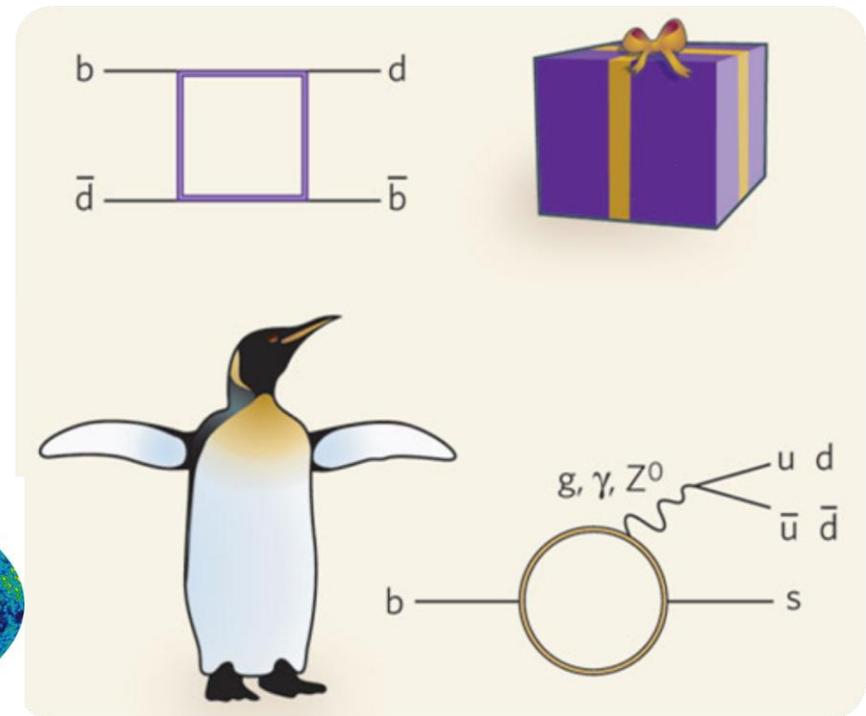
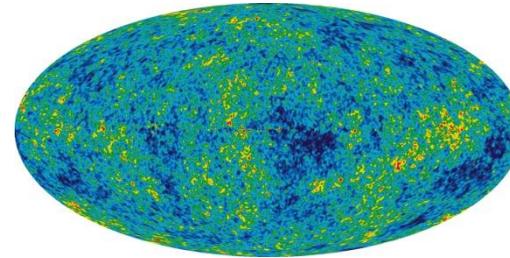


# Kerne und Teilchen

## Physik VI

Vorlesung # 24 8.7.2010



Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

## Kaonen und Neutrinos

- Einführung
- P, C, CP Eigenzustände von  $K^0$
- Kaon-Oszillationen
- Kaon-Regeneration
- indirekte & direkte CP-Verletzung
- Materie-Antimaterie-Asymmetrie



Materie



Antimaterie

# Higgs-Mechanismus, Quark-Mischung

## ■ Higgs-Mechanismus

- SU(2) Dublett  $\Phi(x)$  mit schwacher Hyperladung  $Y_W = -1$
- 3 Eichfelder ( $W_\mu, B_\mu$ ) erhalten Masse,  $\gamma =$  masselos
- Higgsfeld mit Vakuumerwartungswert  $w = 246$  GeV
- Teilchenmassen über Yukawa-artige Kopplung

