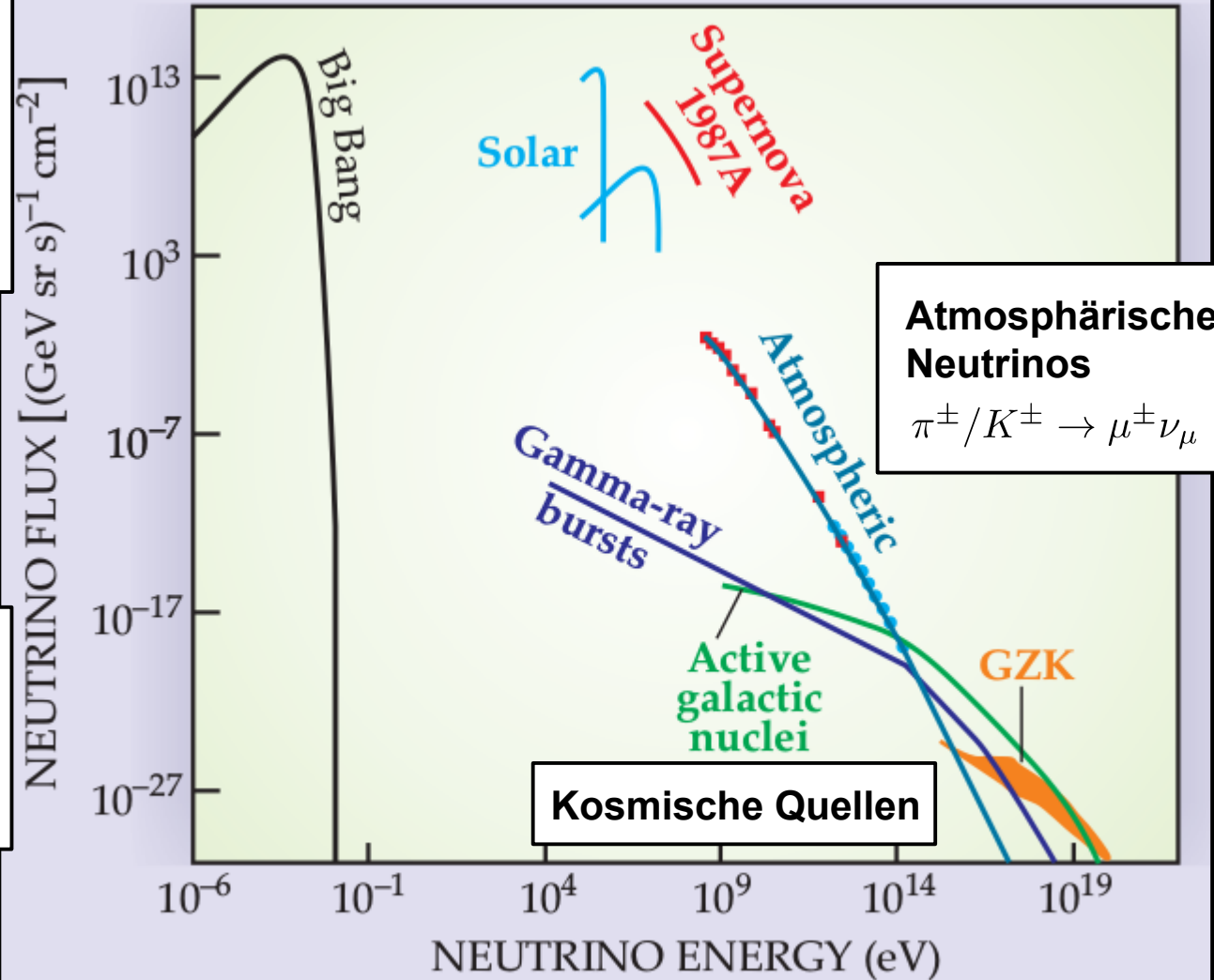
Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

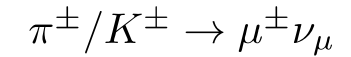
Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

Kernfusion in Sternen & Supernovae

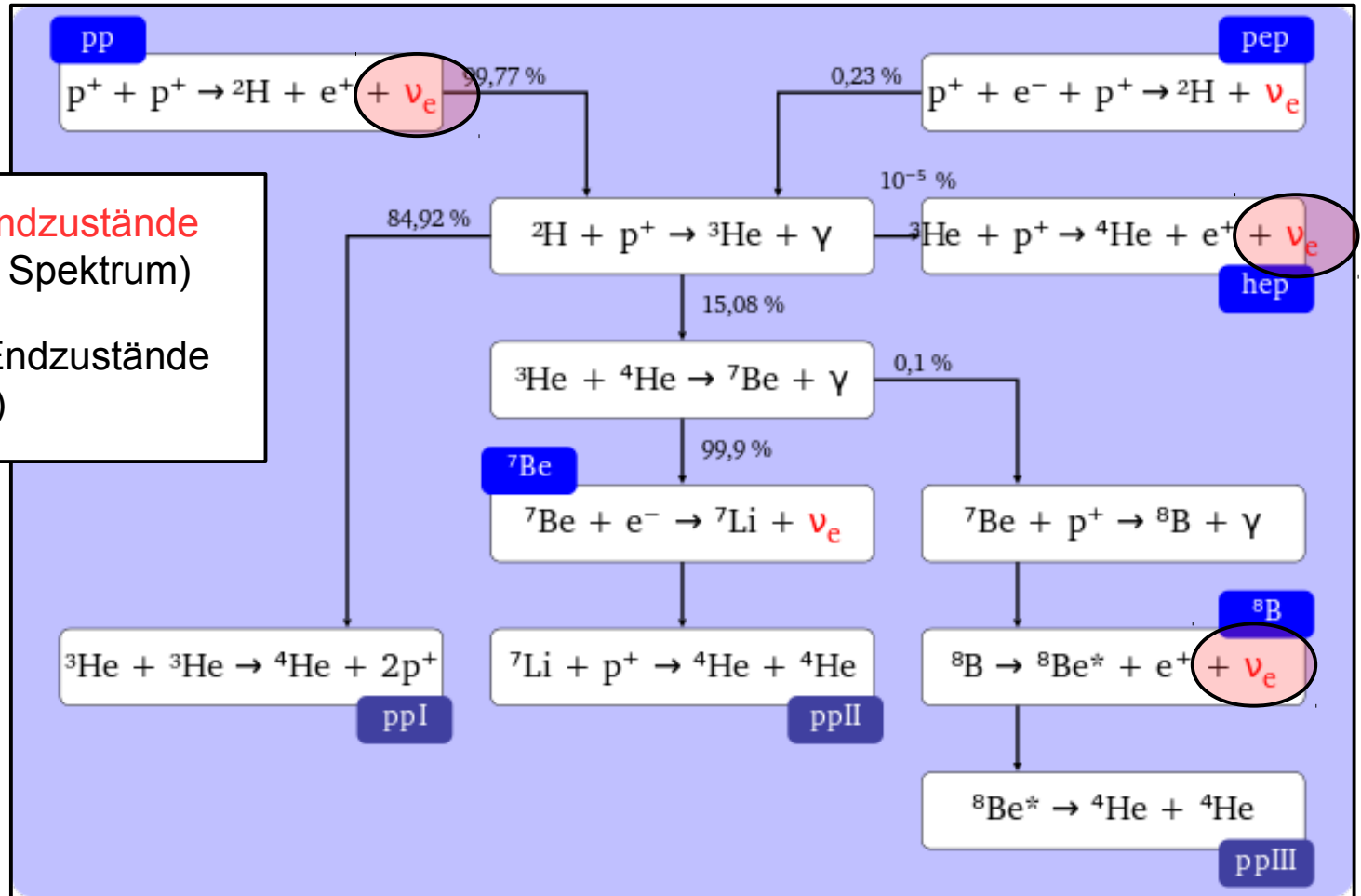


Atmosphärische Neutrinos



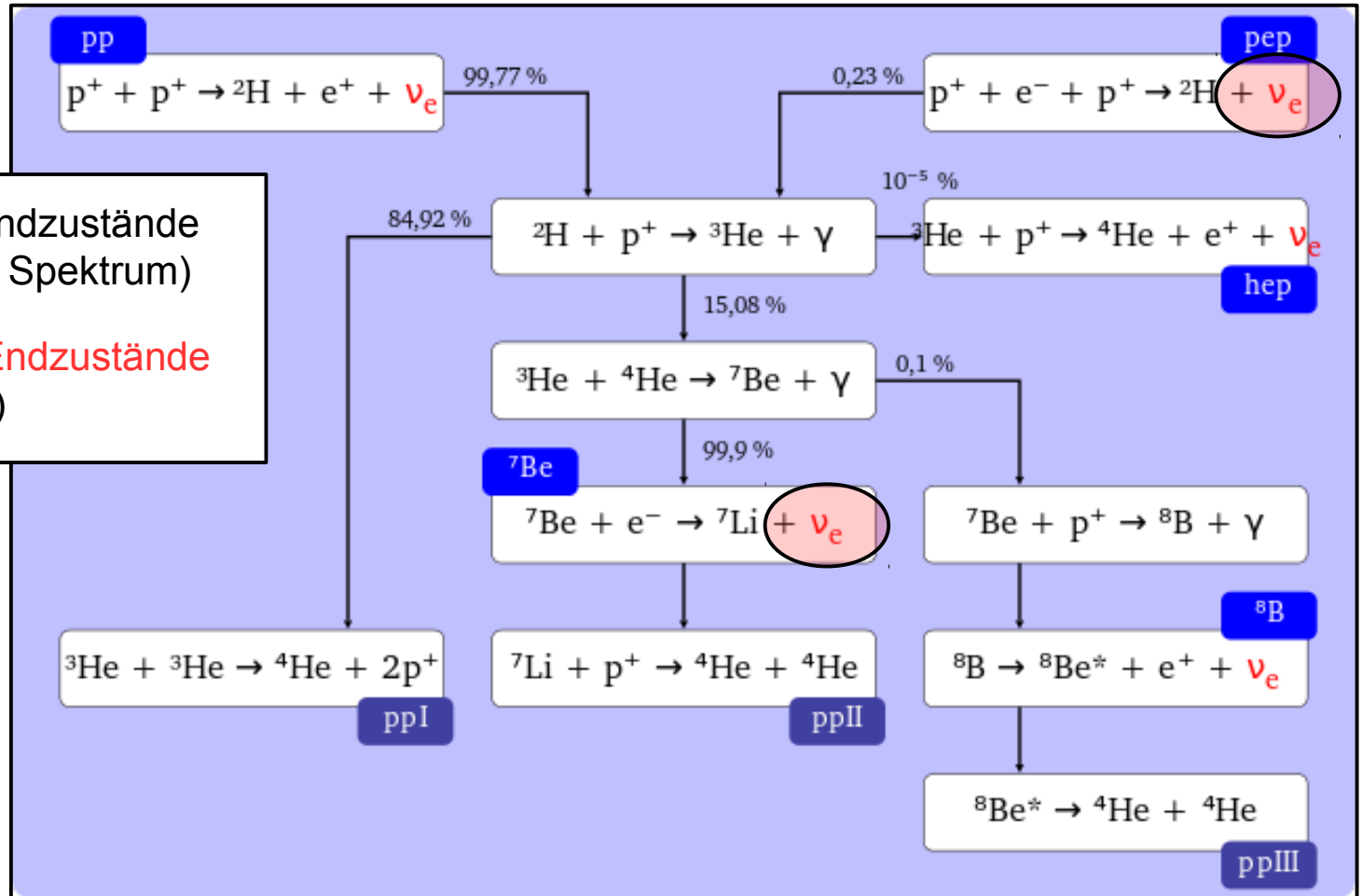
Neutrinos aus der Sonne (vgl VL-14 Folie 22ff)

- **Drei-Teilchen-Endzustände**
(kontinuierliches Spektrum)
- **Zwei-Teilchen-Endzustände**
(diskrete Linien)



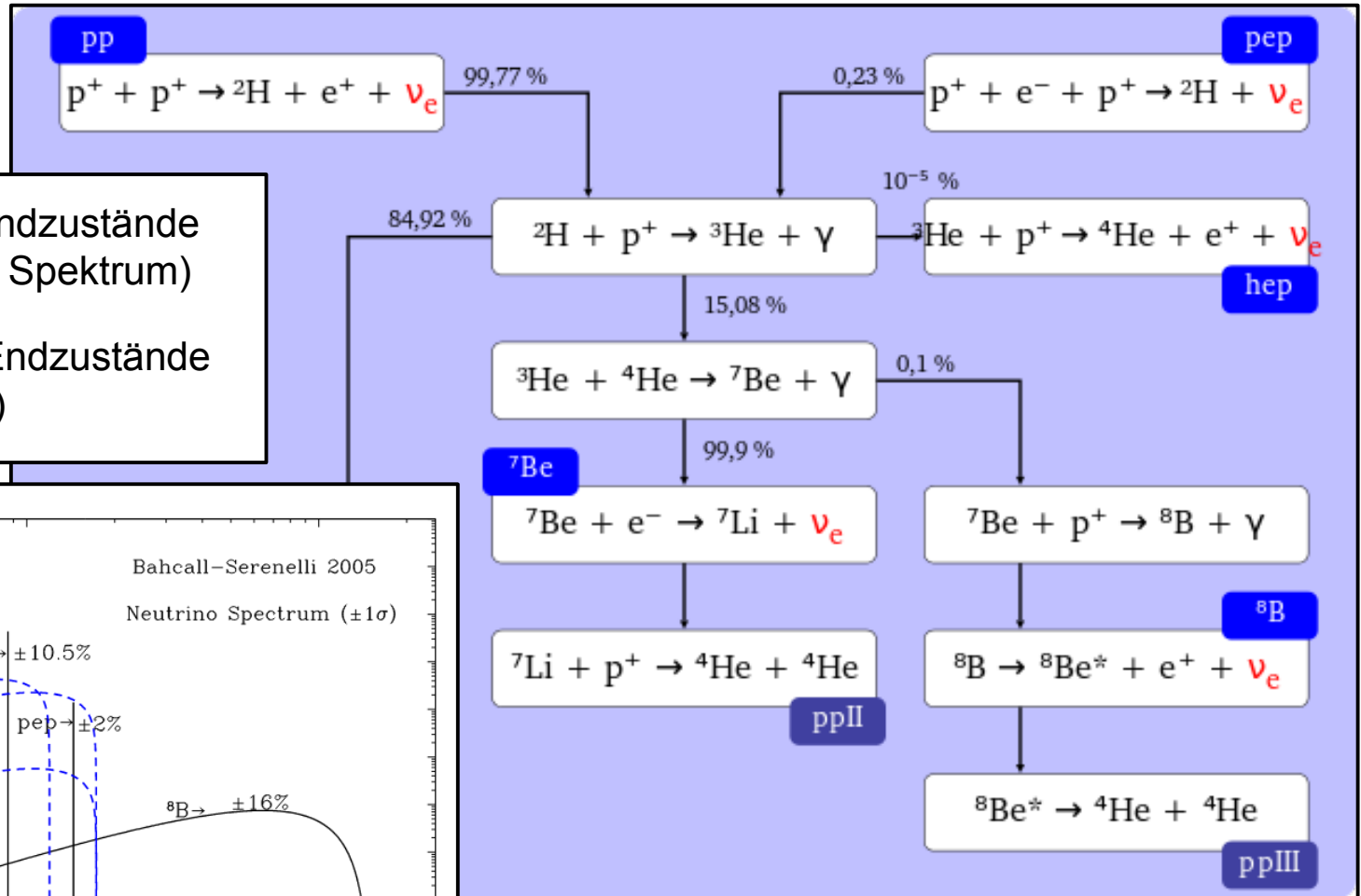
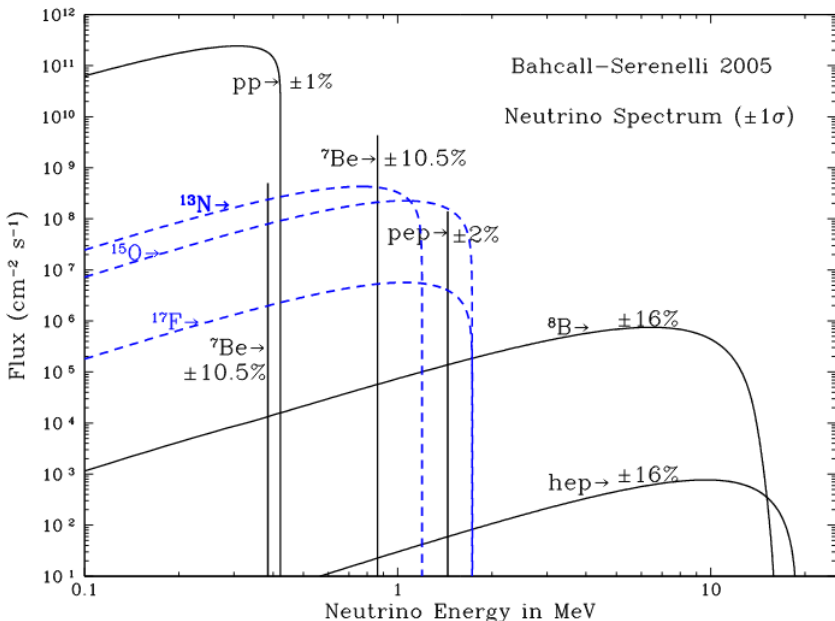
Neutrinos aus der Sonne (vgl VL-14 Folie 22ff)

