

# Kerne und Teilchen

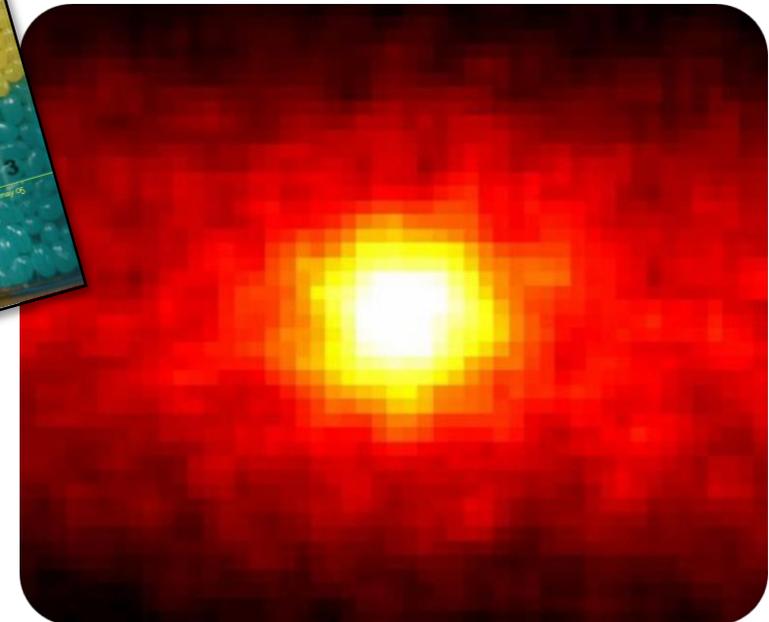
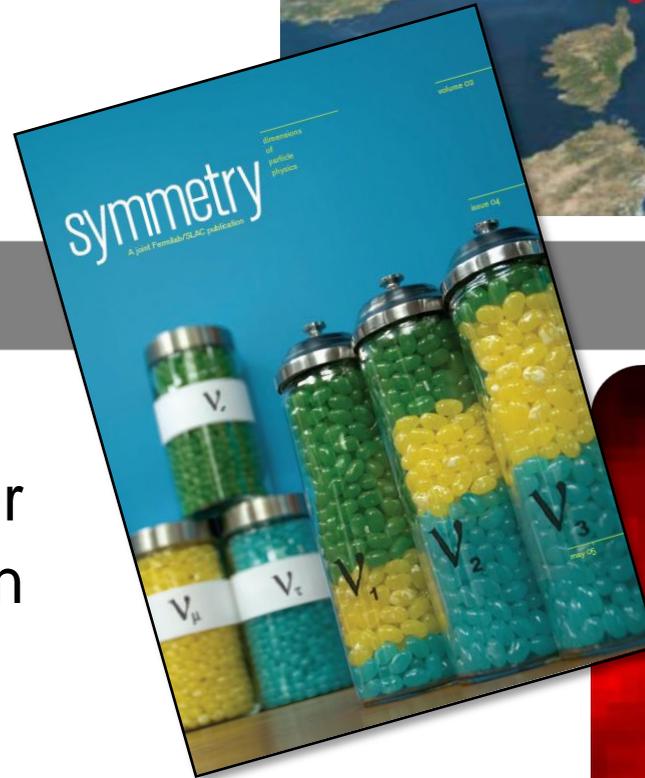
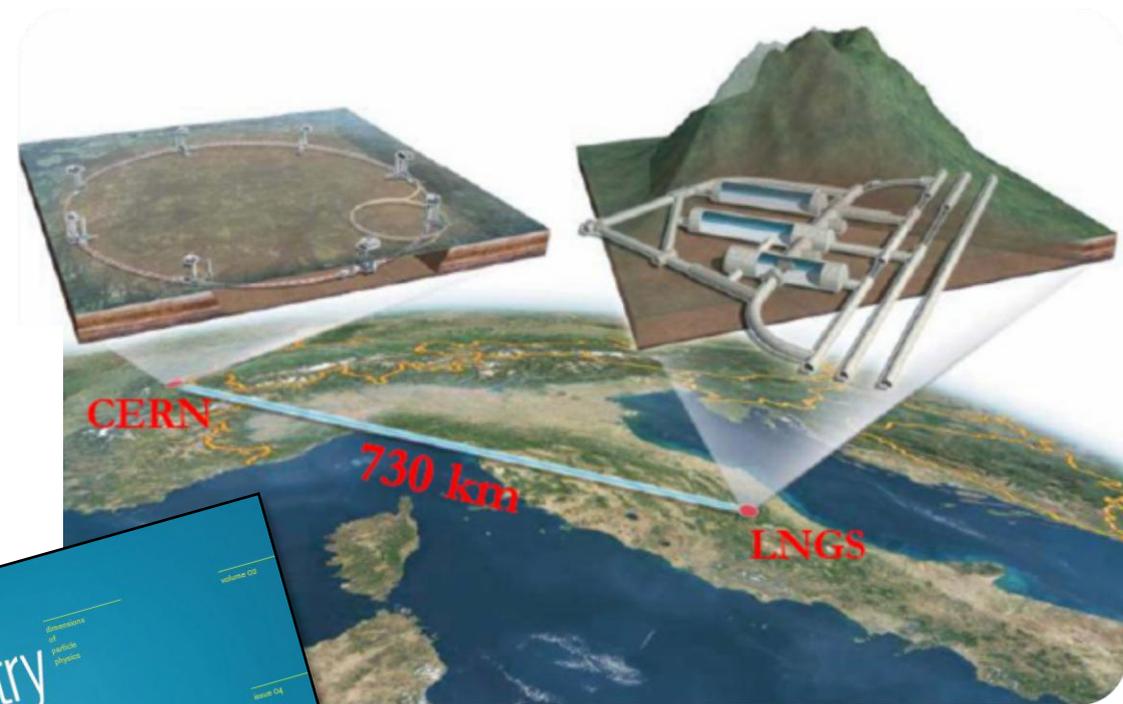
## Physik VI

Vorlesung # 25 13.7.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

### Kaonen & Neutrinos

- $\nu$ -Quellen: Beschleuniger
- $\nu$ -Quellen: Kernreaktoren
- $\nu$ -Quellen: Astrophysik
- Neutrino-Oszillationen:
  - $2\nu$  – Mischung
  - $3\nu$  – Mischung



# Kaon-Zustände



## ■ Eigenzustände der starken Wechselwirkung: $K_0$ & $\bar{K}_0$

$$\begin{pmatrix} |K^0\rangle \\ |\bar{K}^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |d\bar{s}\rangle \\ |d\bar{s}\rangle \end{pmatrix}$$

Zustände mit definierter Strangeness & starker Ww.  
 Massen von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  über CPT – Theorem identisch  
 keine definierten CP-Werte

## ■ Eigenzustände der CP-Symmetrie: $K_1$ & $K_2$

$$|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{CP} = +1$$

$$|K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad \text{CP} = -1$$

- unterschiedliche Massen (Mischung  $K_0$ - $\bar{K}_0$ ) & Lebensdauern
- unterschiedliche starke Wechselwirkung (Regeneration)
- Pionen als Marker der CP-Zustände:  $2\pi \Leftrightarrow \text{CP} = +1$      $3\pi \Leftrightarrow \text{CP} = -1$

## ■ Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung: $K_L$ & $K_S$

- Zerfall mit exponentiellem Zerfallsgesetz & festem  $\lambda_i$
- bei CP-Erhaltung:

$$K_S \rightarrow 2\pi$$

$$\tau_S \sim 90 \text{ ps}$$

$$K_S = K_{\text{Short}}$$

$$K_L \rightarrow 3\pi$$

$$\tau_L \sim 50 \text{ ns}$$

$$K_L = K_{\text{Long}}$$

# CP-Verletzung



## ■ Entdeckung der CP-Verletzung

- Nachweis des CP-verletzenden Zerfalls  $K_L \rightarrow 2\pi$
- sehr kleine Rate  $R = 2.23 \times 10^{-3}$

## ■ indirekte CP-Verletzung

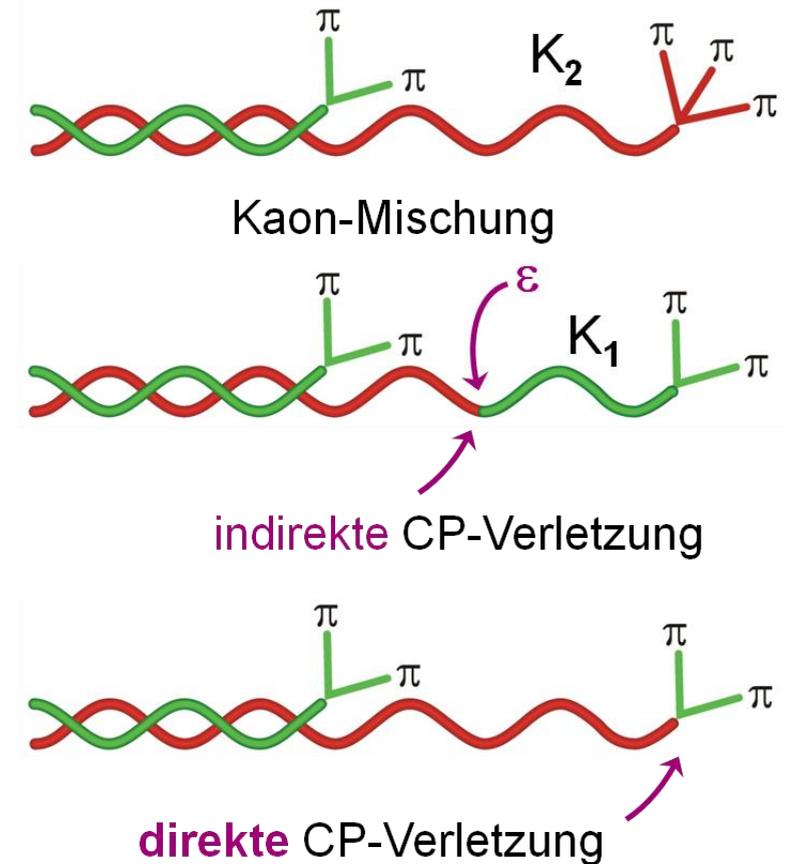
- resultiert aus der  $K^0 - \bar{K}^0$  Oszillation durch die schwache Wechselwirkung
- Parameter  $\varepsilon$ : kleine Beimischung von  $K_1$  zur  $K_2$ -Komponente ( $\varepsilon = 2.23 \cdot 10^{-3}$ )  
↳ dominanter Beitrag zur  $\mathcal{CP}$

