

# Moderne Experimentalphysik III: Hadronen und Teilchen (Physik VI)

Thomas Müller, Roger Wolf  
3. Juli 2018

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IETP) – PHYSICS FACULTY



# Kapitel 8: Neutrino-physik





# Wolfgang Paulis Neutrino-Hypothese

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

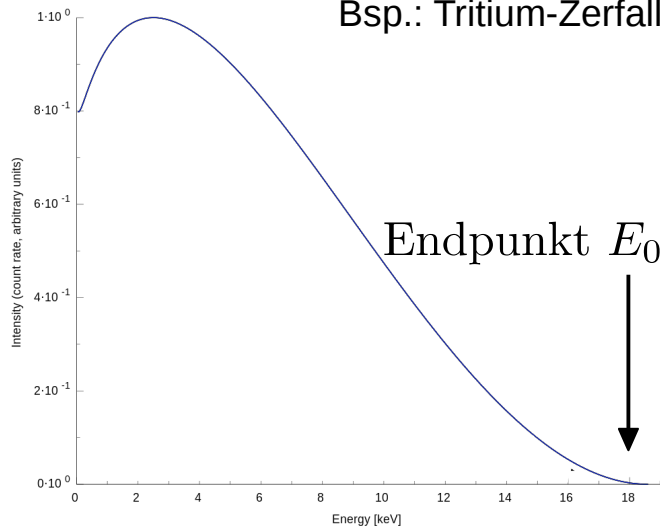
Zürich, 4. Dez. 1930  
Oloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich baldvollst  
anzuhören 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  
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale  
ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,  
in 1/2 haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und  
Quanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
igkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
essenordnung wie die Elektronenmasse sein und  
als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche  
verständlich unter der Annahme, dass beim  
ktron jeweils noch ein Neutron emittiert  
summe der Energien von Neutron und Elektron

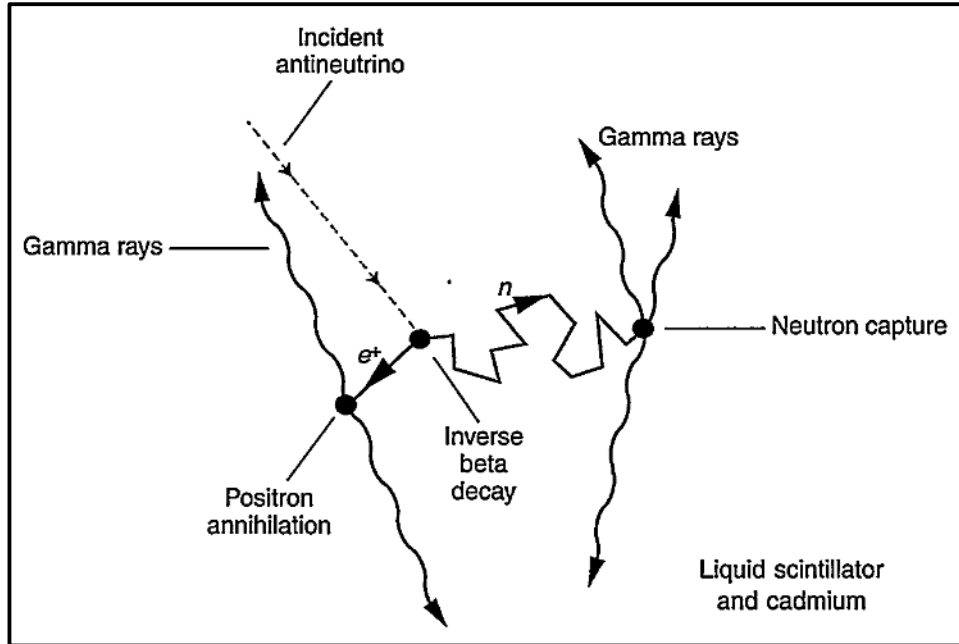
Kontinuierliches Spektrum  
des  $\beta$ -Zerfalls

Bsp.: Tritium-Zerfall

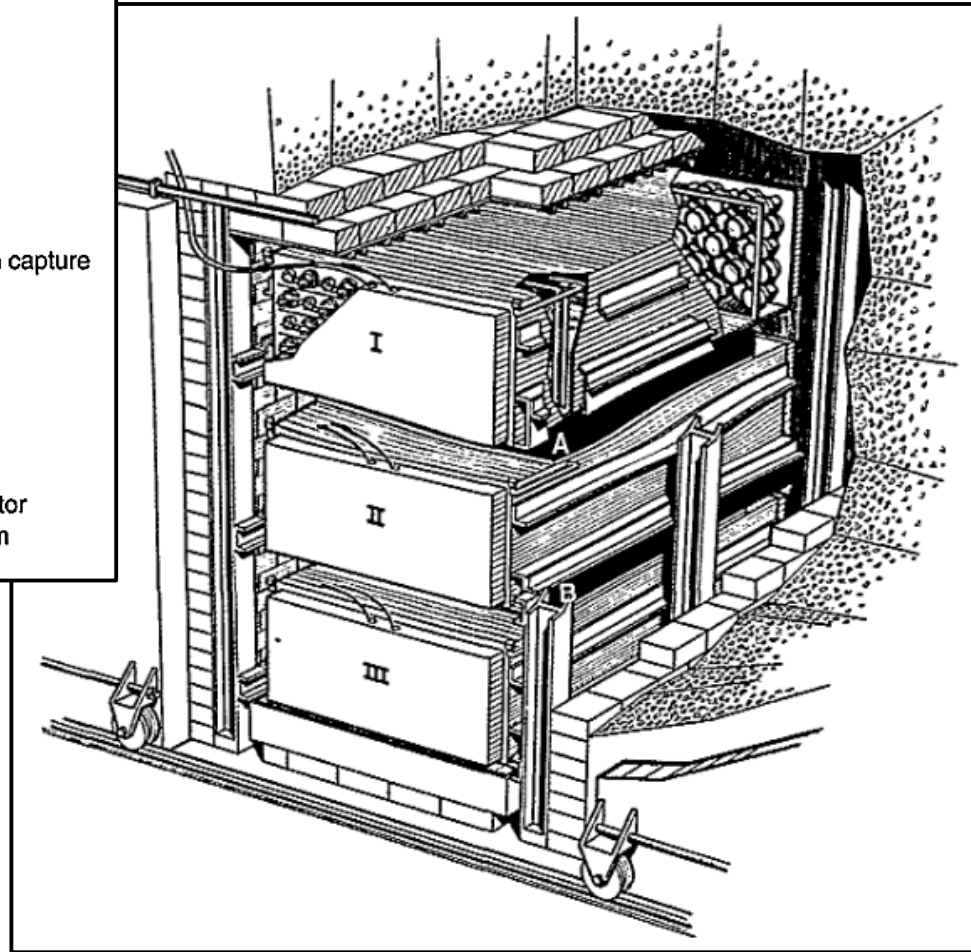


# Neutrino nachweis

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



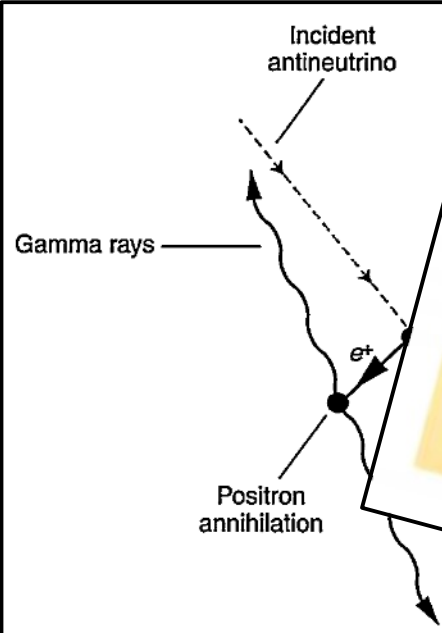
- Nachweis der 511 keV Photon-Koinzidenz der  $e^+e^-$ -Annihilation (+ charakteristische Röntgenstrahlung aus Neutroneinfang)



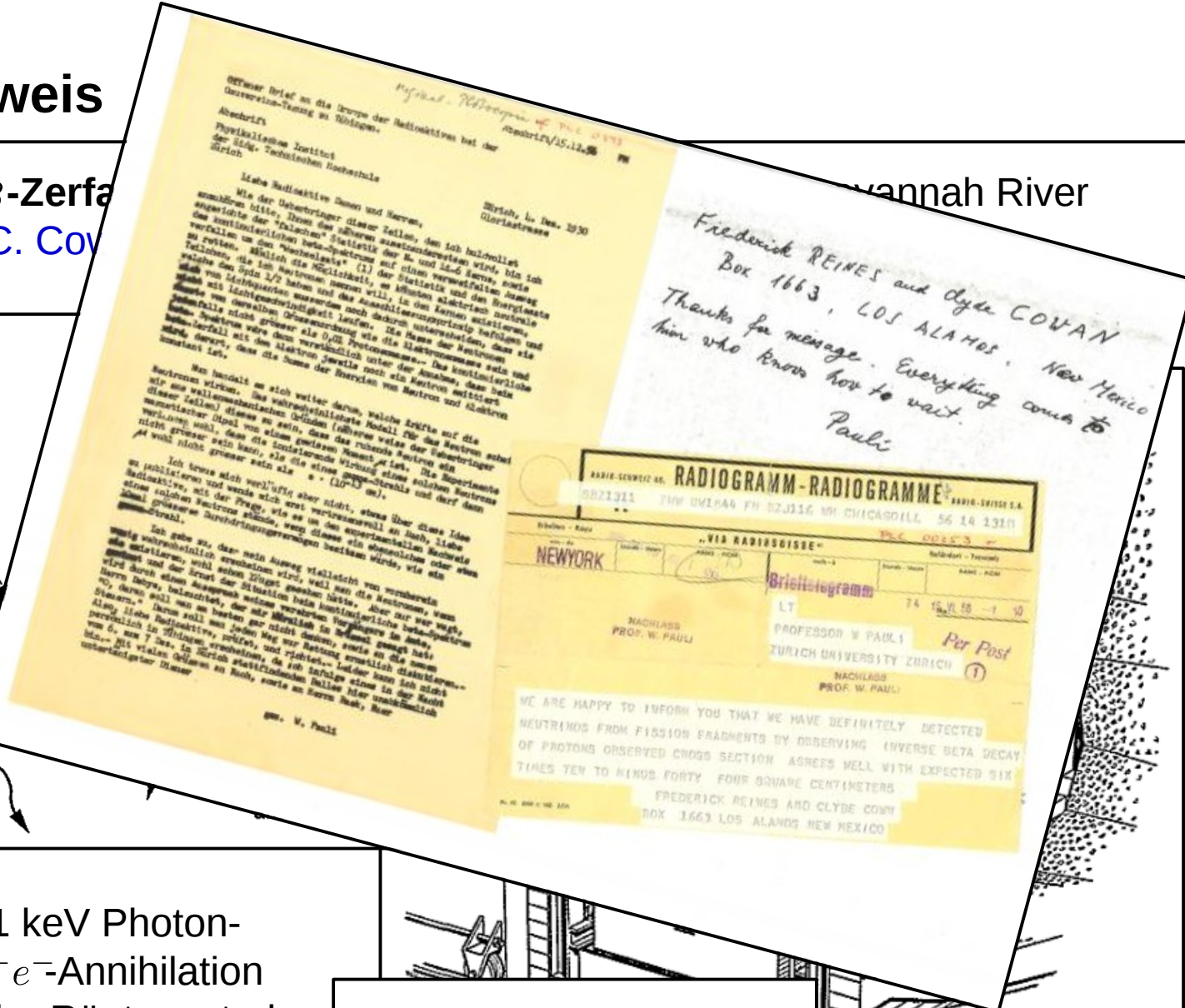


# Neutrino nachweis

- Durch inversen  $\beta$ -Zerfall USA (F. Reines, C. Cowan)



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

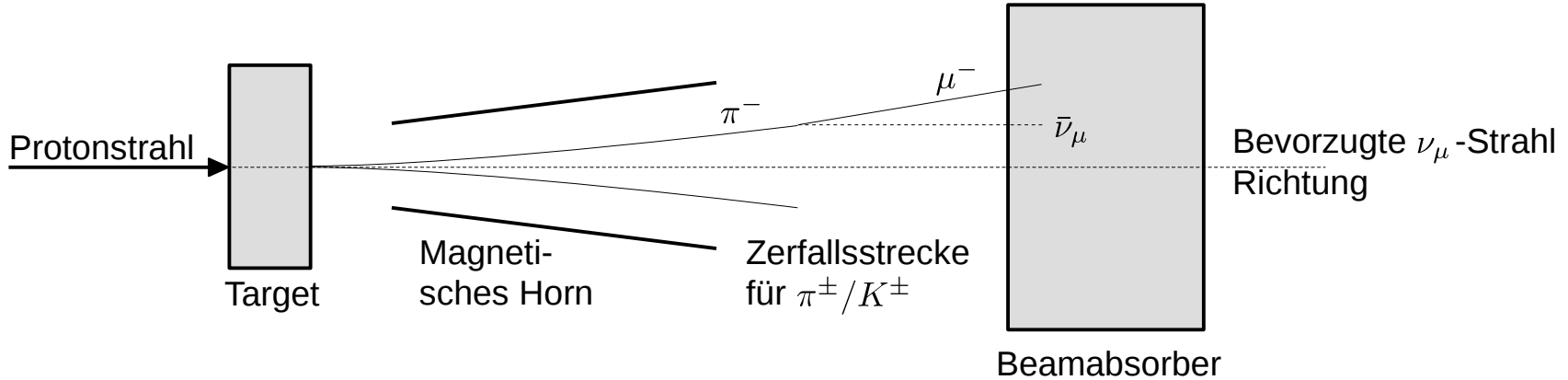


**Vorlage für Nachweis aller weiteren Neutrino-Generierungen**

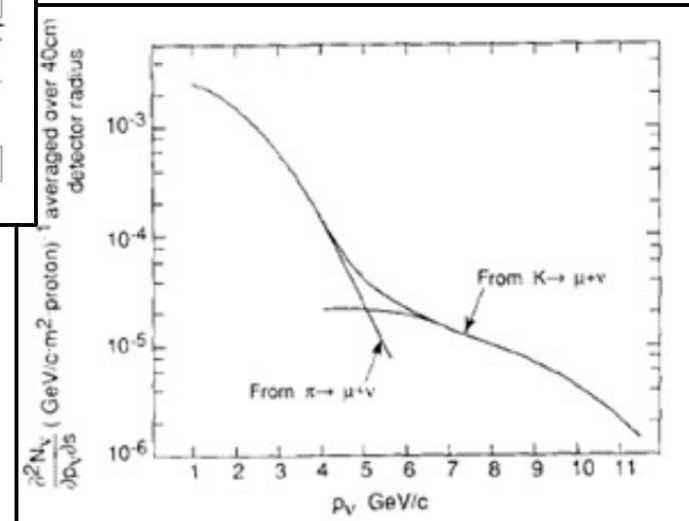
Wannah River

# Erzeugung eines fokussierten Myonstrahls

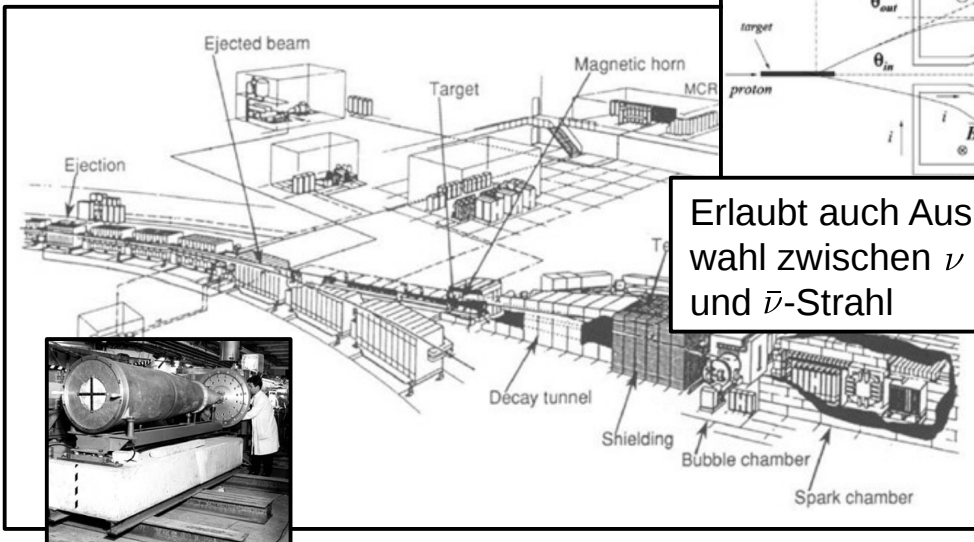
- **Fokussierung Neutrinostrahl** (soweit möglich) durch **magnetisches Horn** (Simon van der Meer; fokussiere  $\pi^\pm / K^\pm$ -Strahl von bestimmter Energie)



Typisches Neutrino-Energiespektrum

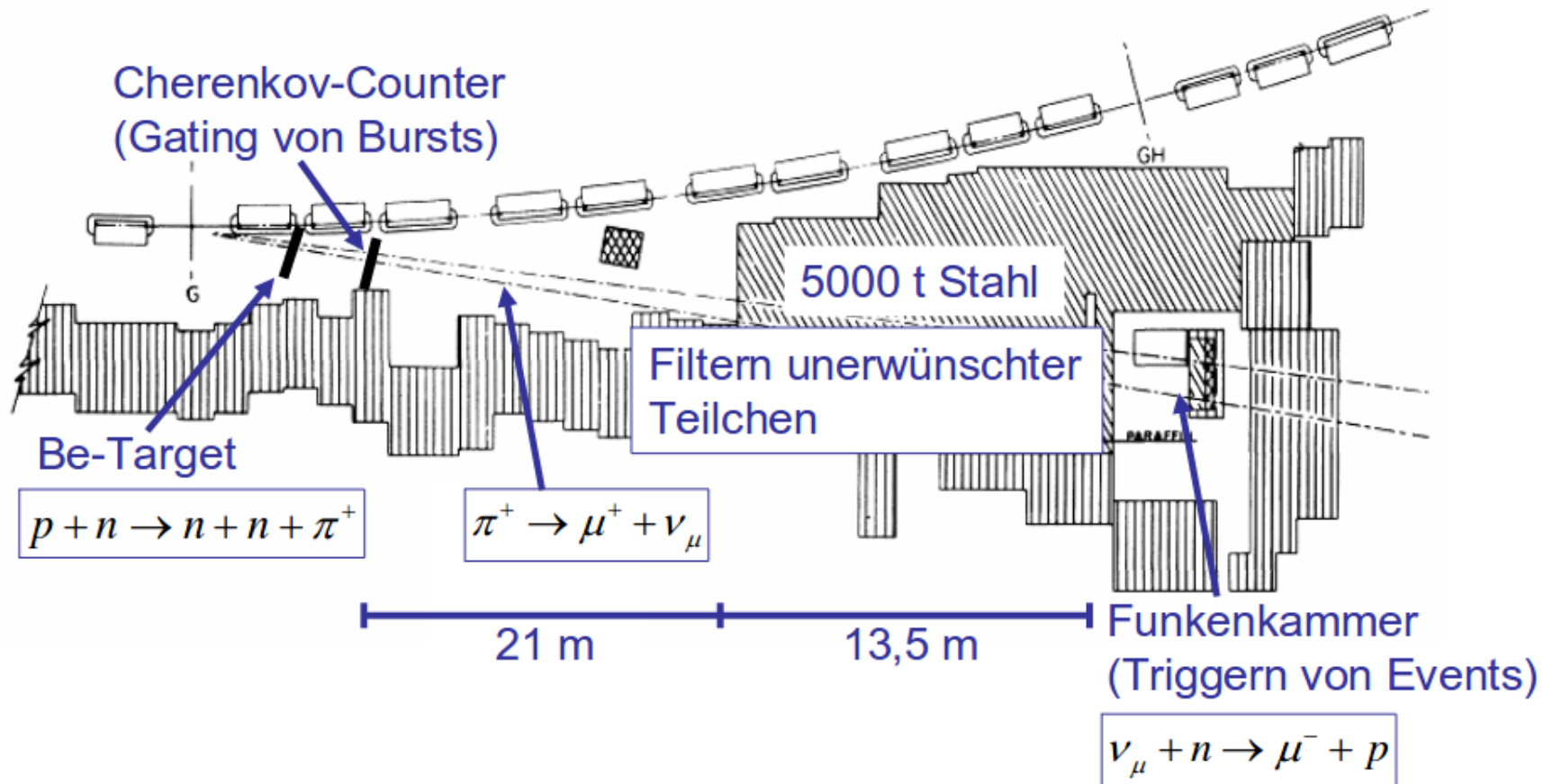


Erlaubt auch Auswahl zwischen  $\nu$  und  $\bar{\nu}$ -Strahl



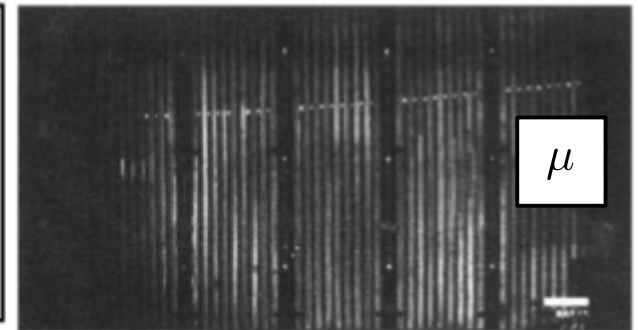
# Nachweis Myon-Neutrinos

- AGS Beschleuniger am BNL ([Lederman, Schwartz, Steinberger, 1962](#))
- Hier: 15 GeV Protonen auf Be-Target  $\rightarrow$  Erzeugung von  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$