- Drei-Teilchen-Endzustände (kontinuierliches Spektrum)
- **Zwei-Teilchen-Endzustände** (diskrete Linien)



Neutrinos aus der Sonne (vgl VL-14 Folie 22ff)

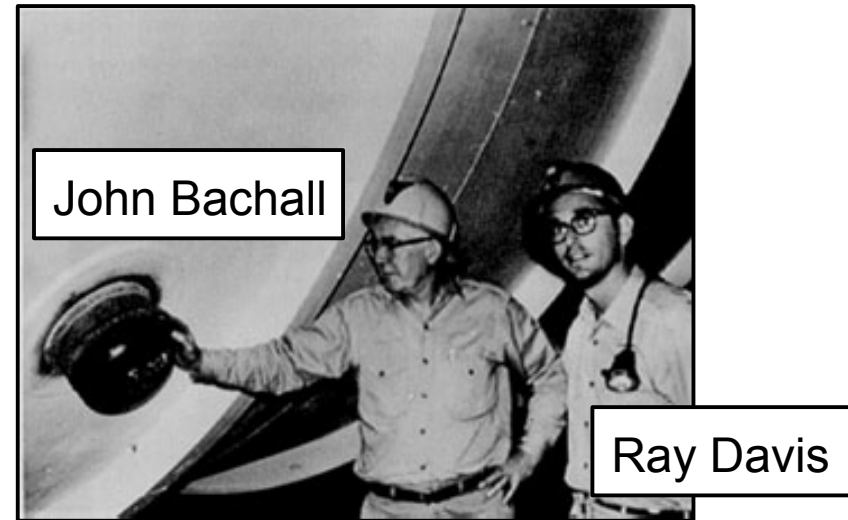
- Drei-Teilchen-Endzustände (kontinuierliches Spektrum)
- Zwei-Teilchen-Endzustände (diskrete Linien)



→ Weites Energiespektrum

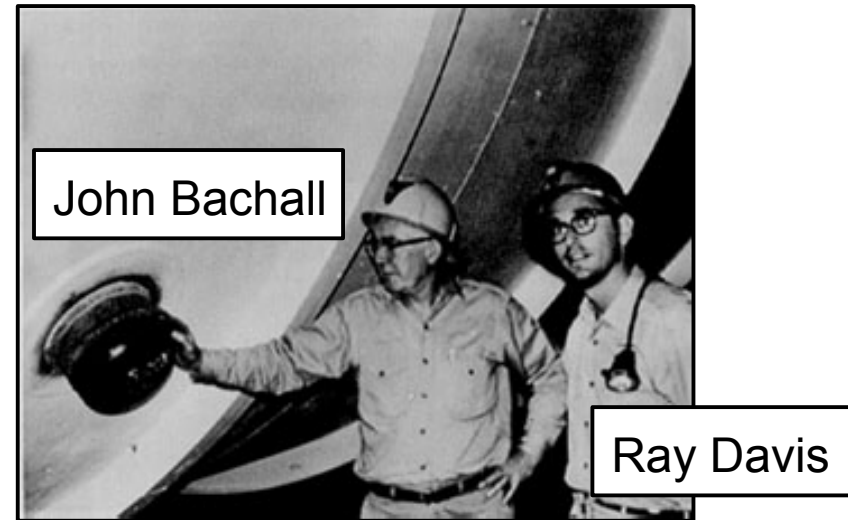
Homestake Experiment

- Erstes Experiment zur **Vermessung des solaren Neutrinoflusses**
- Herausforderung: untergrundfreies Meßverfahren für sehr **seltene Ereignisse**
- Tank mit 615 t Tetrachlorethylen in 1478 m tiefer Homestake Goldmine
- Nachweisreaktion: $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- ^{37}Ar zerfällt mit $T_{1/2} = 35$ d zurück in $^{37}\text{Cl}^*$
- Alle paar Wochen: Ausspülen des Tanks mit He und Aufsammeln des ^{37}Ar in einer Kühlfalle
- Erwarte **~1 Neutrino/Tag** → Auswaschen und Nachweis von $\mathcal{O}(10)$ Argonkernen pro Meßperiode



Homestake Experiment

- Erstes Experiment zur **Vermessung des solaren Neutrinoflusses**
- Herausforderung: untergrundfreies Meßverfahren für sehr **seltene Ereignisse**
- Tank mit 615 t Tetrachlorethylen in 1478 m tiefer Homestake Goldmine
- Nachweisreaktion: $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- ^{37}Ar zerfällt mit $T_{1/2} = 35$ d zurück in $^{37}\text{Cl}^*$
- Alle paar Wochen: Ausspülen des Tanks mit He und Aufsammeln des ^{37}Ar in einer Kühlfalle
- Erwarte **~1 Neutrino/Tag** → Auswaschen und Nachweis von $\mathcal{O}(10)$ Argonkernen pro Meßperiode

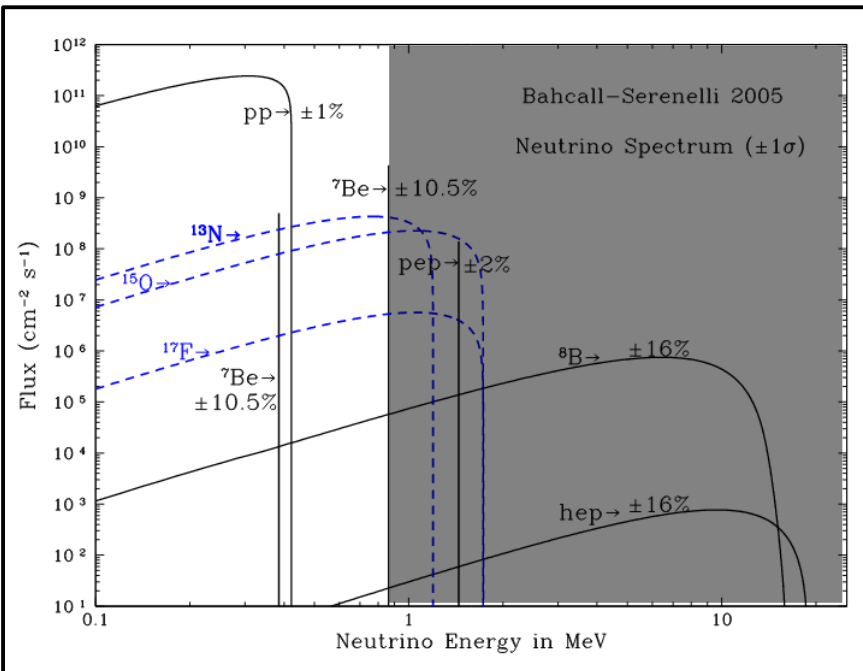


Überraschendes Ergebnis:
nur **~1/3 des erwarteten**
Flusses beobachtet

Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

Homestake Experiment

- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV \rightarrow ^7Be -Neutrinos



→ Weites Energiespektrum

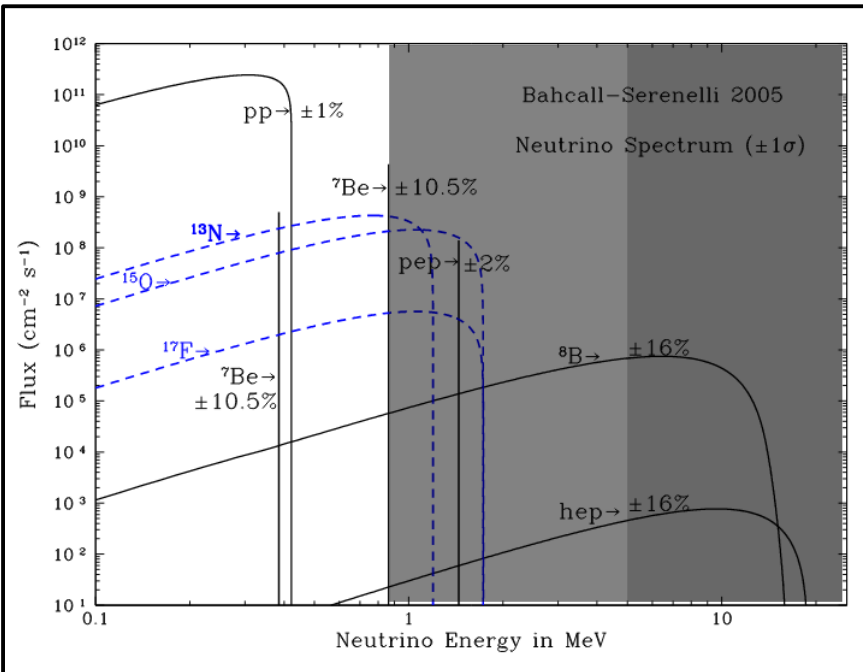
Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

Super-Kamiokande

- Wasser Cherenkov (VL-05 Folie 5)
- 5 MeV \rightarrow 8B -Neutrinos

Homestake Experiment

- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV \rightarrow ^7Be -Neutrinos



→ Weites Energiespektrum

Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

Super-Kamiokande

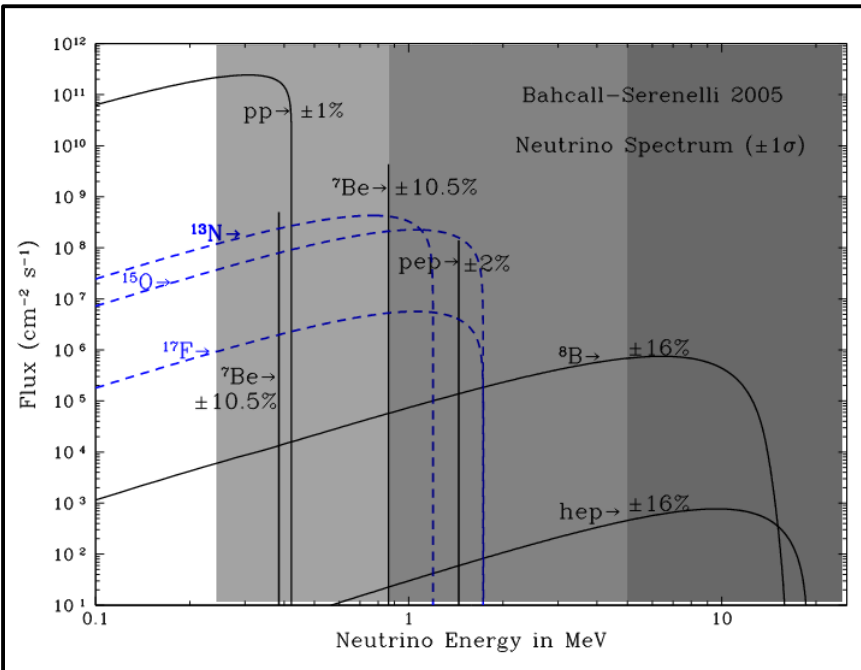
- Wasser Cherenkov (VL-05 Folie 5)
- 5 MeV \rightarrow 8B -Neutrinos

Homestake Experiment

- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV \rightarrow ^7Be -Neutrinos

Gallex/SAGE

- Radiochemisch
- $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$
- 233 keV \rightarrow pp-Neutrinos



\rightarrow Weites Energiespektrum

Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

Super-Kamiokande

- Wasser Cherenkov (VL-05 Folie 5)
- 5 MeV \rightarrow 8B -Neutrinos

Homestake Experiment

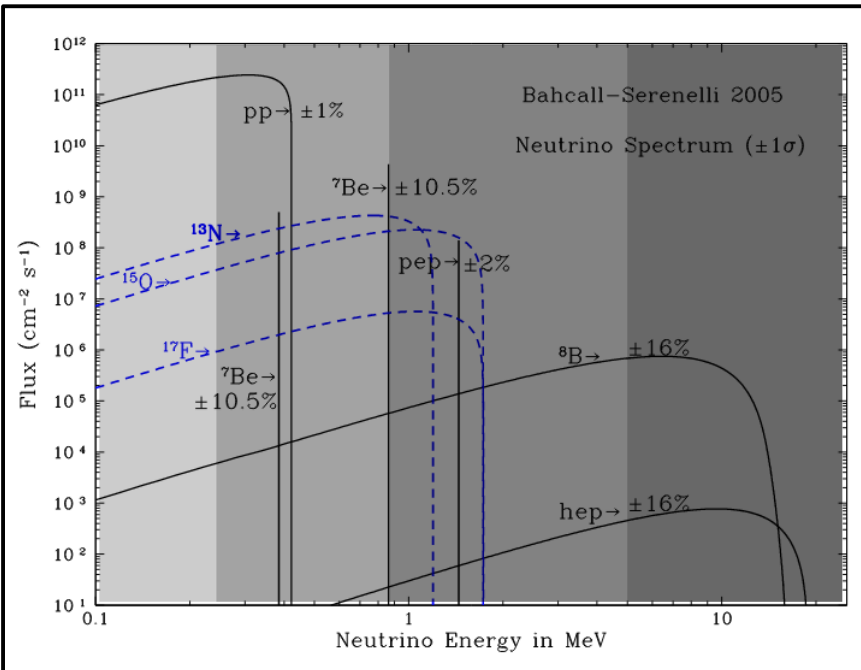
- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV \rightarrow ^7Be -Neutrinos

Gallex/SAGE

- Radiochemisch
- $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$
- 233 keV \rightarrow pp-Neutrinos

Borexino

- Szintillator
- $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- 50 keV \rightarrow pp-Neutrinos



\rightarrow Weites Energiespektrum

Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

Super-Kamiokande

- Wasser Cherenkov (VL-05 Folie 5)
- 5 MeV \rightarrow 8B -Neutrinos

Homestake Experiment

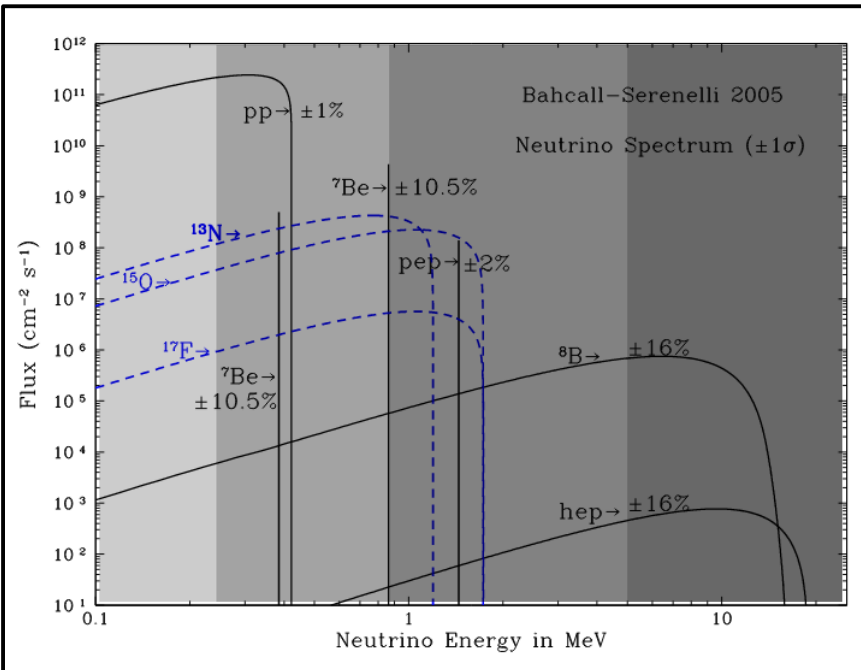
- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV \rightarrow ^7Be -Neutrinos