## ■ direkte CP-Verletzung

- CP direkt am schwachen Zerfallsvertex (Pinguin-Diagramm), kleiner Beitrag zu  $\mathcal{CP}$
- Parameter  $\varepsilon'$ : experimentell  $\text{Re } \varepsilon'/\varepsilon = 1.65 \cdot 10^{-3}$

## ■ CP-Verletzung & Materie

- $\mathcal{CP}$  wichtige Voraussetzung für Materie/Antimaterie Asymmetrie

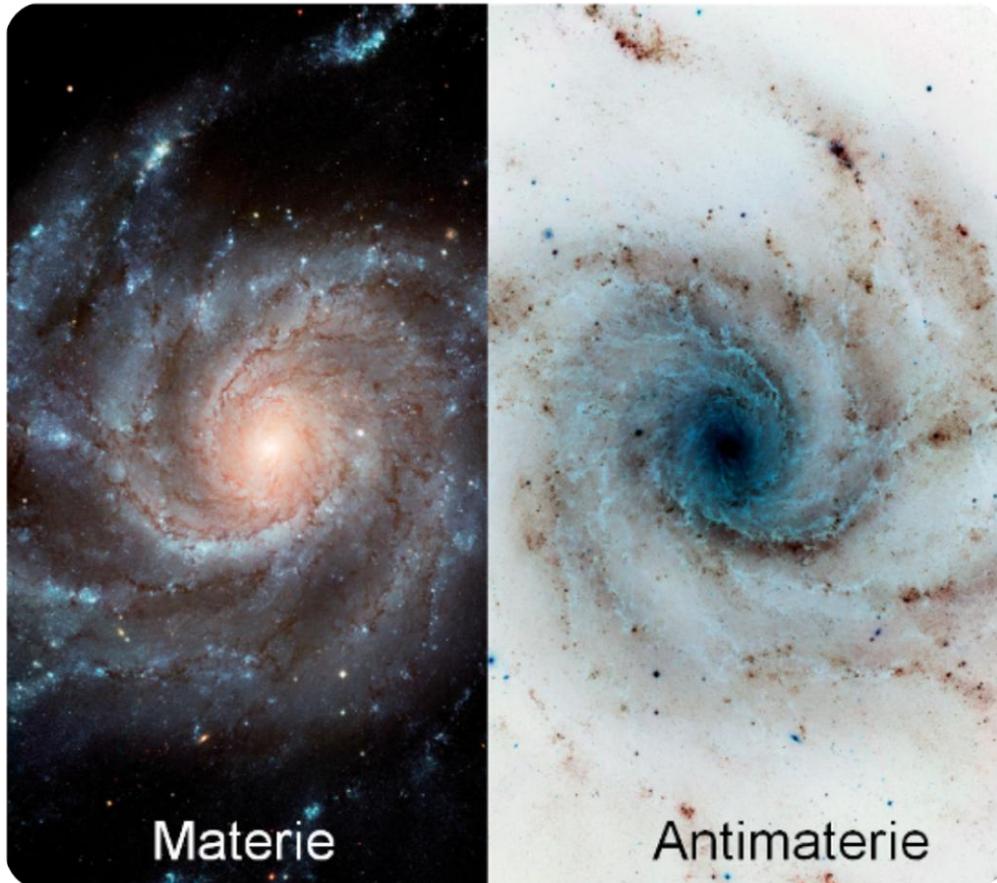


# Ursprung der Asymmetrie

## ■ Sacharov-Kriterien für Entstehung einer Baryon-Antibaryon-Asymmetrie:

### 1 CP- und C-verletzende Prozesse

verschiedene Eigenschaften von Materie & Antimaterie,  
Beispiel: Zerfalls-Amplituden von neutralen Kaonen, B-Mesonen



### 2 kein thermodynamisches Gleichgewicht

ansonsten wäre die Teilchendichte nur abhängig von ihrer Masse & der Temperatur  $kT$  des Universums  
CPT: identische Massen  $m(K^0) = m(\bar{K}^0)$

### 3 Baryonenzahl B- verletzende Prozesse

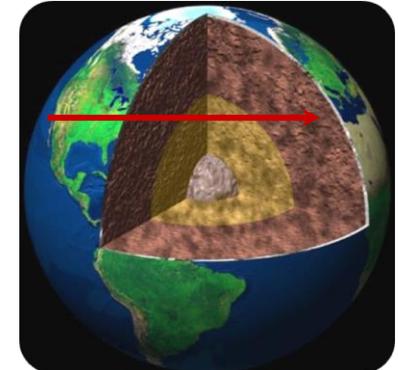
Verletzung von B, L ist möglich in GUTs, aber  $(B - L)$  bleibt dabei erhalten!

↳ **Leptogenese**? (L-verletzender Zerfall von schweren Majorana- $\nu$ 's)

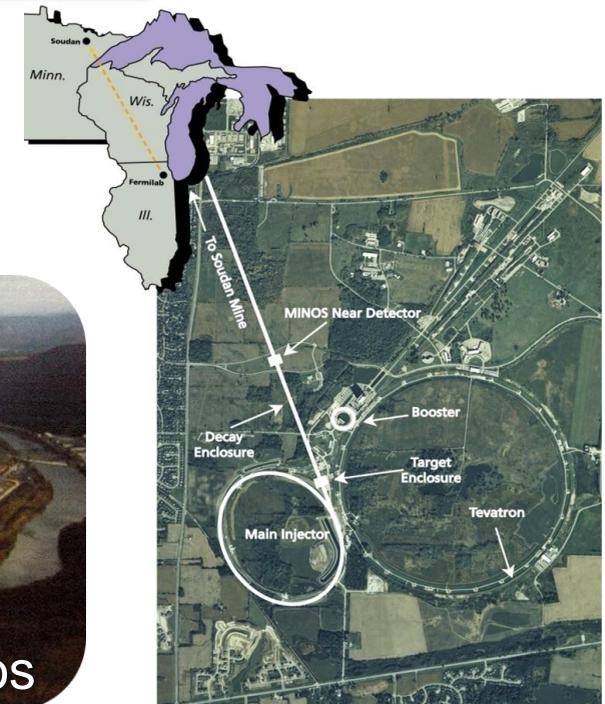
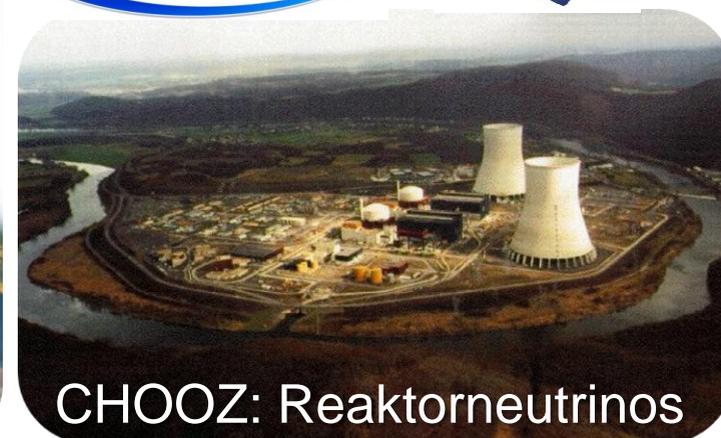
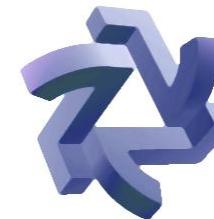
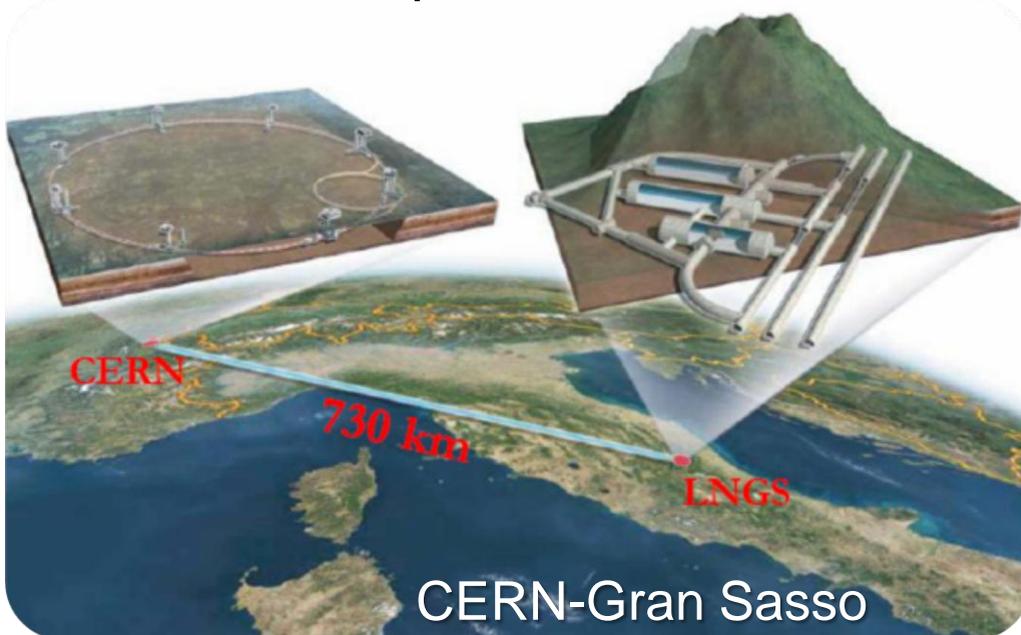
# 10.2 Neutrinoquellen und -strahlen

- Untersuchung der  **$\nu$ -Eigenschaften** (Mischung,  $\not{C}P$ ) mit intensiven  $\nu$ -Quellen: genau bekannte  $\nu$ -Energien & Flavour-Zusammensetzungen erforderlich

