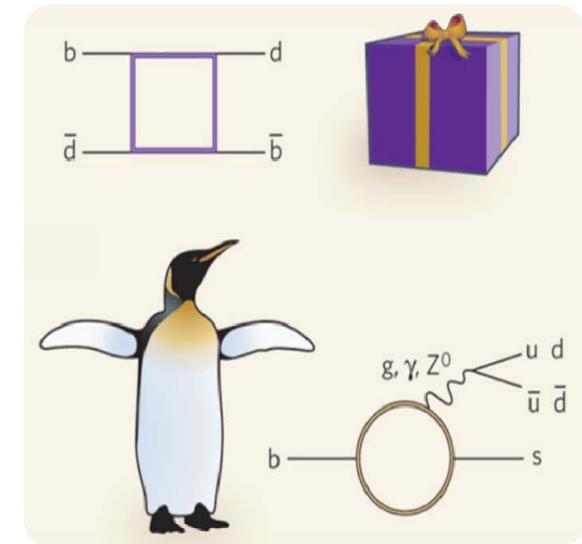


# Kerne und Teilchen

## Moderne Physik III

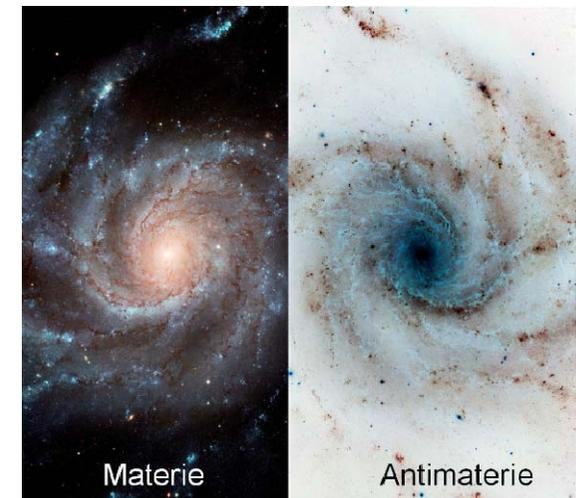
### Vorlesung # 21



## 8. Moderne Elementarteilchen-Physik

### 8.1 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung

- Klassifikation schwacher Prozesse
- Elektroschwache Vereinigung
- Schwache Wechselwirkung von Quarks
- CP-Verletzung
- Neutrino-Physik



### 8.2 Fundamentale Entdeckungen: W/Z-Bosonen, Top-Quarks, Higgs-Bosonen

# Wiederholung: Elektroschwache Vereinigung

Austauschfelder (Eichfelder):

$(W^+, W^0, W^-)$ : Triplet des schwachen Isospins

Koppelt nur an linkshändige Fermionen (rechtsh. Antifermionen)

Kopplungsstärke  $g$

$B^0$ : Singulett des schwachen Isospins

Koppelt an schwache Hyperladung (analog zum Photon  
bzgl. El. Ladung)

Kopplungsstärke  $g'$

Physikalische Austauschbosonen  $\gamma$  und  $Z$  sind Gemische  
von  $W^0$  und  $B^0$ :

$$\begin{pmatrix} |\gamma\rangle \\ |Z^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_w & \sin \theta_w \\ -\sin \theta_w & \cos \theta_w \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |B^0\rangle \\ |W^0\rangle \end{pmatrix}$$

Weinbergwinkel  $\theta_w$ :

$$\begin{aligned} g' &= g \cdot \tan \theta_w \\ e &= g \cdot \sin \theta_w \end{aligned}$$

# CKM-Matrix, GIM Mechanismus

## ■ Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix

- unitäre  $3 \times 3$  Matrix (Universalität des CC)  
i.a. 3 Winkel, 6 Quark-Phasen
- **3 reelle Winkel**  $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$   
beschreiben Quarkmischung
- **1 imaginäre (CP)-Phase**  
beschreibt CP-Verletzung  
(alle weiteren Phasen können  
in Quarkfeldern absorbiert werden)

$$\sum_{k=1}^3 |V_{ik}|^2 = 1$$

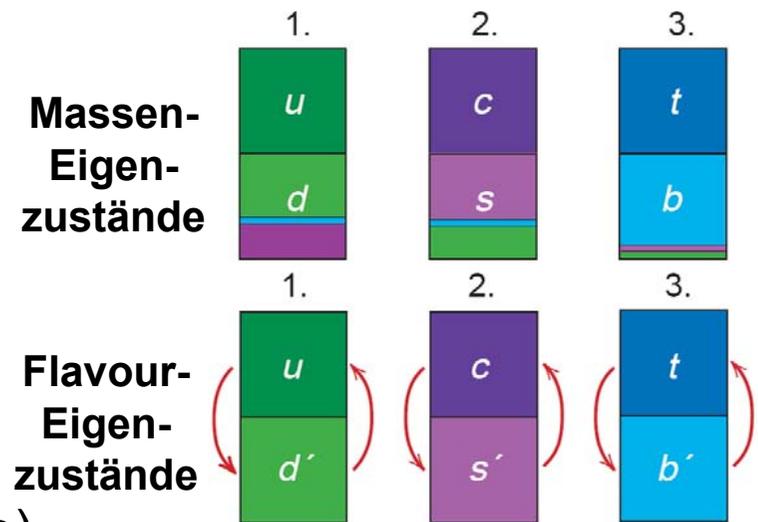
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}_L$$

## ■ CKM-Matrix

- alle nicht-diagonalen Elemente klein
- Drehung  $\theta_{ij}$  der Massen/Flavourzustände

## ■ GIM-Mechanismus

- Einführung schwacher Dubletts  $(u d')_L$   $(c s')_L$   
keine **FCNC** (flavourändernde neutrale Ströme)

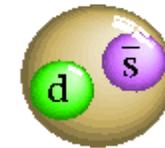


# d) CP-Verletzung in der Schwachen W.W.

- **Kaonen\*** bilden zwei (Starke) Isospin-Doublets:

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

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



Kaon  $K^0$

- **Erzeugung von Kaonen** durch die **starke** Wechselwirkung mit  $\Delta S = 0$

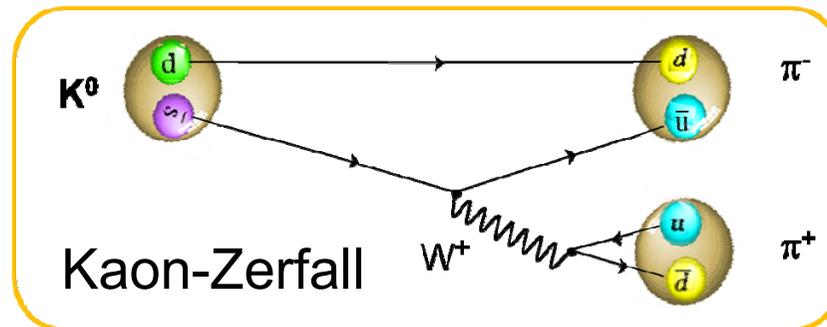
$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$$

paarweise Erzeugung  $\rightarrow d\bar{s} + uds$

**Zerfall von Kaonen** durch die **schwache** Wechselwirkung mit  $\Delta S = \pm 1$

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$\rightarrow 2\pi, \rightarrow 3\pi, \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$