Gallex/SAGE

- Radiochemisch
- $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$
- 233 keV \rightarrow pp-Neutrinos

Borexino

- Szintillator
- $\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$
- 50 keV \rightarrow pp-Neutrinos



Gleiches Ergebnis über
volles Energiespektrum

\rightarrow Weites Energiespektrum

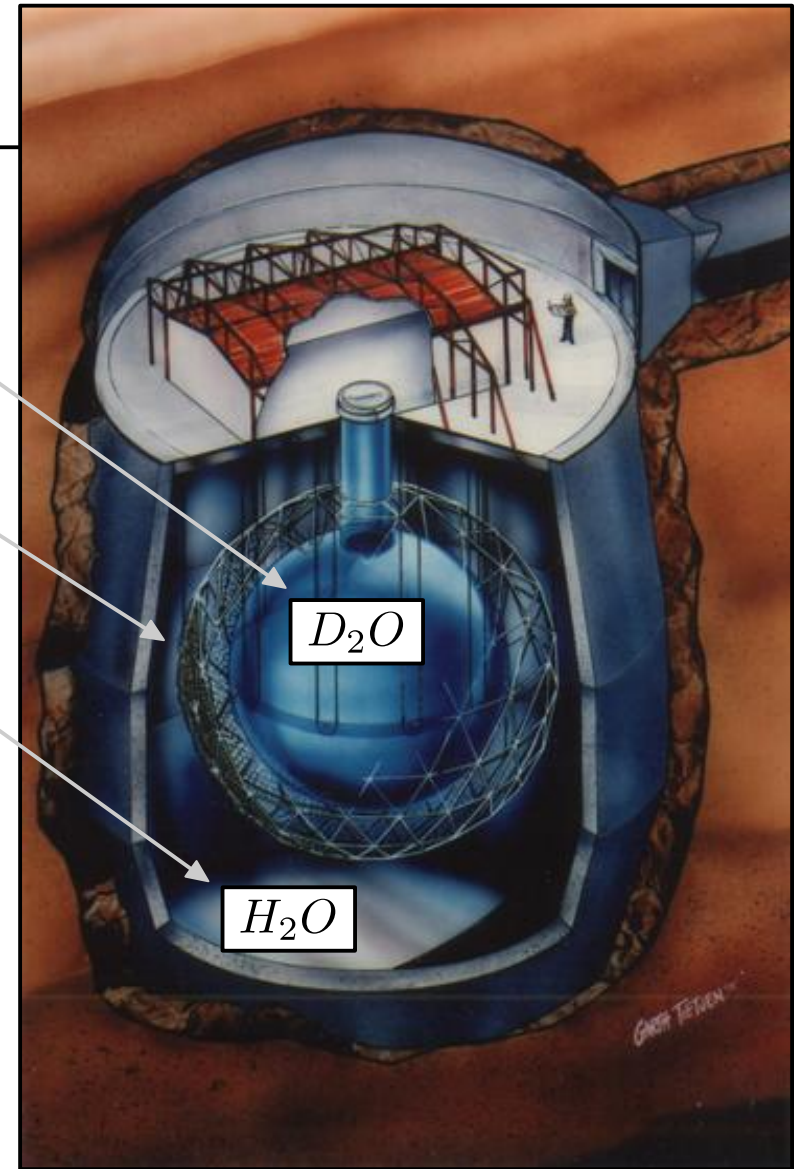
SNO Experiment

- Nachweis der Neutrinos durch **Cherenkovstrahlung** in schwerem Wasser (D_2O)

12 m Durchmesser

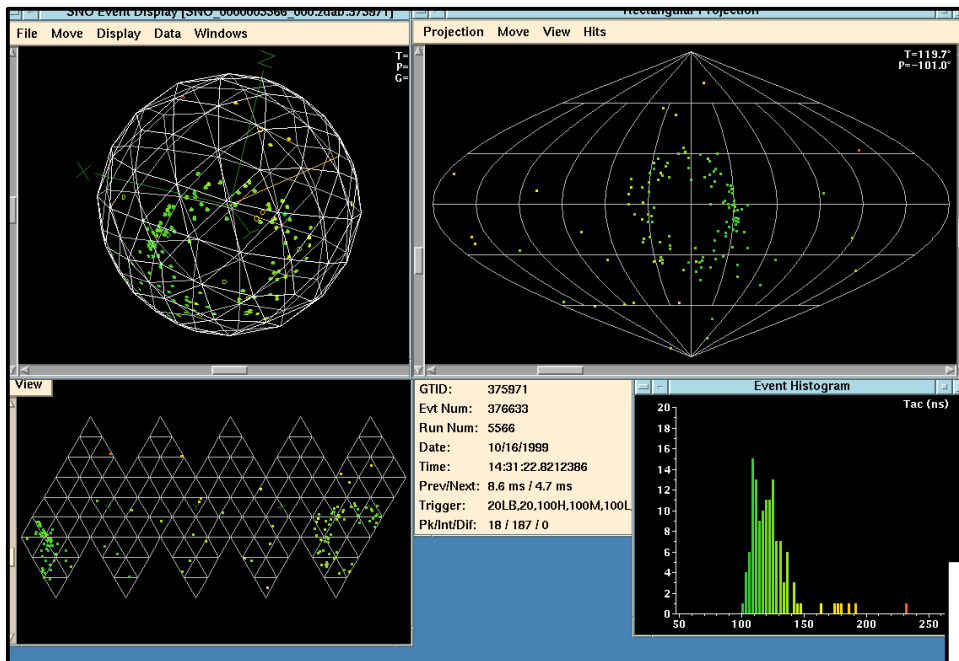
9450 PM & Reflektoren

25 m Durchmesser Hohlraum
(gefüllt mit H_2O)



D_2O

H_2O



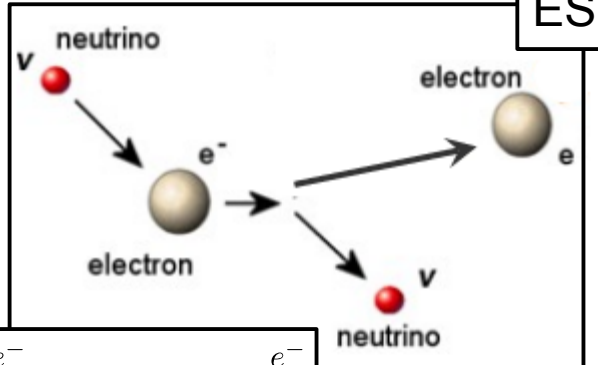
→ ν_e schlägt e^- aus

→ schnelles e^- erzeugt Cherenkovstrahlung

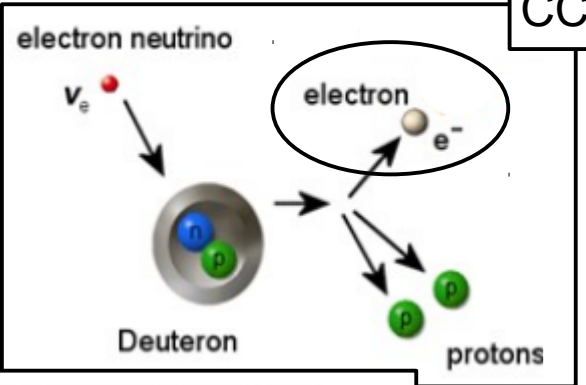
Typischerweise ~50 detektierte Photonen pro Ereignis

Unterscheidung von NC und CC

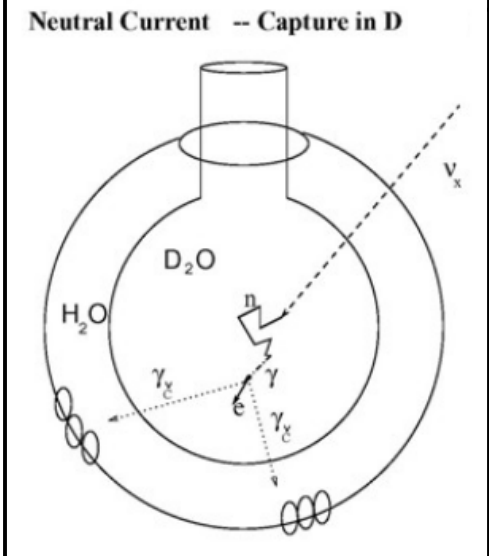
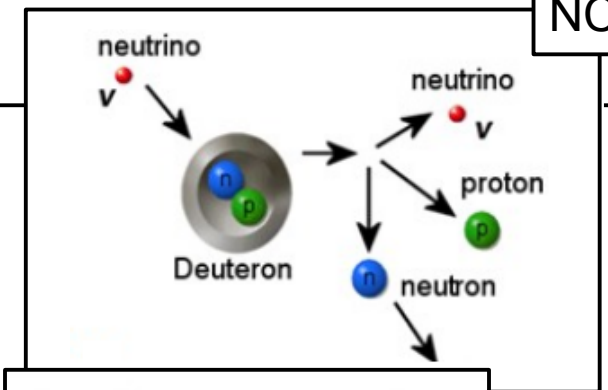
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$$



$$\nu_e + d \rightarrow \nu_e + p + p$$



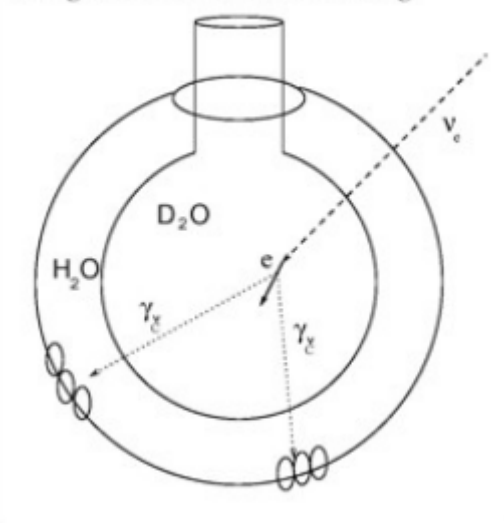
$$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + n + p$$



$$n + d \rightarrow t + \gamma(6.25 \text{ MeV})$$

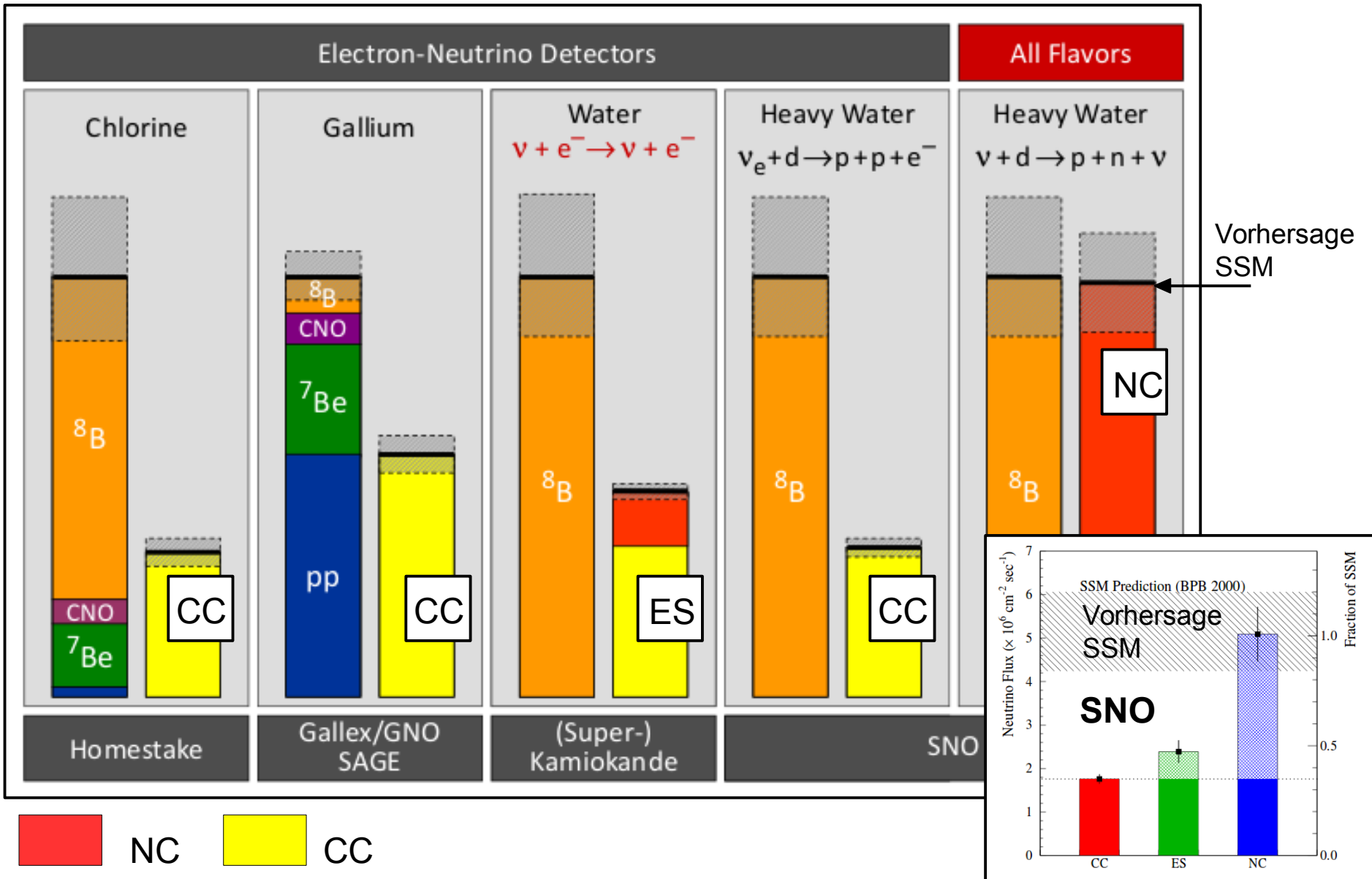
Später: Einfang durch ^{35}Cl
und durch eigene ^3He De-
tektoren