Terrestrische $\nu$ -Quellen	$\nu$ -Energien
Kernreaktoren ( $\beta$ -Zerfall von Spaltprodukten)	1 – 5 MeV
Spallationsquellen ( $\pi^+$ - $\mu^+$ Zerfallskette in Ruhe)	bis 50 MeV
Beschleuniger ( $\pi^+$ -Zerfall im Fluge)	bis 200 GeV

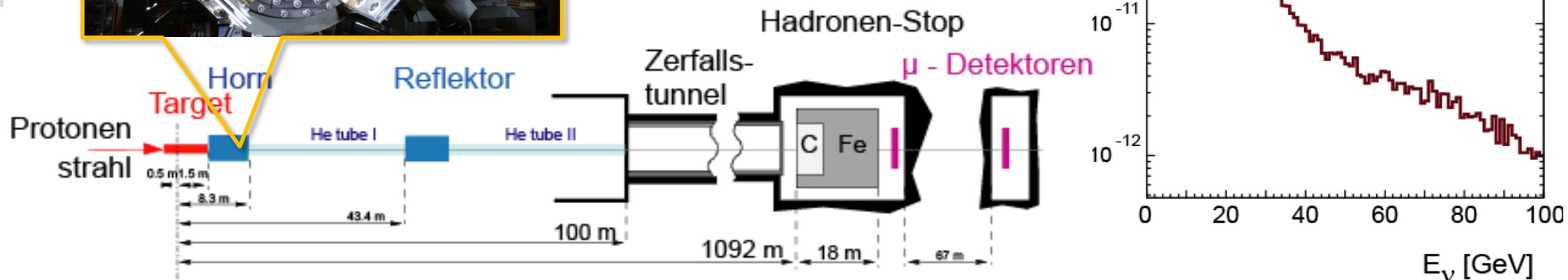


+ neue Konzepte für  $\nu$ -Strahlen: „ $\beta$ -beams“



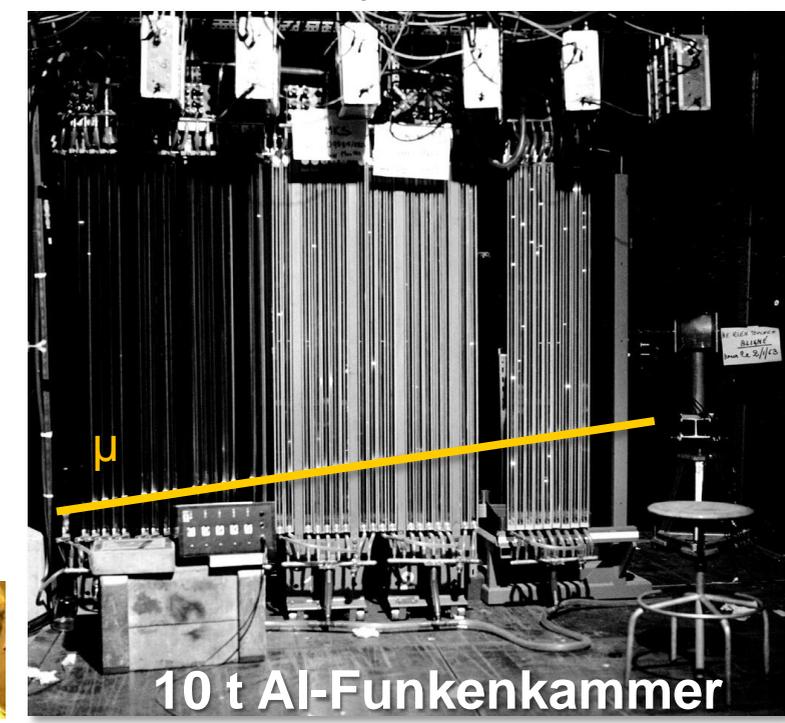
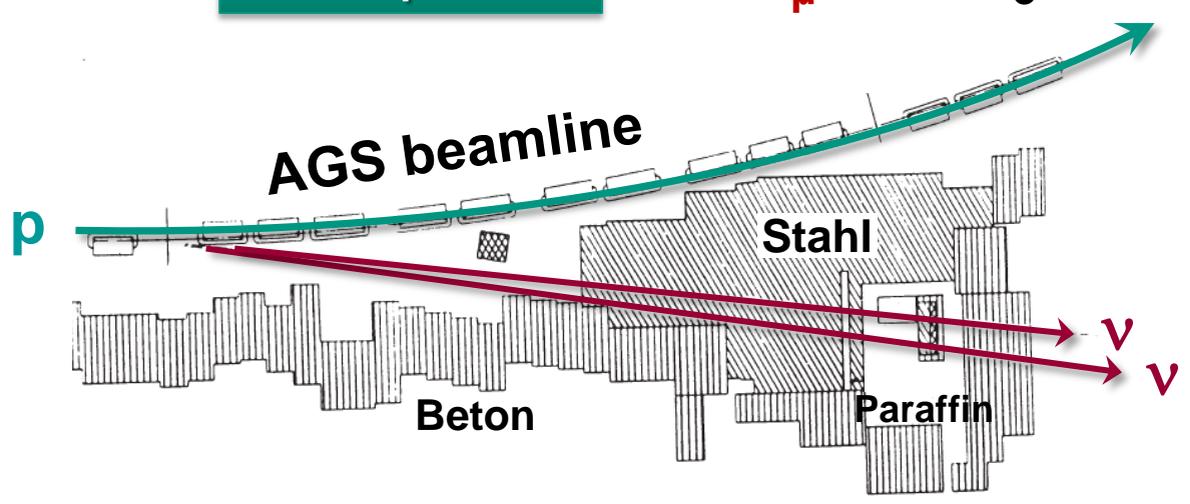
# Beschleuniger-Neutrinoexperimente

- Erzeugung **hochenergetischer Neutrinostrahlen** am Beispiel des CNGS:  
400 GeV Protonen aus dem SPS treffen auf leichtes Be-Target:
  1. **Target**: Erzeugung von Pionen ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ) & Kaonen ( $K^\pm$ ,  $K^0$ ,  $\bar{K}^0$ )
  2. **magnetisches Horn**: Fokussierung & Ladungsselektion der Mesonen
  3. **Zerfallstunnel**: Pionzerfall  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  in einem evakuiertem Tunnel
  4. **Abschirmung**: Absorption von Myonen und Hadronen, Instrumentierung



# AGS-Experiment – das zweite Neutrino $\nu_\mu$

- 1962: L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger: erster experim. Nachweis, dass  $\nu_\mu \neq \nu_e$  (Identität der Neutrinos aus dem Pionzerfall)



## Versuchsanordnung am BNL

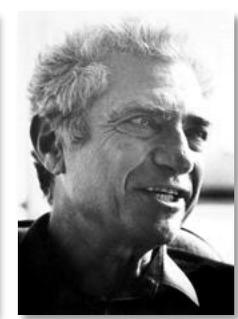
**experimentelle Resultate**  
 34 Ereignisse:  
 29 Myonen (d.h.  $\nu_\mu$  - CC)  
 5 kosm. Strahlung

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

Nobelpreis 1988



Leon M. Lederman



Jack Steinberger



Melvin Schwartz

OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS\*

G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz,† and J. Steinberger†

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York  
 (Received June 15, 1962)

In the course of an experiment at the Brookhaven AGS, we have observed the interaction of high-energy neutrinos with matter. These neutrinos were produced primarily as the result of the decay of the pion:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + (\nu/\bar{\nu}). \quad (1)$$

It is the purpose of this Letter to report some of the results of this experiment including (1) demonstration that the neutrinos we have used produce  $\mu$  mesons but do not produce electrons, and hence are very likely different from the neutrinos involved in  $\beta$  decay and (2) approximate cross sections.

Behavior of cross section as a function of energy. The Fermi theory of weak interactions which works well at low energies implies a cross section for weak interactions which increases as phase space. Calculation indicates that weak interacting cross sections should be in the neigh-

# DONUT-Experiment – das dritte Neutrino $\nu_\tau$

- 2000 : erster experimenteller Nachweis des  $\nu_\tau$  durch das DONUT Experiment (Direct Observation of **NU** Tau) am Fermilab (Chicago)