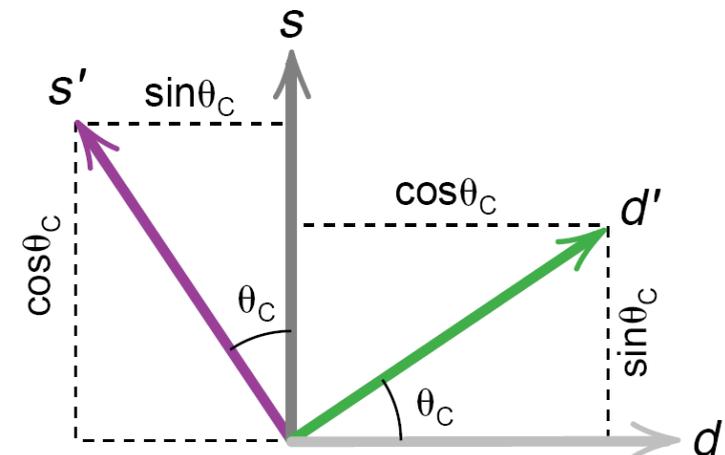
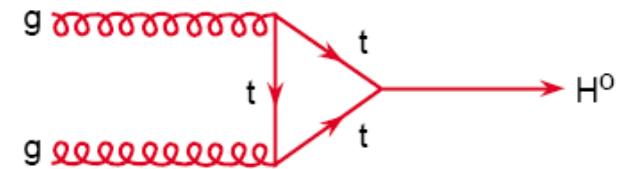
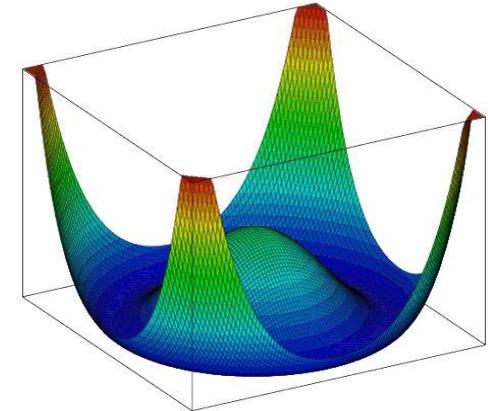
## ■ Higgs-Boson

- Produktion: Gluon-Gluon Fusion, Vektorboson-Fusion
- Zerfall:  $b\bar{b}$ -Paare, selten:  $\gamma\gamma$ -Kanal
- erlaubter Massenbereich:  $m = 115-150$  GeV

## ■ Quark-Mischung

- Cabibbo-Mischung bei 2 Generationen  
**(u,d') (c,s') Dubletts**

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix}$$



# 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)

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

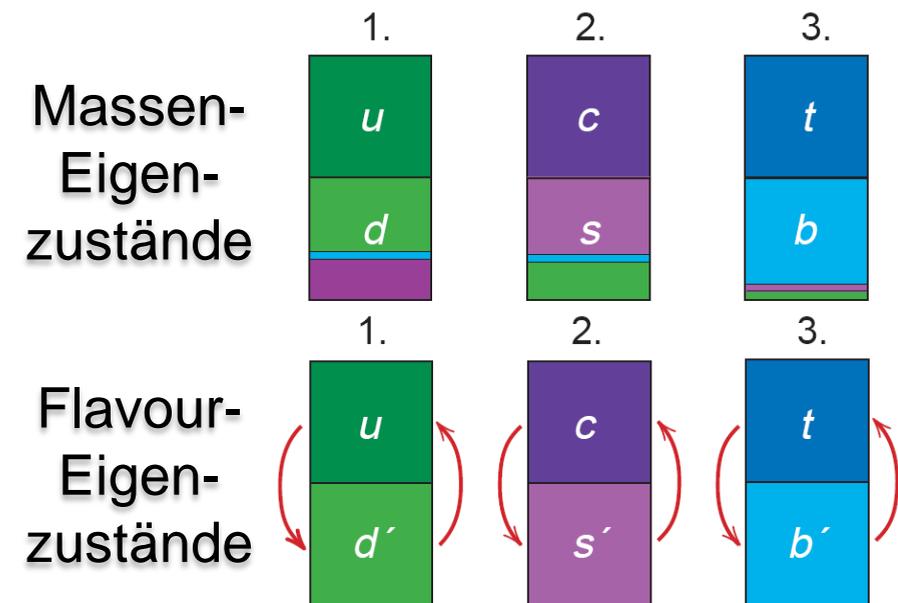
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}_L$$

## ■ CKM-Matrix

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

## ■ GIM-Mechanismus

- durch schwache Dubletts  $(u \ d')_L$   $(c \ s')_L$   
keine **FCNC** (flavourändernde NC)