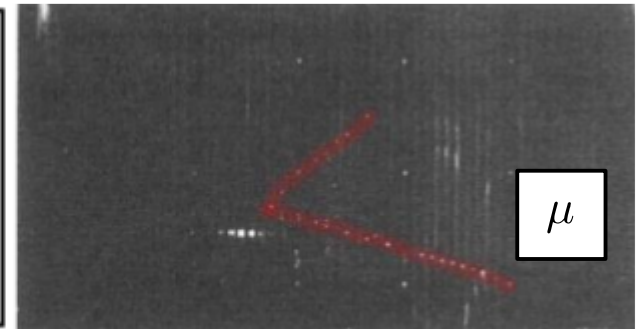
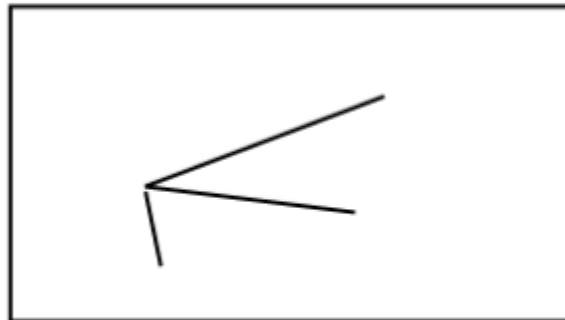


# Ereignis-Klassifikation

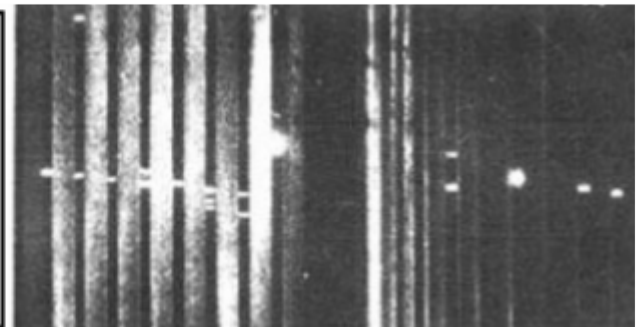
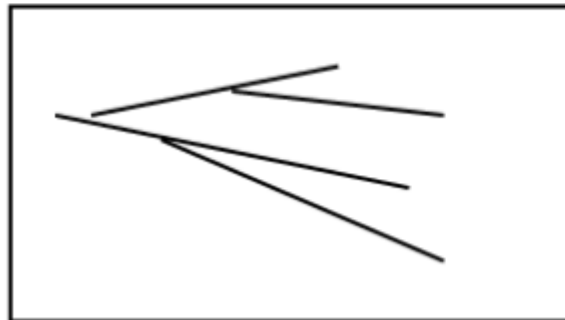
- Single long/short track event



- Vertex event



- Shower event (e oder p)



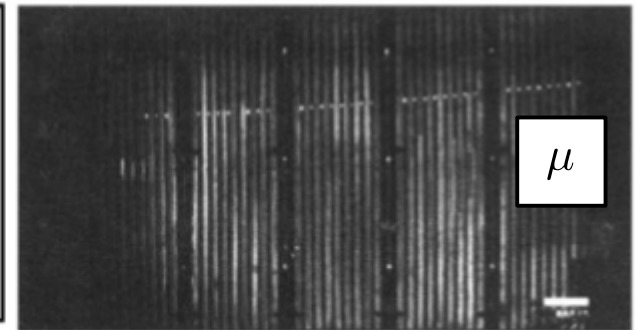


# Ereignis-Klassifikation

- Single long/short track event

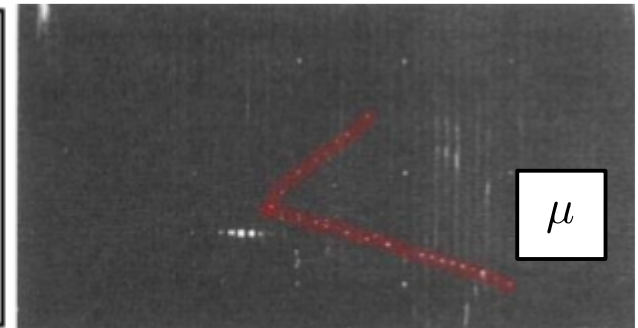
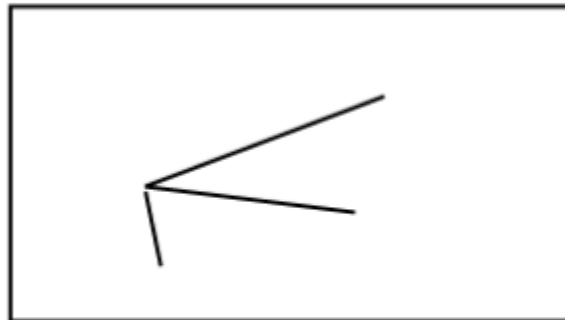
49 evts (short single track)

34 evts (long single track)



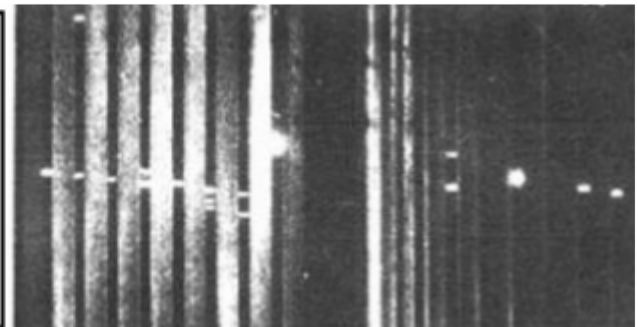
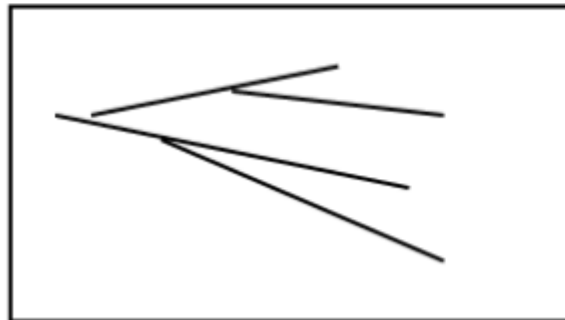
- Vertex event

22 evts



- Shower event (e oder p)

8 evts



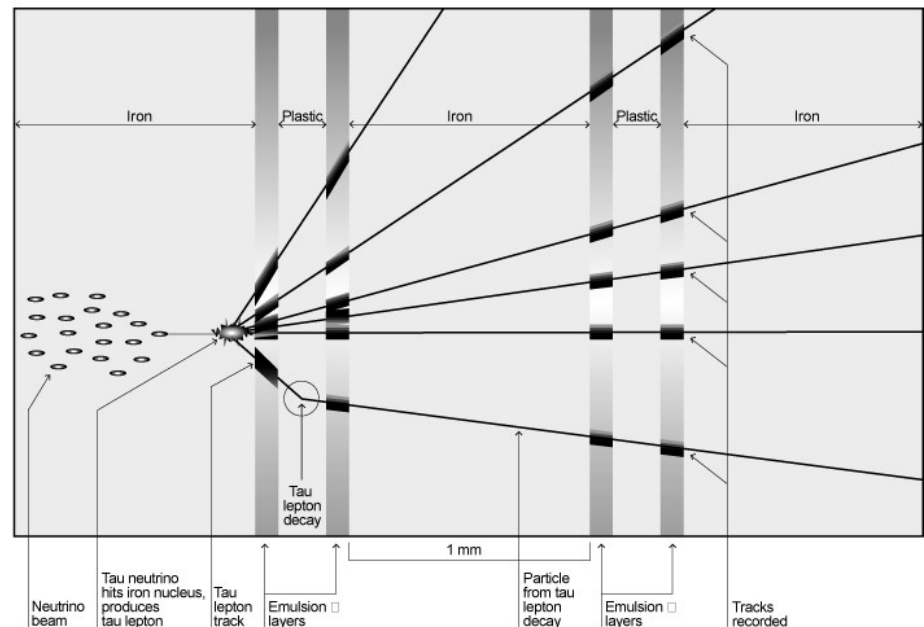
56 evts (klar identifiziert mit Myonen)

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

# Nachweis Tau-Neutrinos

- Nach Entdeckung des  $\tau$ -Leptons (SLAC 1979, Martin L. Perl) → schwacher Isospin Partner erwartet
- Erzeugung eines fokussierten  $\nu_\tau$ -Strahls (vgl Folie 5)
  - Hier: 800 GeV Protonen auf W-Target → Erzeugung von  $D_s^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$
- Nachweis mit Detektor Donut (FNAL, 2000)

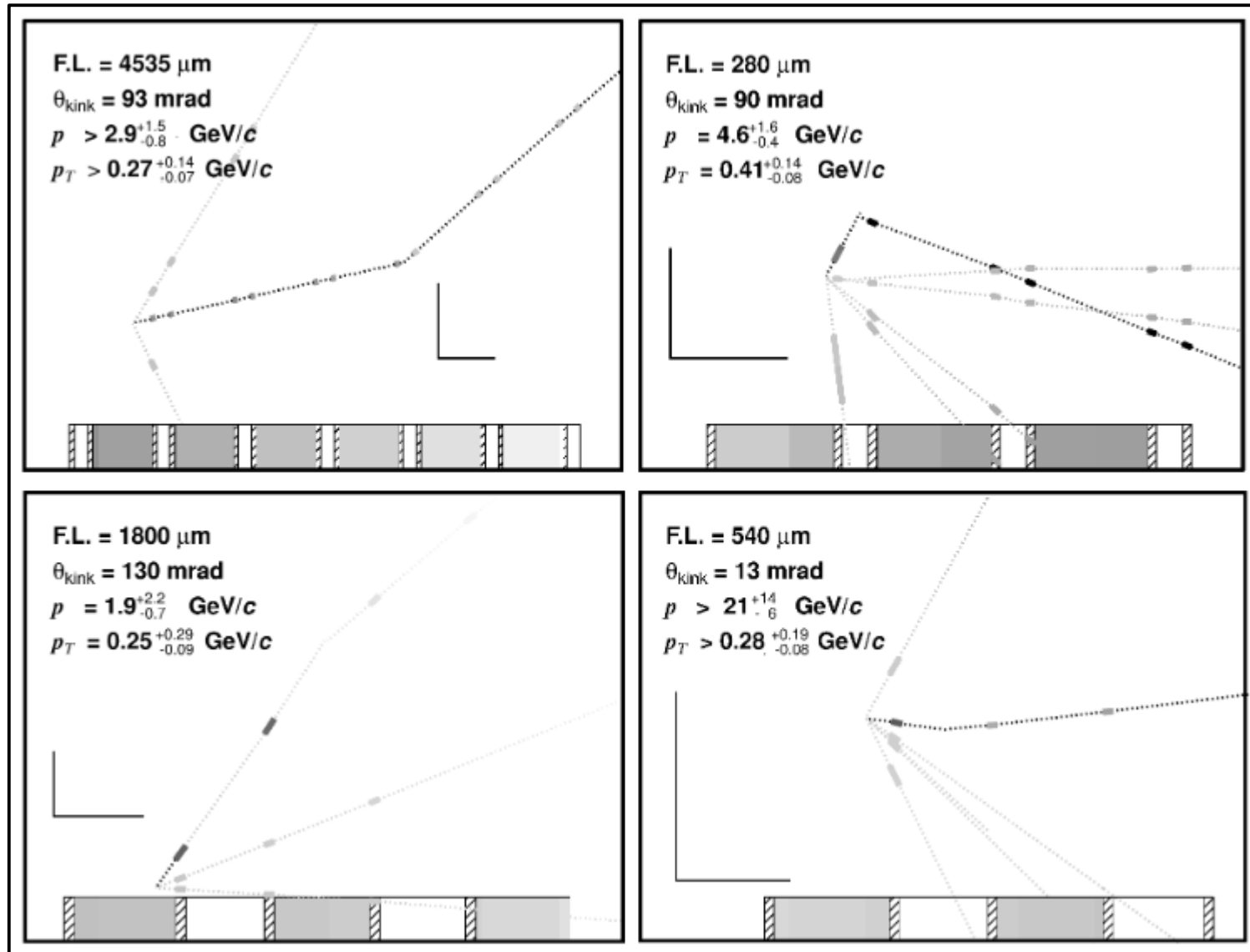
- $\nu_\tau + n \rightarrow \tau^- + p$   
 $\bar{\nu}_\tau + p \rightarrow \tau^+ + n$
- $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$  BR 18%  
 $\tau \rightarrow e \nu \nu$  BR 18%  
 $\tau \rightarrow \text{single track } \nu$  BR 86%
- $c\tau_\tau = 86 \mu\text{m}$ ;  $\gamma c\tau_\tau \approx 2.3 \text{ mm}$   
 (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

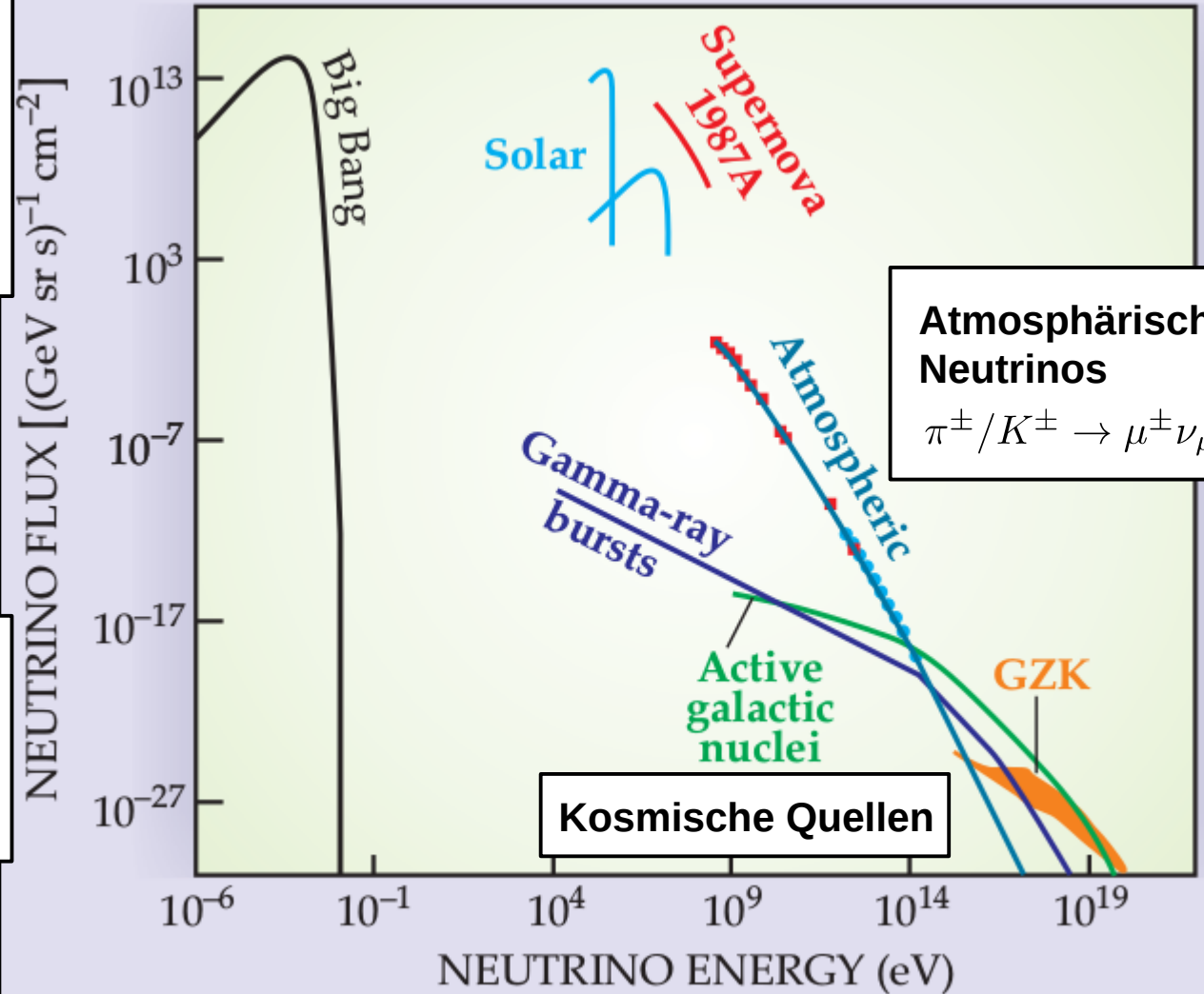
## Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

## Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

## Kernfusion in Sternen & Supernovae



## Atmosphärische Neutrinos

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

## Kosmische Quellen

# Neutrinoquellen

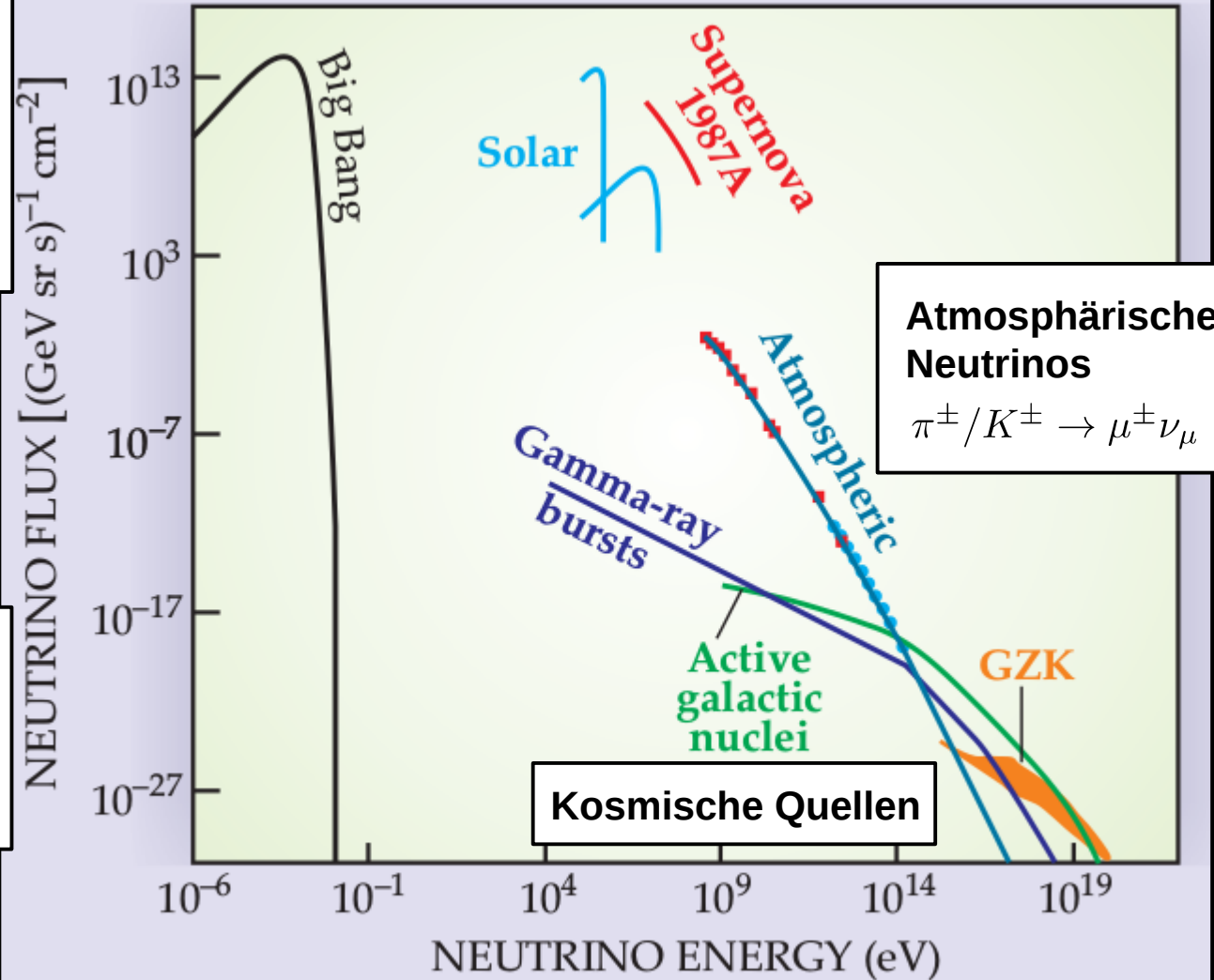
## Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

## Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

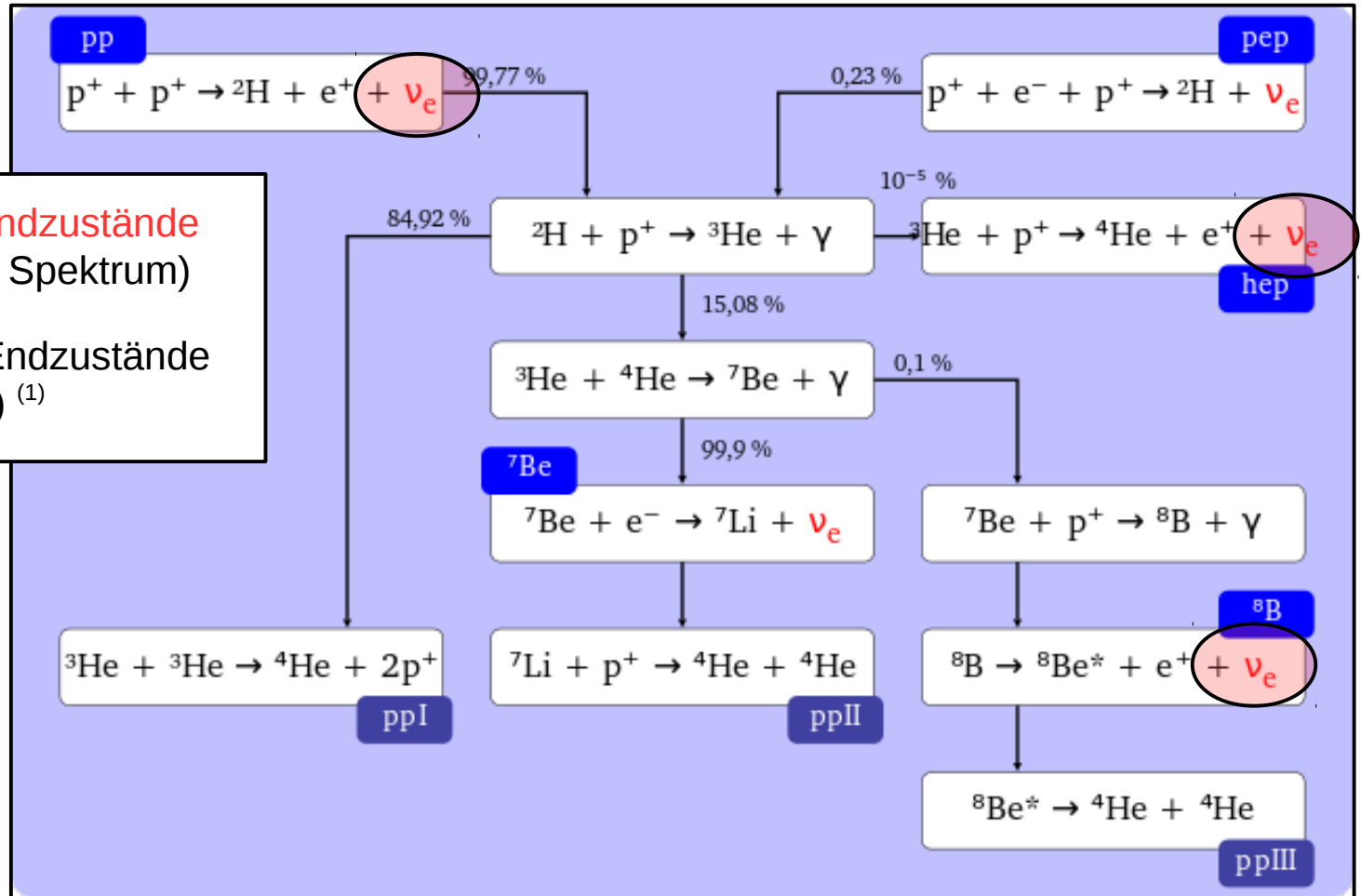
## Kernfusion in Sternen & Supernovae



## Atmosphärische Neutrinos

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

# Neutrinos aus der Sonne

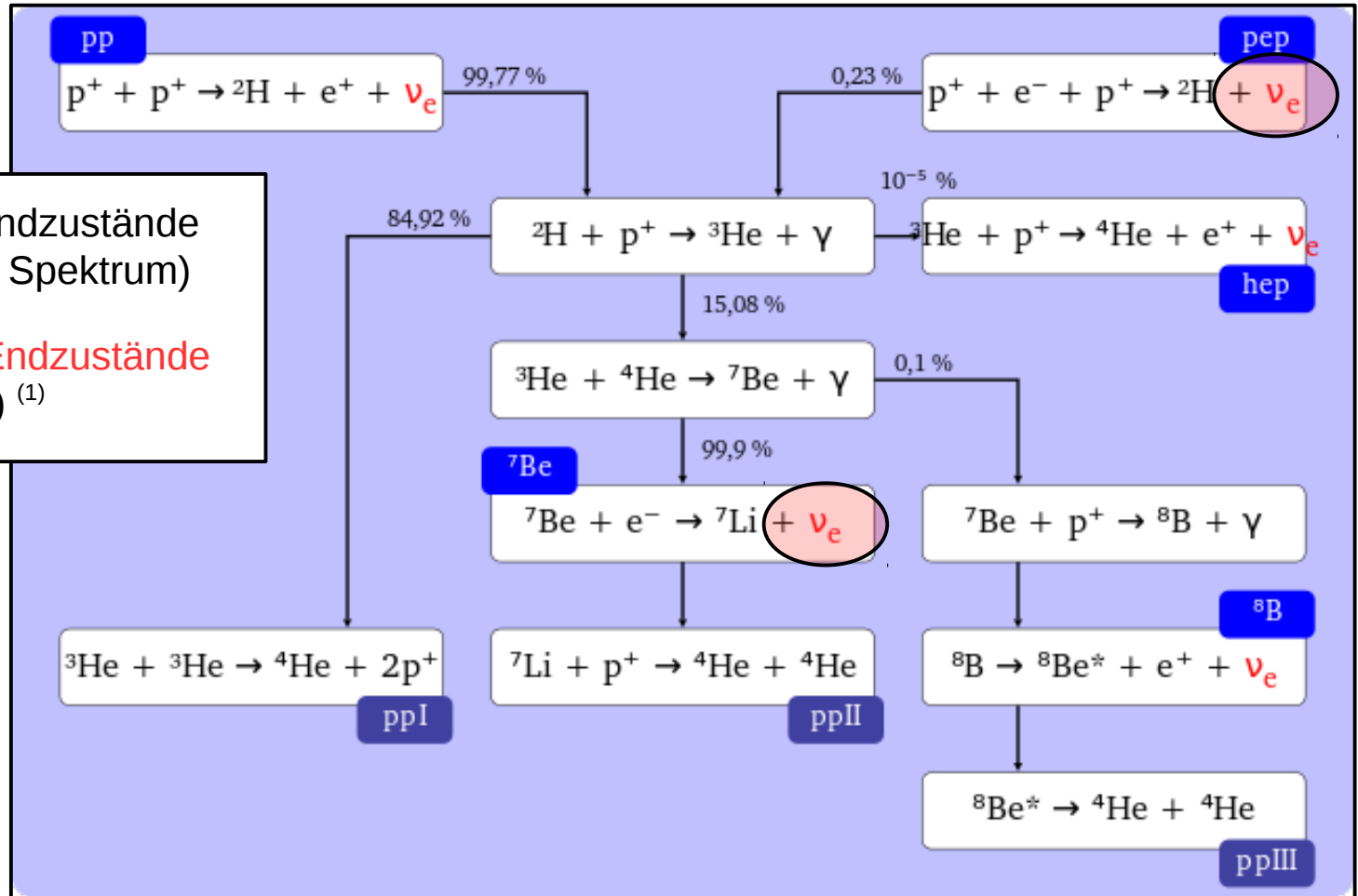


- **Drei-Teilchen-Endzustände** (kontinuierliches Spektrum)
- **Zwei-Teilchen-Endzustände** (diskrete Linien) <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Wenn der Prozess an der Produktionsschwelle stattfindet, was jedoch der Fall ist (siehe SS-17 VL-14 Folie 22)



# Neutrinos aus der Sonne

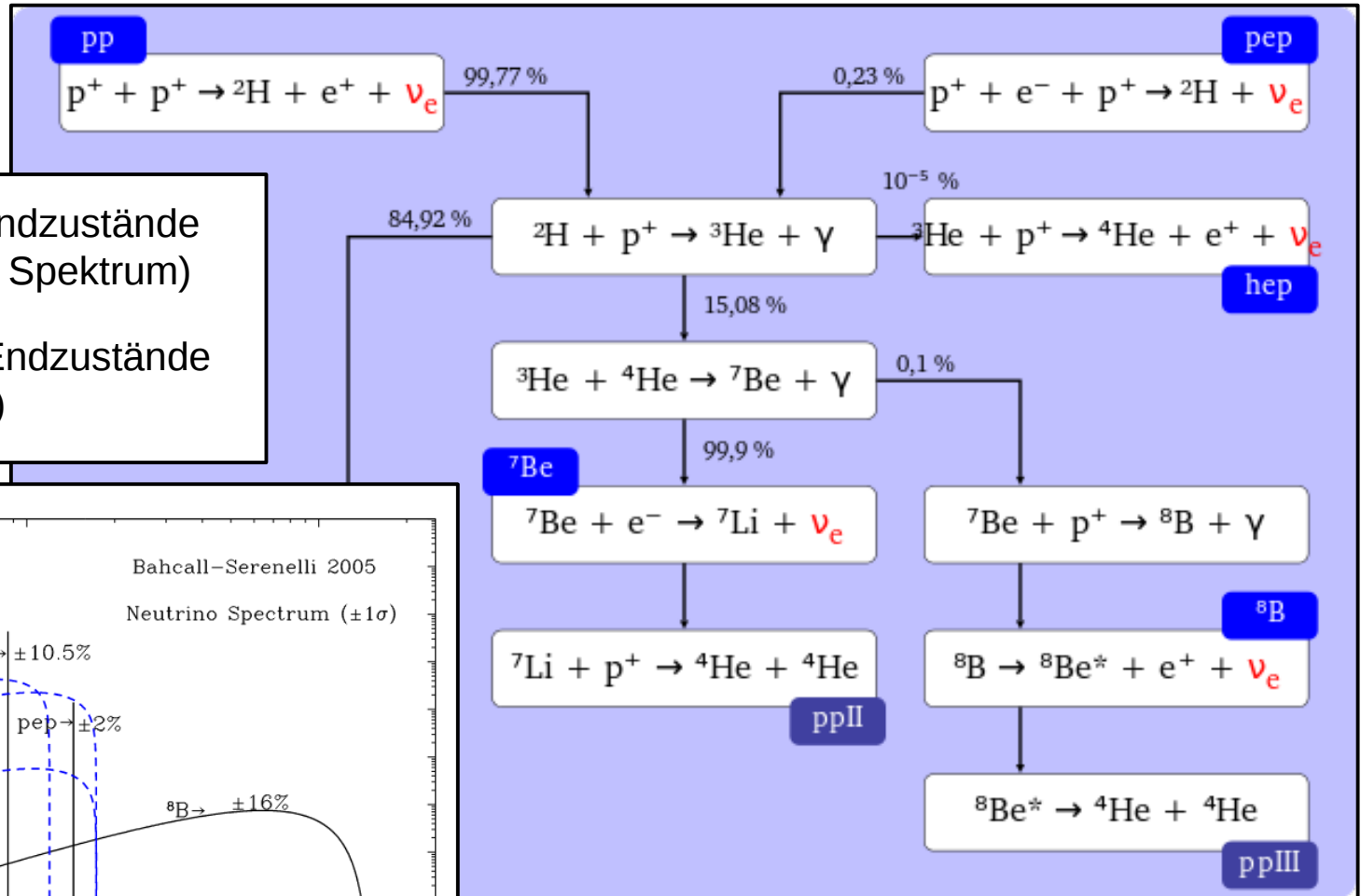
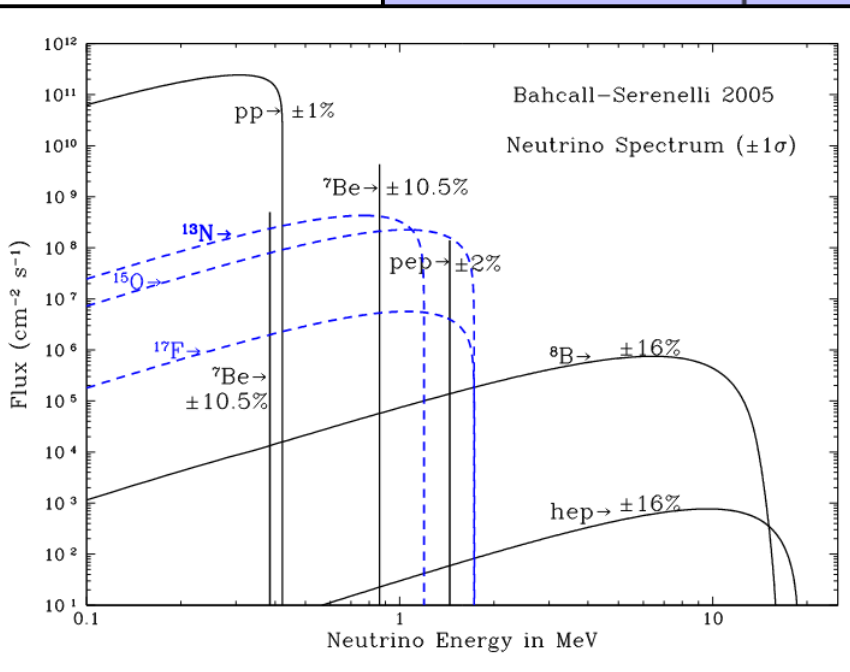


- Drei-Teilchen-Endzustände (kontinuierliches Spektrum)
- **Zwei-Teilchen-Endzustände** (diskrete Linien) <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Wenn der Prozess an der Produktionsschwelle stattfindet, was jedoch der Fall ist (siehe SS-17 VL-14 Folie 22)

# Neutrinos aus der Sonne

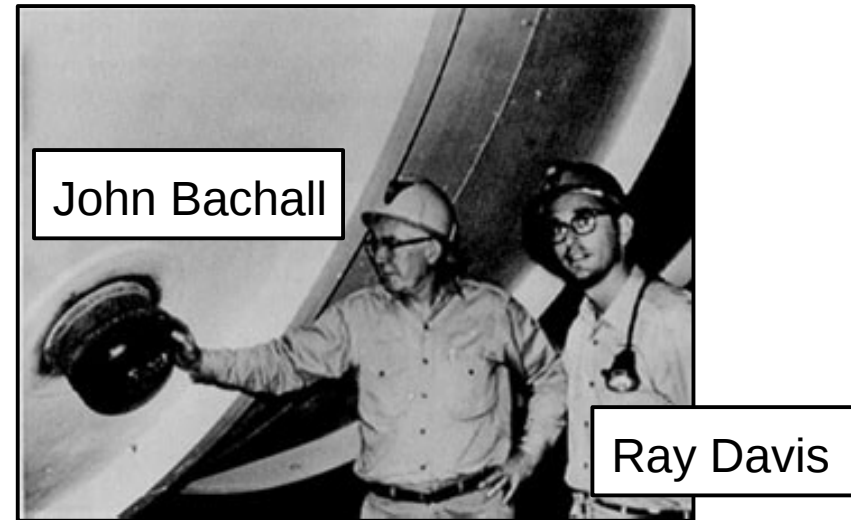
- Drei-Teilchen-Endzustände (kontinuierliches Spektrum)
- Zwei-Teilchen-Endzustände (diskrete Linien)



→ Weites Energiespektrum

# Homestake Experiment

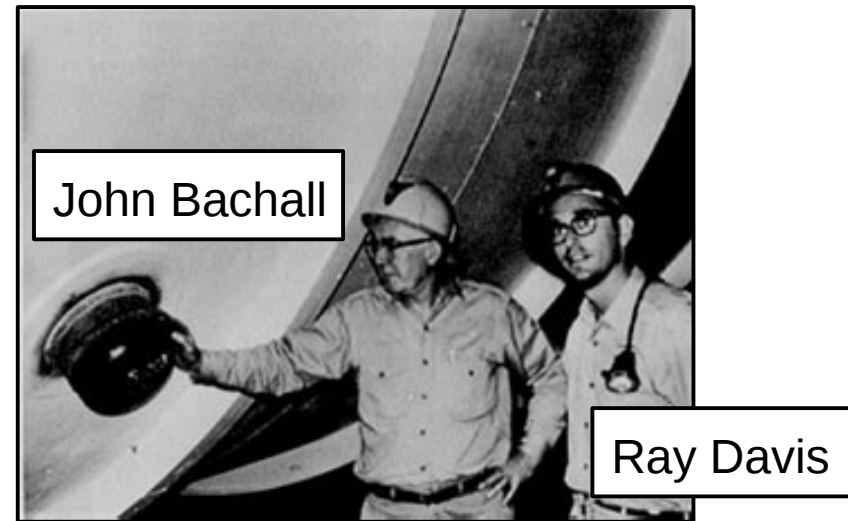
- Erstes Experiment zur **Vermessung des solaren Neutrinoflusses**
- Herausforderung: untergrundfreies Meßverfahren für sehr **seltene Ereignisse**
- Tank mit 615 t Tetrachlorethylen in 1478 m tiefer Homestake Goldmine
- Nachweisreaktion:  $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- $^{37}\text{Ar}$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

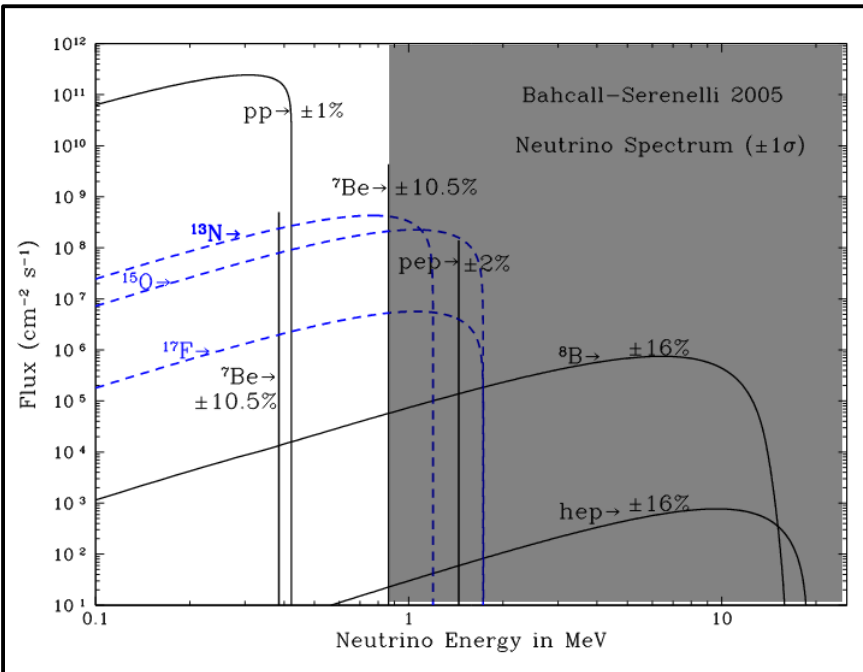


Überraschendes Ergebnis:  
nur **~1/3 des erwarteten**  
Flusses beobachtet

# Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

## Homestake Experiment

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



$\rightarrow$  Weites Energiespektrum

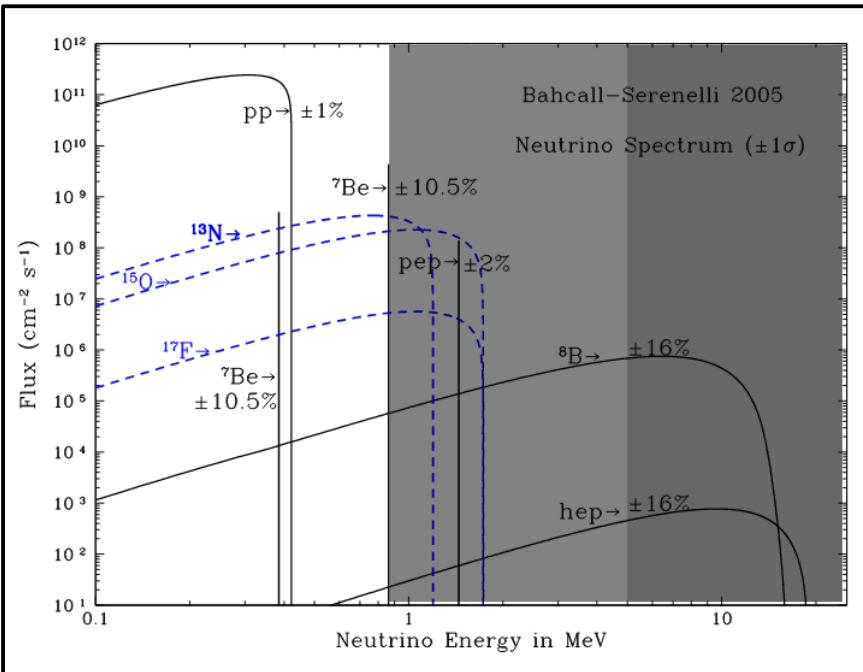
# Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