Experiment: 800 GeV Protonen treffen auf ein Wolfram-Target

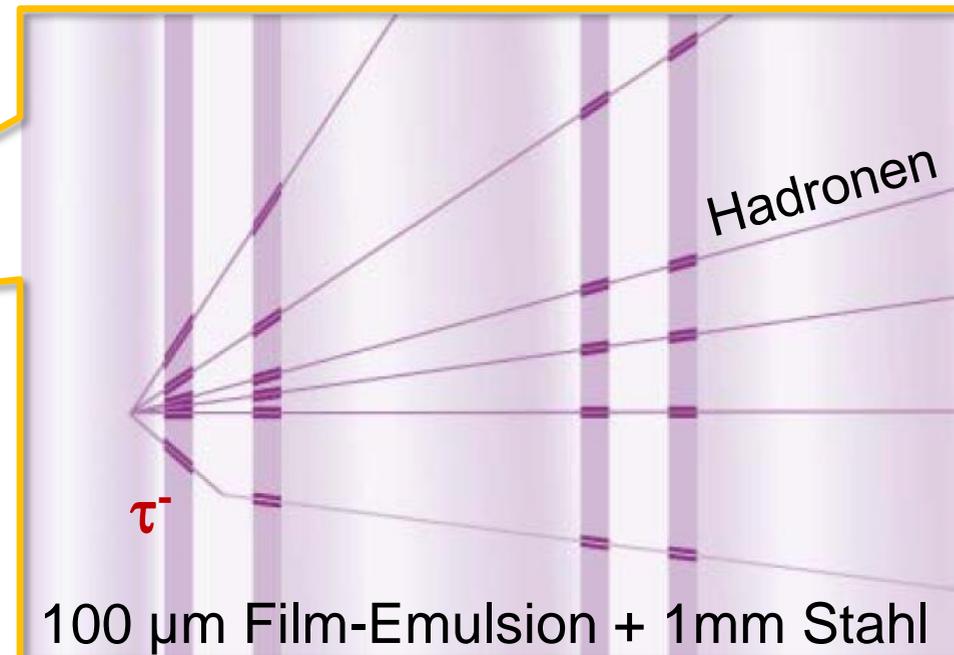
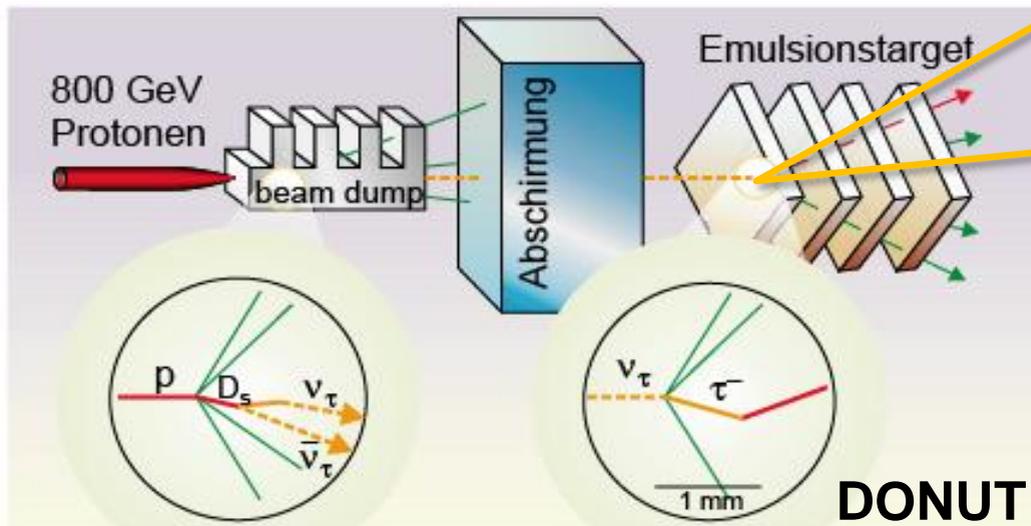
↳  $D_s$ -Mesonen ( $c\bar{s}$ ) Zerfall ↳  $\nu_\tau$  mit  $E_\nu = 50$  GeV

↳ Suche nach **CC- $\nu_\tau$ -Wechselwirkungen** an Stahlplatten

Resultate: **4 Ereignisse** mit der Topologie eines  $\nu_\tau$  identifiziert:  **$\tau$ -kink**

$\tau$ -Lebensdauer:  $\tau = 3 \times 10^{-13}$  s, Reichweite  $c\tau =$  einige mm

## DONUT Experiment am Fermilab

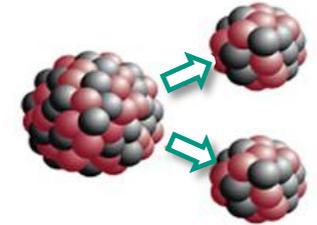


# Reaktor-Neutrinos

- Kernreaktoren = stärkste terrestrische  $\nu$ -Quellen (isotroper Fluss  $\Phi_\nu \sim 1/r^2$ )

## Neutrinos aus $\beta$ -Zerfällen neutronen-reicher Spaltprodukte

- Spaltisotope aus Kernspaltung von  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$
- ca.  $6 \bar{\nu}_e$  pro Spaltung mit  $\langle E_\nu \rangle \sim 1 \text{ MeV}$



Isotop	Energie [MeV]
$^{235}\text{U}$	$201.7 \pm 0.6$
$^{238}\text{U}$	$205.0 \pm 0.9$
$^{239}\text{Pu}$	$210.0 \pm 0.9$
$^{241}\text{Pu}$	$212.4 \pm 1.0$

- pro Spaltung werden  $\sim 200 \text{ MeV}$  Energie freigesetzt
- $\nu$ -Rate  $R_\nu$  aus einem  $P_{\text{therm}} = 8.4 \text{ GW}$  Reaktor:

$$R_\nu = \frac{6 \cdot P_{th}}{204 \text{ MeV}} = \frac{6 \times 8.4 \cdot 10^9 \times 6.24 \cdot 10^{12}}{204} \bar{\nu}_e / s = 1.5 \cdot 10^{21} \bar{\nu}_e / s$$

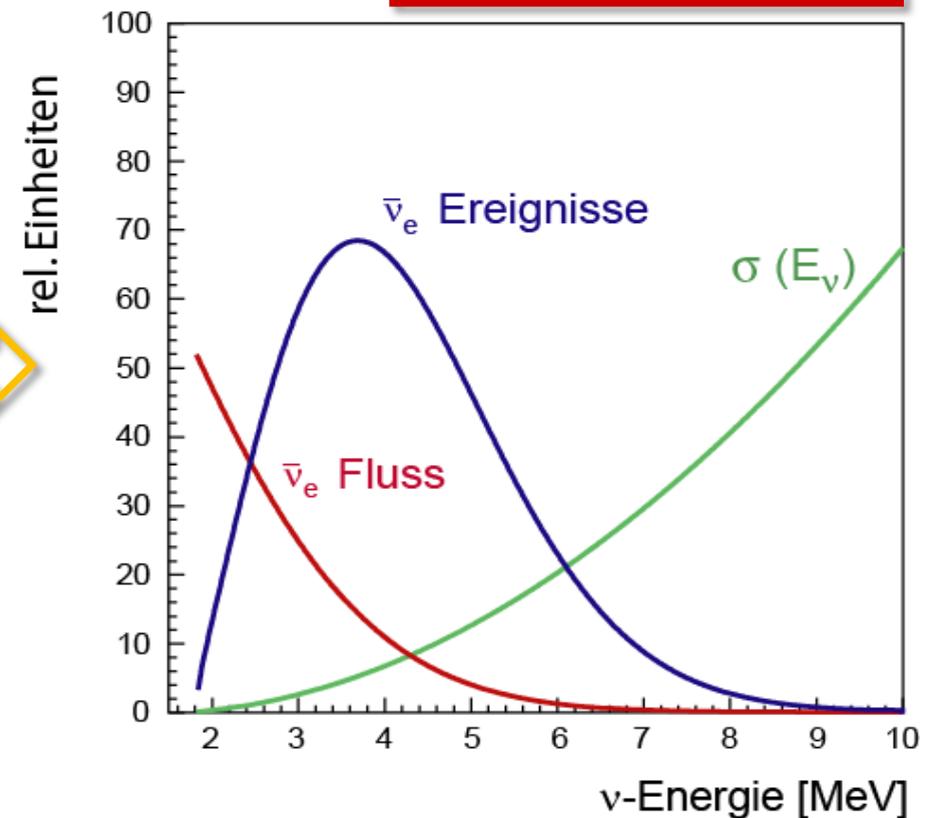
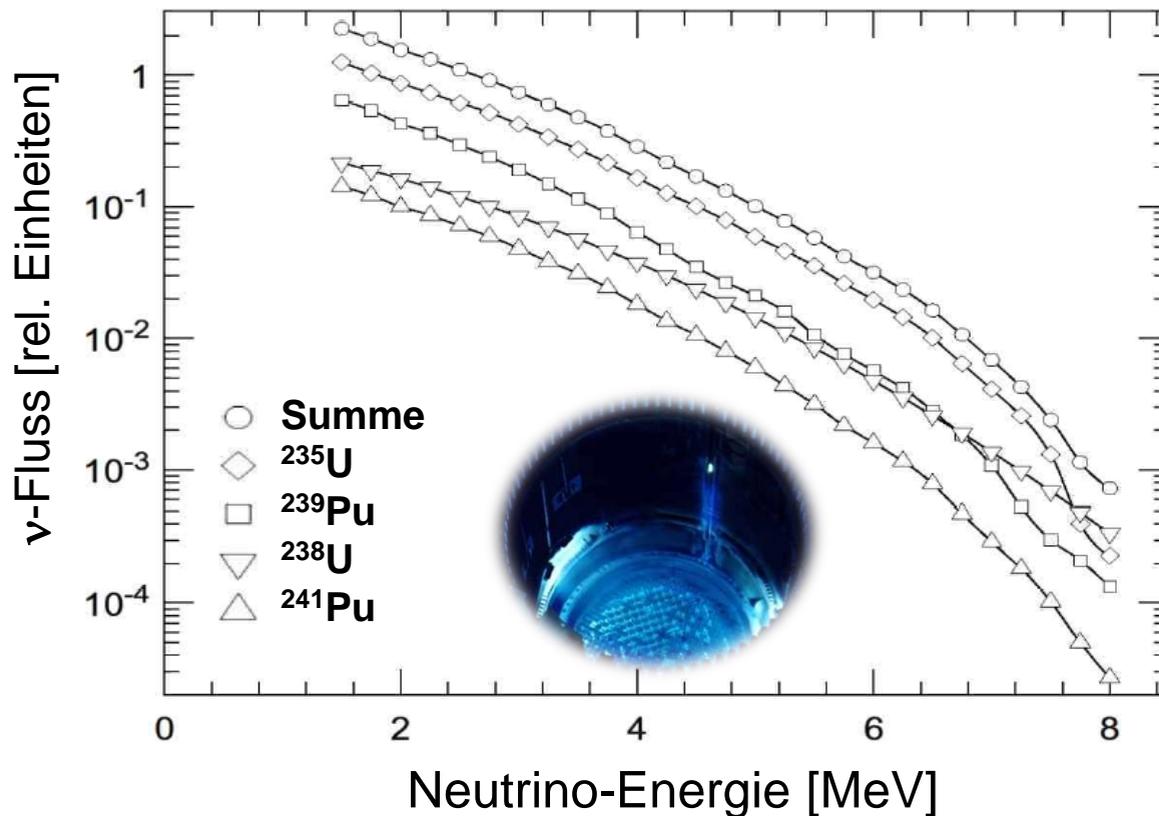
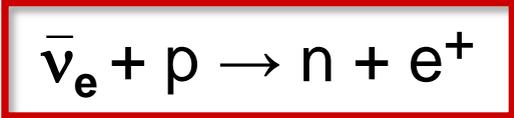
$$1 \text{ MeV} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ Ws}$$