Charged Current/Elastic Scattering



**Unterscheidung NC und CC durch Gesamtenergie
& radiale Energieverteilung des Signals**

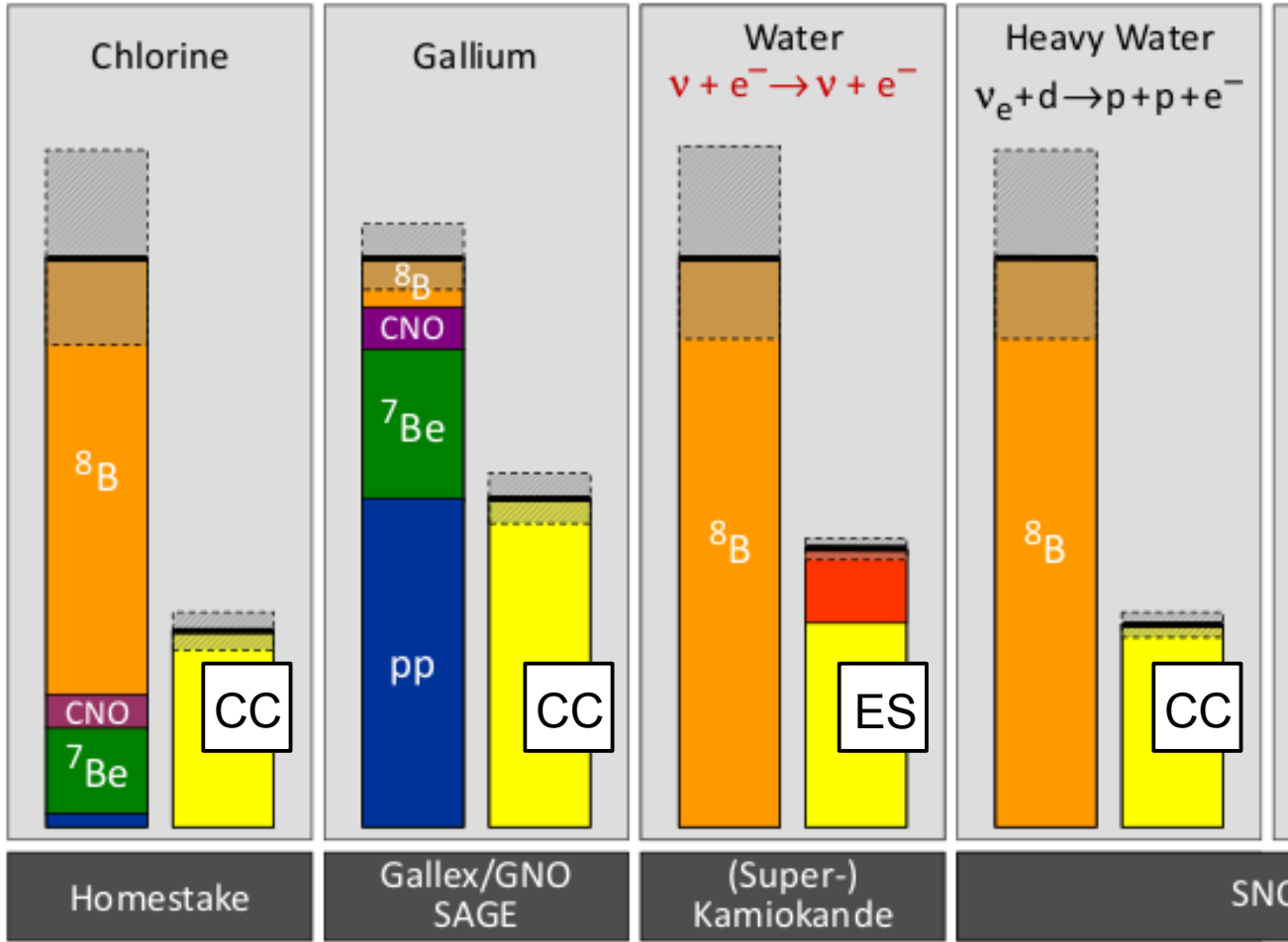
Ergebnis: Sonnenneutrinos



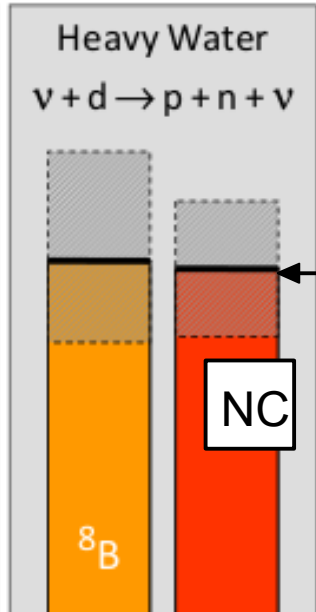
Ergebnis: Sonnenneutrinos

Beobachtung kompatibel mit $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$

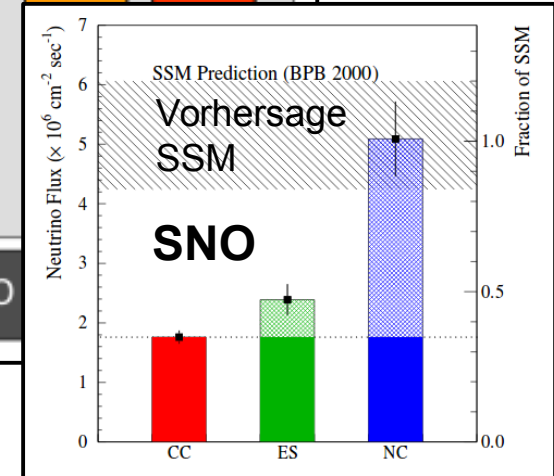
Electron-Neutrino Detectors



All Flavors



Vorhersage SSM



NC CC

Neutrinoquellen

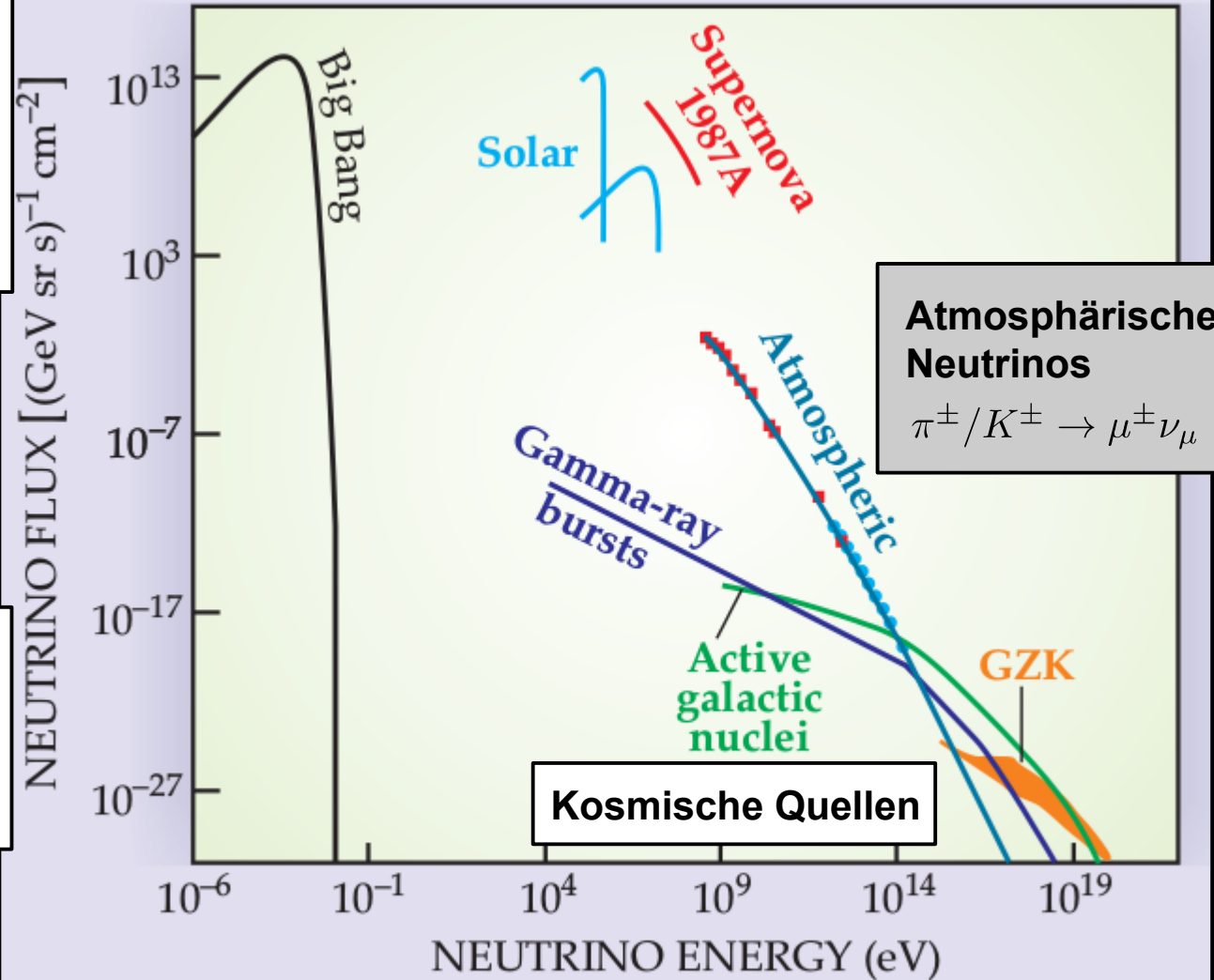
Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

Kernfusion in Sternen & Supernovae

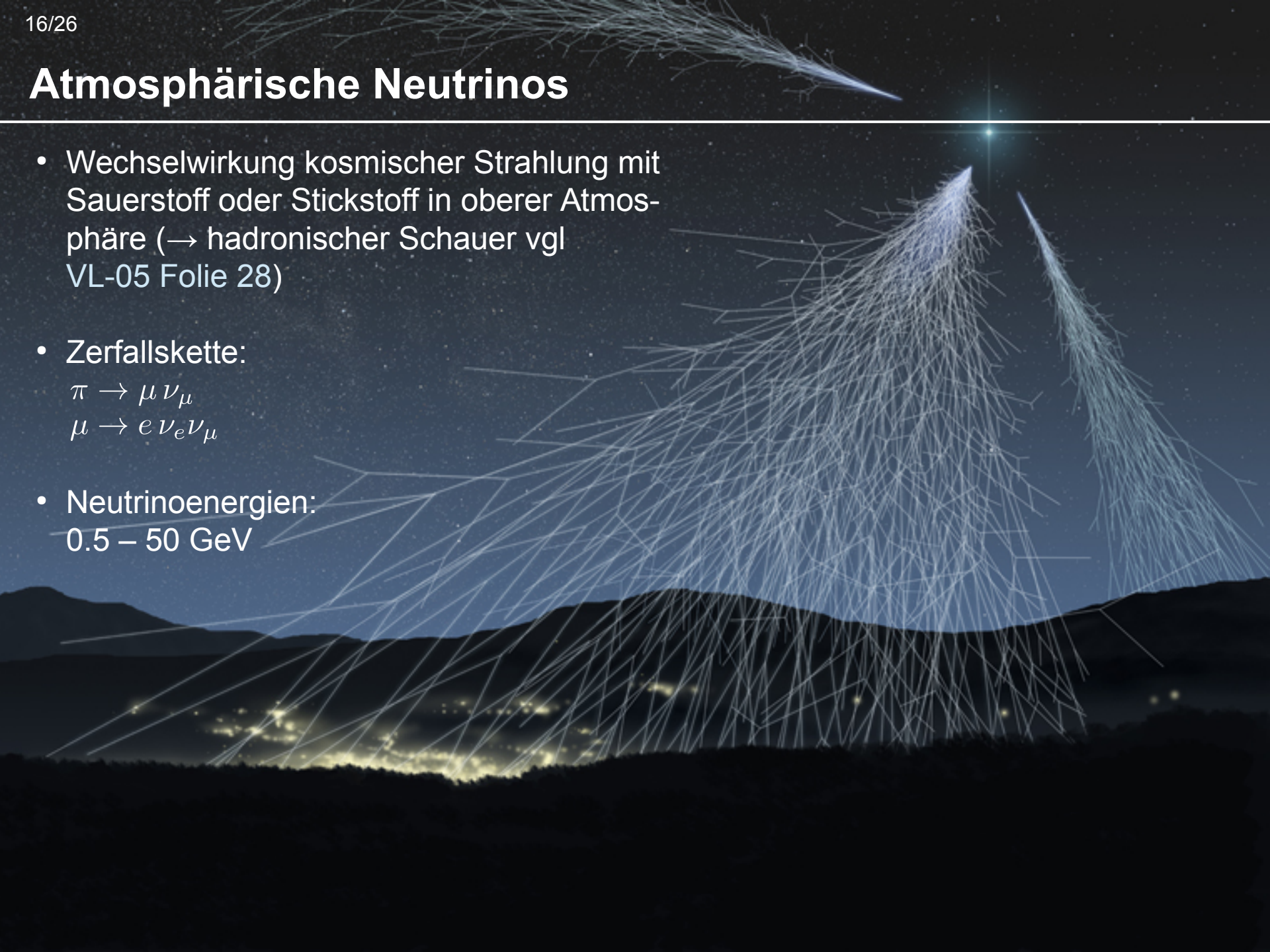


Atmosphärische Neutrinos

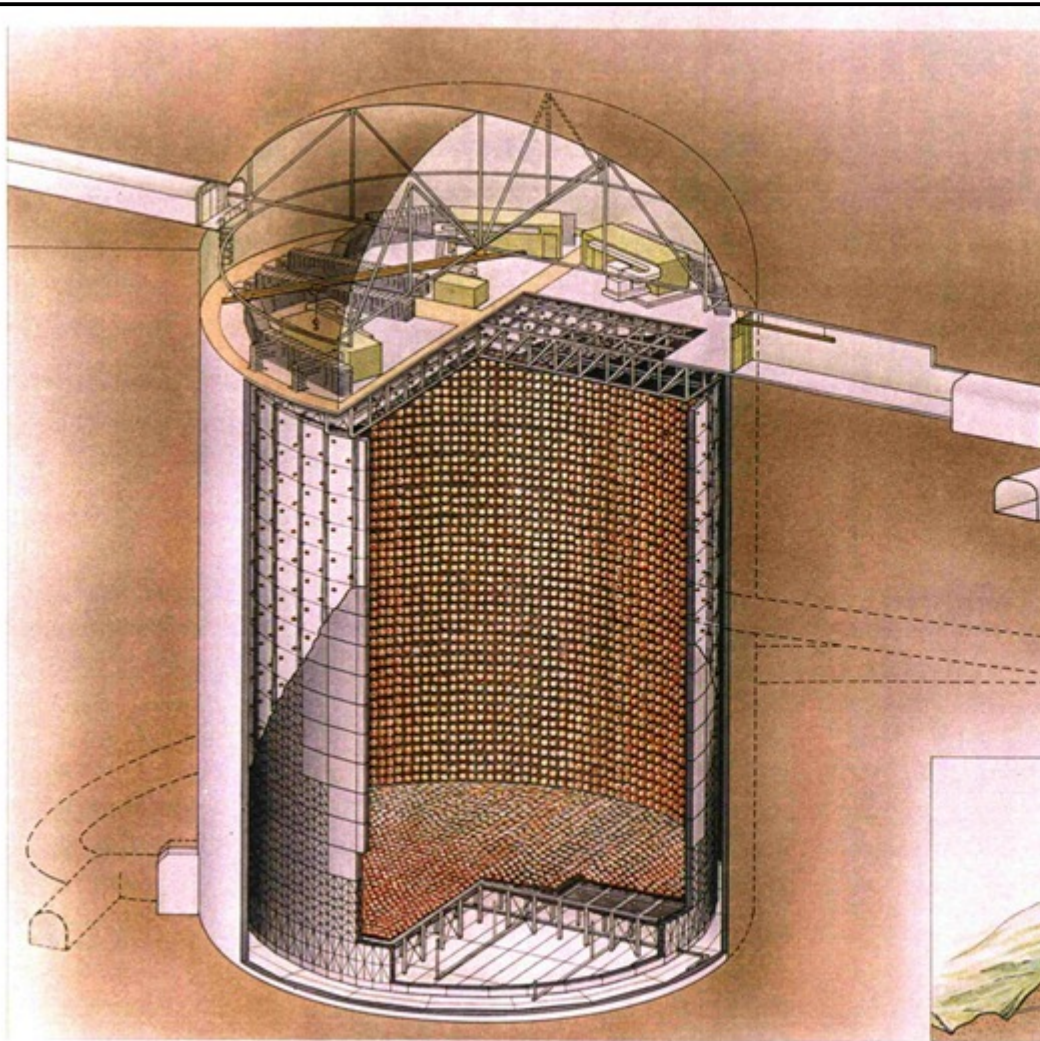
$$\pi^\pm / K^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$$

Atmosphärische Neutrinos

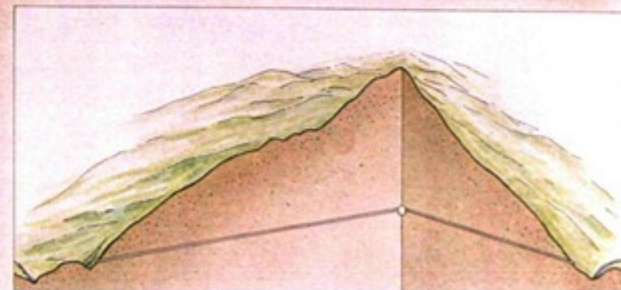
- Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit Sauerstoff oder Stickstoff in oberer Atmosphäre (→ hadronischer Schauer vgl VL-05 Folie 28)
- Zerfallskette:
 $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$
 $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$
- Neutrinoenergien:
0.5 – 50 GeV