## Super-Kamiokande

- Wasser Cherenkov (VL-06 Folie 8)
- 5 MeV  $\rightarrow$   $^8B$ -Neutrinos

## Homestake Experiment

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



$\rightarrow$  Weites Energiespektrum



# Experimente zum Nachweis von Sonnenneutrinos

## Super-Kamiokande

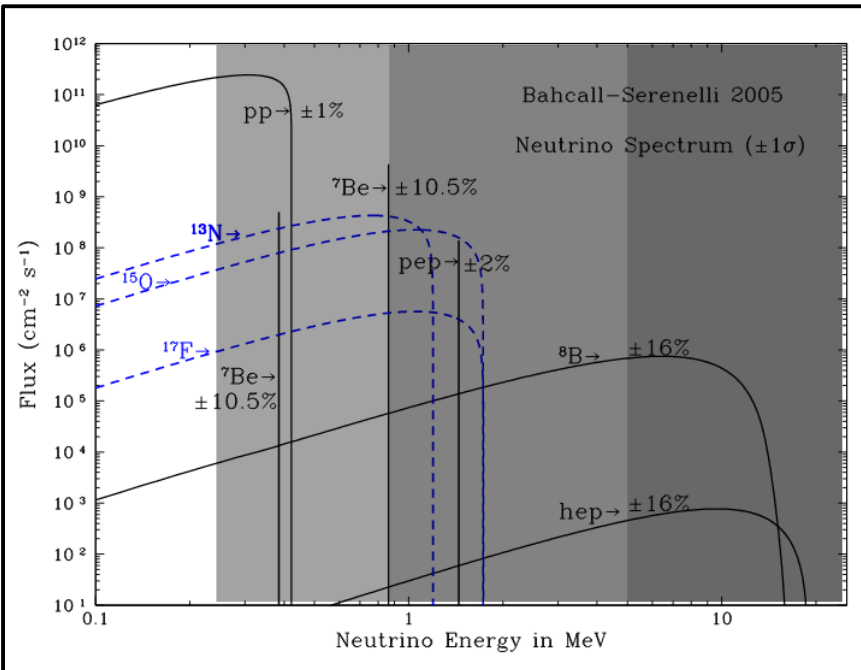
- Wasser Cherenkov (VL-06 Folie 8)
- 5 MeV  $\rightarrow$   $^8B$ -Neutrinos

## Homestake Experiment

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

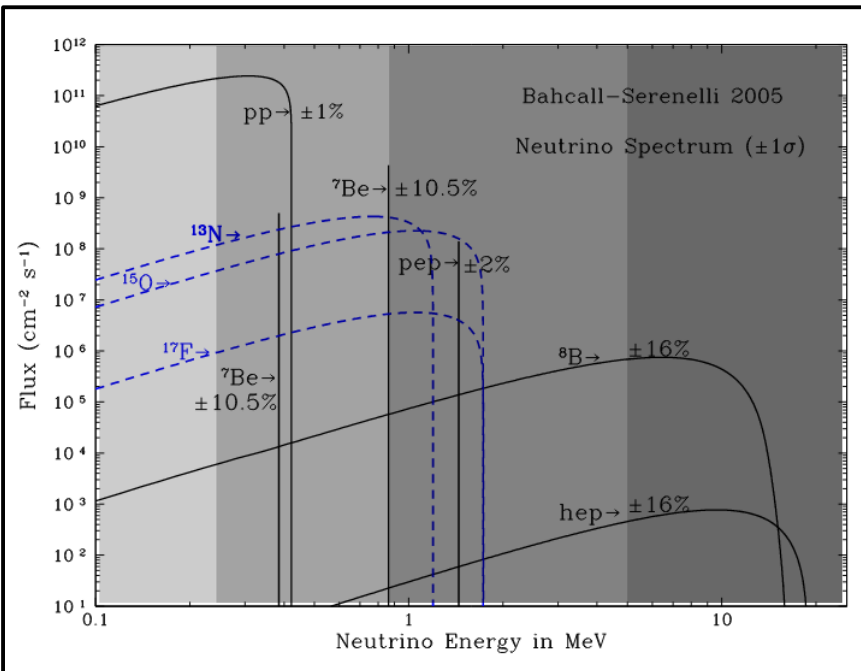
- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV  $\rightarrow$   $^7\text{Be}$ -Neutrinos

## 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

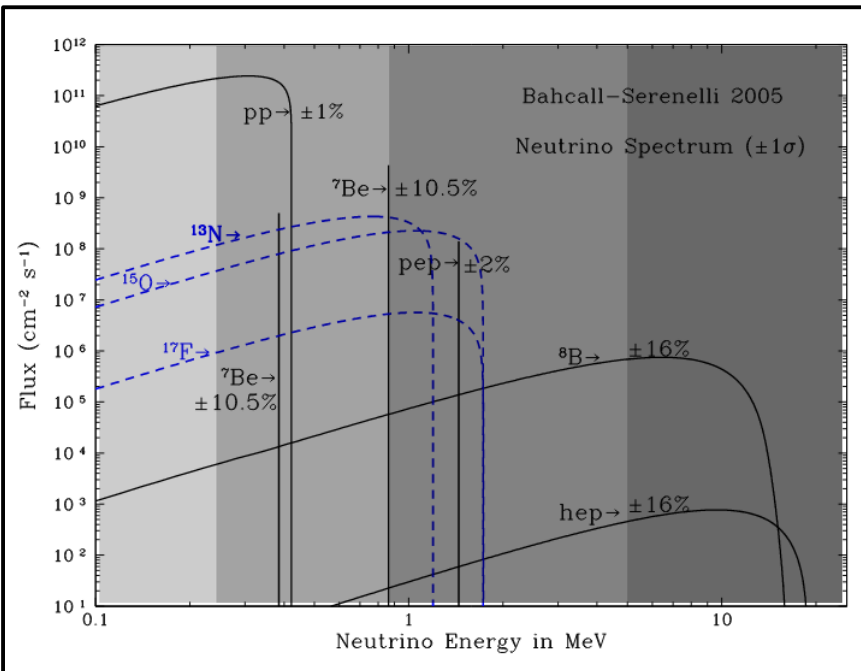
- Radiochemisch
- $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$
- 814 keV  $\rightarrow$   $^7\text{Be}$ -Neutrinos

## 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

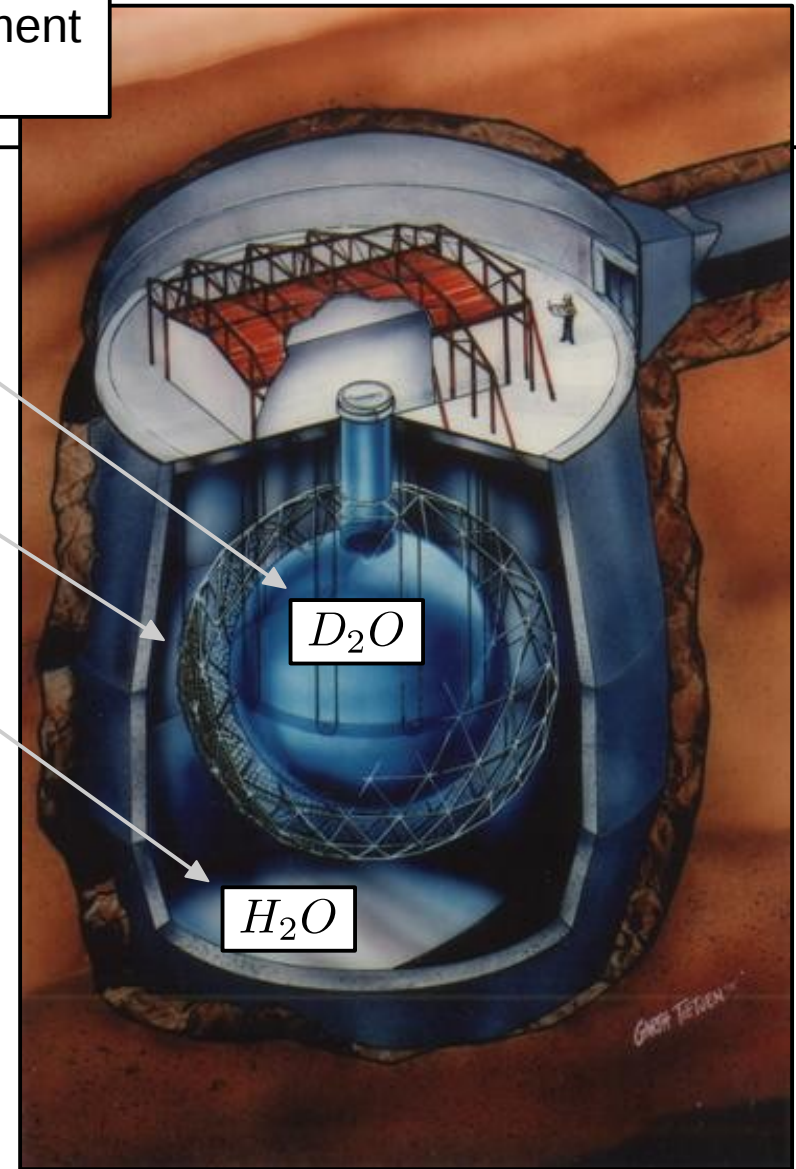
Judgment  
call

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

12 m Durchmesser

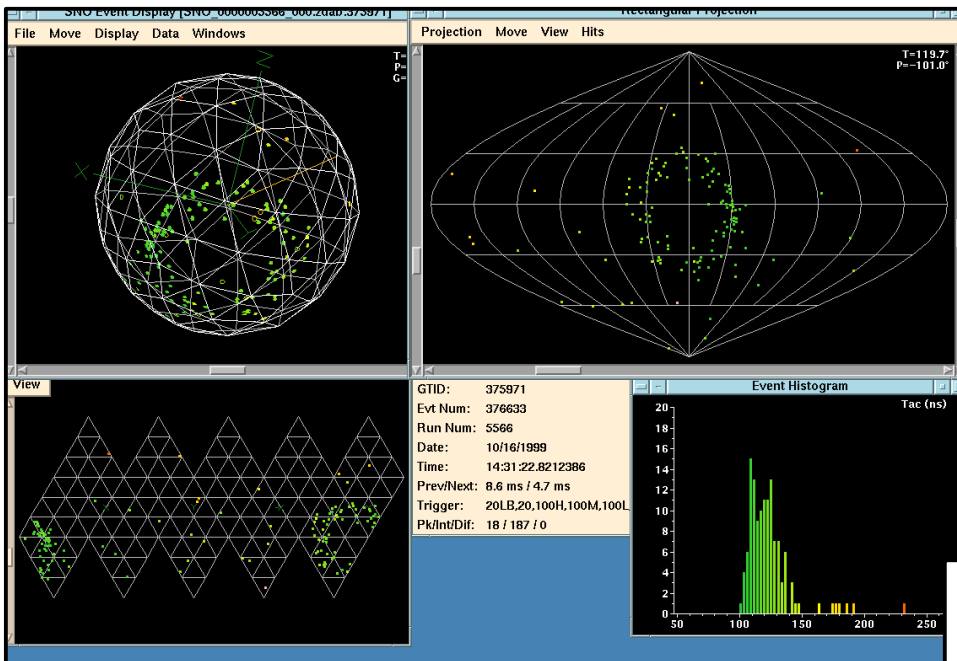
9450 PM & Reflektoren

25 m Durchmesser Hohlraum  
(gefüllt mit  $H_2O$ )



$D_2O$

$H_2O$

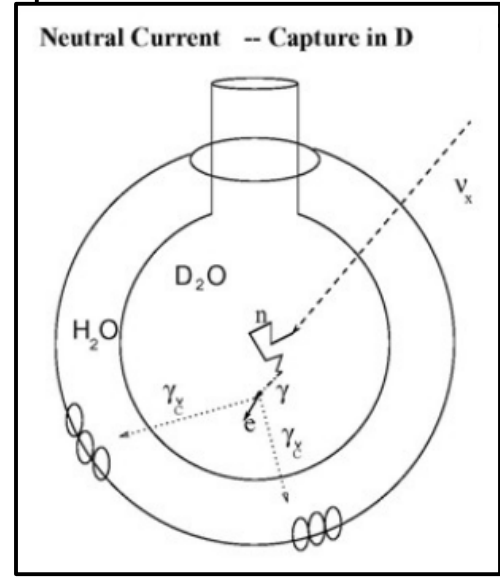
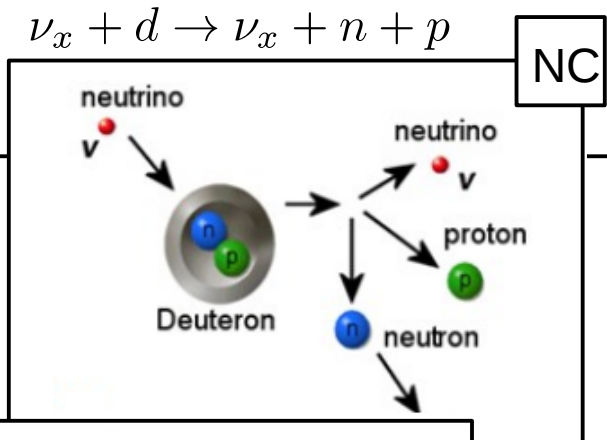
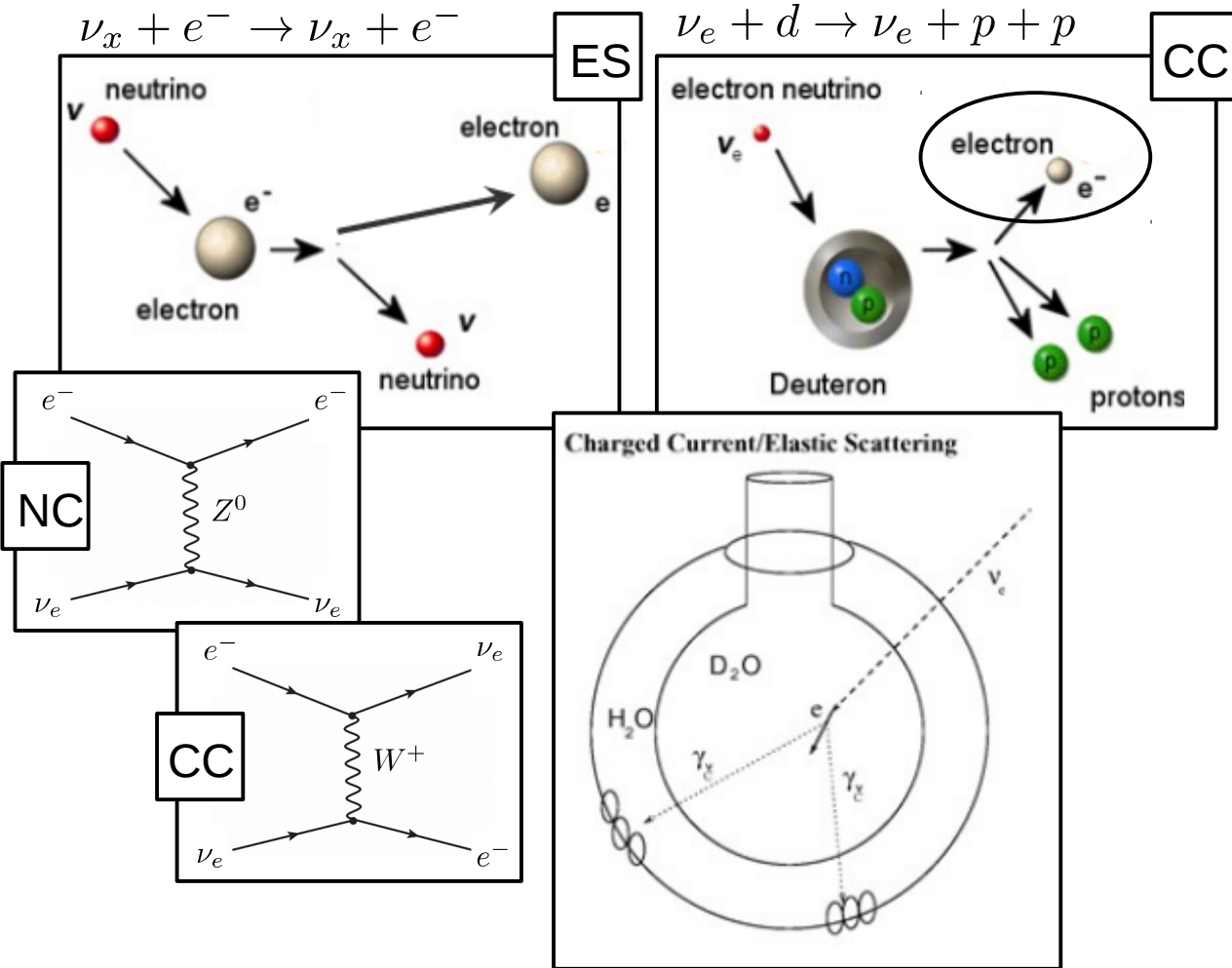


→  $\nu_e$  schlägt  $e^-$  aus  
→ schnelles  $e^-$  erzeugt Cherenkovstrahlung

Typischerweise ~50 detektierte Photonen pro Ereignis



# Unterscheidung von NC und CC

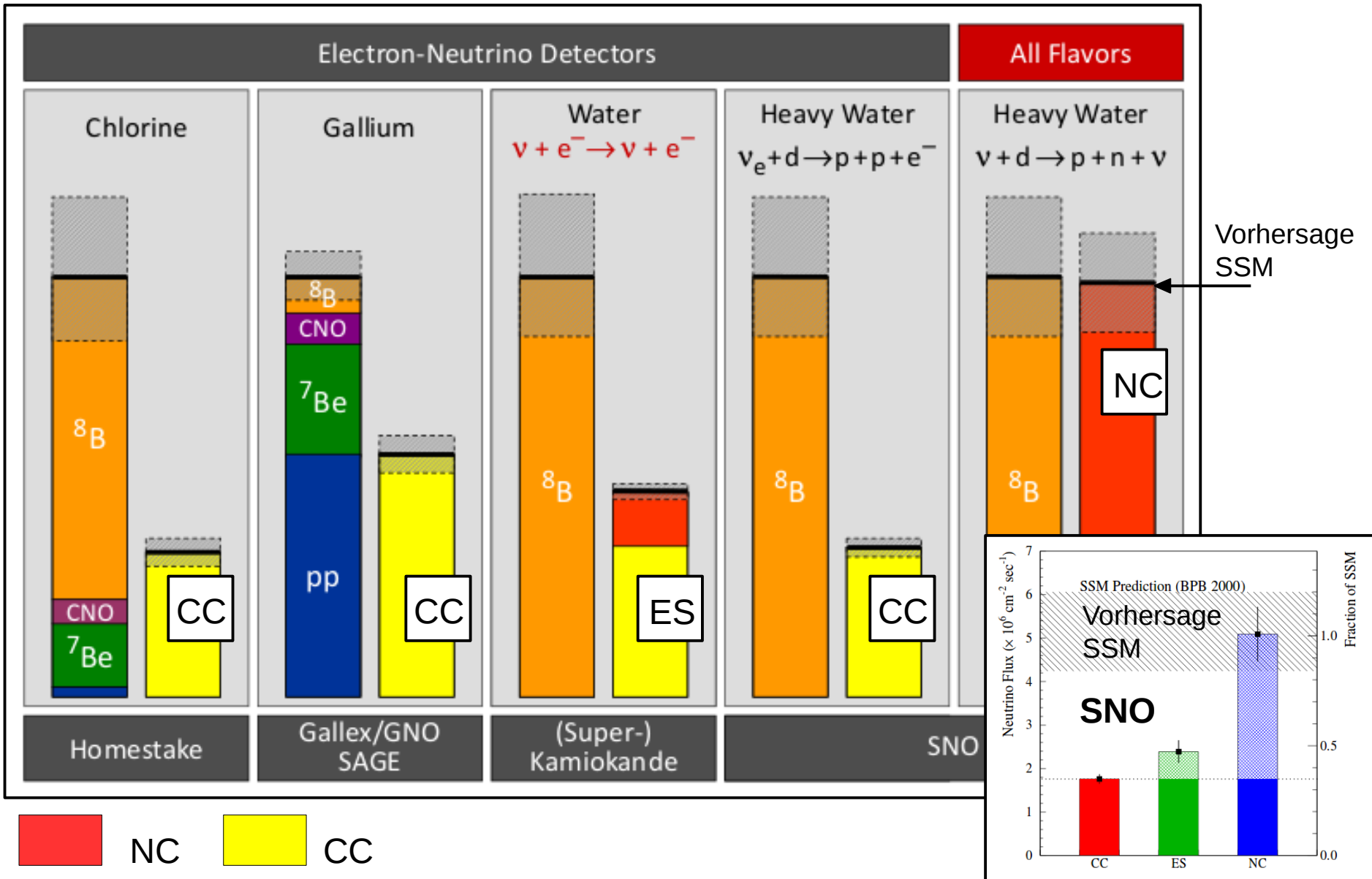


$n + d \rightarrow t + \gamma(6.25 \text{ MeV})$

Später: Einfang durch  $^{35}\text{Cl}$  und durch eigene  $^3\text{He}$  Detektoren