$$1 \text{ W} = 6.24 \cdot 10^{12} \text{ MeV/s}$$



# Reaktor-Neutrinos: Energiespektren

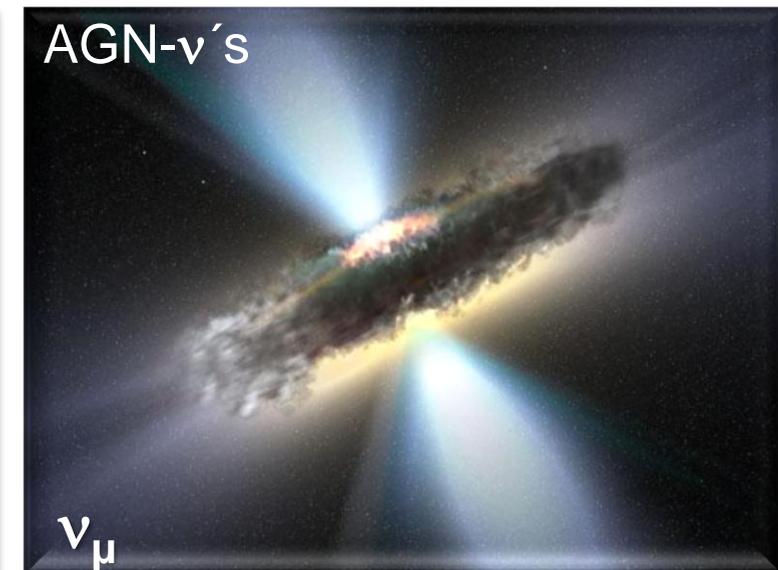
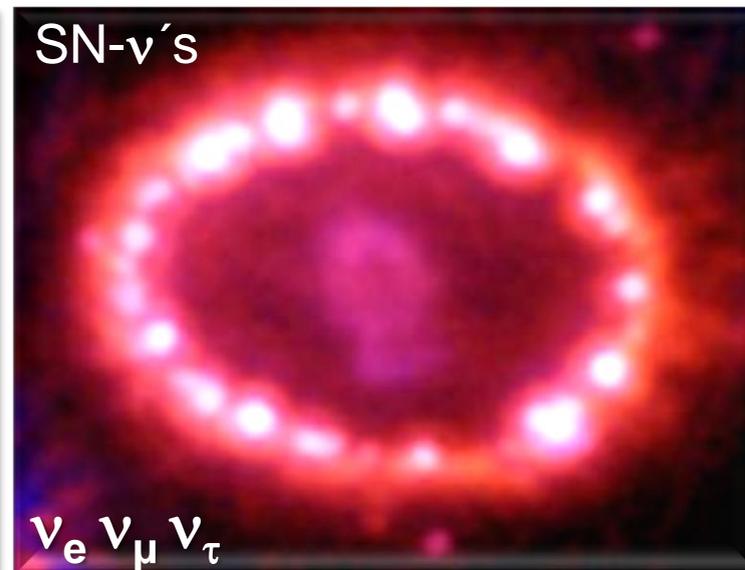
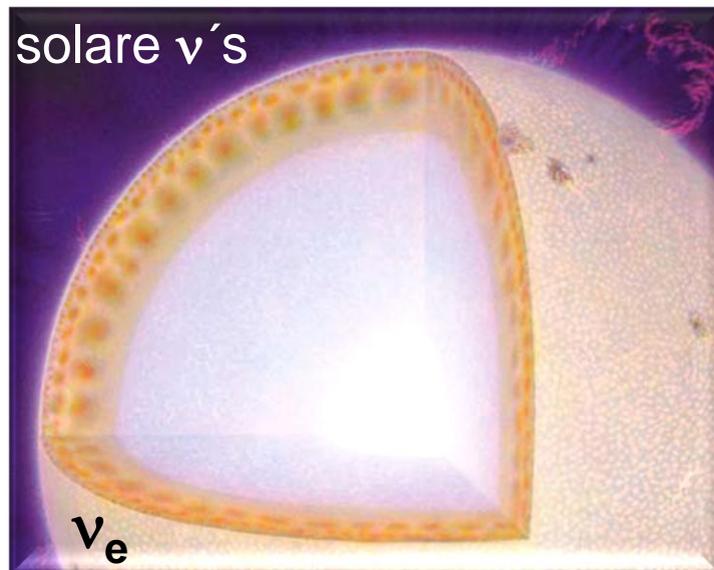
- theoretisch **berechnete  $\nu$ -Energiespektren** für unterschiedliche Spaltprodukte
  - gewichtet mit der Häufigkeit im Reaktorkern (  $\hookrightarrow$  zeitabhängige Anteile ! )
  - Normierung auf gemessene thermische Reaktor-Leistung  $P_{th}$
- nachgewiesene Antineutrinos: **Faltung mit energieabhängigem Wq.**
  - Anwachsen mit der Energie:  $\sigma(E_\nu) \sim (E_\nu - Q)^2$



# Neutrinoquellen – astrophysikalisch

- Erzeugung von astrophysikal. Neutrinos mit Energien von  $10^{-6}$  eV bis  $10^{20}$  eV

astrophysikalische $\nu$ -Quellen	Energien	Erzeugungs-Reaktionen
Urknall (thermisch, $T_\nu = 1.9$ K)	einige $\mu\text{eV}$	$e^+ + e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$
Sonne (Kernfusion, pp, ${}^7\text{Be}$ , ${}^8\text{B}$ )	$< 15$ MeV	$4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e$
Supernova (thermisch, Protoneutronstern)	$< 50$ MeV	$e^+ + e^- \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau} + \bar{\nu}_{e,\mu,\tau}$
Atmosphäre (kosmische Strahlung)	$< 10^4$ GeV	$\pi^\pm \rightarrow \overset{(-)}{\nu}_\mu + \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \overset{(-)}{\nu}_\mu + \overset{(-)}{\nu}_e$
kosmische Beschleuniger ( $\mu$ -Quasare, AGN)	$< 10^{10}$ GeV	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \overset{(-)}{\nu}_\mu$

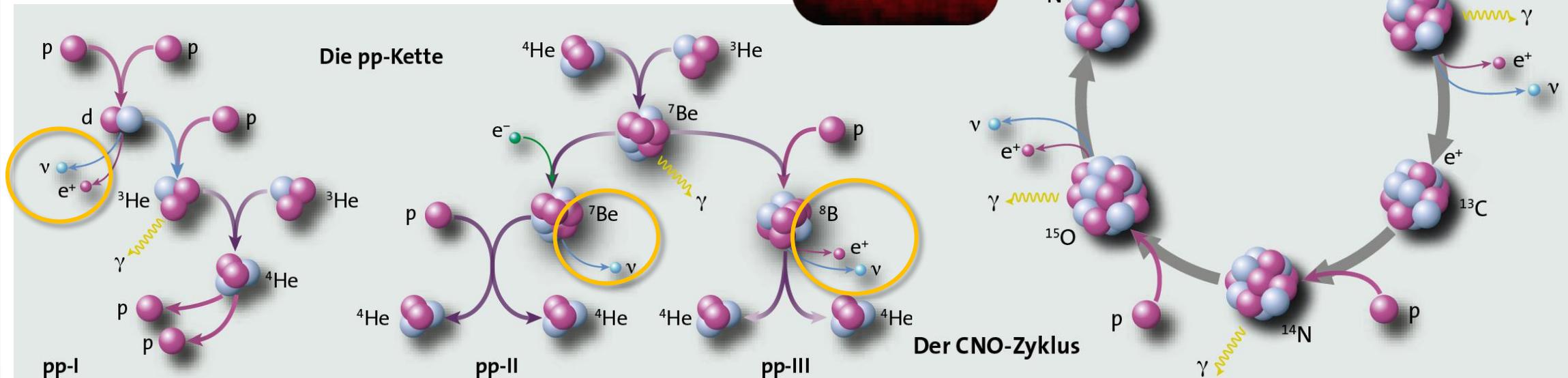
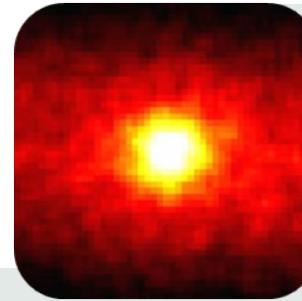


# Sonnenneutrinos

- **solare Neutrinos:**  $E_\nu < 10 \text{ MeV}$  (pp,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^8\text{B}$ , hep),  $L_\nu \sim 150 \text{ Mio km}$   
aus den pp-Fusionsreaktionsketten:  $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e$
- Standardsonnenmodell SSM (basierend auf solaren Parameter)

integraler Sonnen- $\nu$ -Fluss:  $\Phi_\nu = 6.6 \times 10^{10} / \text{cm}^2 \text{ s}$