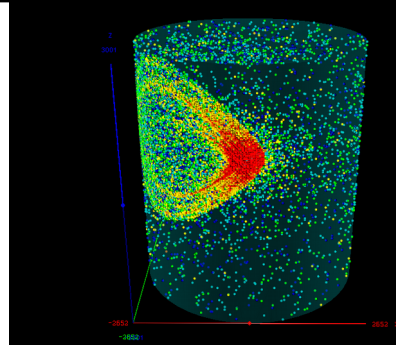
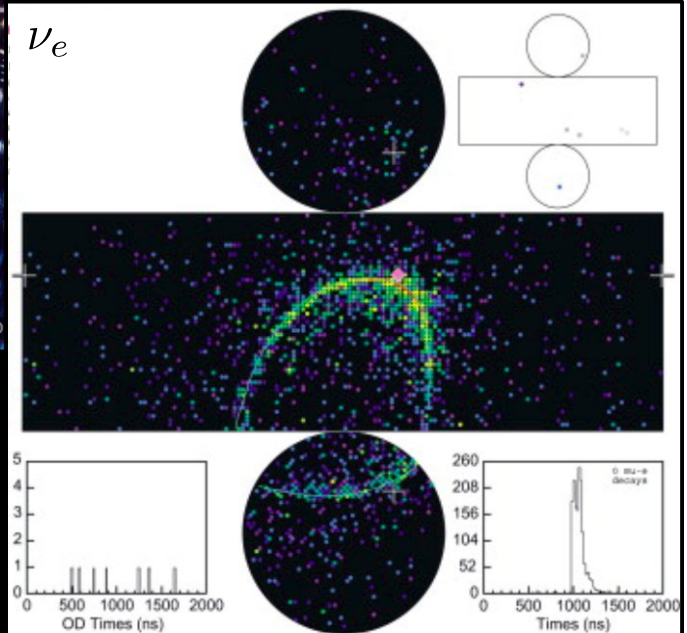
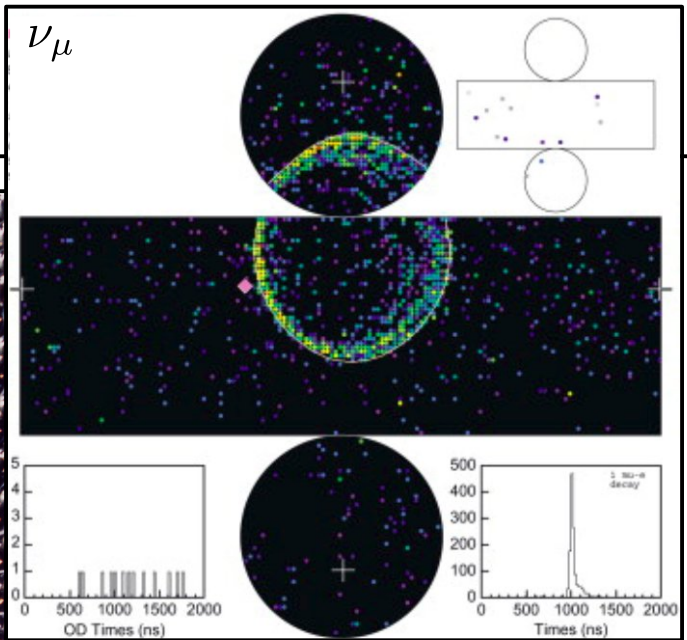
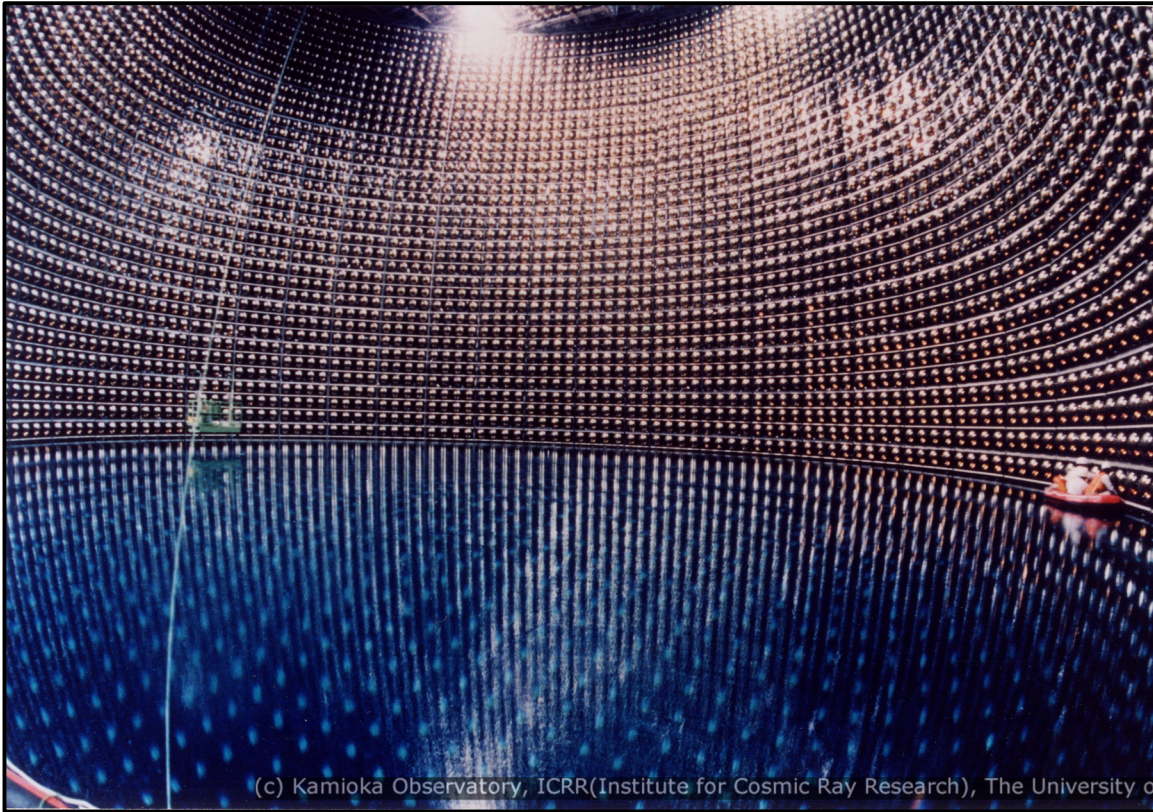
(Super-)Kamiokande Experiment



- Wasser Cherenkov Detektor
- 3000 (50'000) t Wasser
- 1000 (11'000) Photomultiplier zum Nachweis des Cherenkov-Lichts
- In Mozumi-Mine bei Kamioka (~1 km unter der Erde)
- Erwarte eine Reaktion alle 90 min



Kamiokande Ereignisse



Kamiokande Ergebnisse

- Beobachte Neutrinos von oben/unten

- **Beobachtung:**

ν_μ "verschwinden"

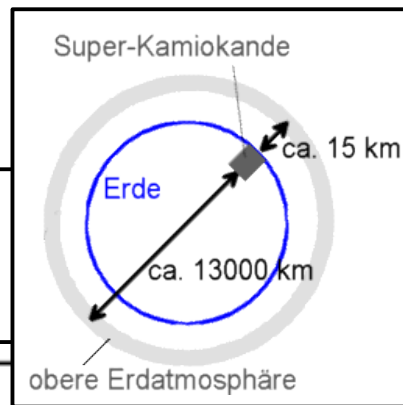
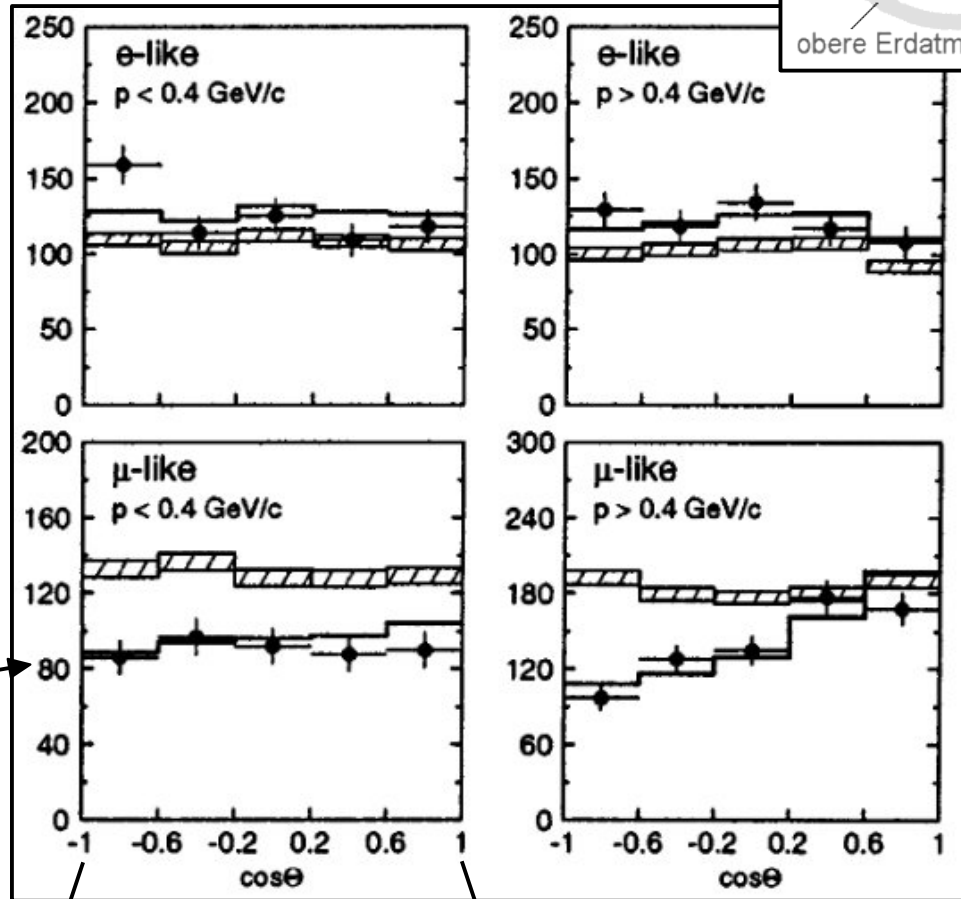
ν_e "verschwinden" nicht
bei Gang durch Erde

Beobachtung kompatibel
mit $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ Oszillation

Erwartung:

ohne Oszillation →

mit Oszillation →



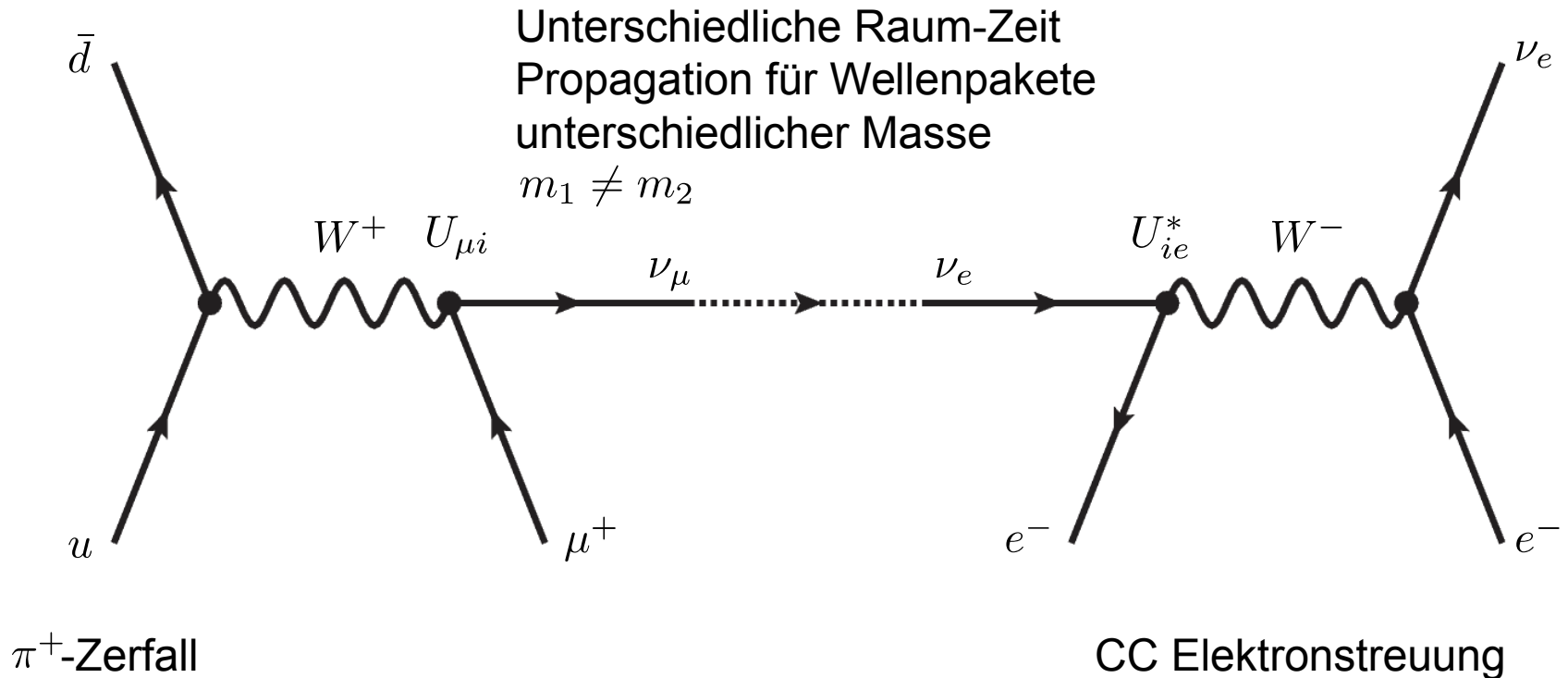
von unten

von oben

Neutrino-Oszillationen

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

- **Masseneigenzustände \neq Flavoreigenzustände** \rightarrow Mischung (vgl. [VL-22 Folie 15](#))
- Produktion/Nachweis \rightarrow Flavoreigenzustände
- Propagation (in Vakuum) \rightarrow Masseneigenzustände

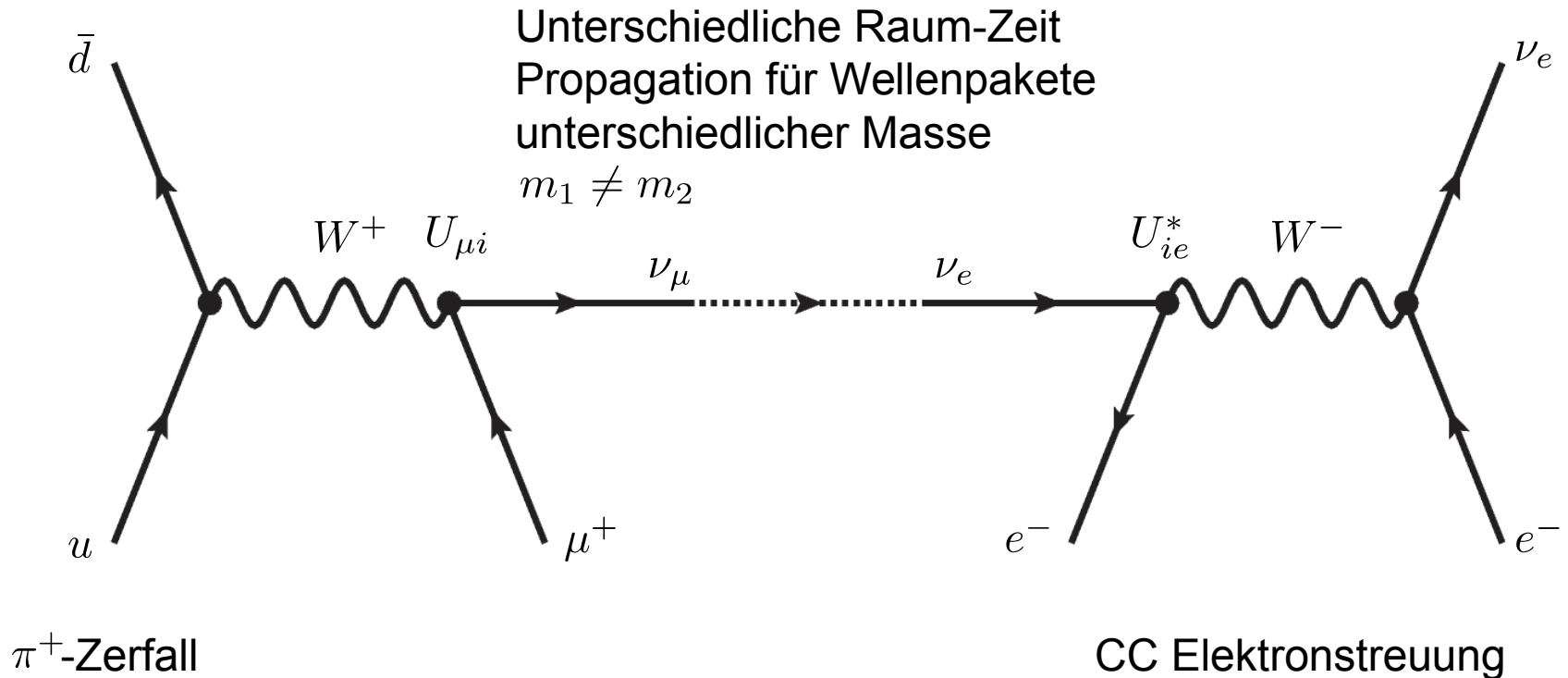


Neutrino-Oszillationen

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

- **Masseneigenzustände \neq Flavoreigenzustände** \rightarrow Mischung (vgl. [VL-22 Folie 15](#))
- Produktion/Nachweis \rightarrow Flavoreigenzustände
- Propagation (in Vakuum) \rightarrow Masseneigenzustände