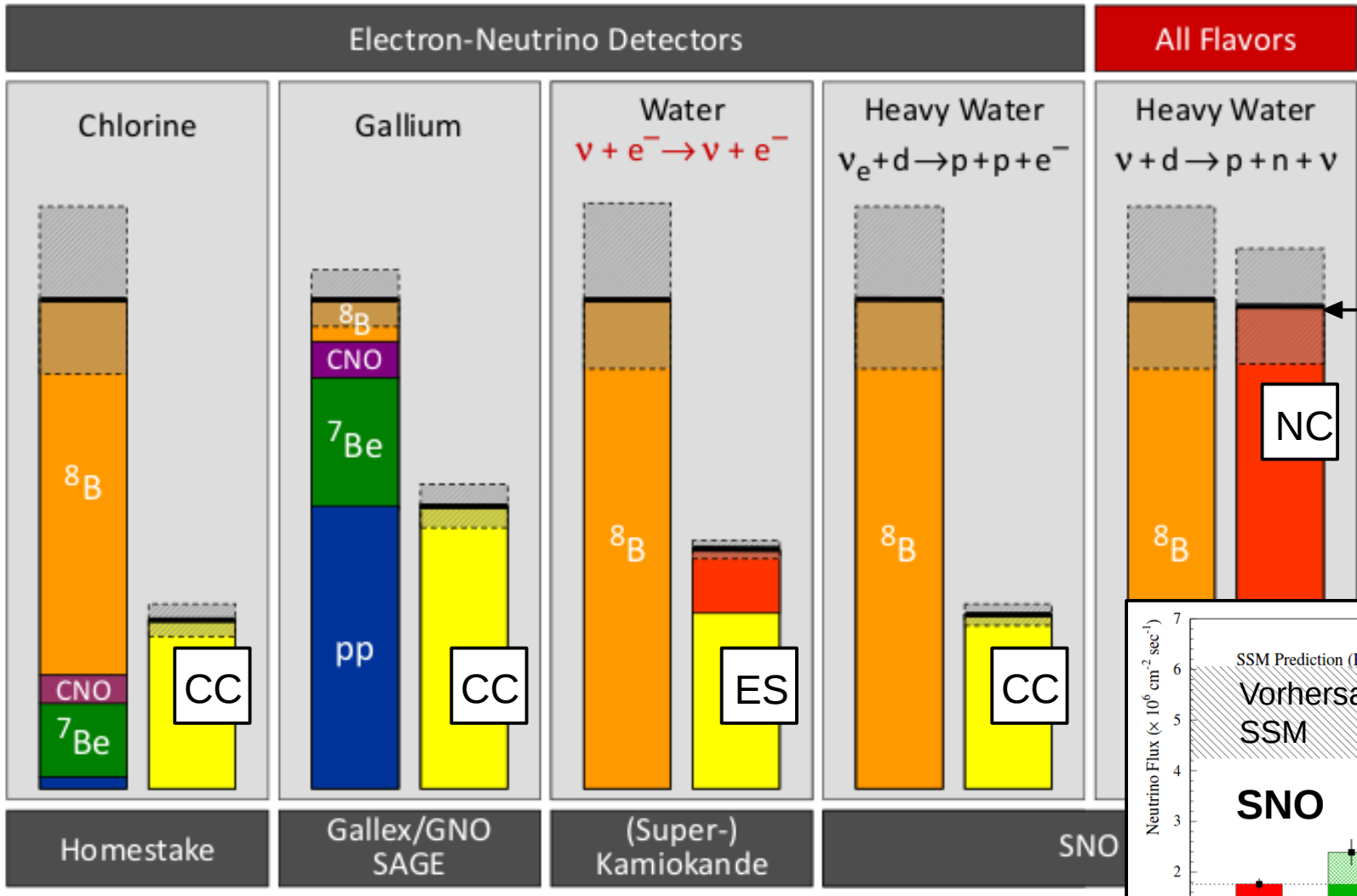
**Unterscheidung NC und CC durch Gesamtenergie & radiale Energieverteilung des Signals**

# Ergebnis: Sonnenneutrinos

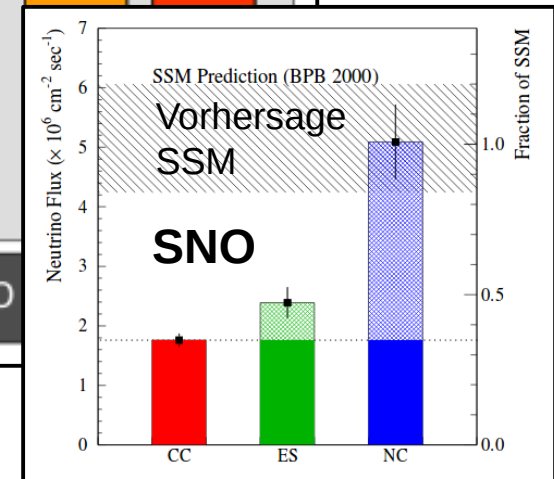


# Ergebnis: Sonnenneutrinos

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



Vorhersage SSM



NC CC

# Neutrinoquellen

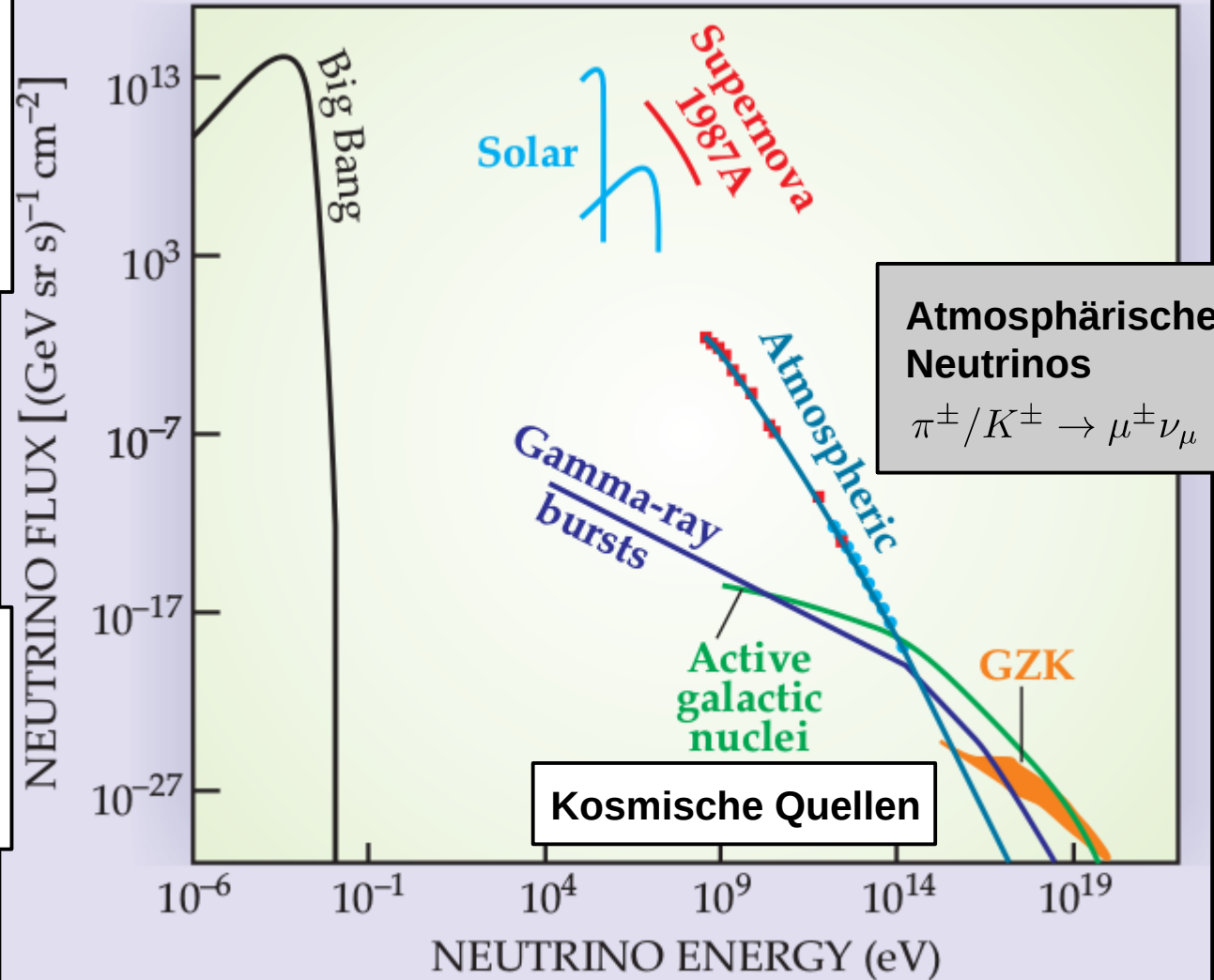
## Neutrinos aus Urknall

- Hoher Fluß
- Niedrige Energie
- Noch nicht direkt nachgewiesen

## Menschliche Quellen

- Reaktorneutrinos
- Beschleuniger

## Kernfusion in Sternen & Supernovae



## Atmosphärische Neutrinos

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

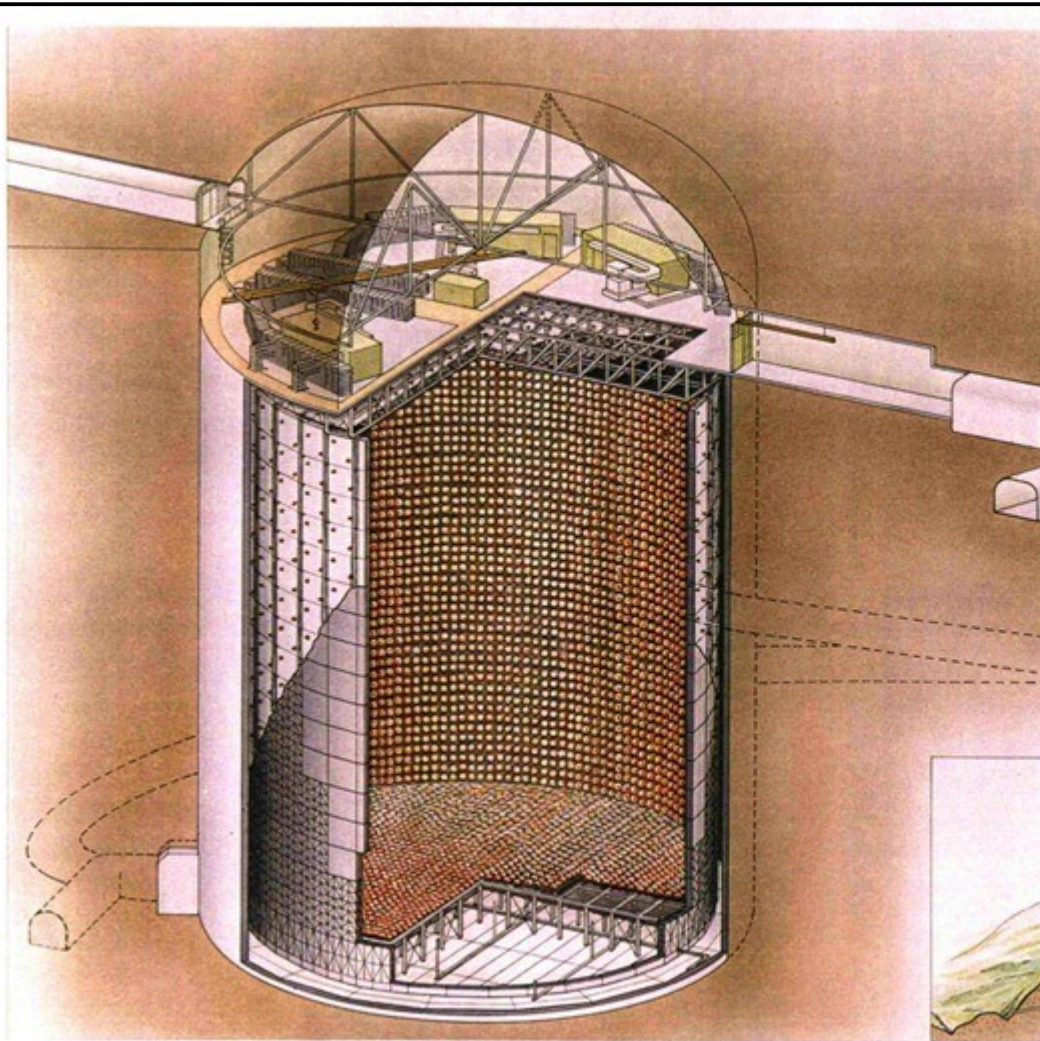


# Atmosphärische Neutrinos

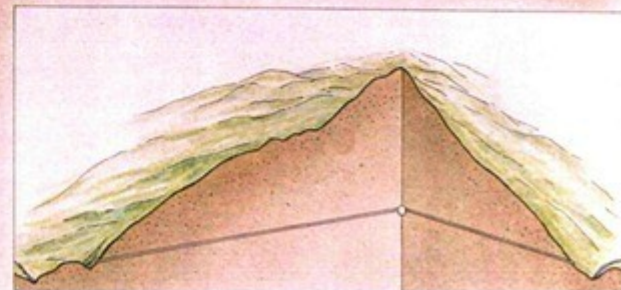
- Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit Sauerstoff oder Stickstoff in oberer Atmosphäre (→ hadronischer Schauer vgl VL-06 Folie 24)
- Zerfallskette:  
 $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$   
 $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$
- Neutrinoenergien:  
0.5 – 50 GeV



# (Super-)Kamiokande Experiment

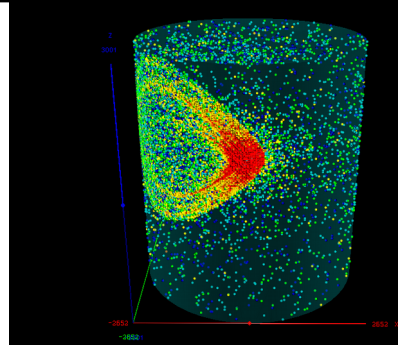
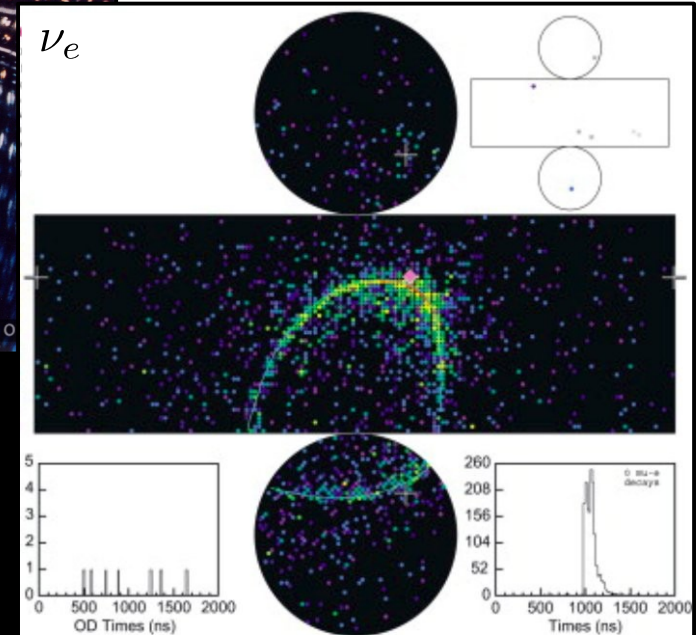
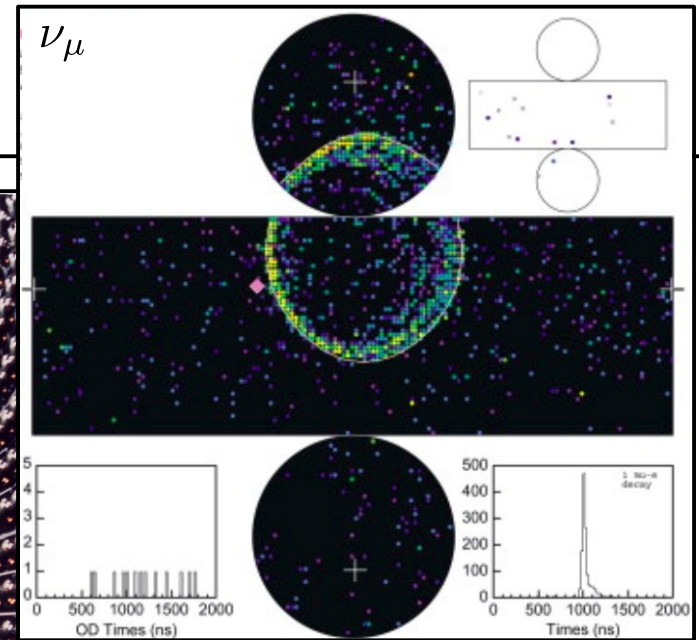
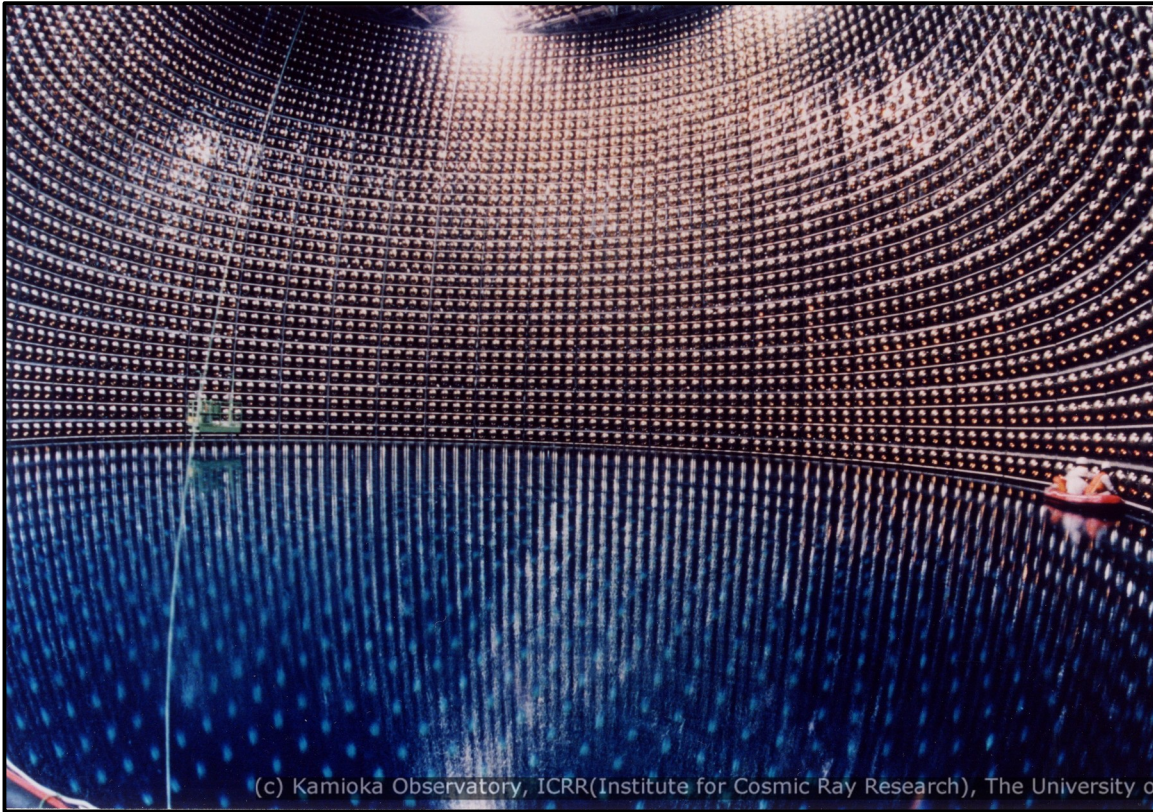


- Wasser Cherenkov Detektor
- 3000 (50'000) t Wasser
- 1000 (11'000) Photomultiplier zum Nachweis des Cherenkov-Lichts
- In Mozumi-Mine bei Kamioka (~1 km unter der Erde)
- Erwarte eine Reaktion alle 90 min





# Kamiokande Ereignisse



# Kamiokande Ergebnisse

- Beobachte Neutrinos von oben/unten

- **Beobachtung:**

$\nu_\mu$  "verschwinden"

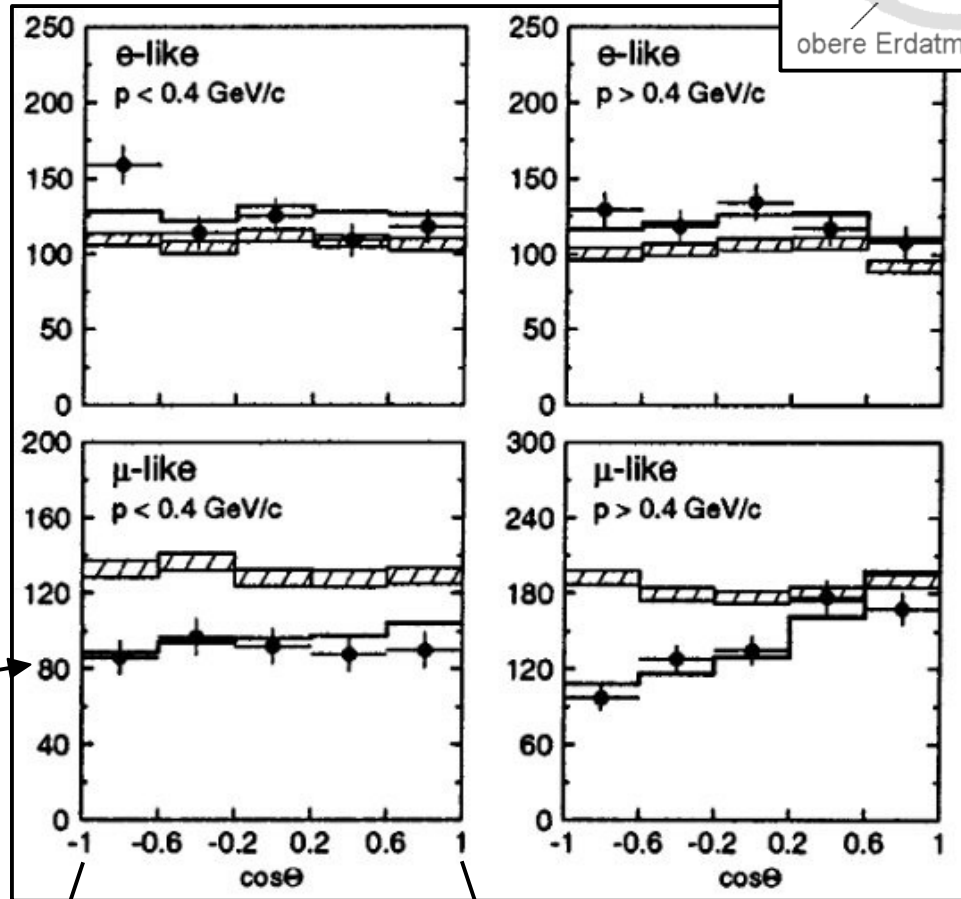
$\nu_e$  "verschwinden" nicht  
bei Gang durch Erde