pp – Kette ist dominant  
CNO – Kette ist sub-dominant

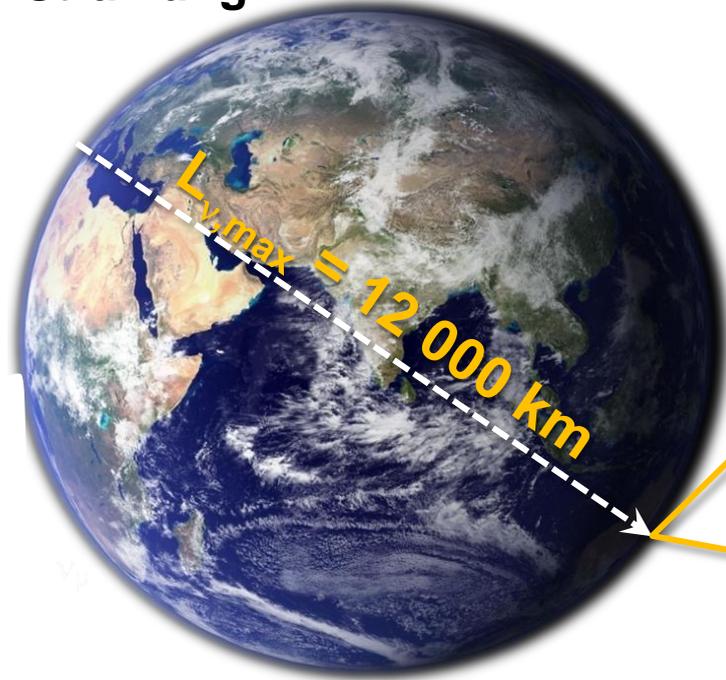
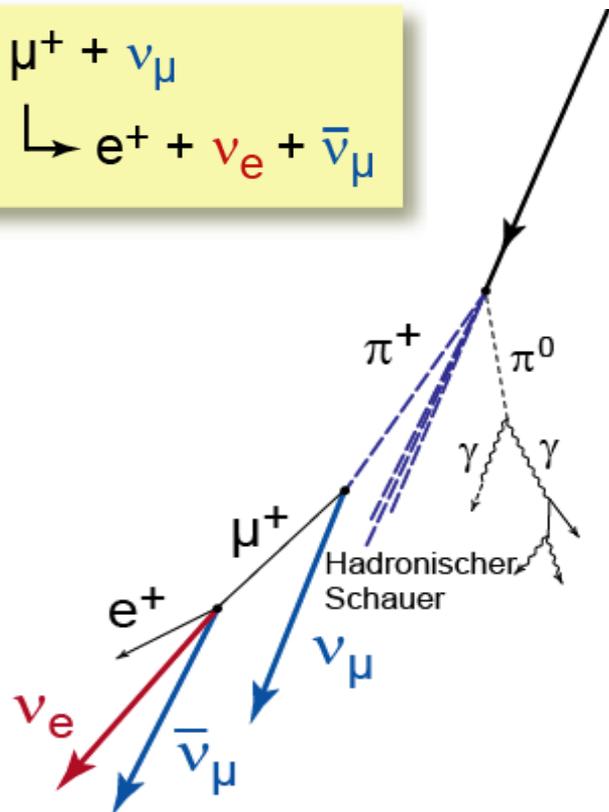
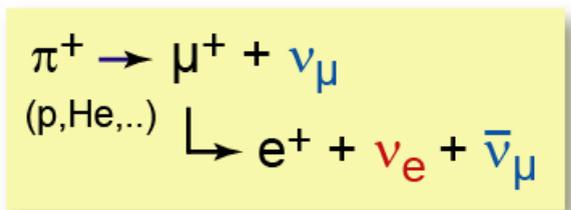


# Atmosphärische Neutrinos

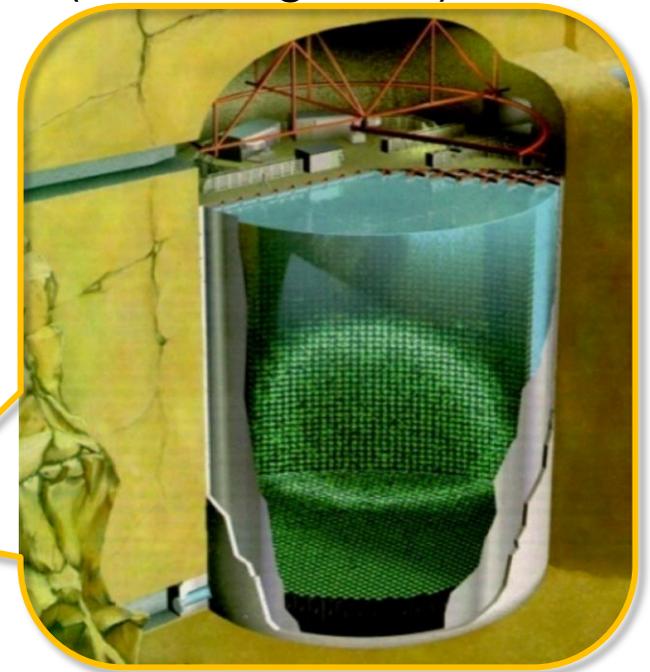
- Erzeugung durch kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre (h ~ 20 km)  
 Wechselwirkungen mit  $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{N}$  Kernen:  $\rightarrow$  Pionen ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ) Kaonen  
 Zerfallskette der Pionen/Kaonen  $\rightarrow$  atmosphärische  $\nu$ 's im **GeV-Bereich**

**Energien:**  $\Phi_{\text{max}}$  bei  $E_\nu = 0.25 \text{ GeV}$ , dann  $\Phi_\nu \sim E^{-2.7}$  bei hohen Energien

**Fluss:**  $\Phi_\nu \sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  auf Meereshöhe



multi-kt-Detektoren  
 (~ 1 Ereignis/kt)

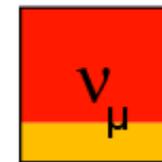
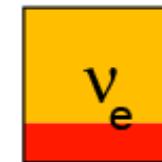
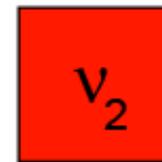
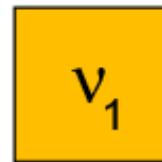


# 10.3 Neutrino-Oszillationen

- Neutrino-Oszillationen basieren auf einem **quantenmechanischen Interferenzphänomen**

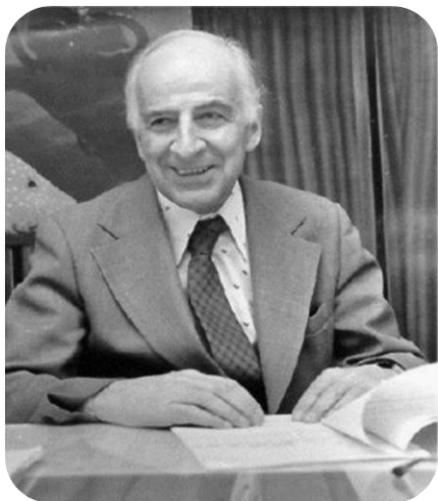
Nichtidentität von **Masseneigenzustände**  $\neq$  **schwache Wechselwirkung**

mit  $m_1, m_2$

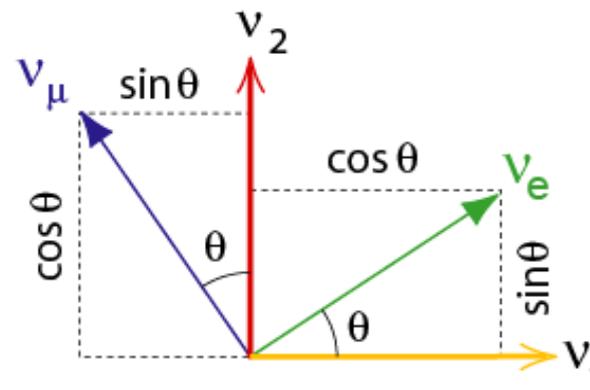


## 2-Flavour- $\nu$ -Mischung:

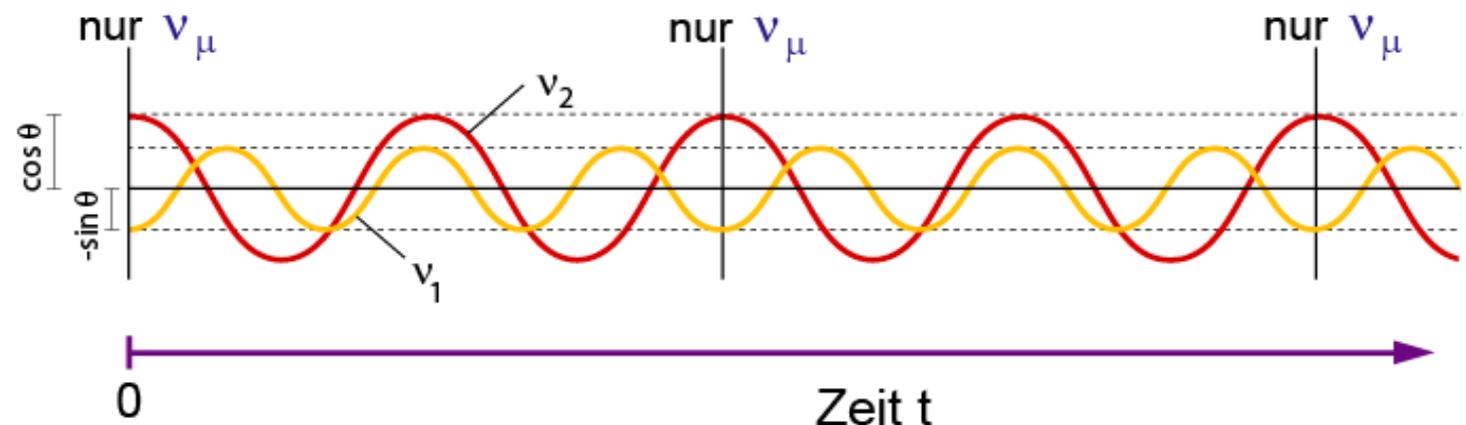
- enge Analogie zur CKM Mischung der linkshändigen Quarks



Bruno Pontecorvo: erstes Konzept  $\nu-\bar{\nu}$  Oszillationen



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



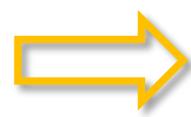
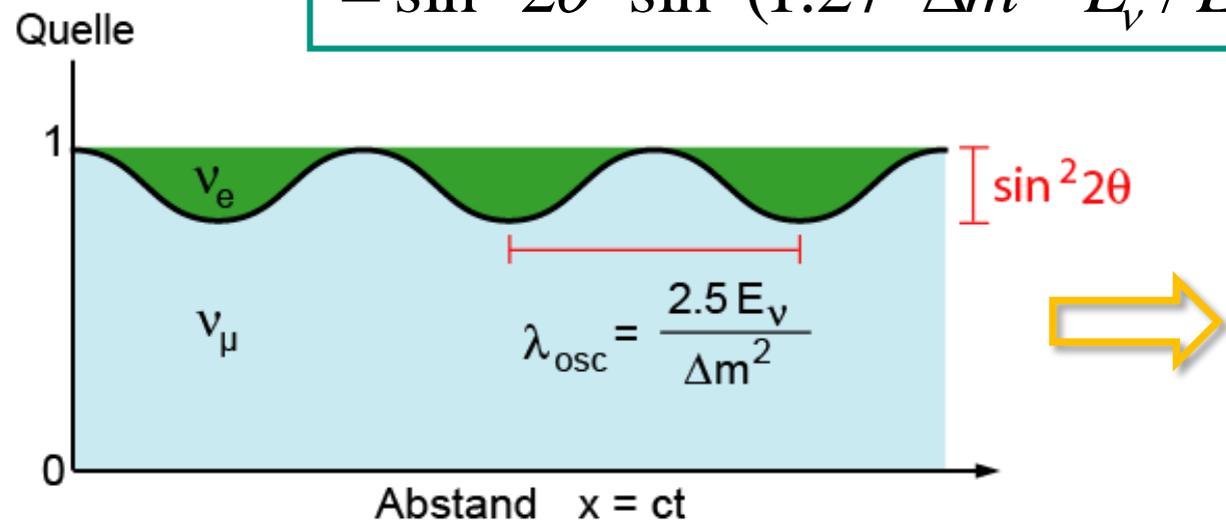
# Neutrino-Oszillationen – Formalismus