\*Kaonen sind **pseudoskalare Mesonen** mit Strangeness;  $M(K^+, K^-) = 493.7 \text{ MeV}$ ,  $M(K^0, \bar{K}^0) = 497.6 \text{ MeV}$

# Zustände $K_1$ und $K_2$

- **Interne Parität  $P$**  von neutralen Kaonen  $P = -(-1)^\ell$ , mit  $\ell = 0$ :

$$P|K^0\rangle = -|K^0\rangle \quad P|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

- **Ladungskonjugation  $C$**  von neutralen Kaonen:

$$C|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \quad C|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle \quad \text{Vorzeichen Konvention}$$

- **CP-Eigenschaften** von neutralen Kaonen:

$$CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle \quad CP|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle \quad K^0, \bar{K}^0 \text{ keine CP-Eigenzustände}$$

- **Linearkombinationen  $K_1, K_2$**  von neutralen Kaonen:

$$|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle \right) \quad |K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right)$$

■  $K_1, K_2$  als CP-Eigenzustände:

$$CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle$$

$$CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

$K^0$  und  $\bar{K}^0$  Mesonen sind damit orthogonale Superpositionen von  $K_1, K_2$ :

$$|K^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_1\rangle + |K_2\rangle)$$

$$|\bar{K}^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_1\rangle - |K_2\rangle)$$

■ Kaon-Oszillationen:

- **Starke Wechselwirkung:**

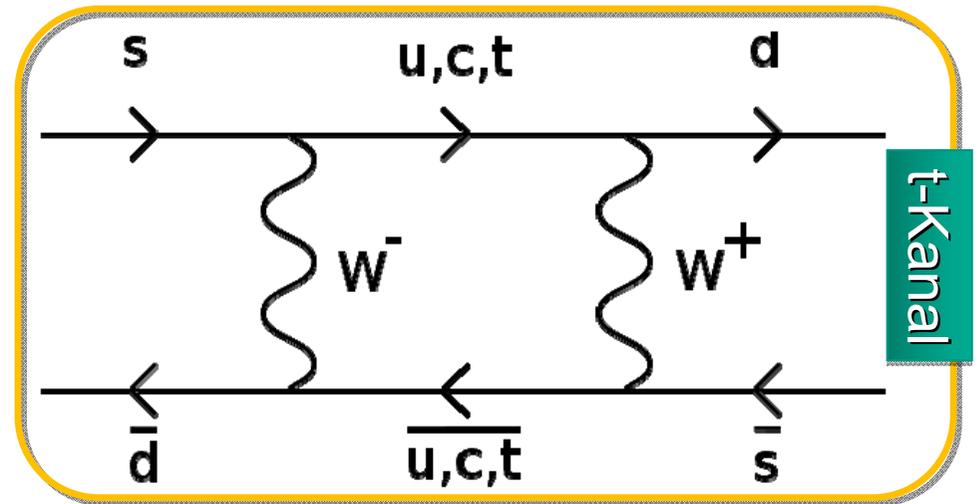
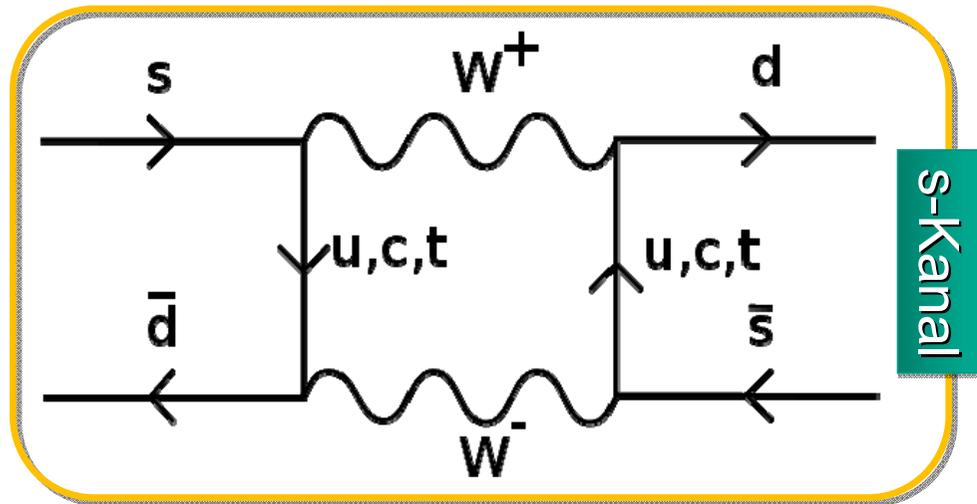
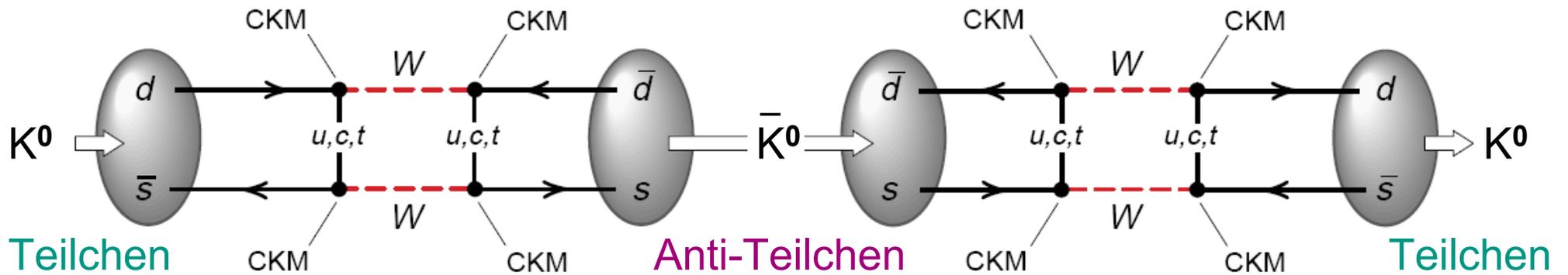
erzeugt  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  mit definierter Masse  
CPT-Theorem:  $m(K^0) = m(\bar{K}^0)$

- **Schwache Wechselwirkung:**

**Übergänge  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$**   
**Mischung der beiden neutralen Kaonen**  
**Entstehung der Zustände  $K_1$  und  $K_2$  mit unterschiedlichen Massen, Lebensdauern**

# Kaon-Oszillationen

- **Schwache Wechselwirkung:** in 2. Ordnung führen die beiden 'Boxdiagramme' zu **Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen** bei Kaonen mit  $\Delta S = 2$  (L. Wolfenstein: alle CP-verletzenden Prozesse involvieren  $\Delta S = 2$ )



# Kaon-Zerfälle

## ■ Zerfälle von $K_1$ und $K_2$ in Pionen

die Zustände  $K_1$  und  $K_2$  haben **unterschiedliche**:

- **Massen** ( $K^0$ - $\bar{K}^0$  Oszillationen heben die Massen-Entartung auf)
- **CP-Eigenwerte** (+1, -1) & damit Zerfallsmoden in Pionen ( $2\pi$ ,  $3\pi$ )
- **Lebensdauern** mit  $\tau(K_1) \ll \tau(K_2)$

## ■ CP Zustände von zwei Pionen

$$P \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle = (-1)^\ell \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle$$

Parität ist multiplikative Größe

$$C \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle = (-1)^{\ell+s} \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle$$

$$CP \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle = +1 \left| \pi^+ \pi^- \right\rangle$$

ebenso

$$CP \left| \pi^0 \pi^0 \right\rangle = +1 \left| \pi^0 \pi^0 \right\rangle$$

## ■ CP Zustände von drei Pionen

$$CP \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle = -1 \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle$$

$$CP \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle = -1^{\ell+1} \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle$$

Grundzustand, daher  $\ell = 0$

# Kaon-Zerfälle: $K_L$ und $K_S$

- bei CP-Erhaltung erwartet man die beiden Zerfallsmoden:



**CP Erhaltung verbietet den Zerfall des  $K_2$  in 2 Pionen**

$K_2$  : durch den kleinen Phasenraum ergibt sich eine **große Lebensdauer**

$$\tau_L = (51.54 \pm 0.44) \text{ ns } (K_L = K_{\text{Long}})$$

$K_1$  : durch den großen Phasenraum ergibt sich eine **kurze Lebensdauer**

$$\tau_S = (89.53 \pm 0.06) \text{ ps } (K_S = K_{\text{Short}})$$

- bei CP-Erhaltung gelten die Relationen

$$K_2 = K_L$$

$$K_1 = K_S$$

die **CP Eigenzustände  $K_1, K_2$**  sind

nur bei vollständiger CP-Erhaltung

identisch mit den **Eigenzuständen**

**$K_S, K_L$  der schwachen Wechselwirkung**

Zerfallsmodus	Branching ratio
$K_1 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	69 %
$K_1 \rightarrow \pi^0 \pi^0$	31 %
$K_2 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$	21 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	13 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ e^- \nu_e$	39 %
$K_2 \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu_\mu$	27 %

# Nachweis der CP-Verletzung

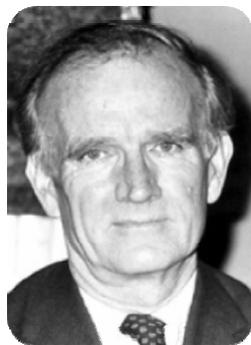
- 1964: am Brookhaven National Laboratory (BNL) weisen Cronin & Fitch **CP-Verletzung** im System der neutralen Kaonen nach
  - **$K^0$  Mesonen Erzeugung**: Beschuss eines Be-Targets mit 30 GeV-Protonen aus dem AGS, **am Experiment ( $d = 20$  m) nur noch  $K_L$**
  - **$\pi^+$  und  $\pi^-$  Impulse**: magnetische Spektrometer mit Funkenkammern
  - Resultat: neben dem dominanten  **$K_L \rightarrow 3\pi$**  Zerfallsmodus beobachtet man eine kleine Rate an  **$K_L \rightarrow 2\pi$**  Ereignissen  **$R = (2.3 \pm 0.4) \times 10^{-3}$**

CP Symmetrie ist verletzt

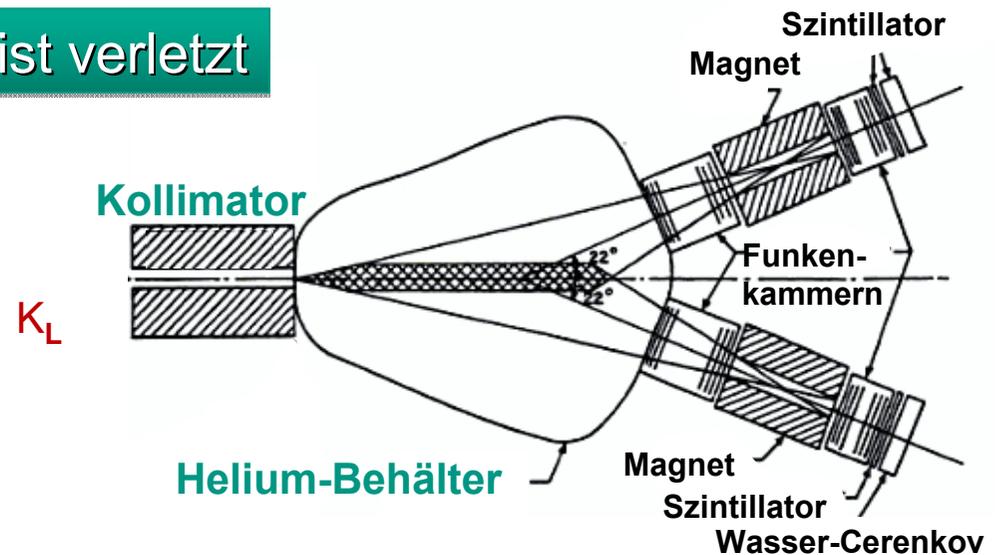
Nobelpreis  
1980



James W. Cronin



Val L. Fitch



CP-Verletzung erfolgt über zwei unterschiedliche Prozesse:

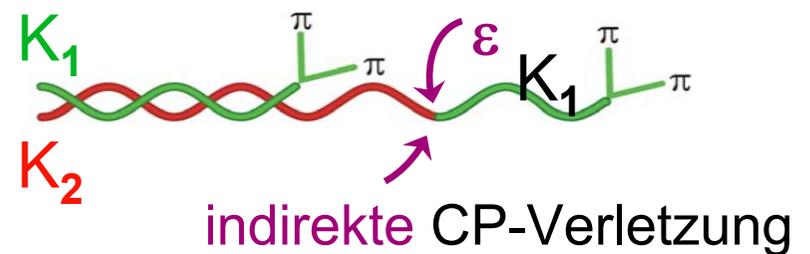
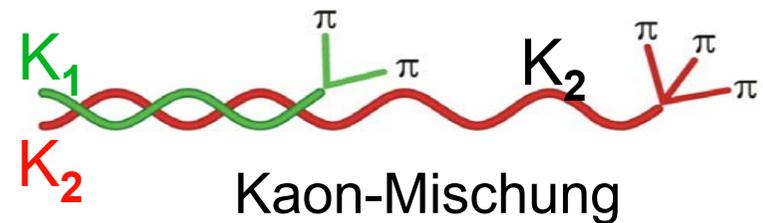
## Indirekte CP-Verletzung

Indirekte CP-Verletzung entsteht durch die Mischung von  $K_1$  und  $K_2$ , d.h. der Zerfall  $K_2 \rightarrow 2\pi$  resultiert durch die **kleine Beimischung von  $K_1$  zu  $K_2$**  :

$$|K_S\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}} (|K_1\rangle + \varepsilon \cdot |K_2\rangle)$$