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

**Erwartung:**

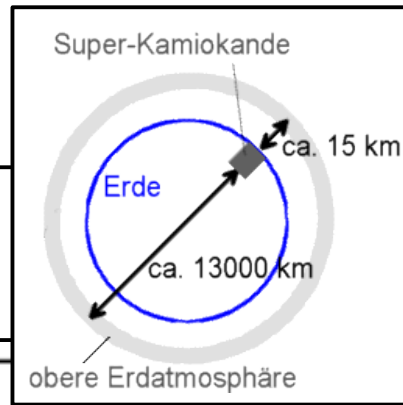
ohne Oszillation →

mit Oszillation →



von unten

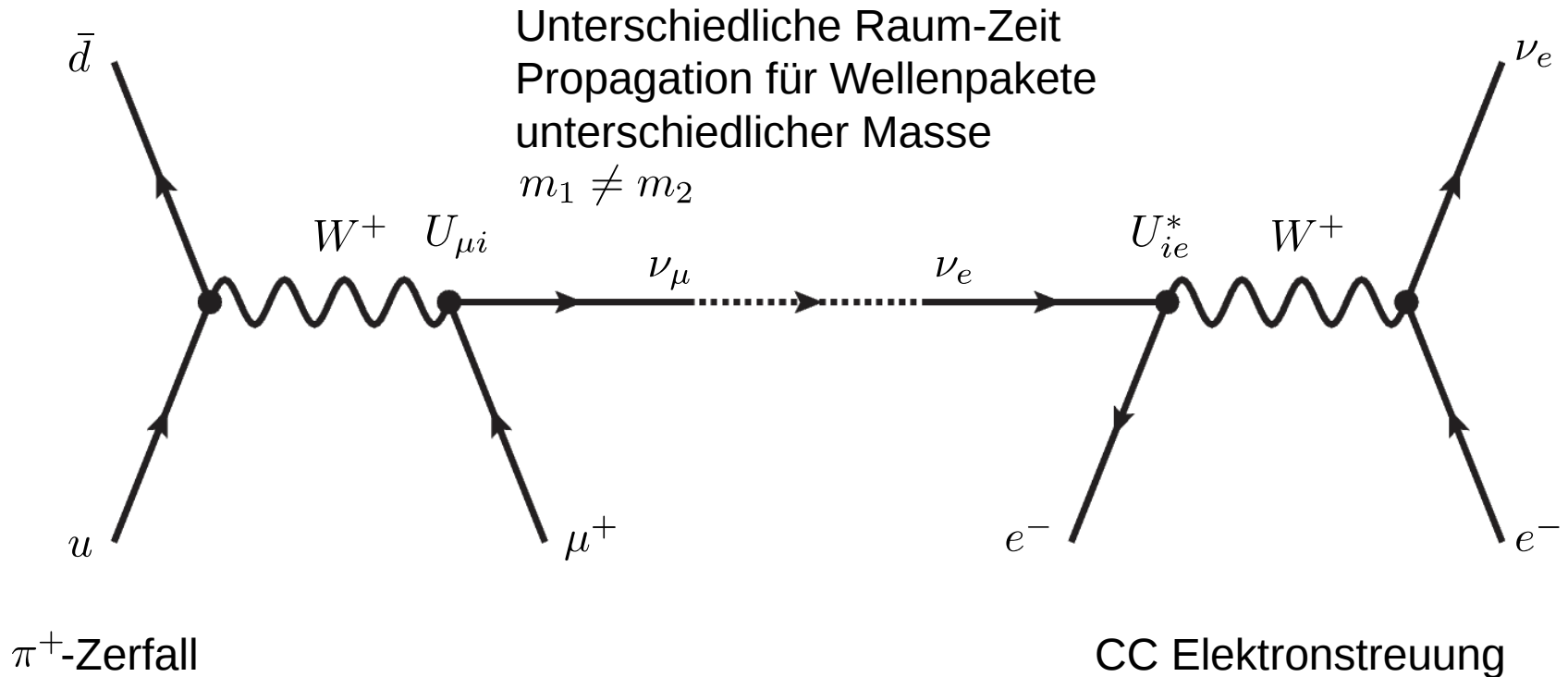
von oben



# 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-13](#))
- Produktion/Nachweis  $\rightarrow$  Flavoreigenzustände
- Propagation (in Vakuum)  $\rightarrow$  Masseneigenzustände



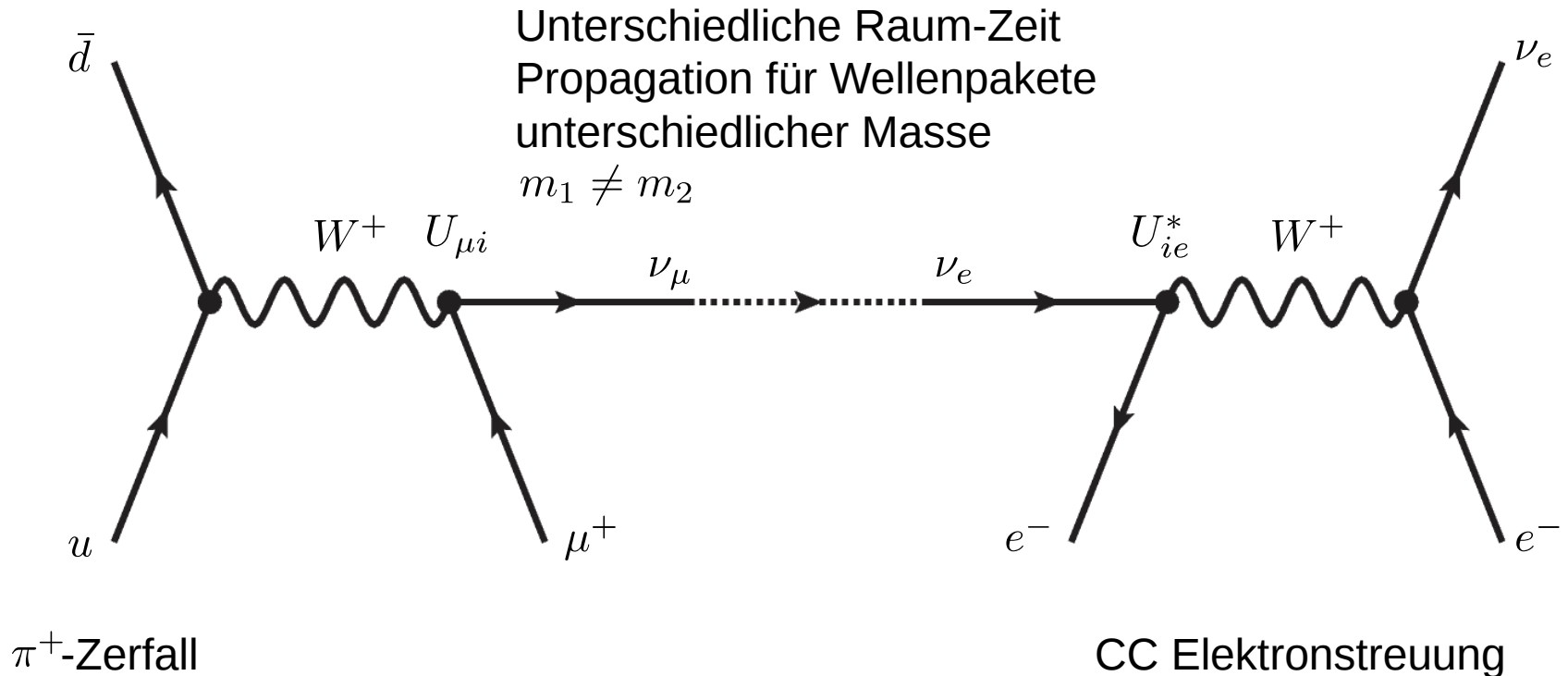


# Neutrino-Oszillationen

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

- **Masseneigenzustände  $\neq$  Flavoreigenzustände**  $\rightarrow$  Mischung (vgl [VL-13](#))
- Produktion/Nachweis  $\rightarrow$  Flavoreigenzustände
- Propagation (in Vakuum)  $\rightarrow$  Masseneigenzustände

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



# Neutrino-Oszillationen: Vermessung

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

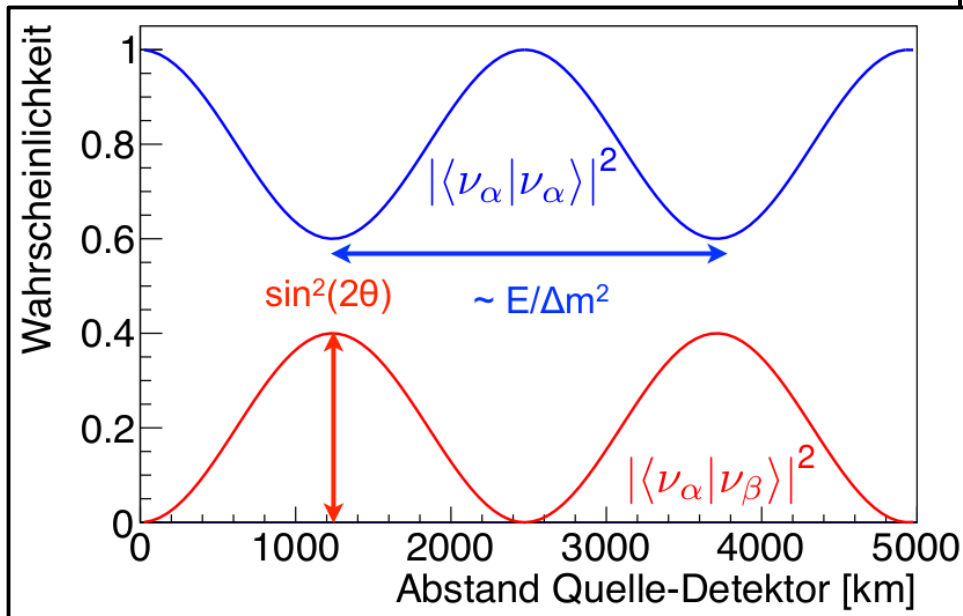
- Masseneigenzustände  $\neq$  Flavoreigenzustände  $\rightarrow$  Mischung (vgl VL-13)
- Aus QM Betrachtung:

$$\begin{aligned} |\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\Delta m_{\alpha\beta}^2 \frac{L}{4E}\right) \\ &= \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m_{\alpha\beta}^2 \frac{L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]}\right) \end{aligned}$$

Für zwei Generationen

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-13)

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-13)

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-13)

Reaktor Oszillationen

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

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

Atmosphärische Oszillationen

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

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

Solare Oszillationen

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

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

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

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

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

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

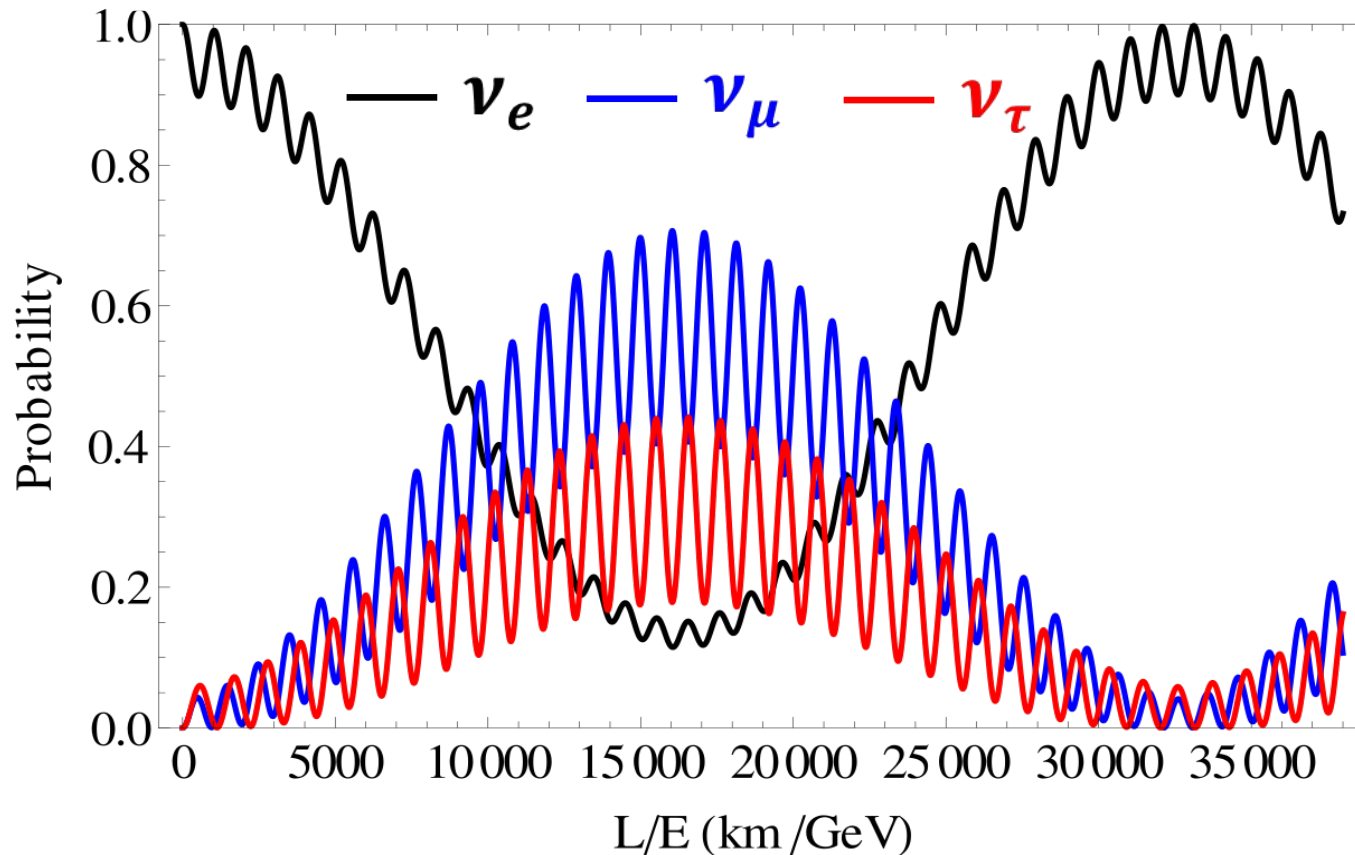
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij} ; s_{ij} = \sin \theta_{ij} \quad (ij = 12, 13, 23)$$



# Oszillation ursprüngliches $\nu_e$

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

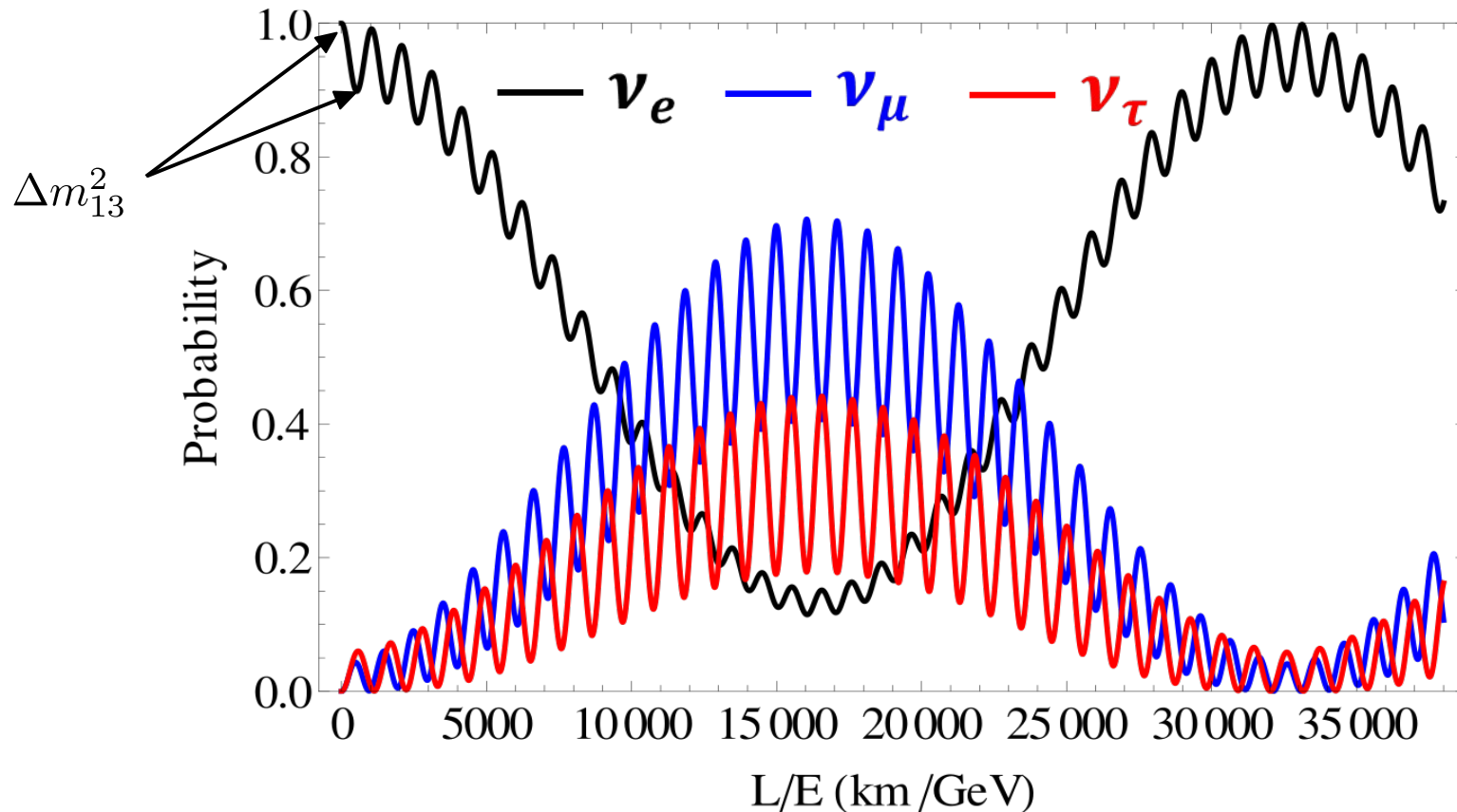
Herleitung  
siehe [hier](#)



# Oszillation ursprüngliches $\nu_e$

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

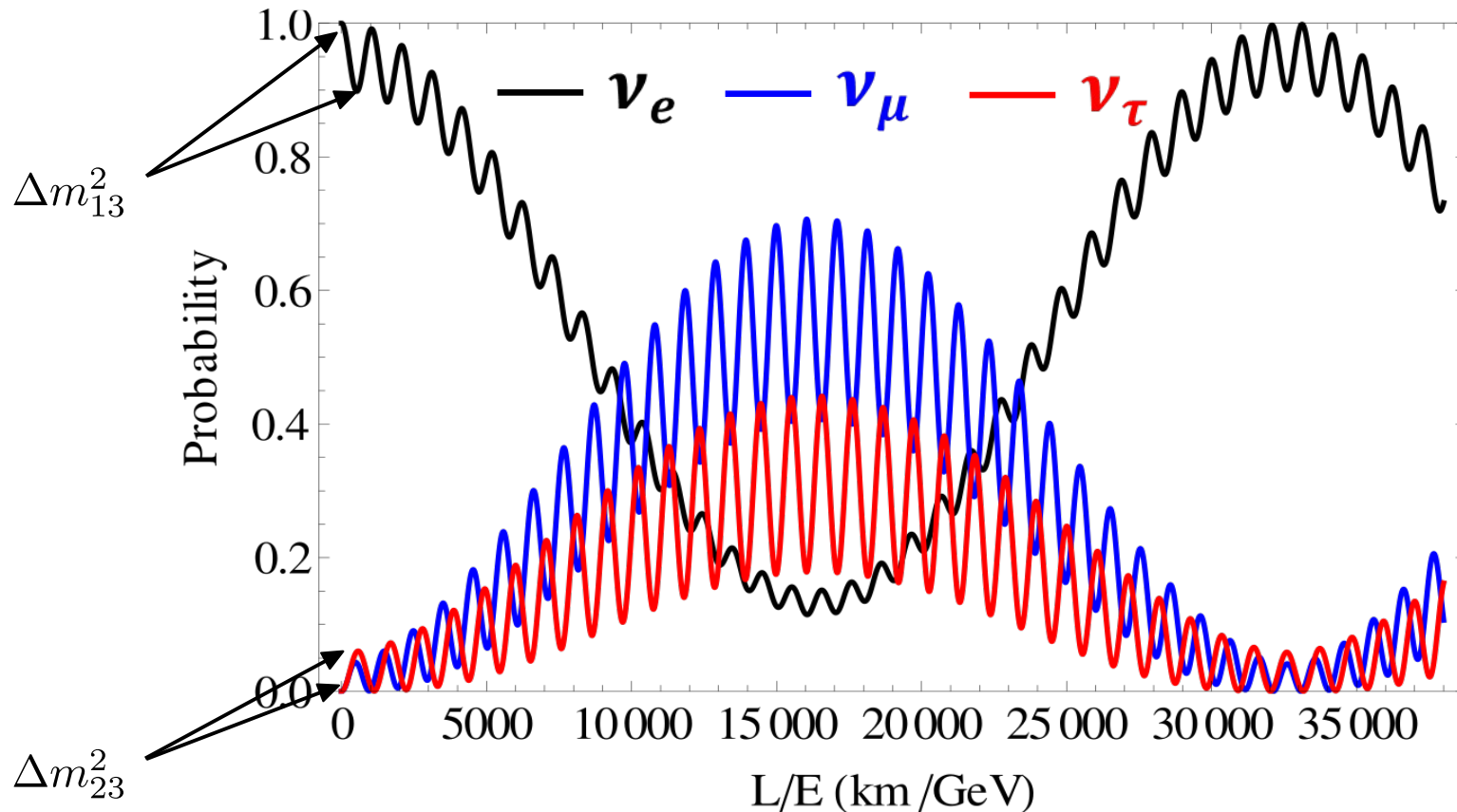
Herleitung  
siehe [hier](#)