# 10. Kaonen und Neutrinos

## ■ Kaonen:

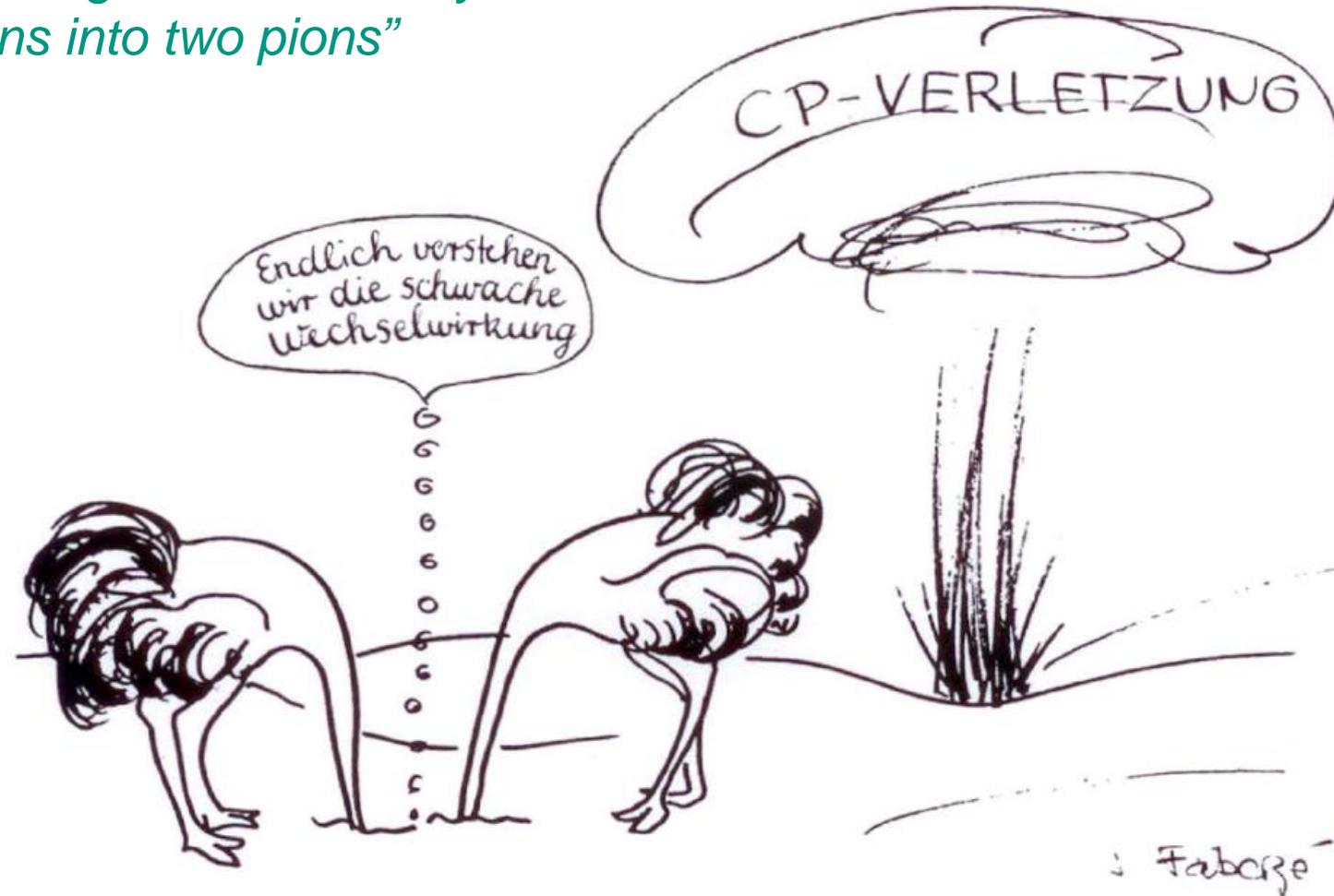
- Kaonen sind **pseudoskalare  $1^1S_0$  Mesonen** mit Strangeness mit Massen  $M(K^+, K^-) = 493.7 \text{ MeV}$  und  $M(K^0, \bar{K}^0) = 497.6 \text{ MeV}$
- 1964: im System der neutralen Kaonen entdecken Cronin und Fitch die **Verletzung der CP-Invarianz**
- seither detailliertes Studium CP-verletzender Effekte in Systemen **oszillierender neutralen Kaonen und  $B^0$ -Mesonen**

## ■ Neutrinos:

- Neutrinos sind die einzigen **ungeladenen elementaren Fermionen** im SM
- 1998: **Entdeckung von Flavour-Oszillationen** bei den atmosphärischen Neutrinos im Super-Kamiokande Experiment (Japan) zeigt  $m(\nu) \neq 0$
- 2001: Lösung des solaren Neutrinoproblems durch SNO
- Neutrinos sind ideale Messenger-Teilchen aus 'verborgenen' Regionen des Universums (z.B. aus dem Zentrum von Supernovae, Sonne, Erde, ...)
- zentrale ungelöste Probleme: **Größe der  $\nu$ -Masse und CP-Eigenschaften**