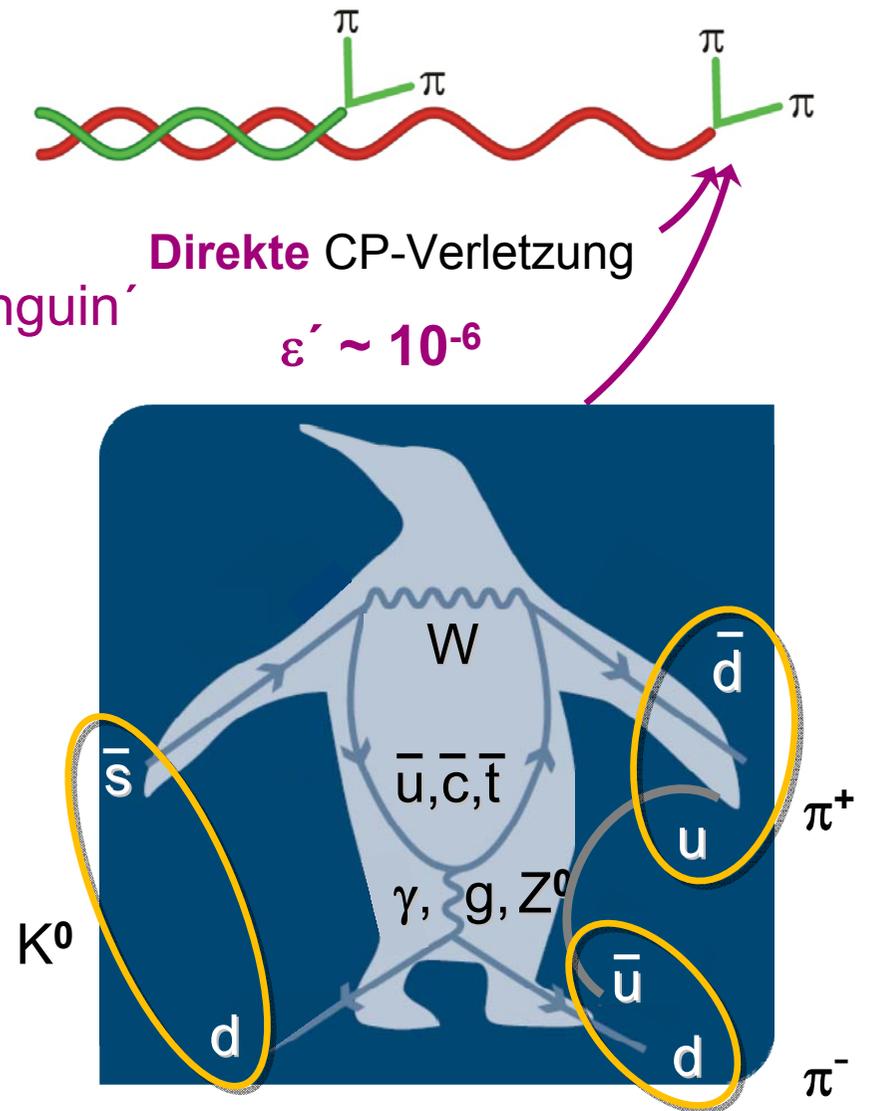
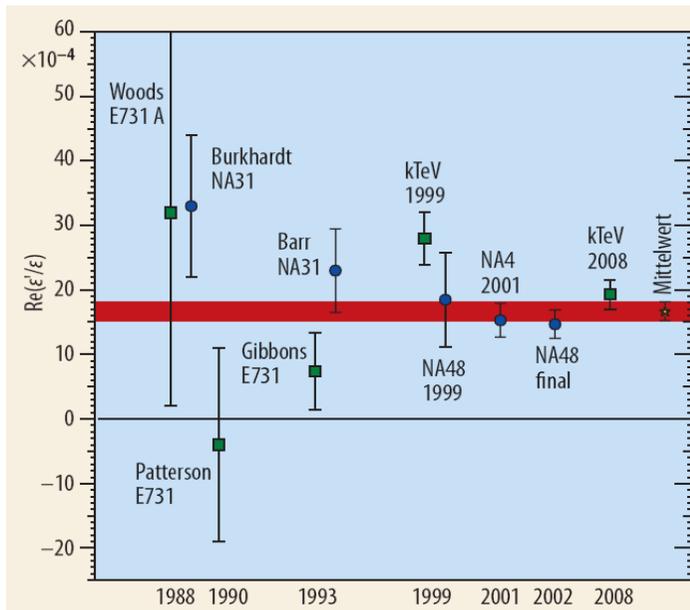
$$|K_L\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}} (\varepsilon \cdot |K_1\rangle + |K_2\rangle)$$

$$\varepsilon = 2.23 \times 10^{-3}$$



## Direkte CP-Verletzung

- CP-Verletzung erfolgt in diesem Falle direkt am Zerfallsvertex  $K_2 \rightarrow 2 \pi$   
Feynman-Diagramm: **elektroschwacher 'Pinguin'**
- Die direkte CP-Verletzung ist nochmals wesentlich schwächer als die indirekte CP-Verletzung durch die Oszillationen