- Wahrscheinlichkeit  $P$  für die **Oszillation eines  $\nu_\mu$  in ein  $\nu_e$**  nach Zeit  $t$ :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\cos \theta \cdot \sin \theta \cdot (1 - e^{i\Delta m^2 t / 2E_\nu})|^2 \quad \text{mit } P = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

$$= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 (\Delta m^2 L_\nu / 4E_\nu) \quad \text{mit Massensplitting } \Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$$

$$= \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 (1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot L_\nu / E_\nu) \quad \begin{array}{l} L_\nu \text{ in Einheiten m bzw. km} \\ E_\nu \text{ in Einheiten MeV bzw. GeV} \end{array}$$



- periodisches Auftauchen eines **neuen** Neutrino-Flavourzustands
- periodische Ab- bzw. Zunahme des **ursprünglichen** Neutrino-Flavourzustandes
- Oszillationslänge  $\lambda \sim \nu$ -Energie!**  
 $\lambda_{osc} \sim 2.5 E_\nu / \Delta m^2$

Wahrscheinlichkeit, daß  $\nu_\mu$  in  $\nu_e$  umgewandelt ist.

Wahrscheinlichkeit, daß  $\nu_\mu$  noch  $\nu_\mu$  ist.

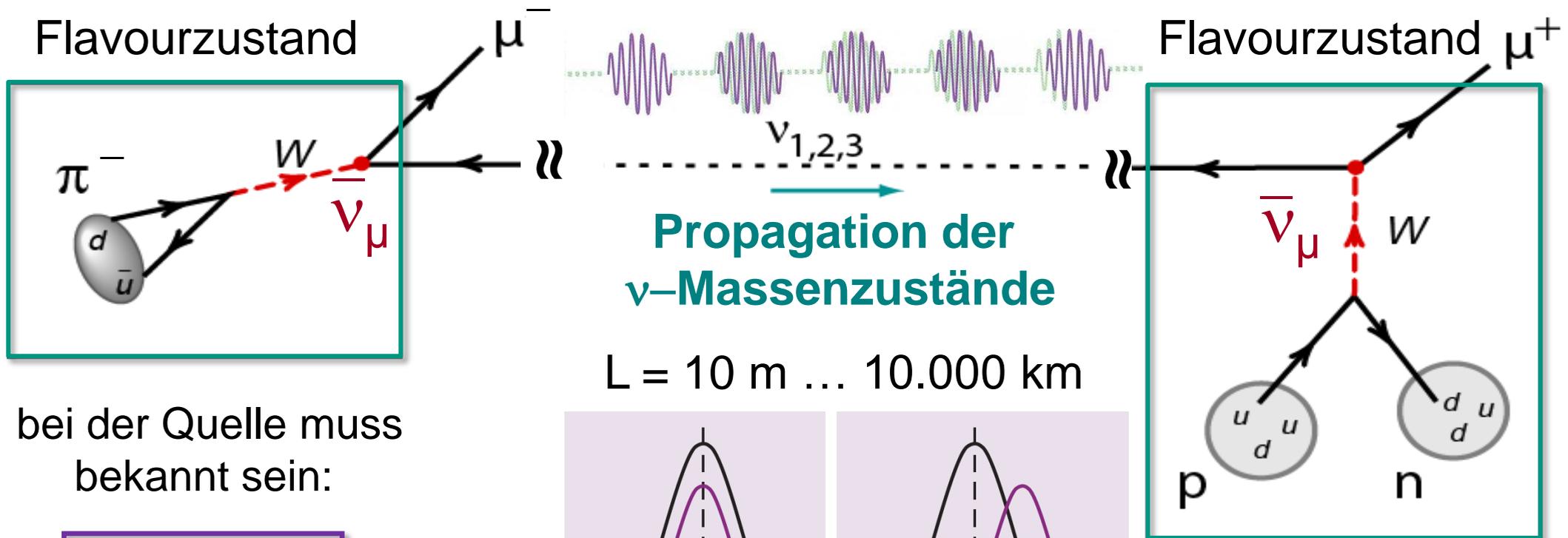
# Neutrino-Oszillationen – Konzept

- Neutrino-Oszillationen entstehen bei der **Propagation der Massenzustände**

**$\nu$ -Quelle**

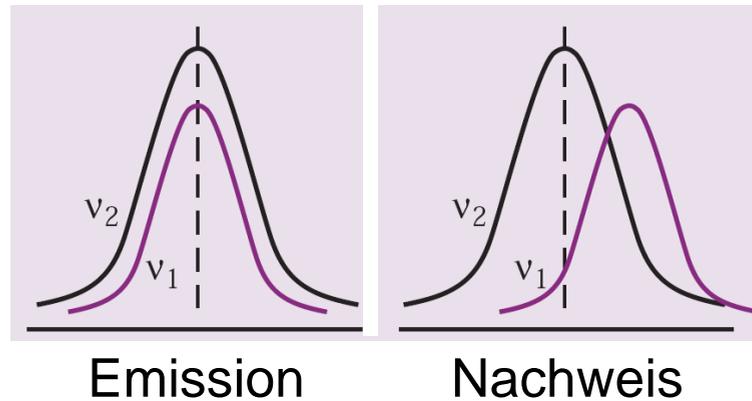
**$\nu$ -Oszillationen**

**$\nu$ -Nachweis**



bei der Quelle muss bekannt sein:

- $\nu$ -Energien
- $\nu$ -Flüsse
- $\nu$ -Arten



- $\nu$ -Nachweiseffizienz
- $\nu$ -Energieauflösung

# Appearance & disappearance Kanal

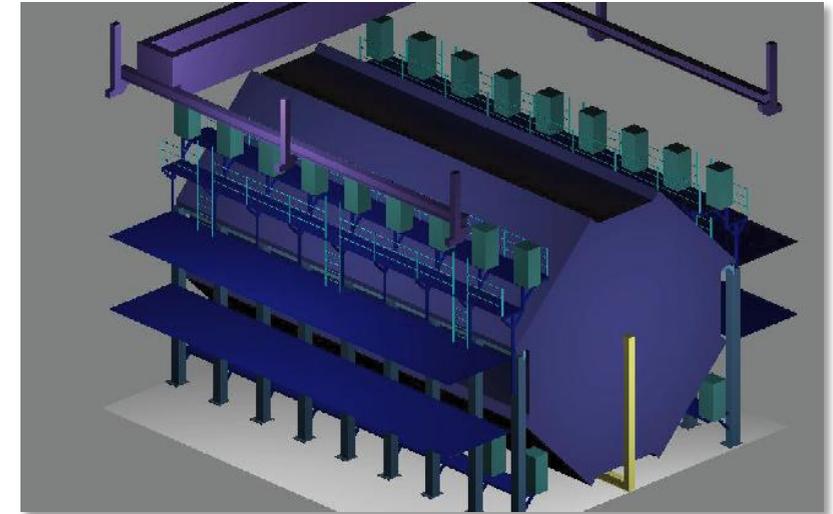
disappearance Kanal  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  disappearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

**Statistik:** große Ereignisanzahl ( $N > 10^4$ )

**Systematik:**  $\nu$ -Fluss &  $\nu$ -Energien ?

ideal, falls **große** Mischungsamplitude



Beispiel: NuMI Strahl - MINOS

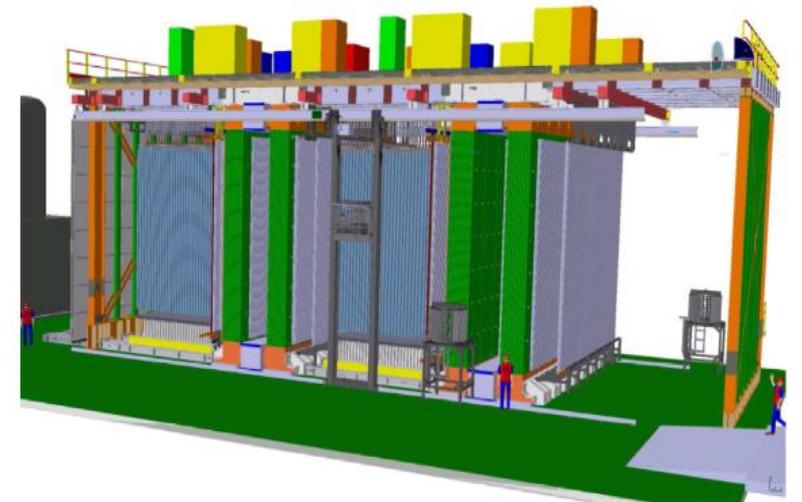
appearance Kanal  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