# 10.1 Oszillation neutraler Kaonen und $CP$

*“The situation in weak interactions seems to have improved, if one ignores the decay of long-lived  $K^0$  mesons into two pions”*



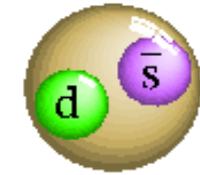
CERN Courier (Oktober 1966)

# Zustände $K^0$ und $\bar{K}^0$

- Kaonen bilden zwei starke Isospin-Dubletts:

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

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



Kaon  $K^0$

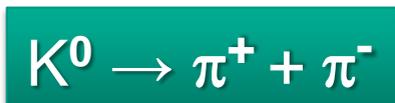
(vgl. Kap. 7.1)

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

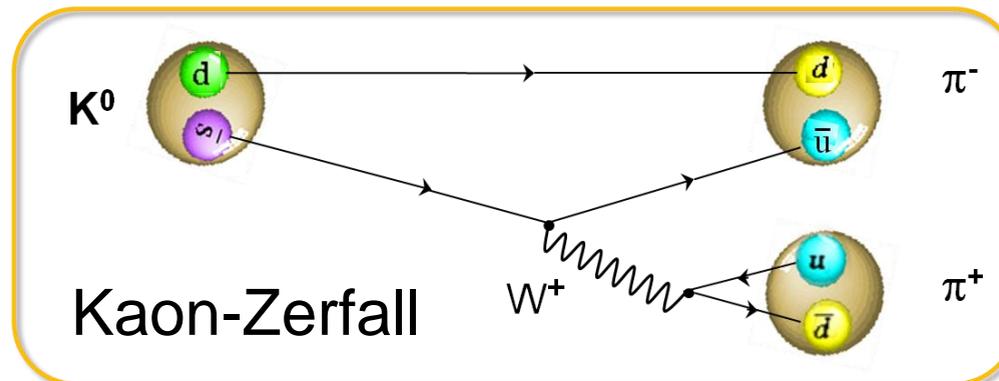


paarweise Erzeugung  $\rightarrow d\bar{s} + uds$

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



$\rightarrow 2\pi, \rightarrow 3\pi, \text{ semileptonisch } \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$



# Zustände $K_1$ und $K_2$

- **interne Parität P** von neutralen Kaonen  $P(q\bar{q}) = (-1)^{\ell+1}$ , 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:

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

Minuszeichen wird *definiert*

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

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

$K^0, \bar{K}^0$  *keine* CP-Eigenzustände

- **Linearkombinationen  $K_1, K_2$**  von neutralen Kaonen mit definiertem CP:

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

## ■ $K_1, K_2$ 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:  $m(K^0) = m(\bar{K}^0)$

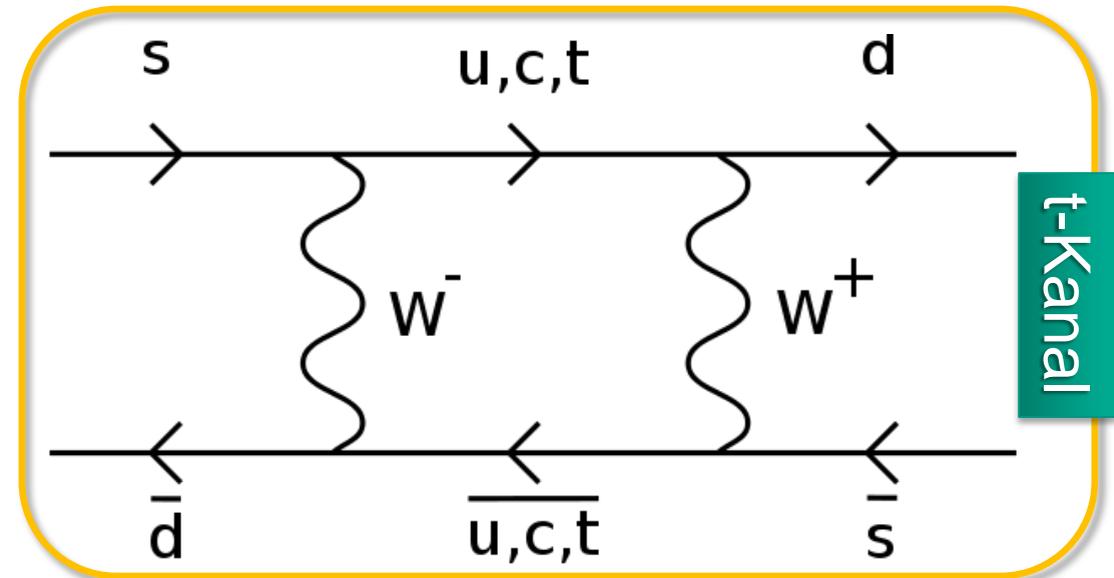
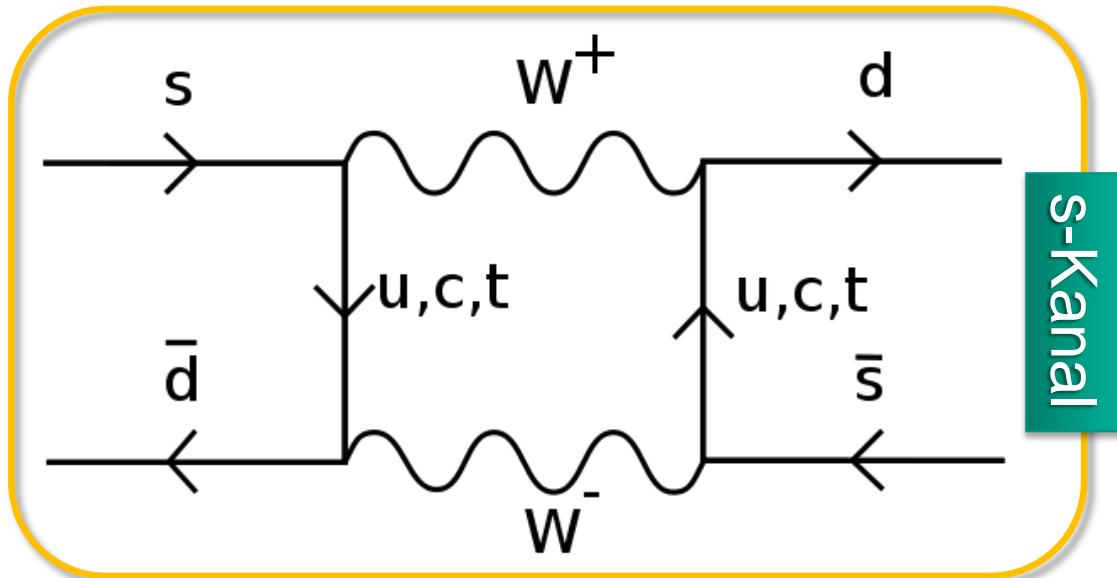
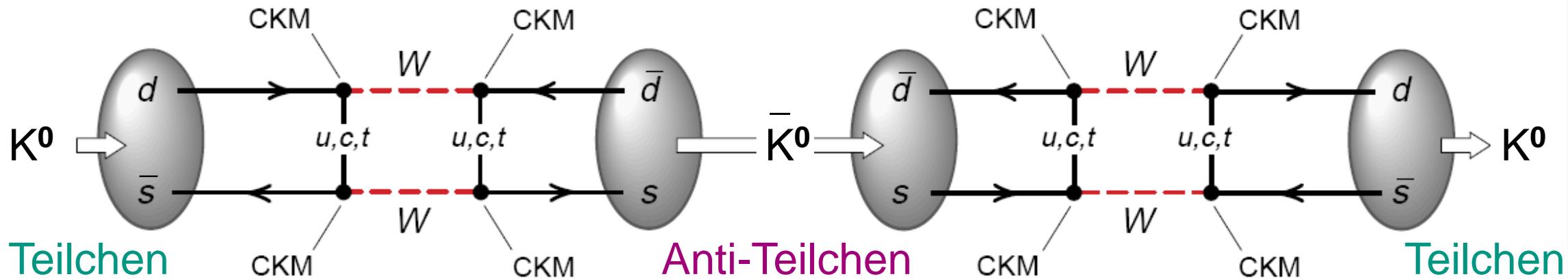
- **schwache Wechselwirkung:**

ermöglicht **Übergänge  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$**

**Mischung der beiden neutralen Kaonen**  
**Entstehung der Zustände  $K_1$  und  $K_2$**   
**mit unterschiedlichen Massen  $m$  &  $\tau$**

# Kaon-Oszillationen

- Schwache Wechselwirkung:** in 2. Ordnung Störungstheorie 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 & CP von 2 Pionen