Zusätzlich **MSW-Effekt** in Materie (CC in e^- -dichten Medien verändert effektive ν_e Masse)



Neutrino-Oszillationen: Vermessung

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

- **Masseneigenzustände \neq Flavoreigenzustände** \rightarrow Mischung (vgl. VL-22 Folie 15)
- Aus QM Betrachtung:

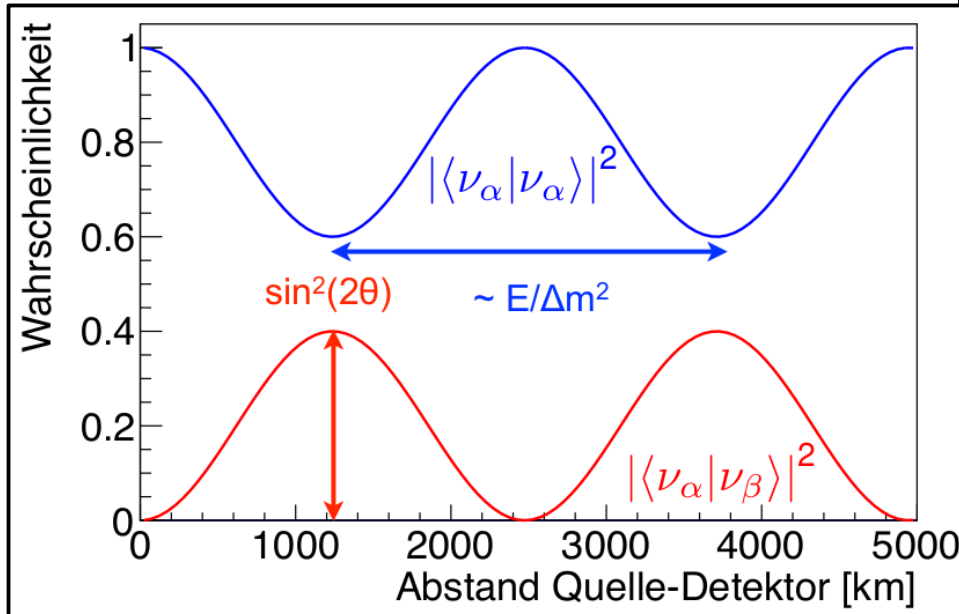
$$|\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\Delta m_{\alpha\beta}^2 \frac{L}{4E}\right)$$

Für zwei Generationen

$$= \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m_{\alpha\beta}^2 \frac{L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}\right)$$

Gute Näherung für
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ und $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$

Für zwei Generationen:



Hier: $E = 1 \text{ GeV}$ $\sin^2(2\theta) = 0.4$ $\Delta m_{\alpha\beta}^2 = 0.001 \text{ eV}^2$

Experimentelle Vorgabe:

- Neutrino-Energie
- Abstand Quelle-Detektor

Messung:

- Mischungswinkel $\sin^2(2\theta)$ (\rightarrow Amplitude)
- Quadrat der Massendifferenz $\Delta m_{\alpha\beta}^2$ (\rightarrow Frequenz)

PMNS-Matrix

- Äquivalent zur CKM Matrix (vgl VL-22 Folie 15)

Atmosphärische Oszillationen

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \approx 45^\circ$$

v.a. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

$$\mathcal{M}_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{13}} & 0 & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} ; s_{ij} = \sin \theta_{ij} \quad (ij = 12, 13, 23)$$

PMNS-Matrix

- Äquivalent zur CKM Matrix (vgl VL-22 Folie 15)

Atmosphärische Oszillationen

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \approx 45^\circ$$

v.a. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Solare Oszillationen

$$\Delta m_{12}^2 \approx 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \approx 35^\circ$$

$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$ Mischzustand

$$\mathcal{M}_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{13}} & 0 & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} ; s_{ij} = \sin \theta_{ij} \quad (ij = 12, 13, 23)$$

PMNS-Matrix

- Äquivalent zur CKM Matrix (vgl VL-22 Folie 15)

Reaktor Oszillationen

$$\Delta m_{13}^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{13} \approx 9^\circ$$

Atmosphärische Oszillationen

$$\Delta m_{23}^2 \approx 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \approx 45^\circ$$

v.a. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Solare Oszillationen

$$\Delta m_{12}^2 \approx 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \approx 35^\circ$$

$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$ Mischzustand

$$\mathcal{M}_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{13}} & 0 & c_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

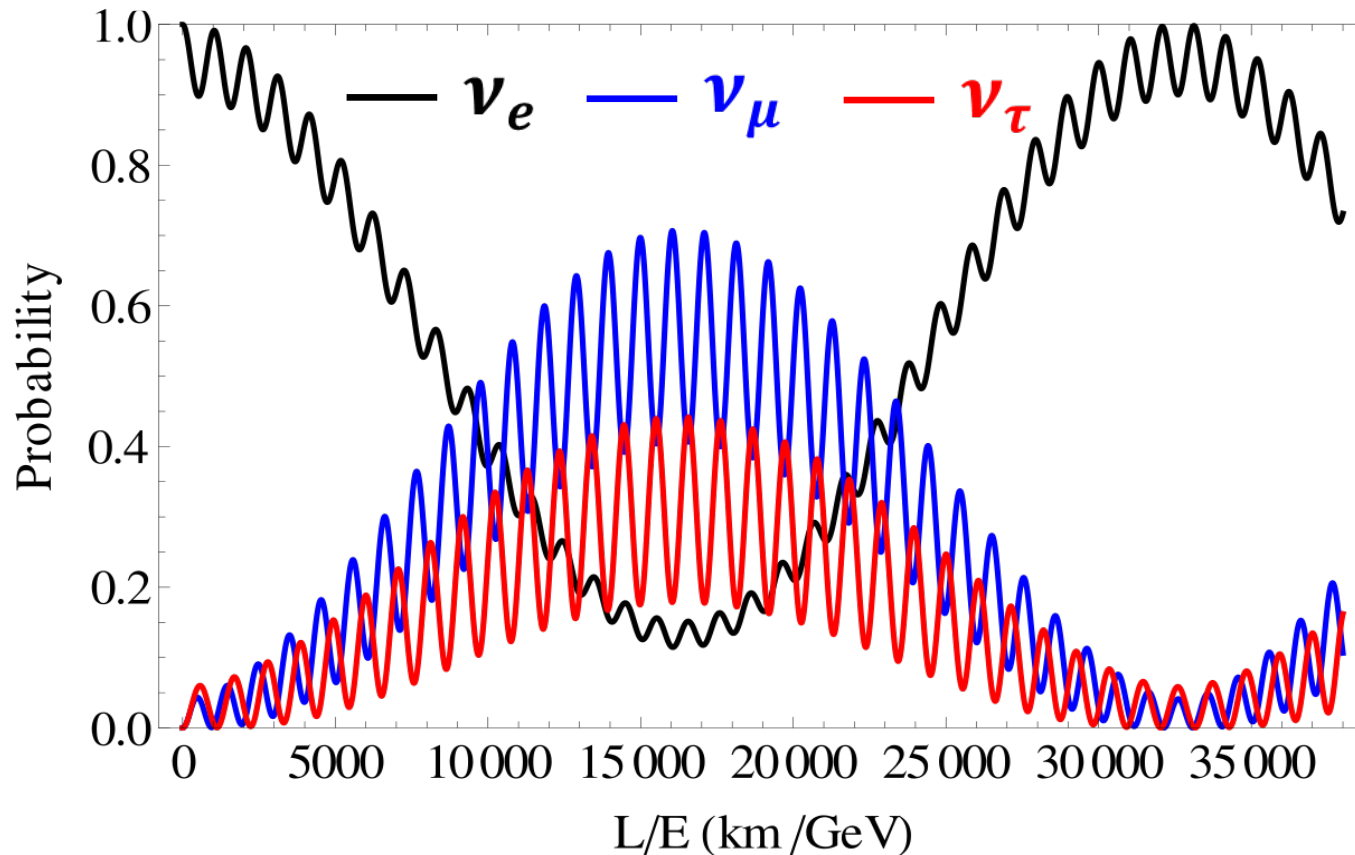
$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}c_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}}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

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} ; s_{ij} = \sin \theta_{ij} \quad (ij = 12, 13, 23)$$

Oszillation ursprüngliches ν_e

$$|\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum \operatorname{Re} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin^2 \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{4 E} \right) + 2 \sum \operatorname{Im} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{2 E} \right)$$

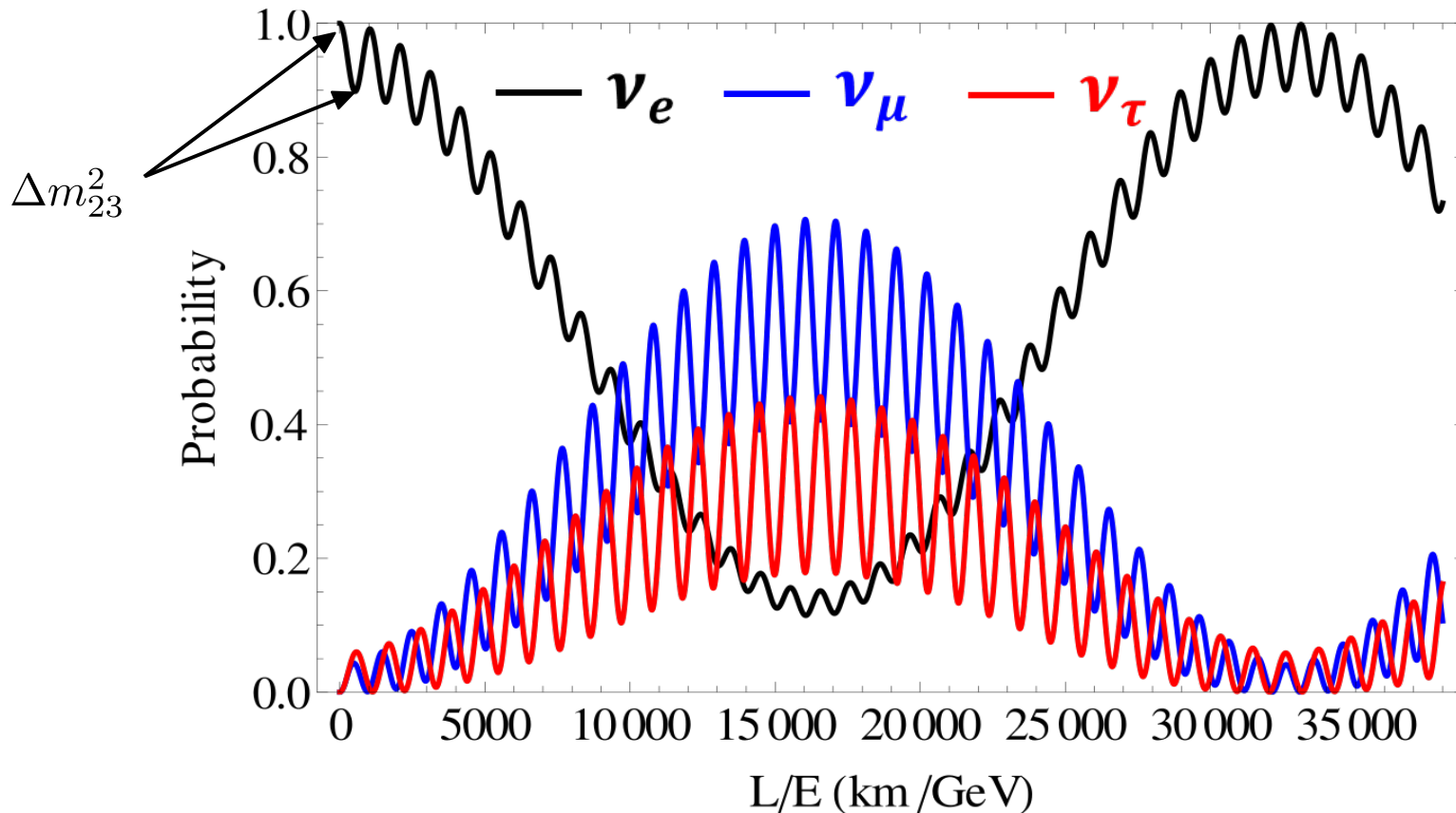
Herleitung
siehe [hier](#)



Oszillation ursprüngliches ν_e

$$|\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum \operatorname{Re} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin^2 \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{4 E} \right) + 2 \sum \operatorname{Im} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{2 E} \right)$$