# Oszillation ursprüngliches $\nu_e$

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

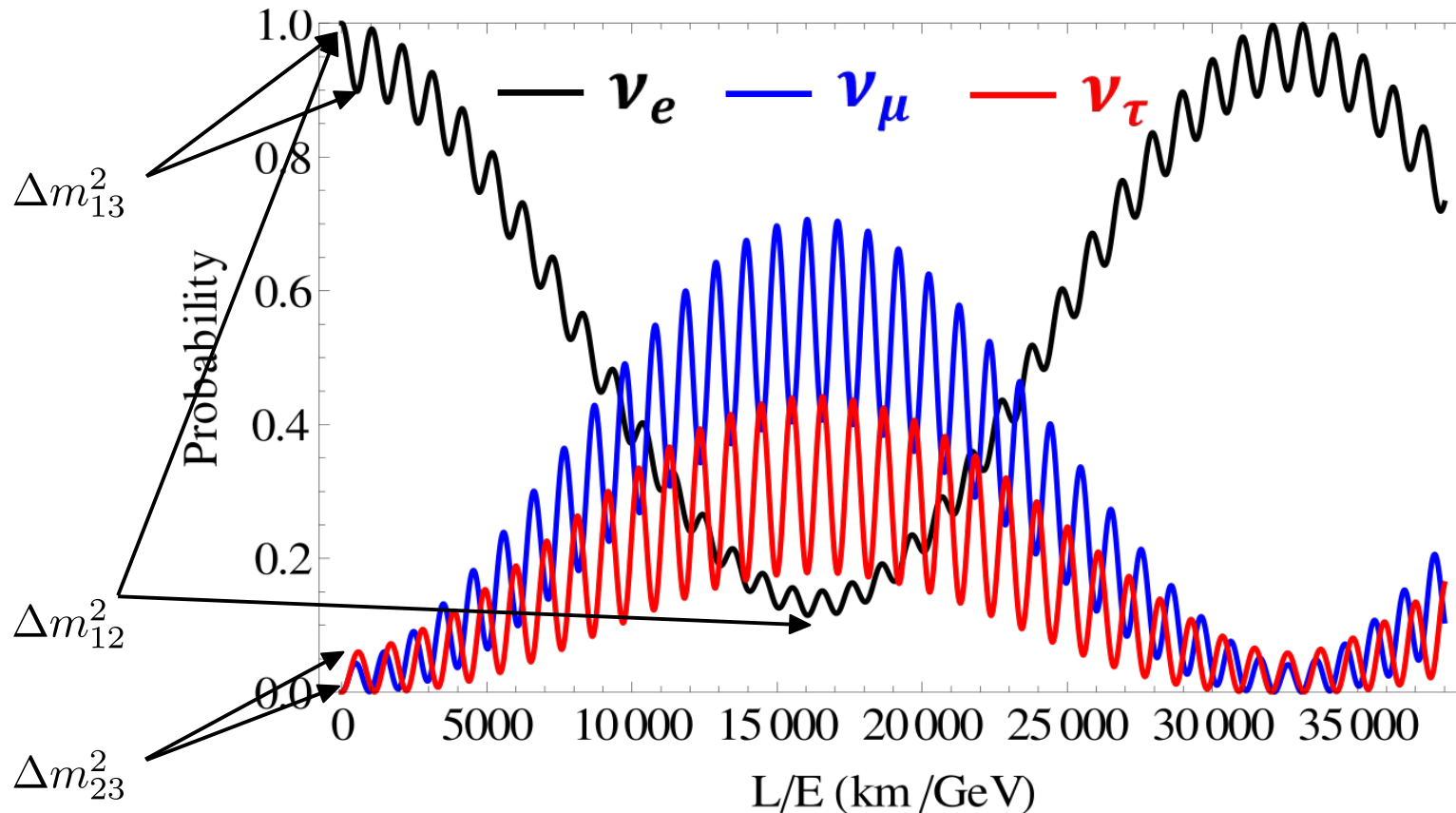
Herleitung siehe [hier](#)



# Oszillation ursprüngliches $\nu_e$

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

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

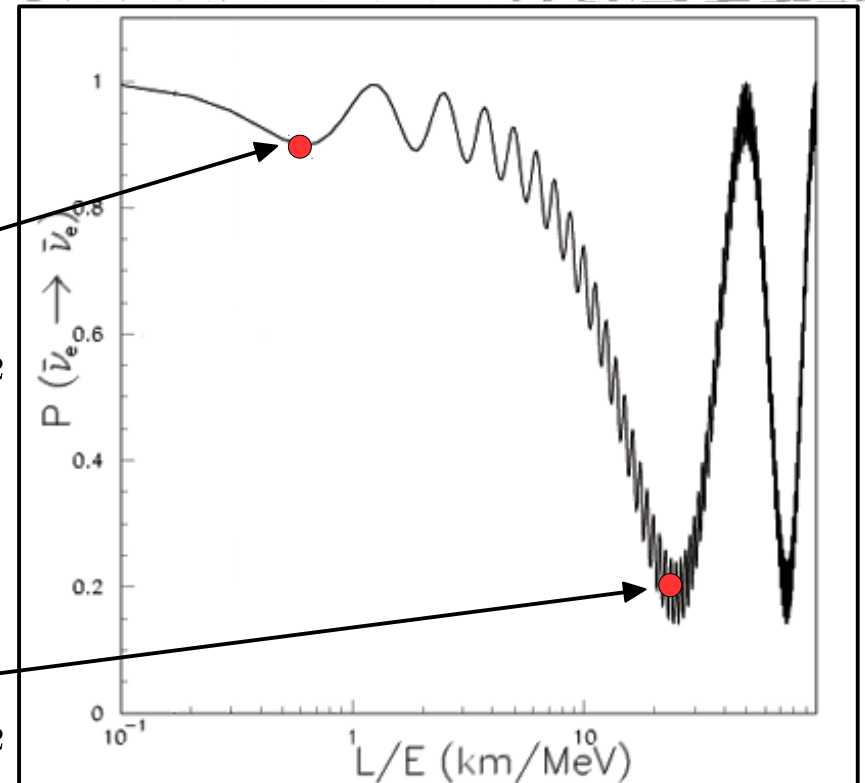
- Ein Detektor nahe bei Quelle (=near), einer von Quelle entfernt (=far)

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

T2K

Reno

PINGU

MiniBooNE

Double Chooz

ORCA

NUCIFER

MINOS

KamLAND

Opera

Nova

INO

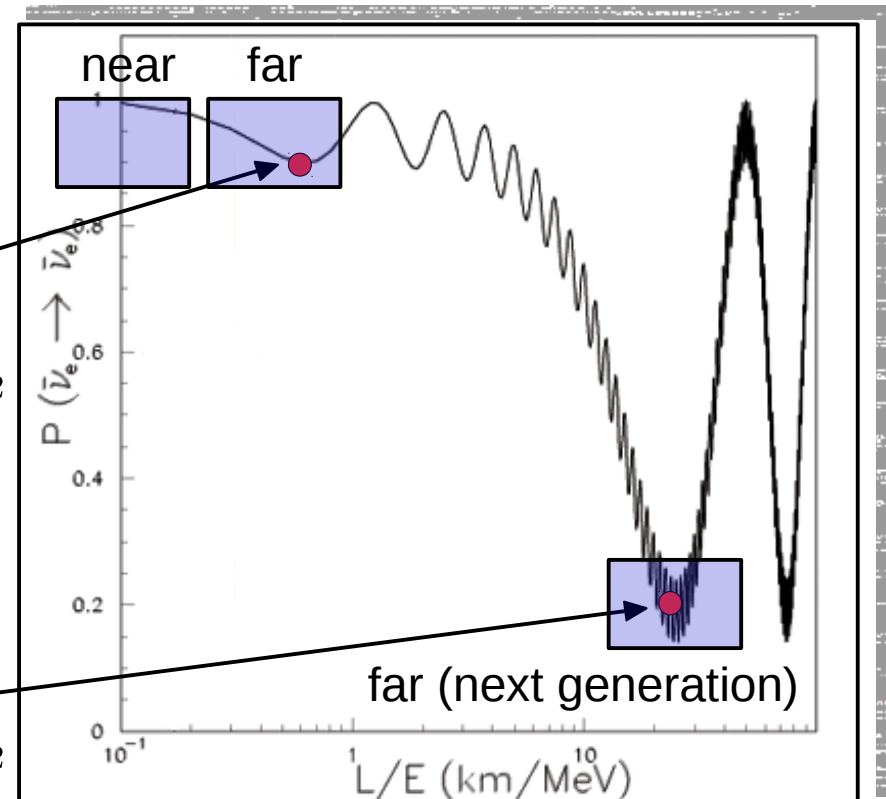
- Ein Detektor nahe bei Quelle (=near), einer von Quelle entfernt (=far)

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)

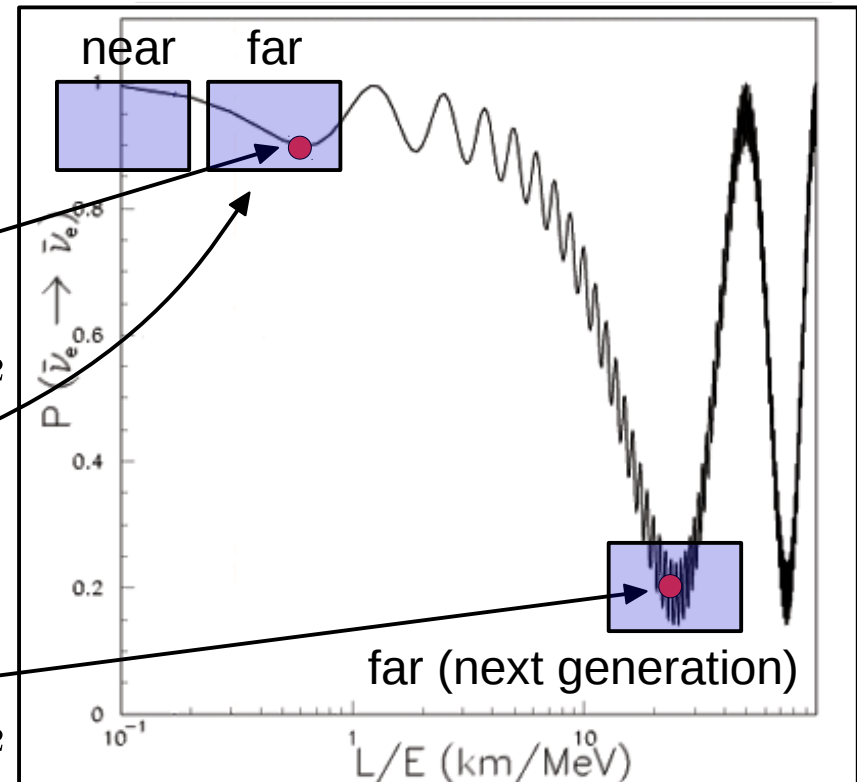
Atmosphärische  
Frequenz

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

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

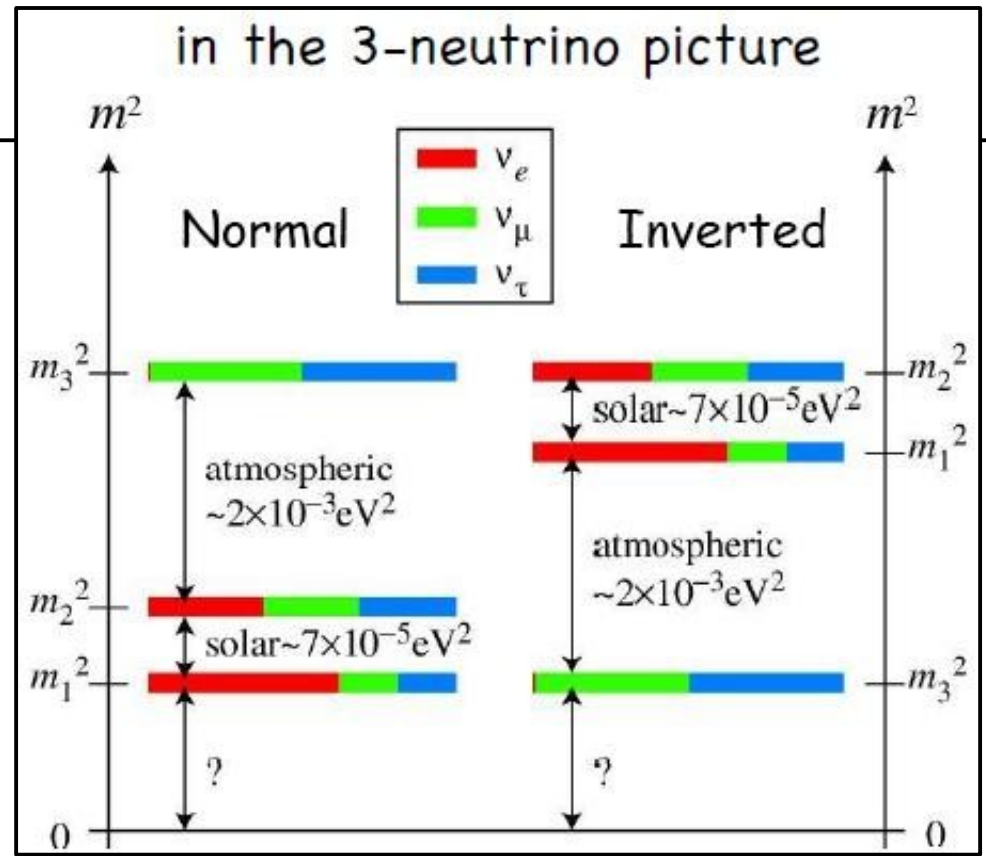
Solare Frequenz

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



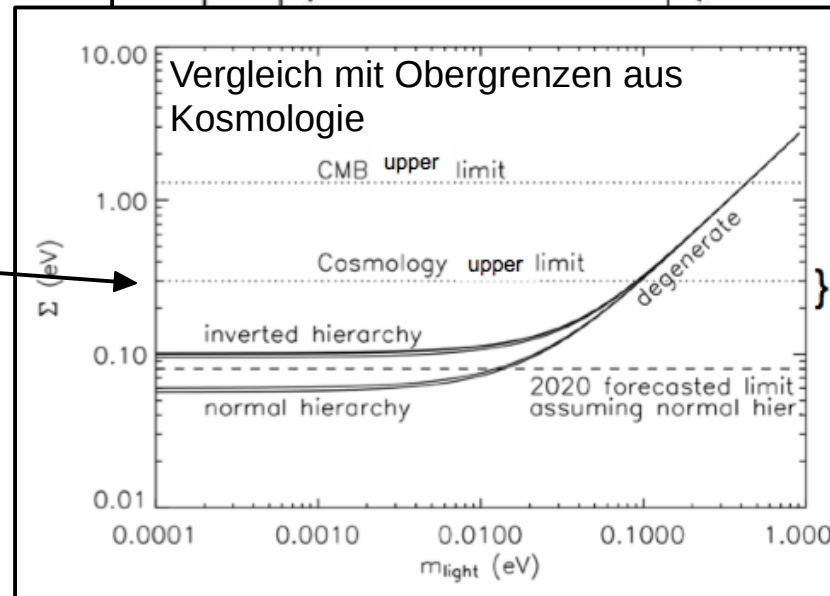
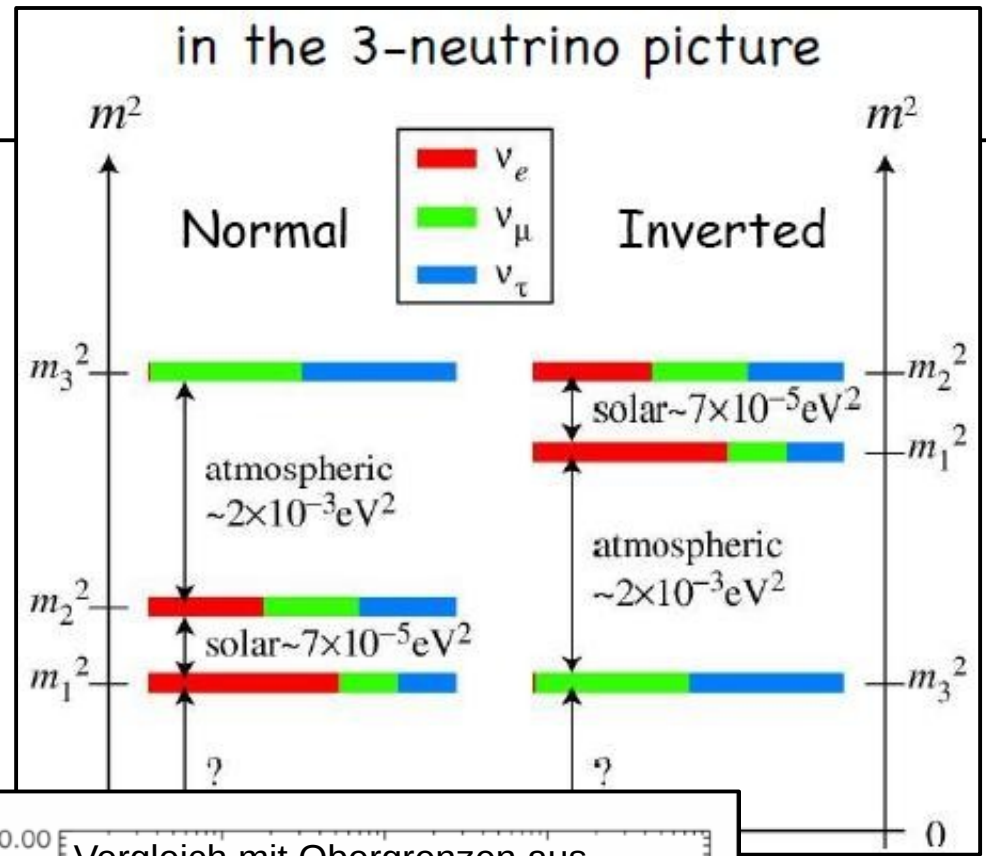
# Massenhierarchie