## Konsequenz: Definition von Materie/Antimaterie

Der Zerfall

$$K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$$

kommt 0,3% häufiger vor als

$$K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$$

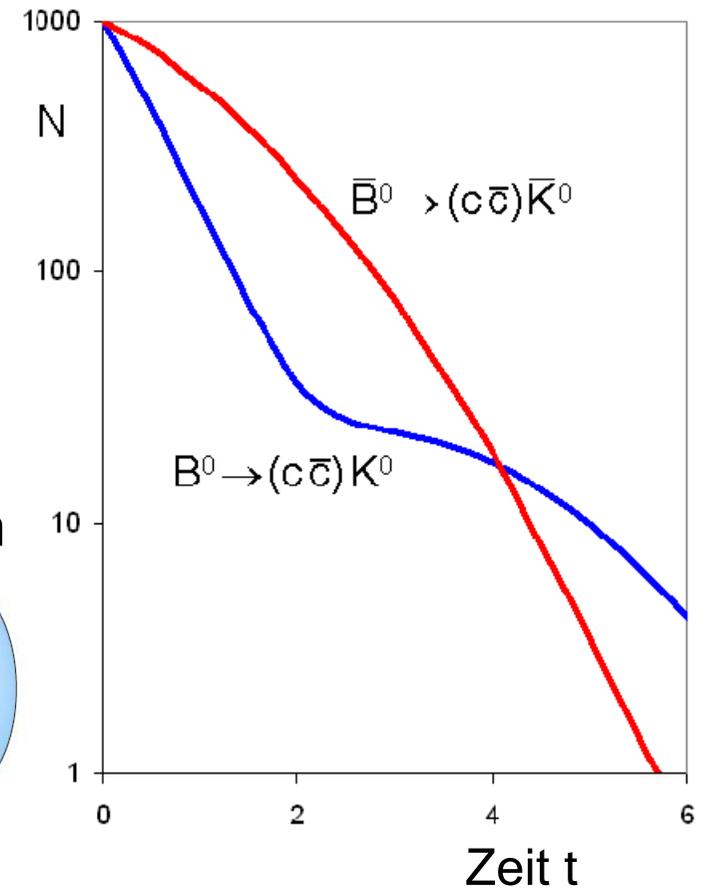
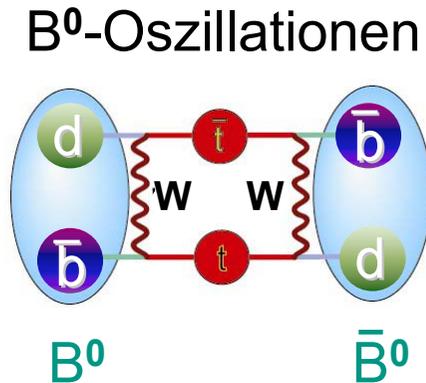
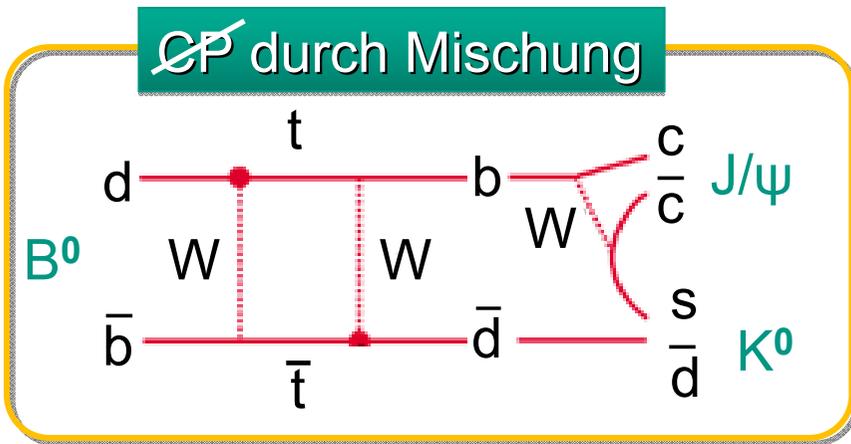
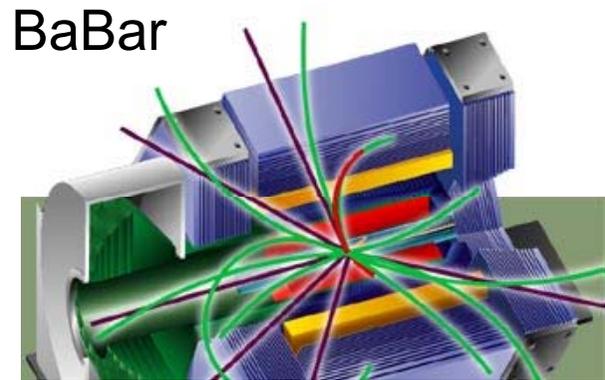
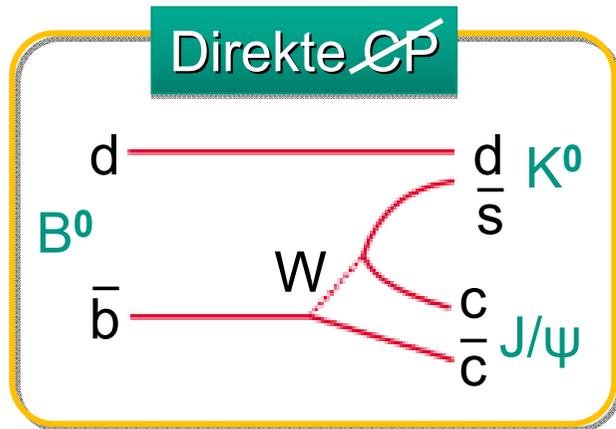
Konvention:

Das im Zerfall der langlebigen Kaonen seltener vorkommende Lepton ist

- Materie
- Elektrisch negativ geladen
- Das assoziierte Neutrino ist rechtshändig

# Oszillation von $B^0$ Mesonen

- Die Verletzung der CP-Symmetrie wurde in den letzten Jahren auch im System der neutralen  $B^0$ -Mesonen beobachtet (B-Fabriken am KEK, SLAC)
- Die **CP-verletzenden Effekte sind wesentlich größer**

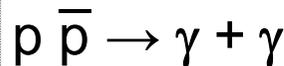
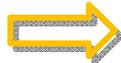


# CP-Verletzung & Materie/Antimaterie

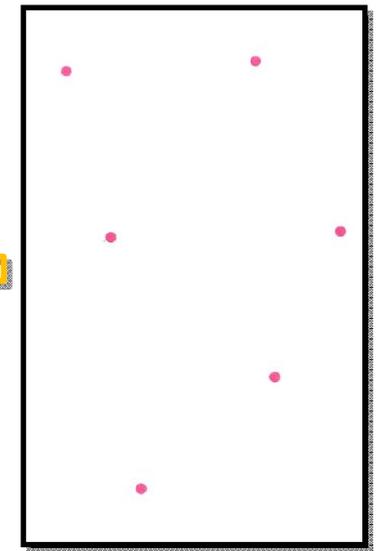
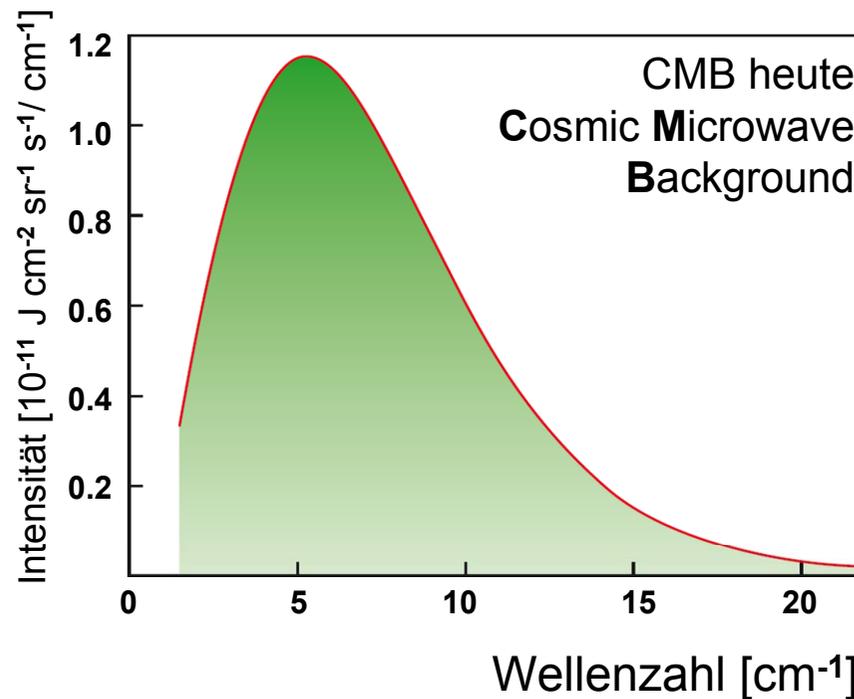
- Vernichtung von Materie – Antimaterie bei  $t \sim 0.1 \text{ ms}$   $\rightarrow$  Erzeugung der CMB
- BBN: Baryon-Photon-Verhältnis  $\eta \sim 10^{-9}$
- hier: **kein thermisches Gleichgewicht**  
sonst wärer  $\eta \sim 10^{-18}$  !