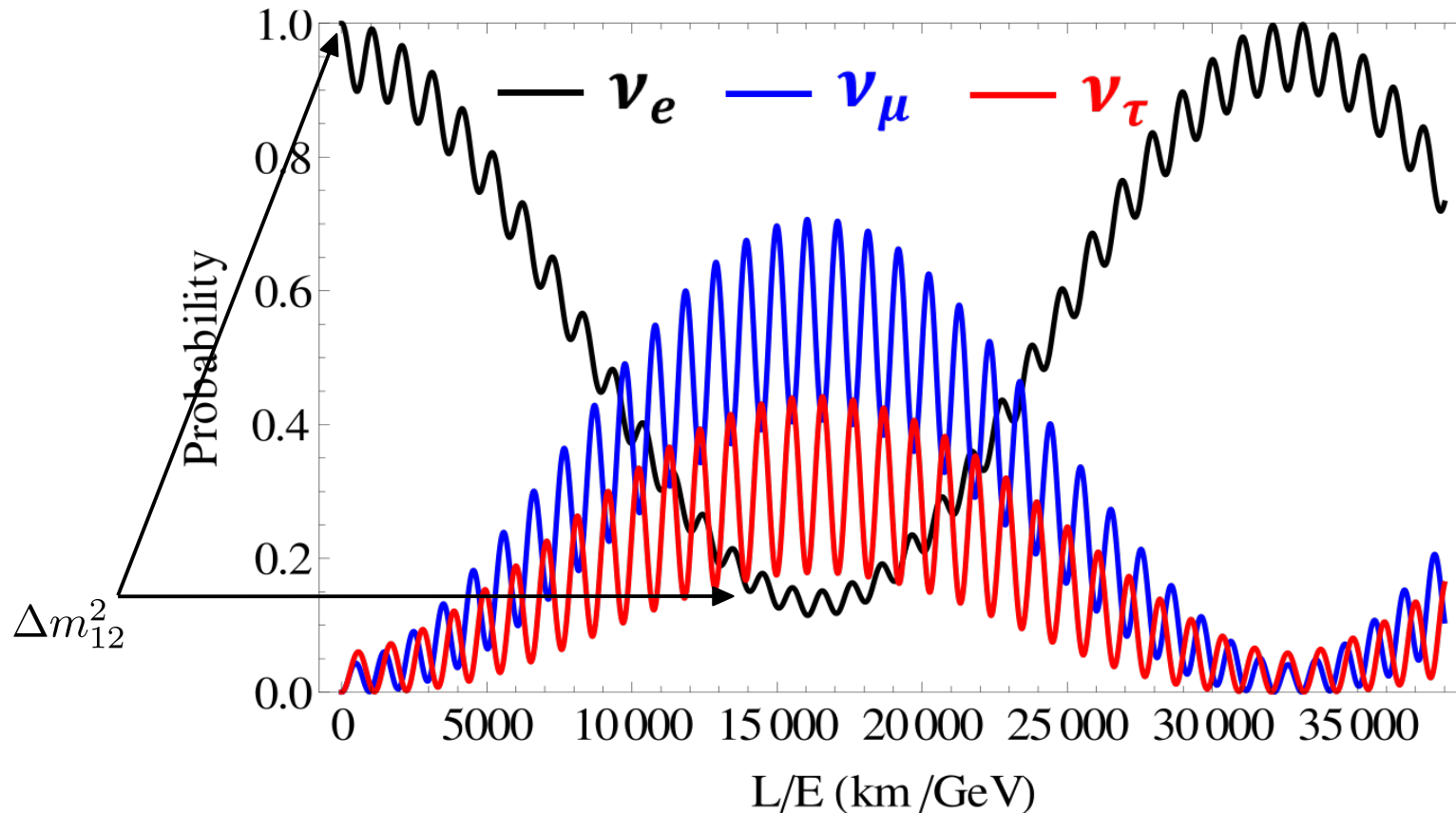
Herleitung
siehe [hier](#)



Oszillation ursprüngliches ν_e

$$|\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum \operatorname{Re} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin^2 \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{4 E} \right) + 2 \sum \operatorname{Im} (\mathcal{M}_{\alpha i}^* \mathcal{M}_{\beta i} \mathcal{M}_{\alpha j} \mathcal{M}_{\beta i}^*) \sin \left(\frac{(m_i^2 - m_j^2) L}{2 E} \right)$$

Herleitung
siehe [hier](#)



Neutrino Experimente mit menschlichen Quellen

- Appearance/Disappearance

- Long/Short Baseline

MINERVA

JUNO

MINOS

T2K

KamLAND

Daya Bay

Reno

PINGU

Double Chooz

Opera

MiniBooNE

ORCA

Nova

NUCIFER

INO

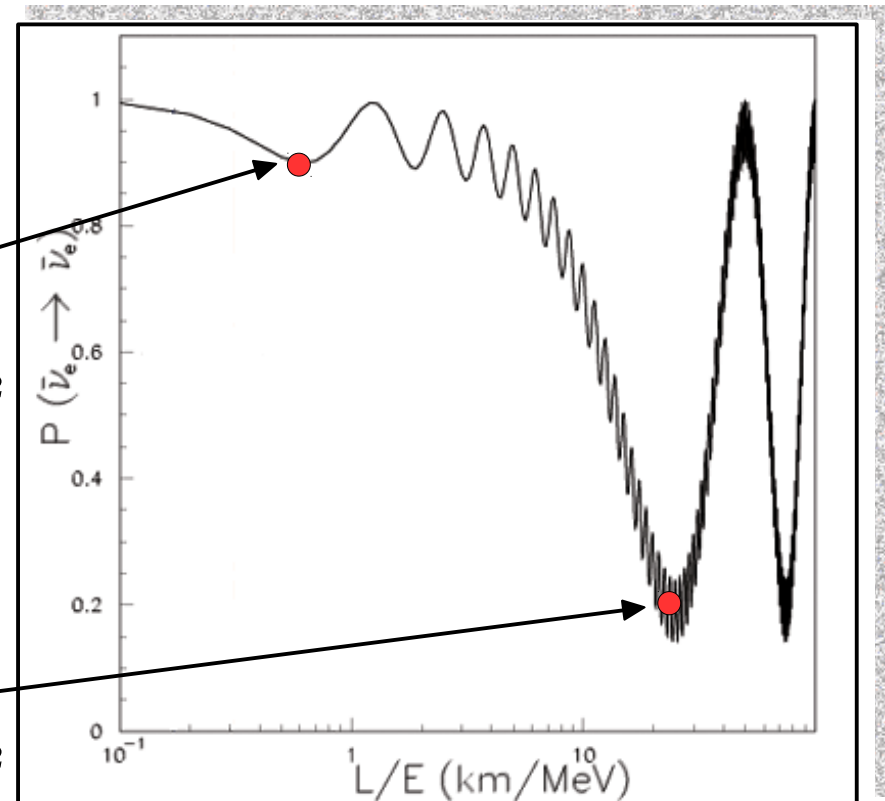
- Ein Detektor nahe bei Quelle (=near), einer von Quelle entfernt (=far)

Atmosphärische
Frequenz

$$\Delta m_{23}^2 = \mathcal{O}(10^{-3}) \text{ eV}^2$$

Solare Frequenz

$$\Delta m_{12}^2 = \mathcal{O}(10^{-5}) \text{ eV}^2$$



Neutrino Experimente mit menschlichen Quellen

- Appearance/Disappearance

- Long/Short Baseline

MINERVA

JUNO

MINOS

KamLAND

T2K

Daya Bay

Reno

PINGU

Double Chooz

Opera

MiniBooNE

ORCA

Nova

NUCIFER

INO

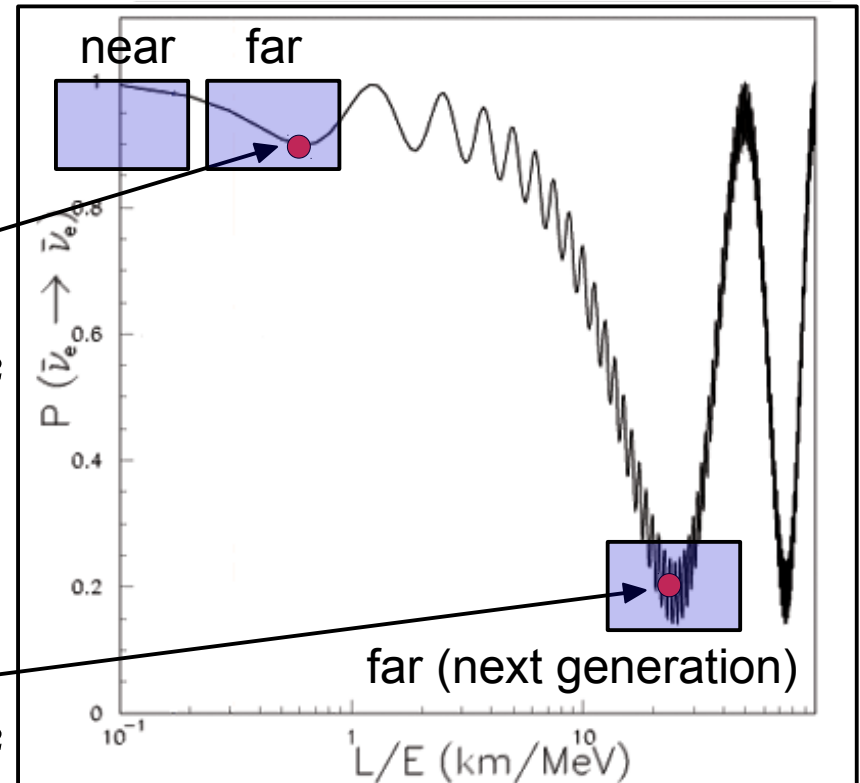
- Ein Detektor nahe bei Quelle (=near), einer von Quelle entfernt (=far)

Atmosphärische
Frequenz

$$\Delta m_{23}^2 = \mathcal{O}(10^{-3}) \text{ eV}^2$$

Solare Frequenz

$$\Delta m_{12}^2 = \mathcal{O}(10^{-5}) \text{ eV}^2$$



Neutrino Experimente mit menschlichen Quellen

- Appearance/Disappearance

- Long/Short Baseline

MINERVA

JUNO

MINOS

T2K

KamLAND

Daya Bay

Reno

PINGU

Double Chooz

Opera

MiniBooNE

ORCA

Nova

NUCIFER

INO

- Ein Detektor nahe bei Quelle (=near), einer von Quelle entfernt (=far)

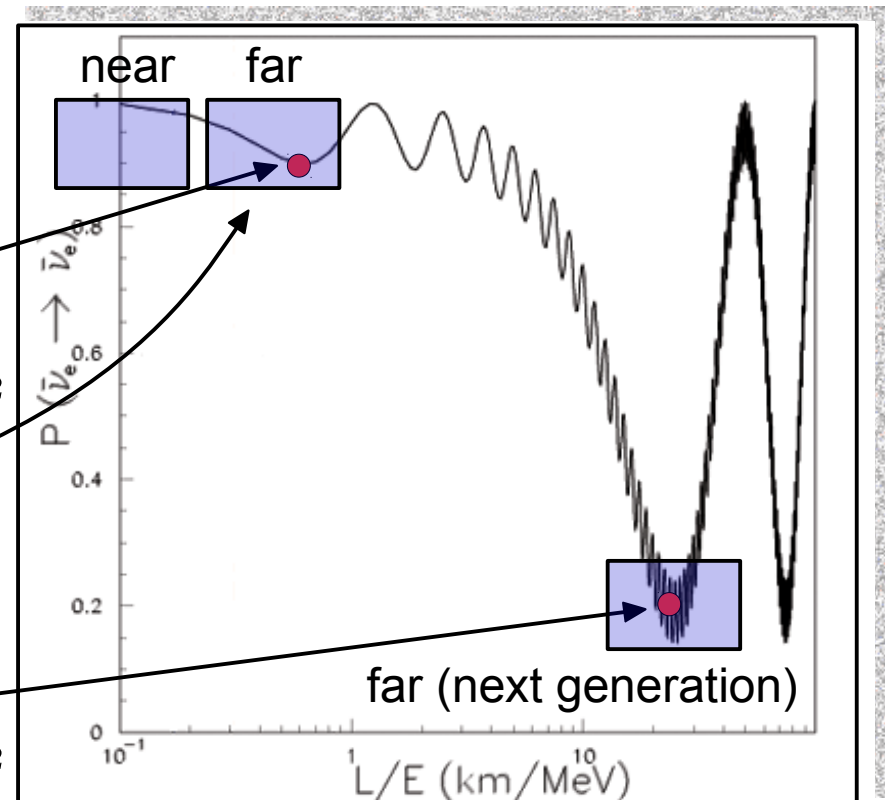
Atmosphärische
Frequenz

$$\Delta m_{23}^2 = \mathcal{O}(10^{-3}) \text{ eV}^2$$

Schwund von ν_e
nach $\nu_{\mu,\tau}$ in erster
Halbperiode

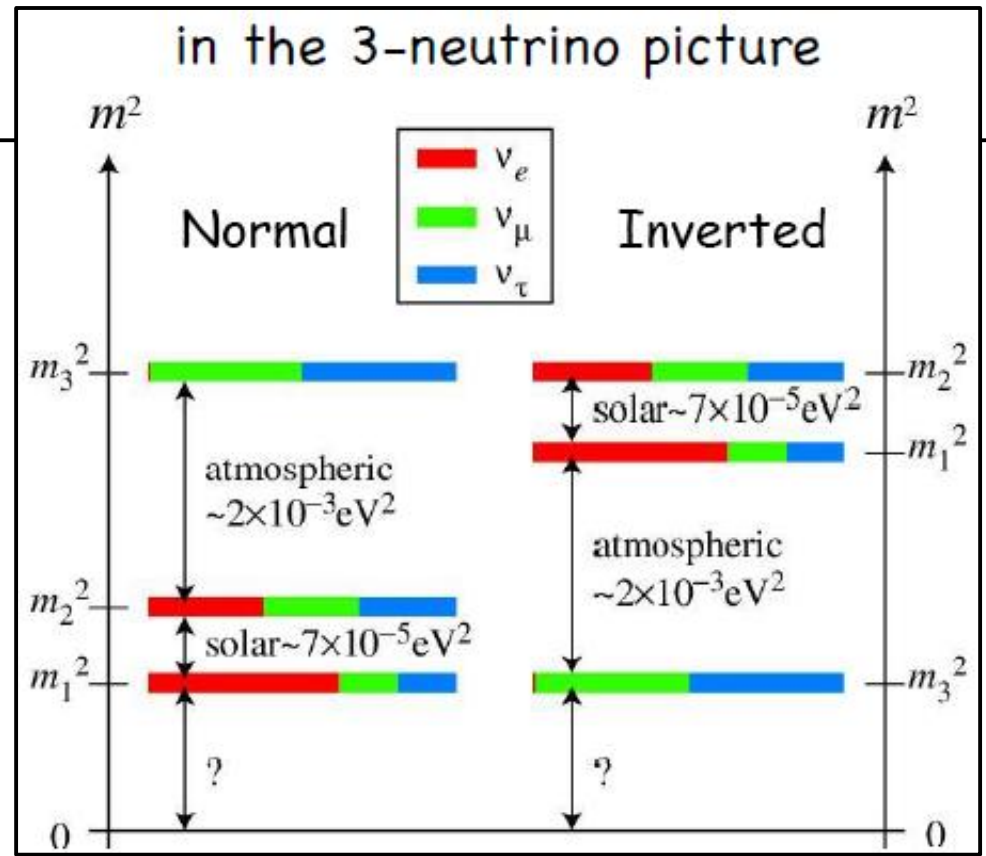
Solare Frequenz

$$\Delta m_{12}^2 = \mathcal{O}(10^{-5}) \text{ eV}^2$$



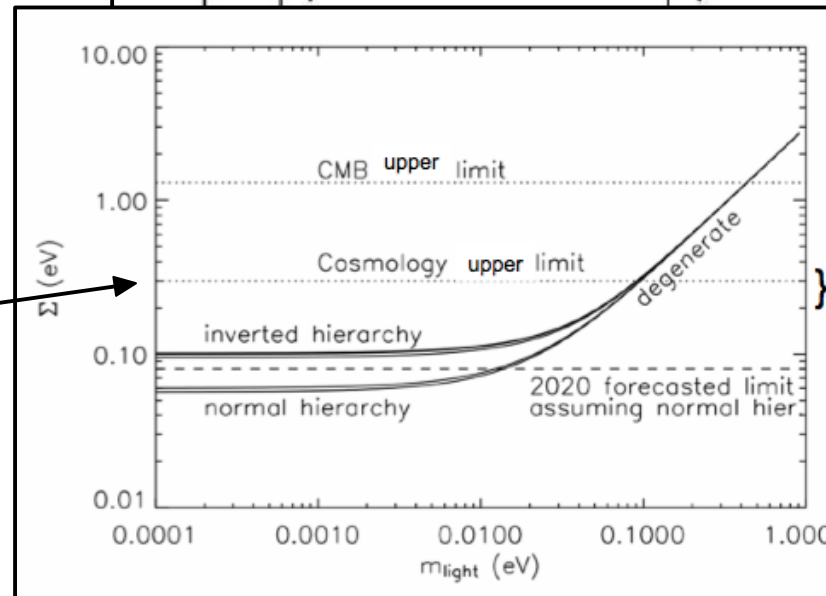
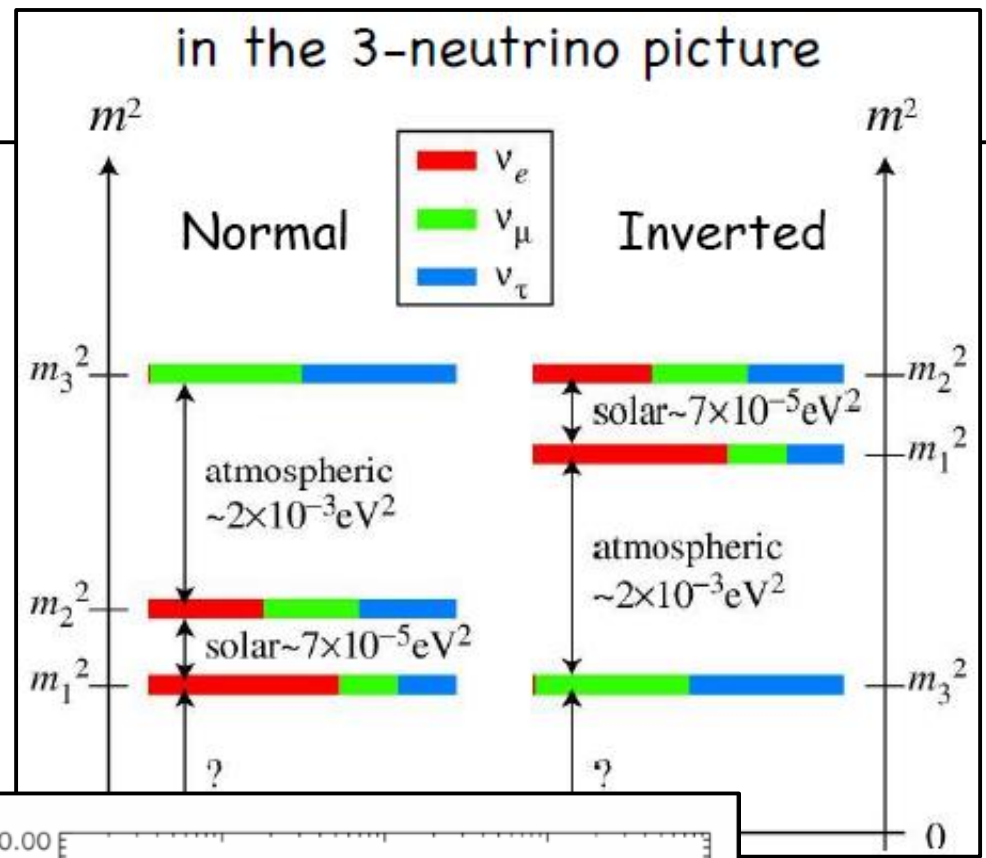
Massenhierarchie