**Statistik:** sehr kleine Ereigniszahl ( $N < 100$ )

**Systematik:**  $\nu$ -Flavoursorten?

ideal, falls **kleine** Mischungsamplitude



Beispiel: CNGS Strahl - OPERA

# Appearance & disappearance Kanal

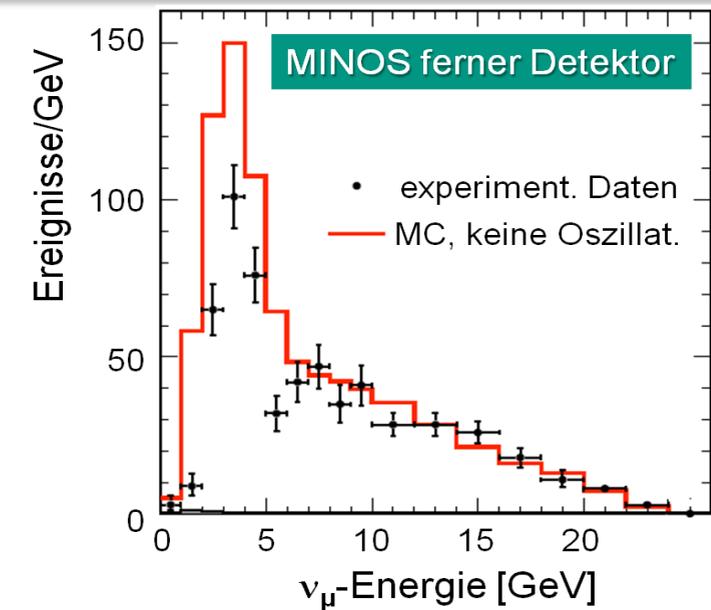
disappearance Kanal  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$  disappearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

**Statistik:** große Ereignisanzahl ( $N > 10^4$ )

**Systematik:**  $\nu$ -Fluss &  $\nu$ -Energien ?

ideal, falls **große** Mischungsamplitude



appearance Kanal  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  appearance

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left( 1.27 \cdot \Delta m^2 \cdot \frac{L_\nu}{E_\nu} \right)$$

**Statistik:** sehr kleine Ereigniszahl ( $N < 100$ )

**Systematik:**  $\nu$ -Flavoursorten?

ideal, falls **kleine** Mischungsamplitude



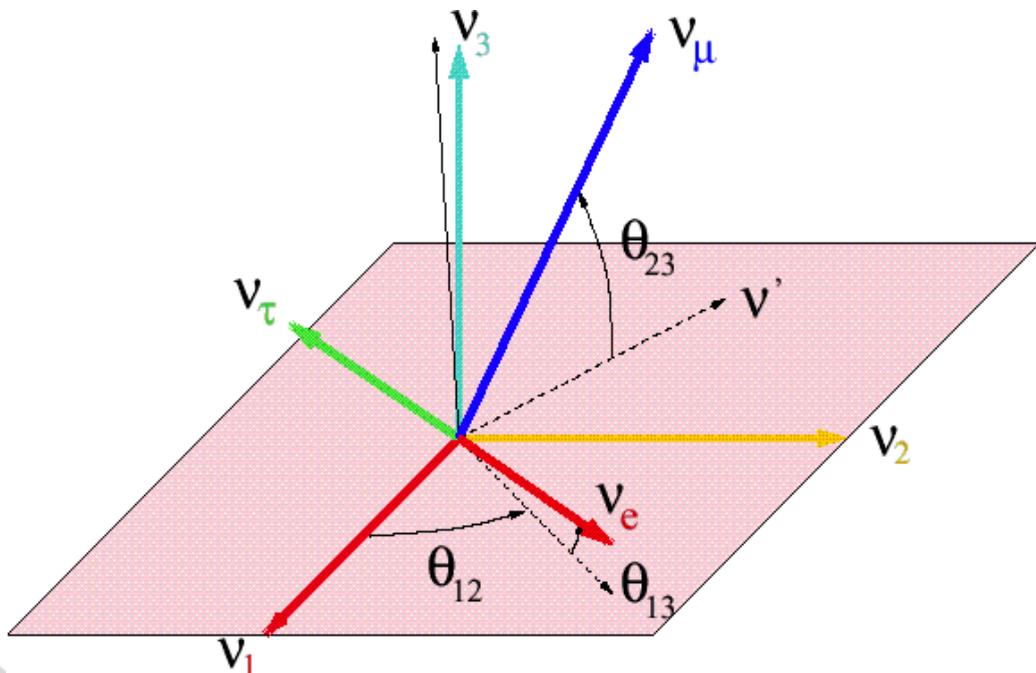
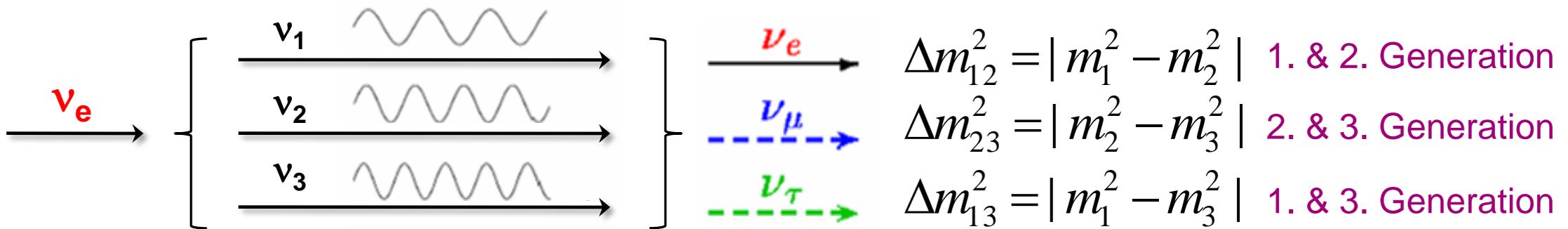
# 3-Flavour Mischung

■ Erweiterung der 2-Flavour-Oszillationen auf **3 Flavour-Oszillationen**:

- drei Mischungswinkel:  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$

- zwei unabhängige  $\Delta m^2$  Skalen mit Relation:

$$\Delta m_{13}^2 = \Delta m_{12}^2 + \Delta m_{23}^2$$



leptonische Mischungsmatrix:  
**P**ontecorvo-**M**aki-**N**akagawa-**S**akata

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

U = unitäre 3 × 3 Mischungsmatrix

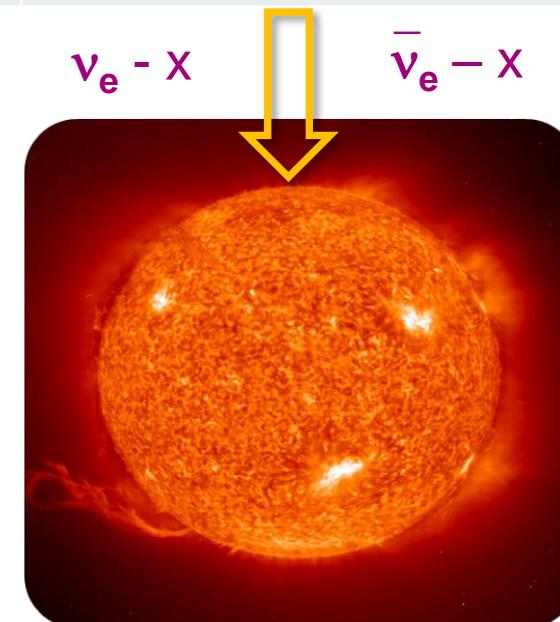
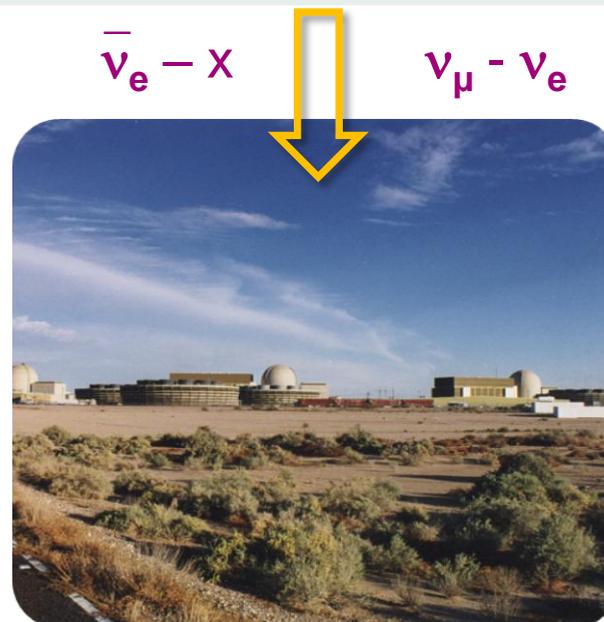
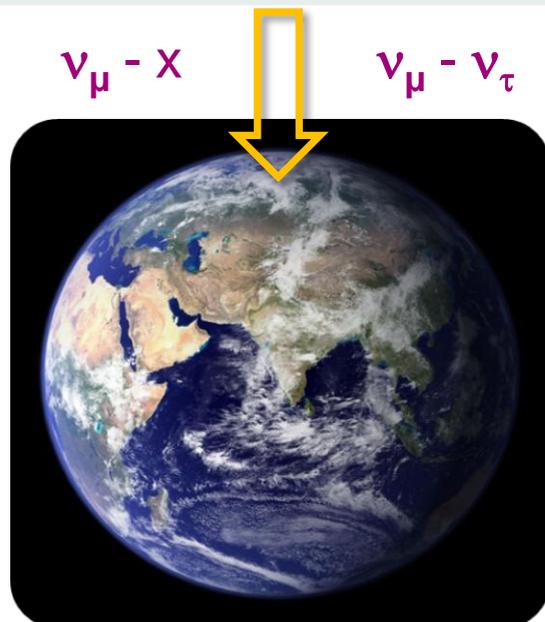
# 3-Flavour Mischung

- 3 Flavour-Mischung 'entkoppelt' in drei separate Mischungs-Terme:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\delta$ : CP-Phase

2. & 3. Generation	1. & 3. Generation	1. & 2. Generation
atmosphärische $\nu$ 's	Reaktorexperimente	solare Neutrinos
long baseline Beschleuniger	long baseline Beschleuniger	Reaktorexperimente



# 3-Flavour Mischung

- 3 Flavour-Mischung 'entkoppelt' in drei separate Mischungs-Terme:

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\delta$ : CP-Phase

2. & 3. Generation	1. & 3. Generation	1. & 2. Generation
$\Delta m_{23}^2 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\Delta m_{13}^2 = 2.3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	$\Delta m_{12}^2 = 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$\theta_{23} = (45 \pm 4)^\circ$ (maximal)	$\theta_{13} < 15^\circ$ (sehr klein)	$\theta_{12} = (33.7 \pm 1.3)^\circ$ (groß)