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



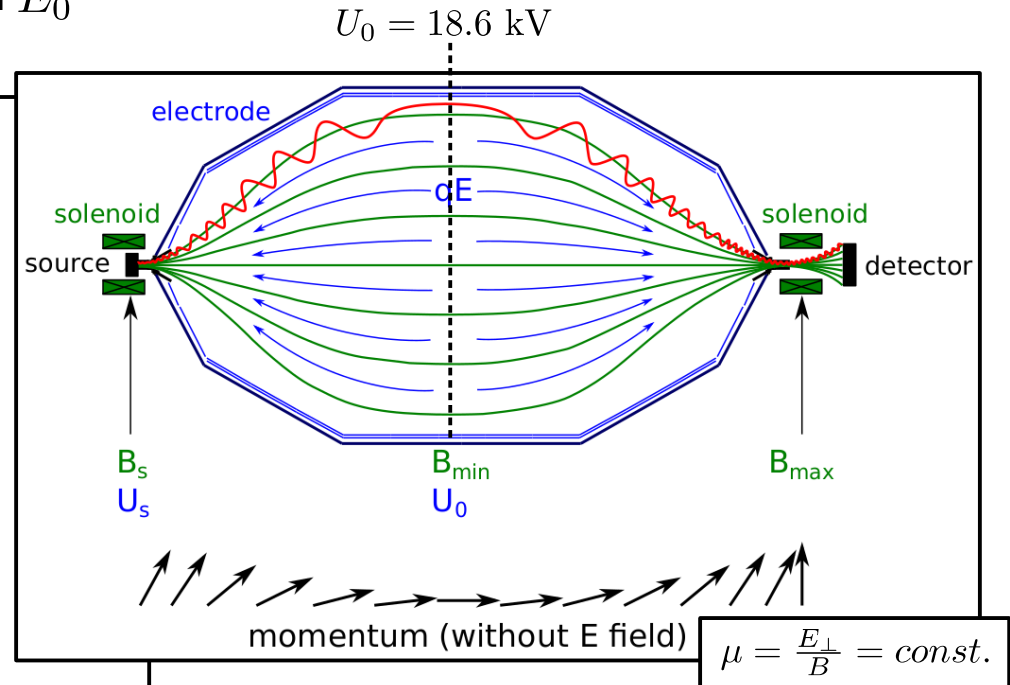
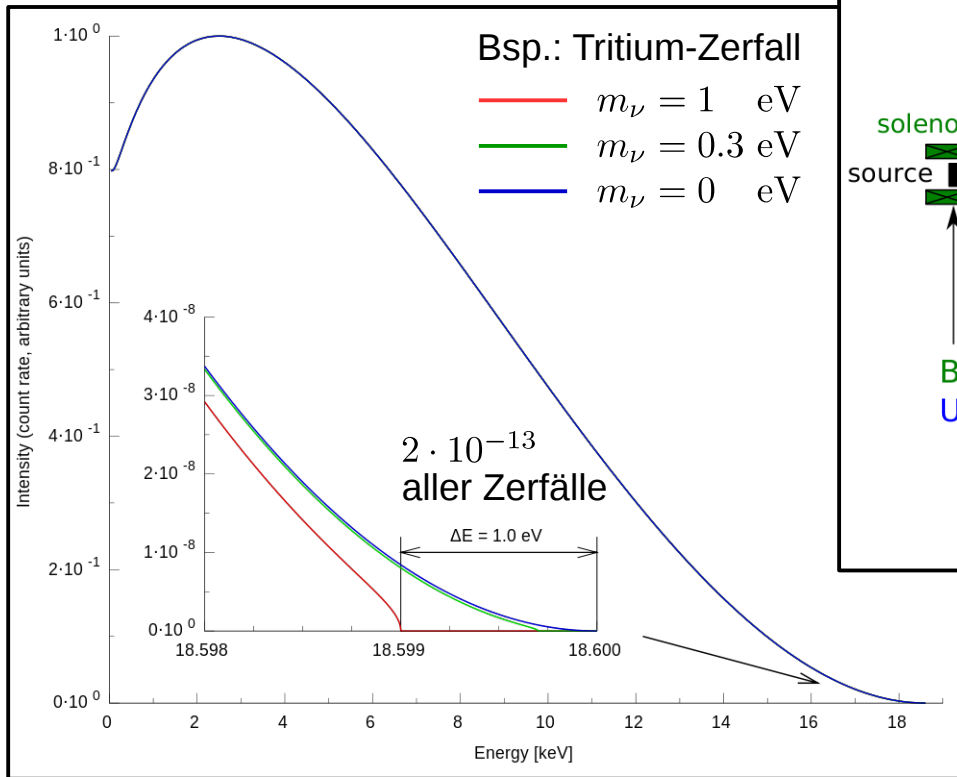
# Massenhierarchie

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



# Messung von $m_\nu^2$

- Exakte Vermessung von  $E_e$  nahe bei  $E_0$



(KATRIN-Spektrometer, MAC-E Filter)

$$\rho(E_0) = \frac{V^2}{(2\pi \hbar)^6} \cdot (4\pi)^2 \int_{m_e}^{E_0} E_e^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{E_e^2}} \cdot (E_0 - E_e)^2 \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2}{(E_0 - E_e)^2}} dE_e \propto E_0^5$$

(Sargent-Regel)

# Gliederung der Vorlesung

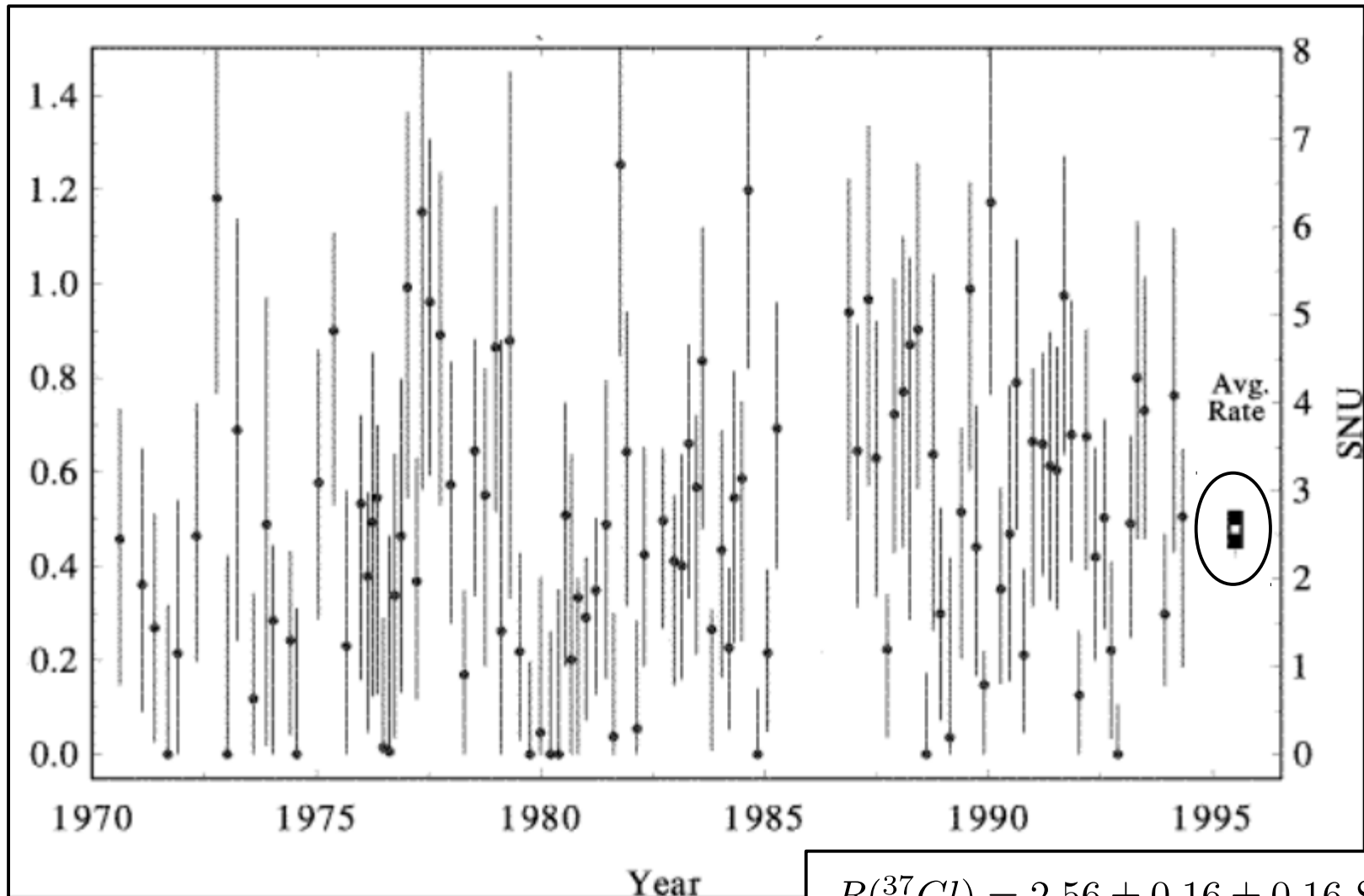


<b>Vorlesung:</b>	<b>Vorlesungstag:</b>	<b>Übungsblatt:</b>
VL-01 Einheiten, Relativistische Kinematik	Di 17.04.2018	-
VL-02 Teilchenstreuung	Do 19.04.2018	-
VL-03 Wirkungsquerschnitt	Di 24.04.2018	Blatt-01
VL-04 Teilchenbeschleunigung	Do 26.04.2018	-
Vorlesung fällt aus	Di 01.05.2018	Blatt-02
VL-05 Teilchennachweis durch Ionisation	Do 03.05.2018	-
VL-06 Elektromag. WW und Schauer	Di 08.05.2018	Blatt-03
Vorlesung fällt aus	Do 10.05.2018	-
VL-07 Detektoren der Teilchenphysik	Di 15.05.2018	Blatt-04
VL-08 Symmetrien und Erhaltungsätze	Do 17.05.2018	-
VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte im SM	Di 22.05.2018	Blatt-05
VL-10 Diskrete Symmetrien des SM	Do 24.05.2018	-
VL-11 Teilchenzoo: vom Hadron zum Quark	Di 29.05.2018	Blatt-06
Vorlesung fällt aus	Do 31.05.2018	-
VL-12 Farbladung und QCD	Di 05.06.2018	Blatt-07
VL-13 Phänomenologie der schwachen WW	Do 07.06.2018	-
VL-14 Theorie der elektroschwachen WW	Di 12.06.2018	Blatt-08
VL-15 Higgs Mechanismus	Do 14.06.2018	-
VL-16 SM: Quarksektor	Di 19.06.2018	Blatt-09
VL-17 Top: Entdeckung und Eigenschaften	Do 21.06.2018	-
VL-18 Higgs: Entdeckung und Eigenschaften	Di 26.06.2018	-
VL-19 Neutrino-Physik	Do 28.06.2018	-



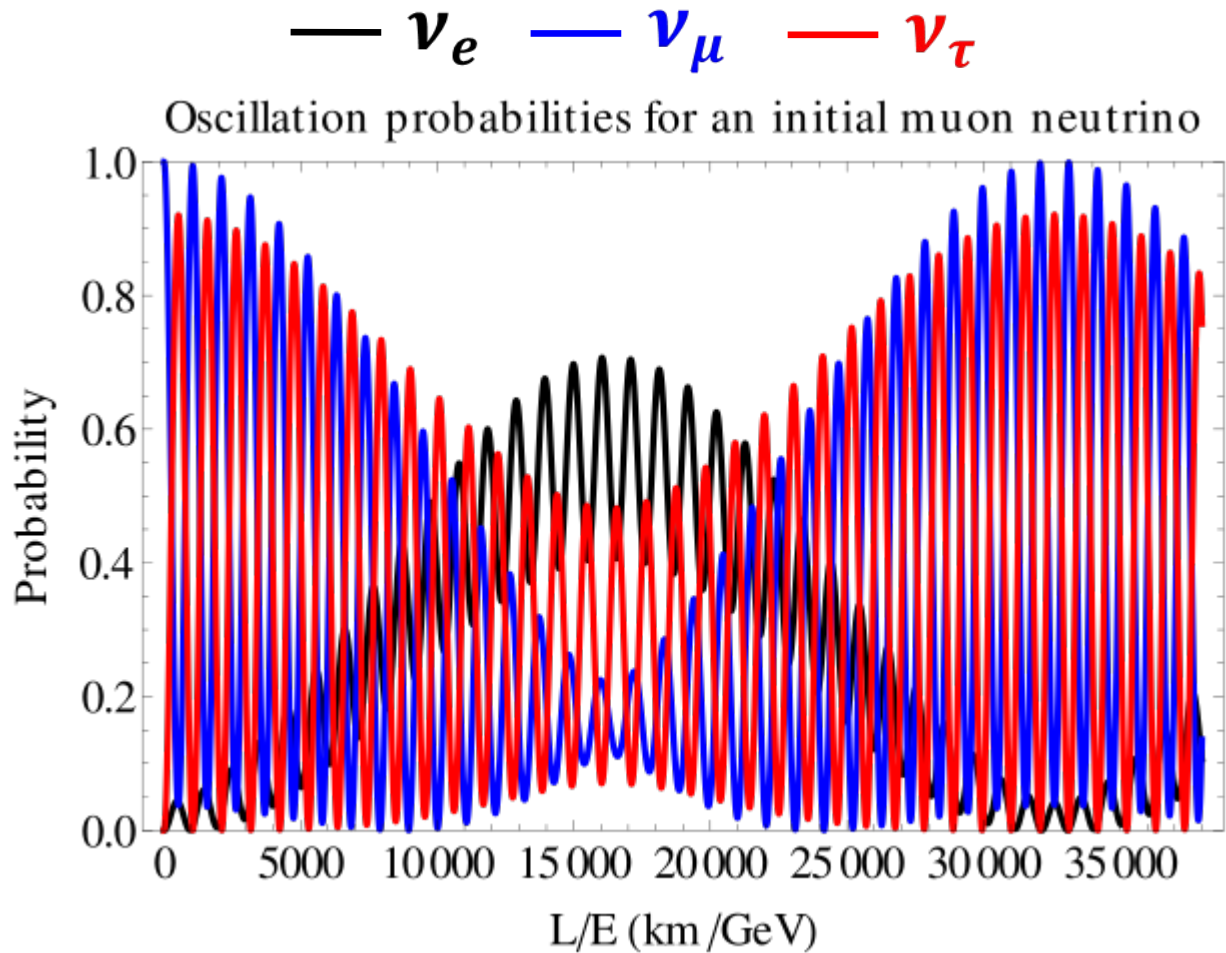


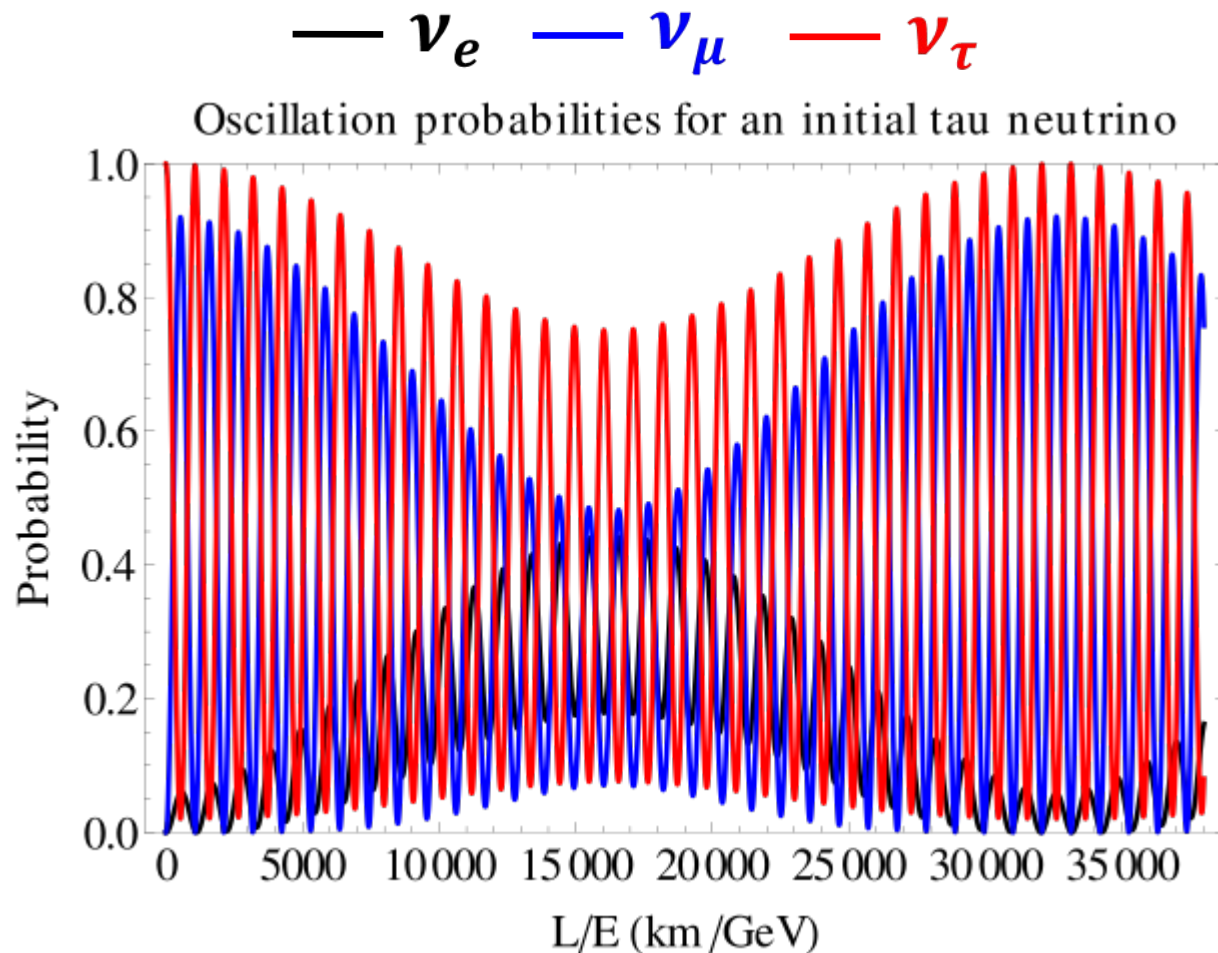
# Homestake Experiment: >20 Jahre Messungen



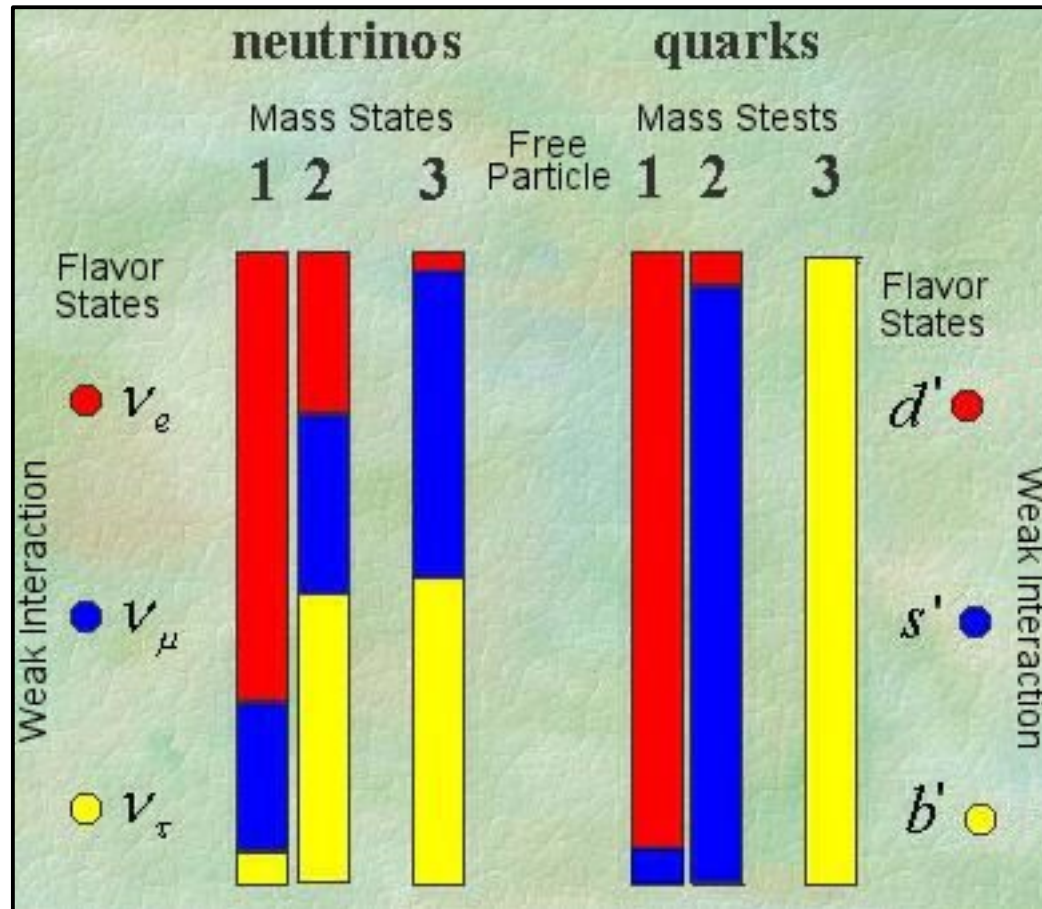
$$R(^{37}\text{Cl}) = 2.56 \pm 0.16 \pm 0.16 \text{ SNU}$$

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





# Vergleich: Flavor composition



# $\beta$ -Zerfallskonstante (Phasenraumfaktor)

- Aus Fermi's Goldener Regel (siehe SS-17 VL-03 Folie 14)

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{2\pi}{\hbar} \underbrace{|\langle f | \mathcal{M}_{fi} | i \rangle|^2}_{\rho(E_0)}$$



$$\begin{aligned} \rho(E_0) &\stackrel{(1)}{=} \int \frac{d^3\vec{r}_e d^3\vec{p}_e}{(2\pi\hbar)^3} \int \frac{d^3\vec{r}_\nu d^3\vec{p}_\nu}{(2\pi\hbar)^3} \\ &= \frac{V^2}{(2\pi\hbar)^6} \cdot (4\pi)^2 \int \int \delta(E_\nu - (E_0 - E_e)) \cdot p_e^2 \frac{dp_e}{dE_e} \cdot p_\nu^2 \frac{dp_\nu}{dE_\nu} dE_e dE_\nu \end{aligned}$$

mit

$$p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \quad \frac{dp_i}{dE_i} = \frac{E_i}{p_i}$$

$$\begin{aligned} \rho(E_0) &= \frac{V^2}{(2\pi\hbar)^6} \cdot (4\pi)^2 \int \int \delta(E_\nu - (E_0 - E_e)) \sqrt{E_e^2 - m_e^2} E_e \sqrt{E_\nu^2 - m_\nu^2} E_\nu dE_e dE_\nu \\ &= \frac{V^2}{(2\pi\hbar)^6} \cdot (4\pi)^2 \int_{m_e}^{E_0} E_e^2 \sqrt{1 - \frac{m_e^2}{E_e^2}} \cdot (E_0 - E_e)^2 \sqrt{1 - \frac{m_\nu^2}{(E_0 - E_e)^2}} dE_e \propto E_0^5 \end{aligned}$$

**Sargent-Regel:**

$$T_{1/2} \propto E_0^{-5}$$

d.h. je größer die frei werdende kinetische Energie, desto schneller der Zerfall

(Sargent-Regel)