## ■ 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

Parität P & C-Parität von **zwei Pionen**: ( $\pi^+ \pi^-$ ) oder ( $\pi^0 \pi^0$ )

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

Parität ist multiplikative Größe

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

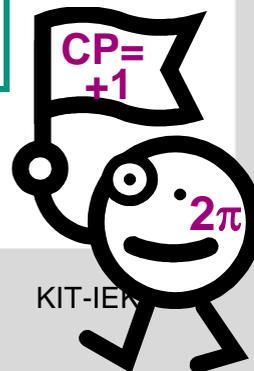
vgl. Kap. 8.2)

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

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

ebenso

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



## ■ CP Zustände von drei Pionen

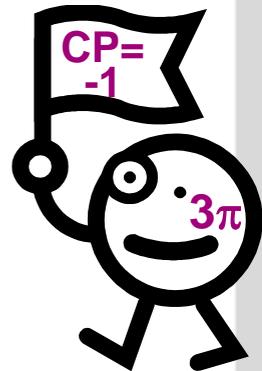
komplexere Betrachtungen (2 Pionen als Di-Pion und 1 Pion) ergeben

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

Di-Pion:  $\ell = \text{gerade}$ , da identische Teilchen

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

kleiner Phasenraum, daher  $\ell = 0$



## ■ auf dem Weg zur CP Verletzung bei den Kaonen

- bisheriger Status mit Zuständen der **starken Wechselwirkung**  $K^0, \bar{K}^0$ : definierte Masse, Strangeness
- **CP-Symmetrie**  $K_1, K_2$ : definierte CP Eigenwerte, keine definierte Masse
- **Pionen** dienen als Marker der CP-Werte
- **schwache Wechselwirkung** erzeugt Kaon-Antikaon Oszillationen  
wie beeinflusst die schwache Wechselwirkung das exponent. Zerfallsgesetz?  
was sind die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung?

# 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 %            |

## ■ Zerfallsgesetze für $K_L$ , $K_S$ , $K^0$ und $\bar{K}^0$ :

- schwache Eigenzustände  $K_L$  und  $K_S$ :

Zerfall mit bekanntem exponentiellen Zerfallsgesetz & mit konstantem  $\lambda_i$   
d.h.  $K_L$  &  $K_S$  sind Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung

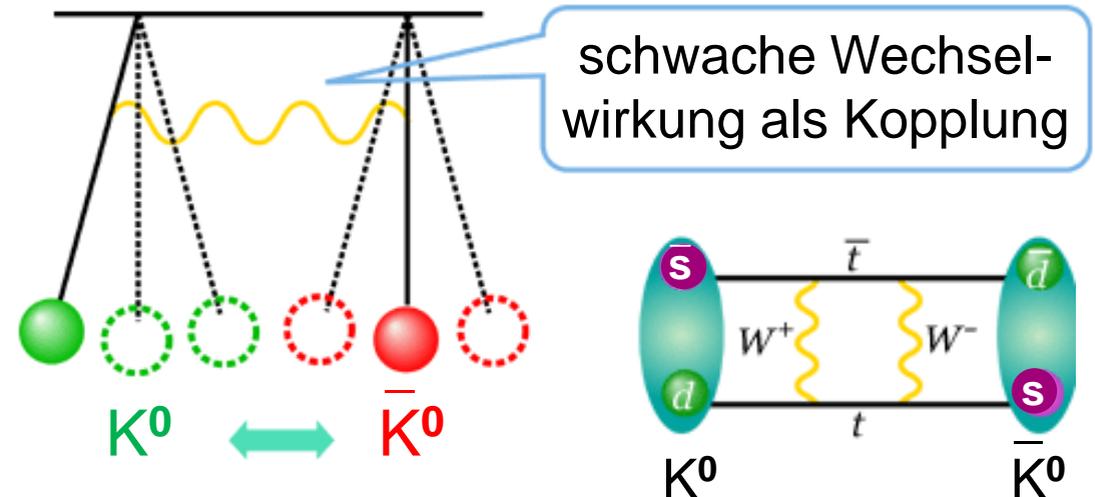
- starke Eigenzustände  $K^0$  und  $\bar{K}^0$ :

keine definierte Lebensdauer, da die  $\Delta S = 2$  Störung der schwachen Wechselwirkung charakteristische  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  Oszillationen erzeugt