Annihilation



$t < 10^{-4} \text{ s}$ :  
Materie-Antimaterie

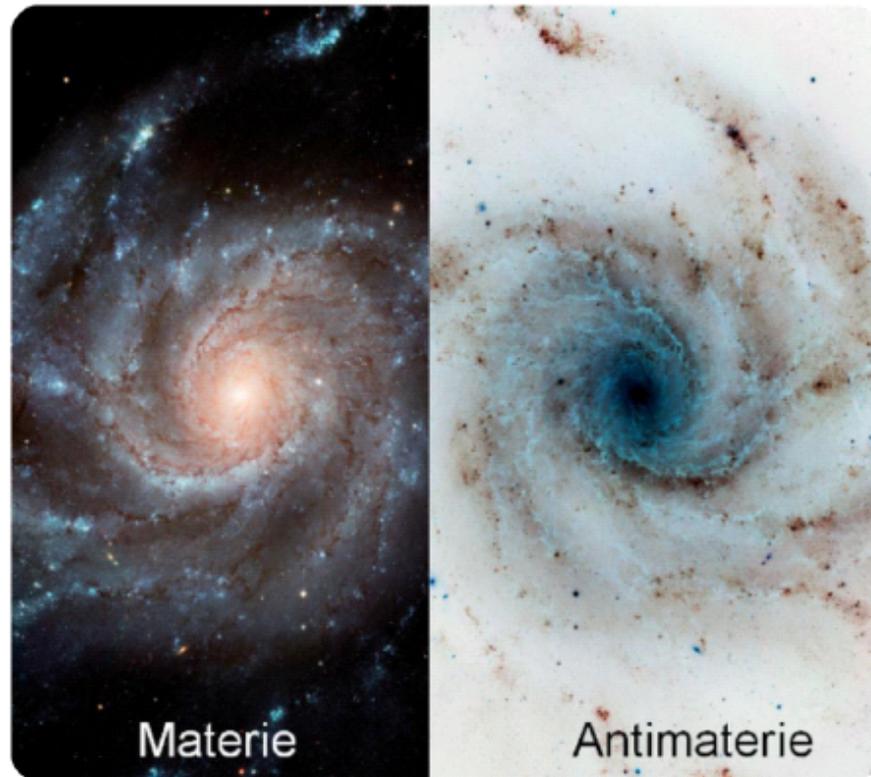


$t > 10^{-4} \text{ s}$ :  
nur Materie

■ **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!

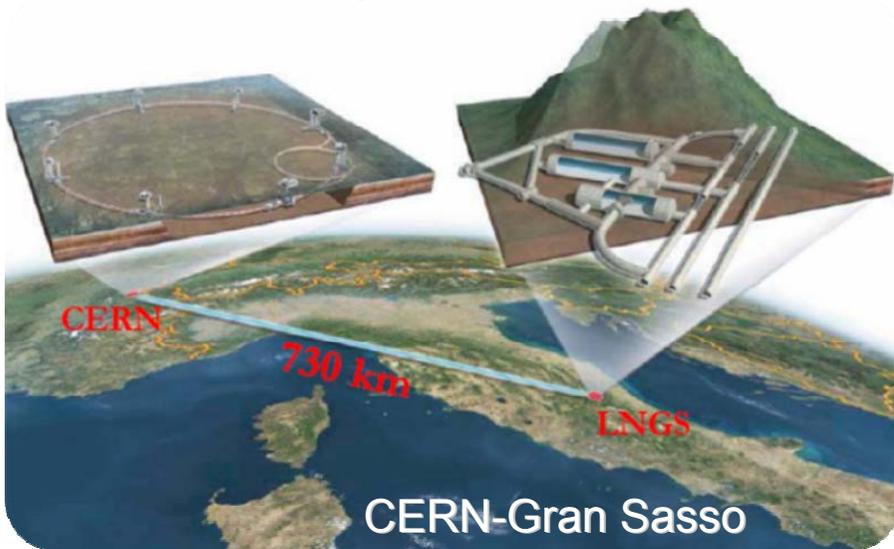
↳ **Leptogenese**? (L-verletzender Zerfall von schweren Majorana- $\nu$ 's)

# e) Neutrino-physik

- Untersuchung der  **$\nu$ -Eigenschaften** (Mischung,  $\theta_{13}$ ) mit intensiven  $\nu$ -Quellen: genau bekannte  $\nu$ -Energien & Flavour-Zusammensetzungen erforderlich

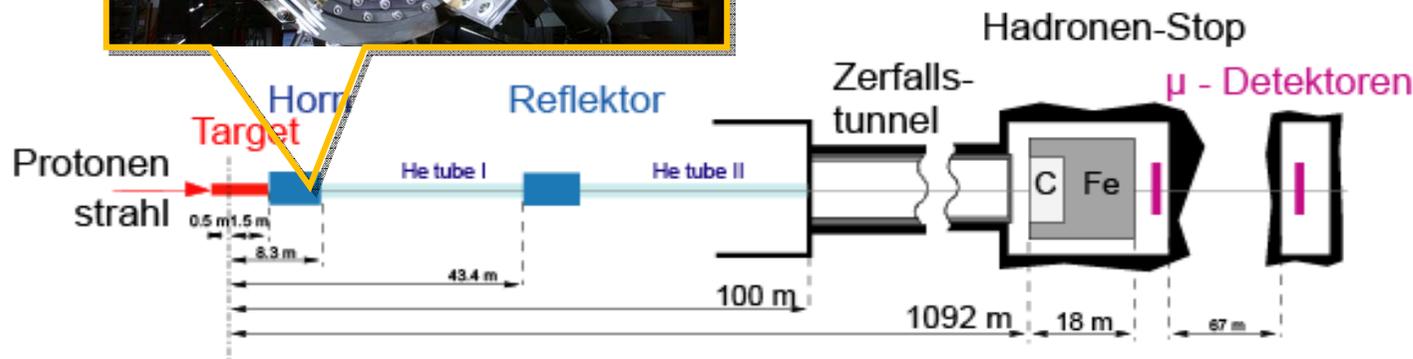
Terrestrische $\nu$ -Quellen	$\nu$ -Energien
Kernreaktoren ( $\beta$ -Zerfall von Spaltprodukten)	1 – 5 MeV
Spallationsquellen ( $\pi^+$ - $\mu^+$ Zerfallskette in Ruhe)	bis 50 MeV
Beschleuniger ( $\pi^+$ -Zerfall im Fluge)	bis 200 GeV