- Keine Aussage über **Vorzeichen von** Δm_{ij}
- Verschiedene Anordnung der Masseneigenzustände möglich
- Erfordert direkte Bestimmung der Neutrinomasse
- Bisherige obere Schranke auf m_{ν_e} :
 $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV (95\% CL)}$
- Ambition **KATRIN** (vgl [VL-12 Folie 13](#))
 $m_{\nu_e} < 0.2 \text{ eV (95\% CL)}$



Massenhierarchie

- Keine Aussage über **Vorzeichen** von Δm_{ij}
- Verschiedene Anordnung der Masseneigenzustände möglich
- Erfordert direkte Bestimmung der Neutrinomasse
- Bisherige obere Schranke auf m_{ν_e} :
 $m_{\nu_e} < 2.2 \text{ eV}$ (95% CL)
- Ambition **KATRIN** (vgl VL-12 Folie 13)
 $m_{\nu_e} < 0.2 \text{ eV}$ (95% CL)



KW-26-28

9 Elektroschwache Physik

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung

KW-29

10 Moderne Teilchenphysik

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern

10.2 Neutrino-physik

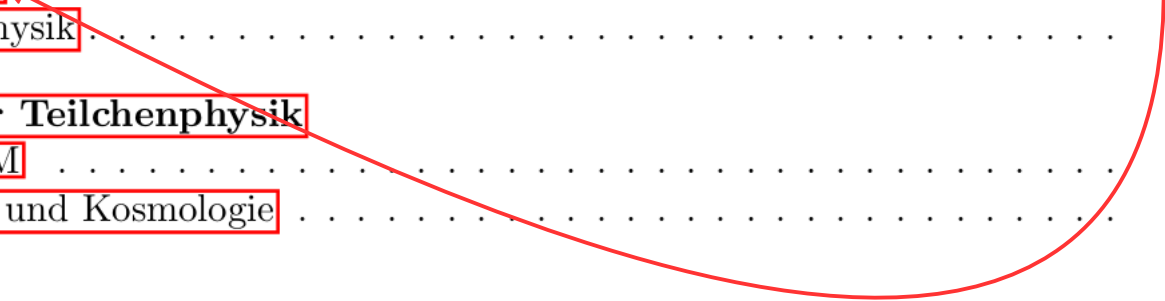
10.3 Astroteilchenphysik

KW-30

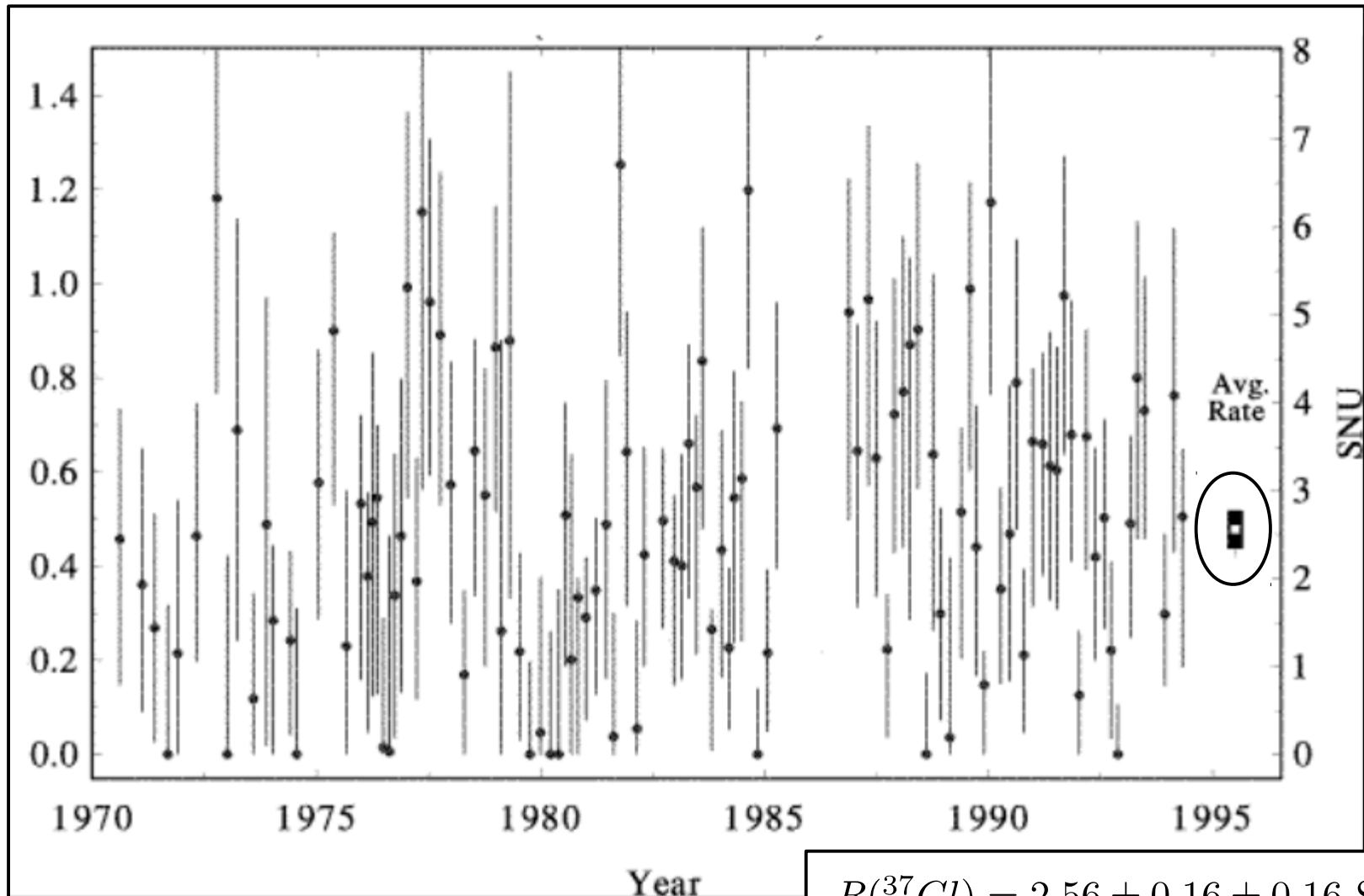
11 Offene Fragen der Teilchenphysik

11.1 Grenzen des SM

11.2 Teilchenphysik und Kosmologie

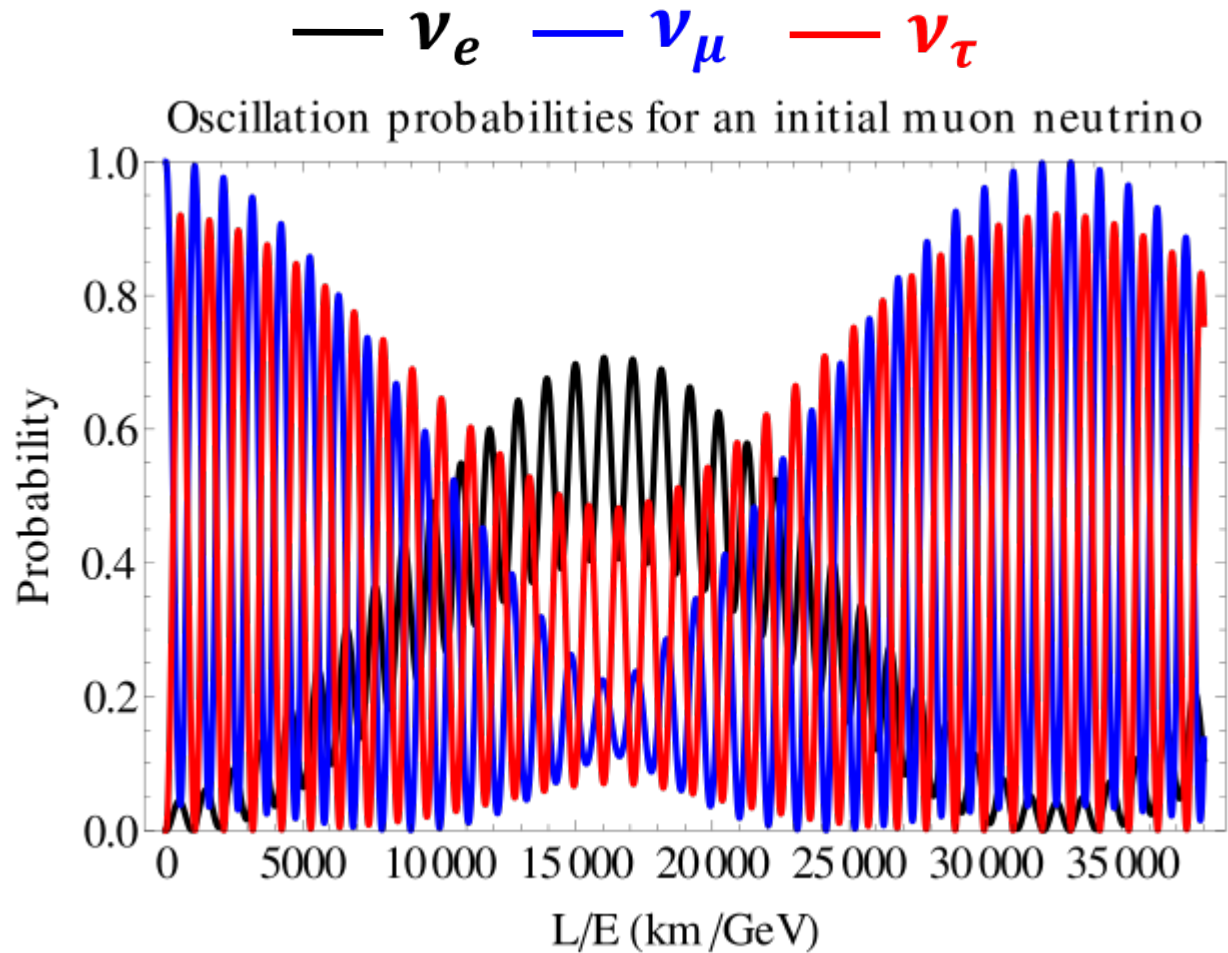


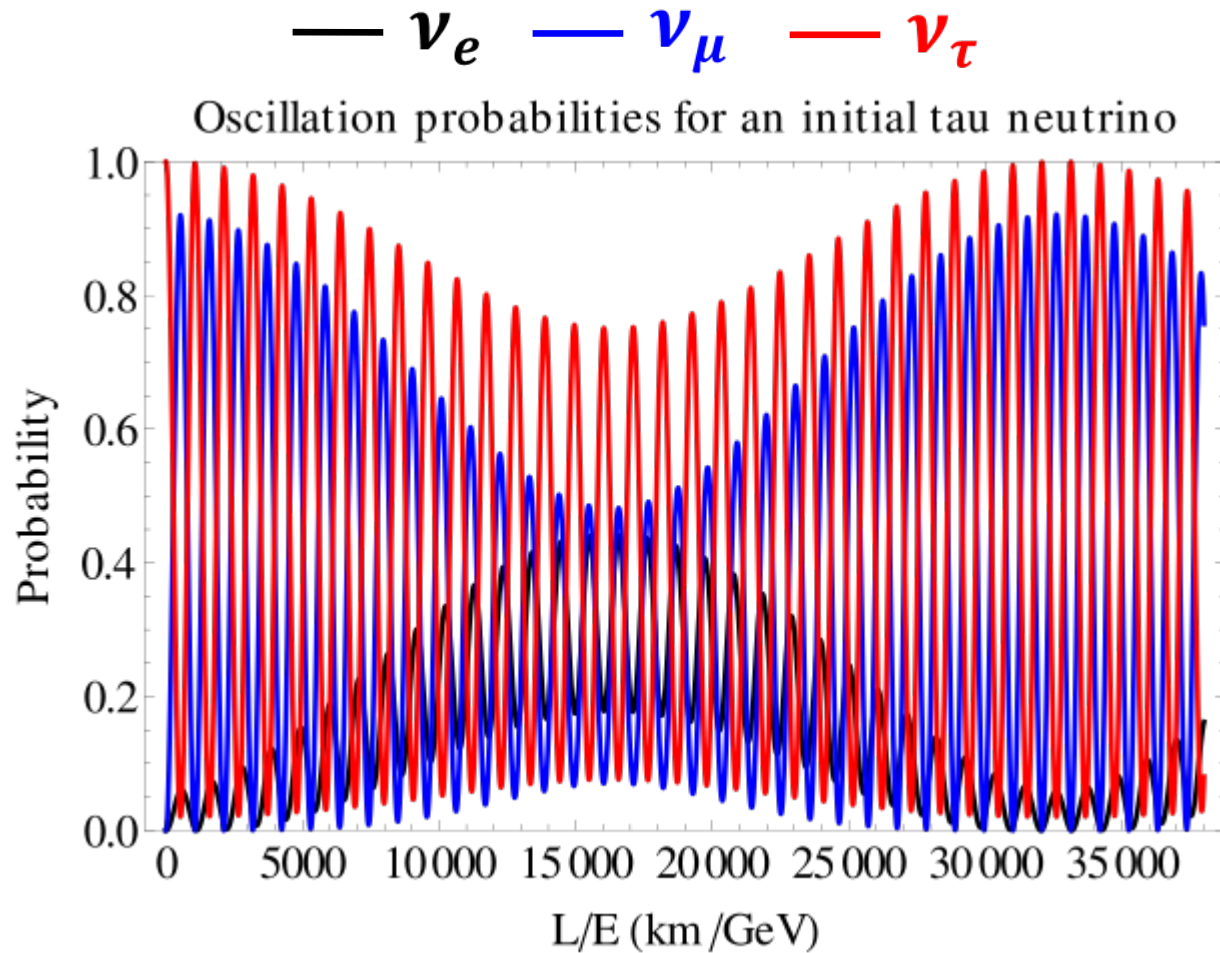
Homestake Experiment: >20 Jahre Messungen



$$R(^{37}\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$$

$$R(\text{SSM}) = 7.6 \pm_{1.1}^{1.3} \text{ SNU}$$





Vergleich: Flavor composition