## ■ Oszillationsfrequenz $\omega$ der $K^0 - \bar{K}^0$ Schwingungen:

- schwache Wechselwirkung erzeugt **Massendifferenz  $\Delta m$**  zwischen  $K_S$  und  $K_L$  ( $= \omega$  von  $K^0 - \bar{K}^0$ ):

$$\Delta m = m_L - m_S = 0.53 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1} = 3.5 \mu\text{eV}$$



# Kaon-Regeneration

- - nach einer langen Flugzeit  $t \gg \tau(K_S)$  wird aus einem ursprünglichen  $K^0$ -Strahl (mit  $K_S$  und  $K_L$ ) ein **reiner  $K_L$ - Strahl**
- in einem Absorber: **Regeneration der  $K_S$  ( $K_1$ ) Komponente** durch starke Wechselwirkungsprozesse der Kaonen mit Materie  
Streuquerschnitt  $\sigma_{\text{tot}}(K^0) \neq \sigma_{\text{tot}}(\bar{K}^0)$

$$|K_{\text{reg}}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (f_0 |K^0\rangle - \bar{f}_0 |\bar{K}^0\rangle)$$

- $\bar{K}^0$  – Wechselwirkungen:

Bildung von Hyperonen  $\bar{K}^0 + p \rightarrow \Lambda + \pi^+$

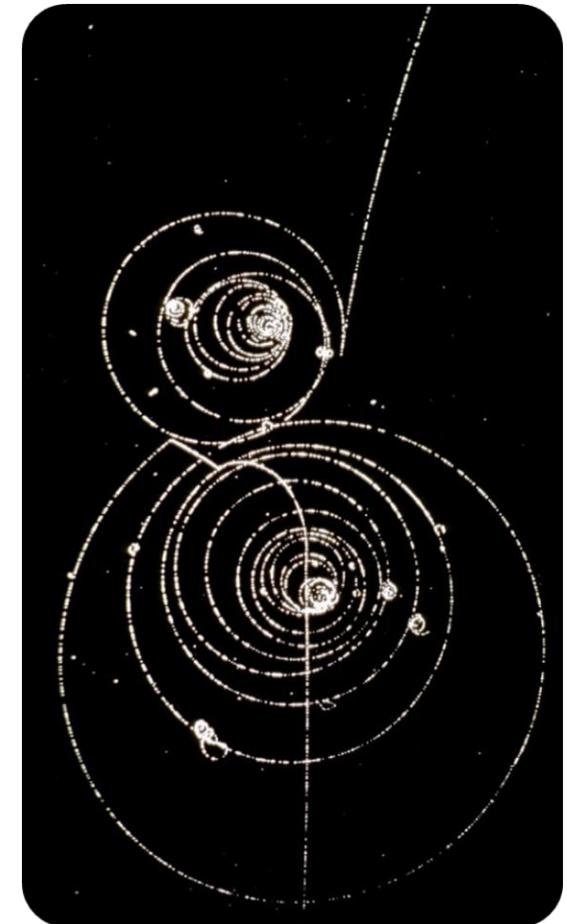
Bildung von Resonanzen  $\bar{K}^0 + p \rightarrow |uus\rangle \rightarrow K^0 + p$

↳  $\bar{K}^0$  Mesonen werden stärker absorbiert

- $K^0$  – Wechselwirkungen:

nur elastische Streuungen im Absorber, da

*keine*  $|uus\rangle$  Resonanzen möglich sind



# Nachweis der CP-Verletzung

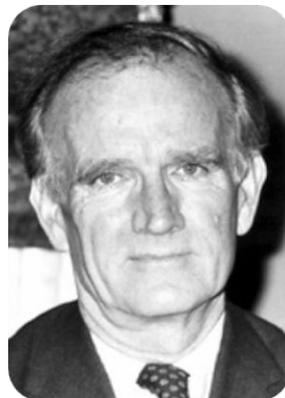
- 1964: am AGS-Beschleuniger am Brookhaven National Laboratory (BNL) weisen Cronin & Fitch **CP-Verletzung** im System der neutralen Kaonen nach
  - **$K^0$  Mesonen Erzeugung**: Beschuss eines Be-Targets mit 30 GeV-Protonen aus dem AGS, **am Experiment ( $d = 20$  m) nur noch  $K_L$**
  - **$\pi^+$  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