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

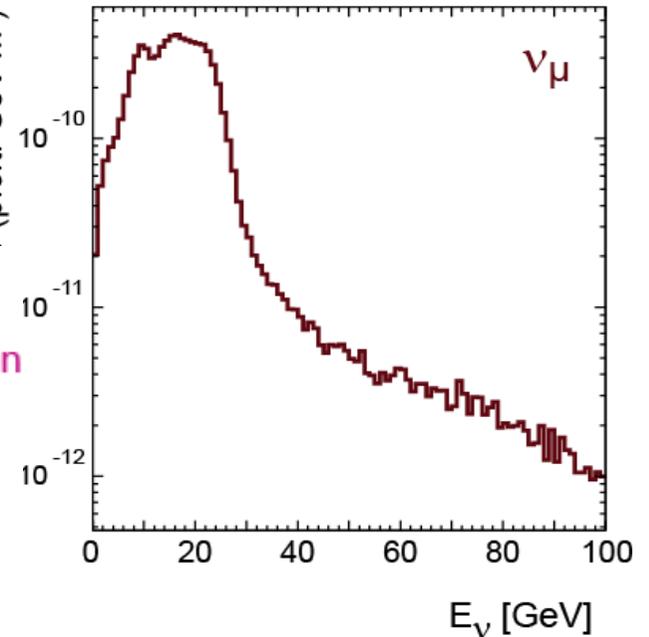


# Beschleuniger-Neutrinoexperimente

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

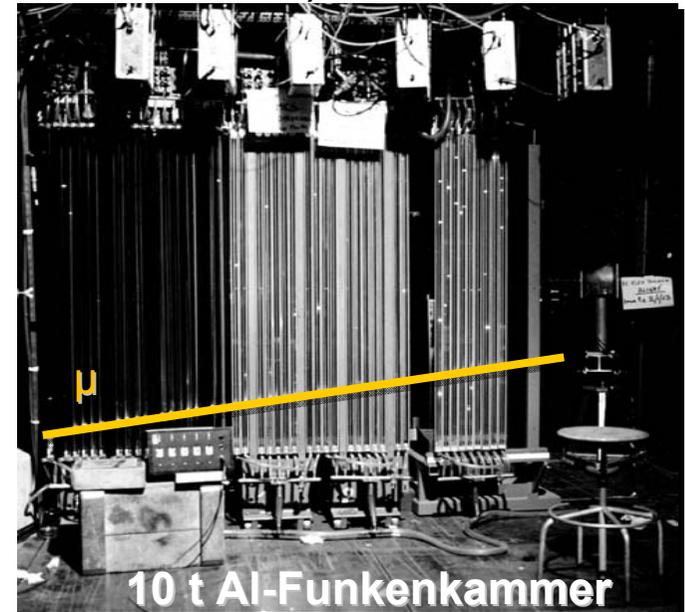
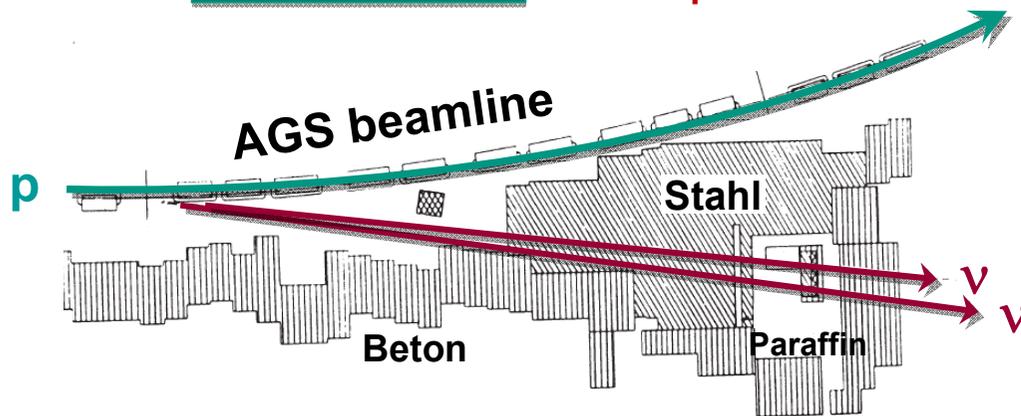


$\nu_\mu$  am LNGS /  
(p.o.t. GeV m<sup>2</sup>)



# 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



Nobelpreis 1988



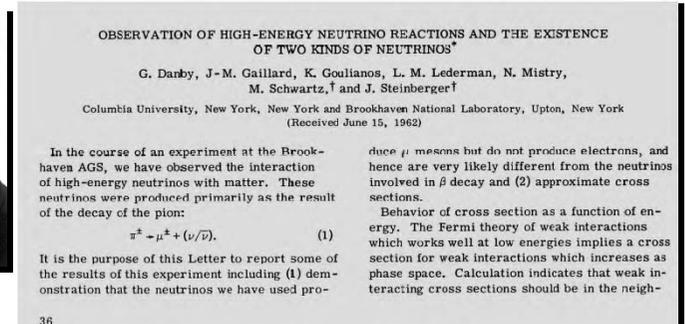
Leon M.  
Lederman



Jack  
Steinberger



Melvin  
Schwartz



# 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

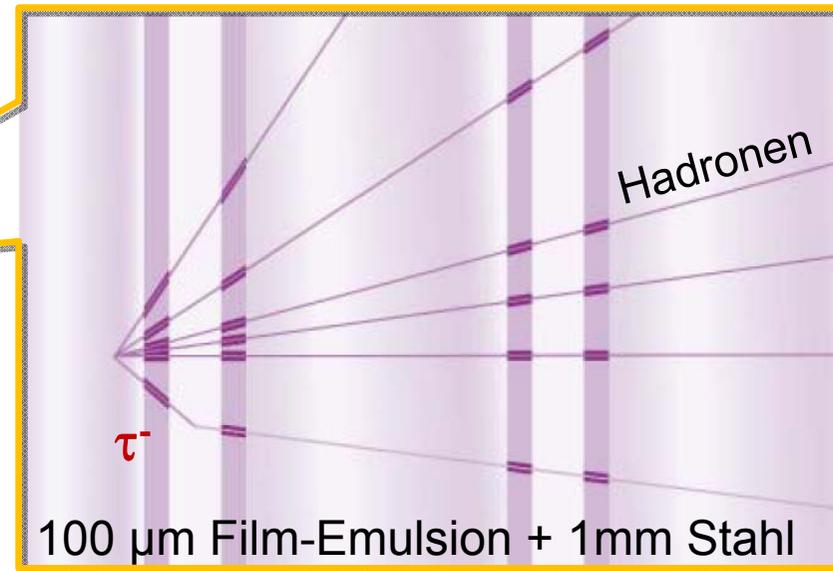
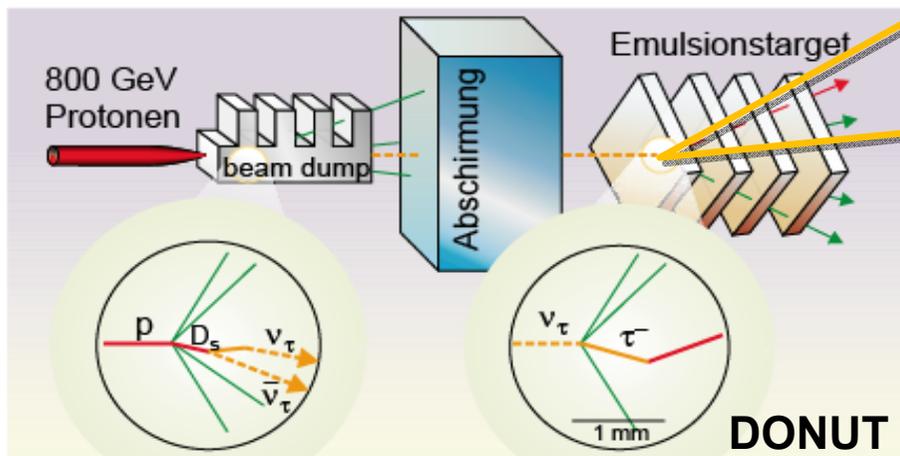
↳  $D_s$ -Mesonen ( $c\bar{s}$ ) Zerfall ↳  $\nu_\tau$  mit  $E_\nu = 50$  GeV

↳ 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

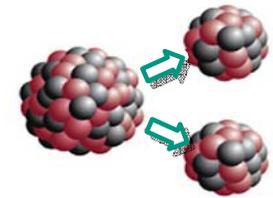


# Reaktor-Neutrinos

- 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:

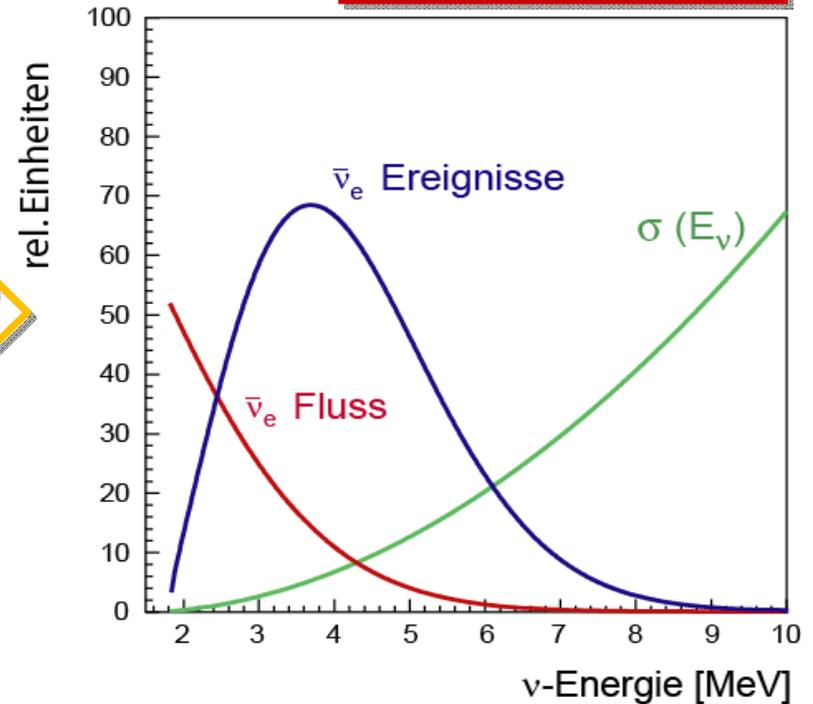
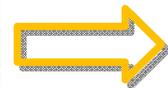
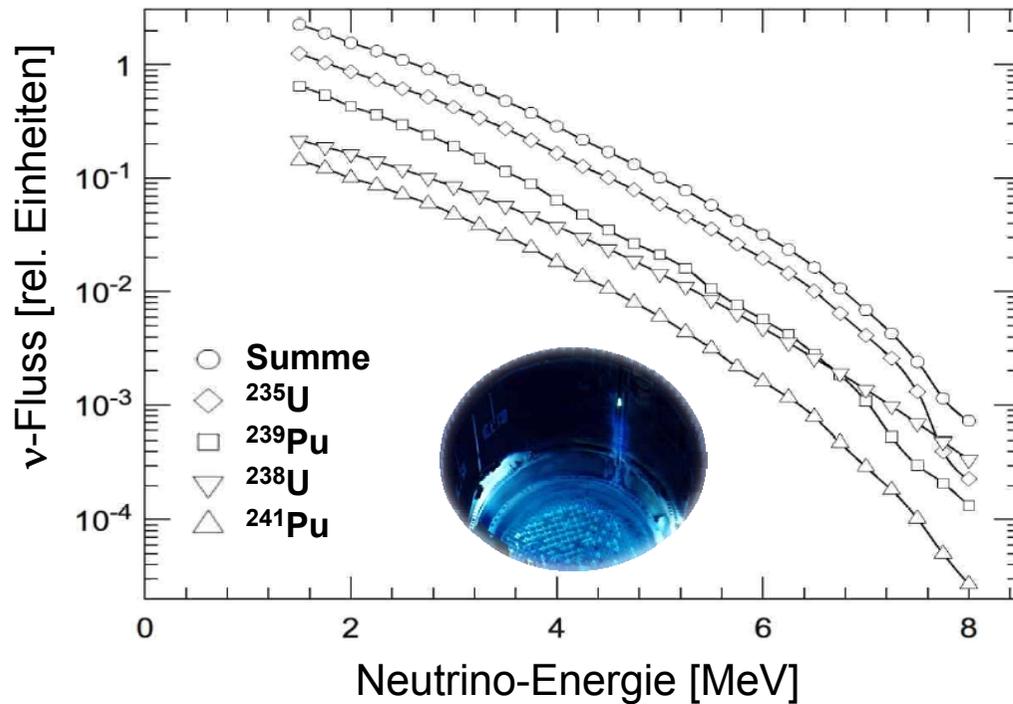
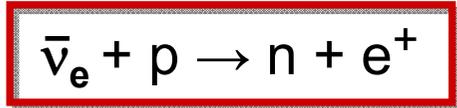
$$R_\nu = \frac{6 \cdot P_{th}}{204 \text{ MeV}} = \frac{6 \times 8.4 \cdot 10^9 \times 6.24 \cdot 10^{12}}{204} \bar{\nu}_e / s = 1.5 \cdot 10^{21} \bar{\nu}_e / s$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ MeV} &= 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ Ws} \\ 1 \text{ W} &= 6.24 \cdot 10^{12} \text{ MeV/s} \end{aligned}$$



# Reaktor-Neutrinos: Energiespektren

- theoretisch **berechnete  $\bar{\nu}$ -Energiespektren** für unterschiedliche Spaltprodukte
  - gewichtet mit der Häufigkeit im Reaktorkern (↪ 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-
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	$\pi^\pm \rightarrow (\bar{\nu}_\mu + \mu^\pm) \rightarrow e^\pm + (\bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_e)$
kosmische Beschleuniger ( $\mu$ -Quasare, AGN)	$< 10^{10}$ GeV	$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\bar{\nu}_\mu)$