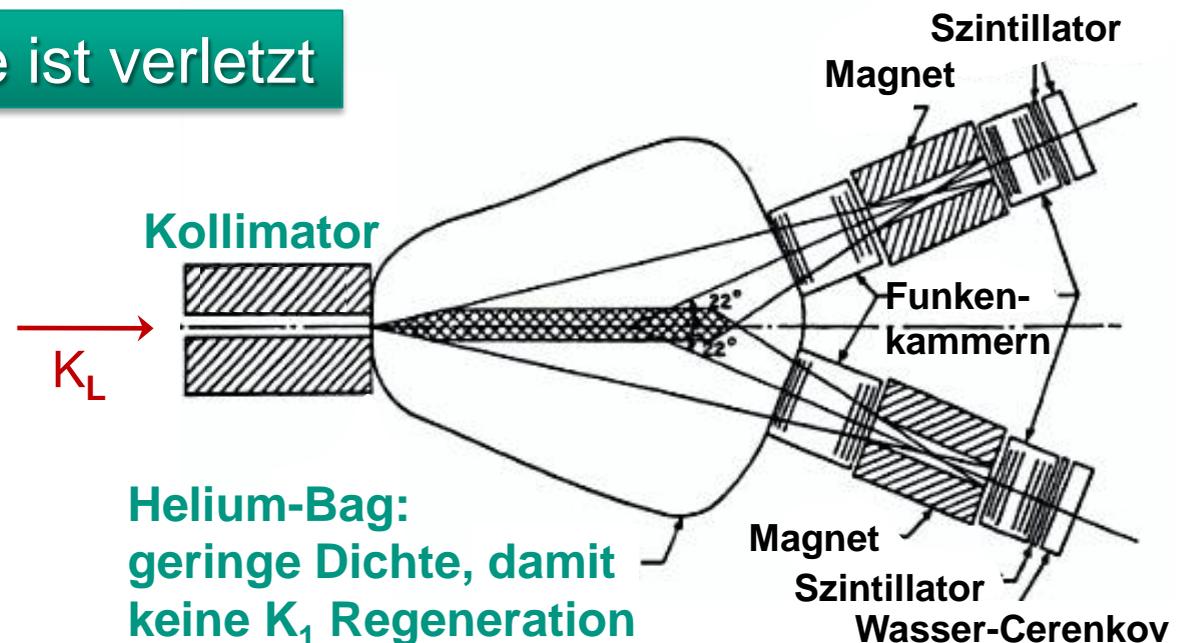
Nobelpreis  
1980



James W. Cronin



Val L. Fitch



# indirekte CP-Verletzung

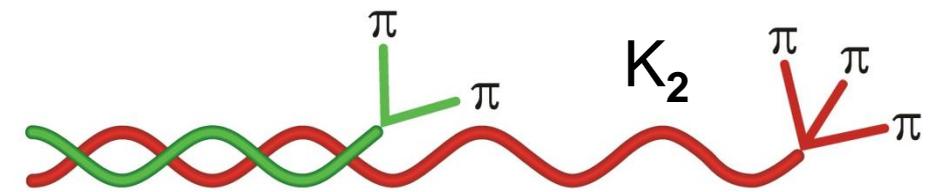
- CP-Verletzung erfolgt durch die **schwache Wechselwirkung** über zwei unterschiedliche Prozesse:
- **indirekte CP-Verletzung**

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  $K_2$**  :

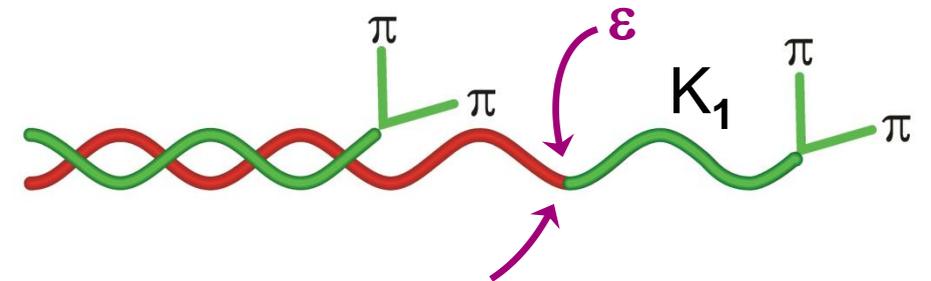
$$|K_S\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}} (|K_1\rangle + \varepsilon \cdot |K_2\rangle)$$

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

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



Kaon-Mischung

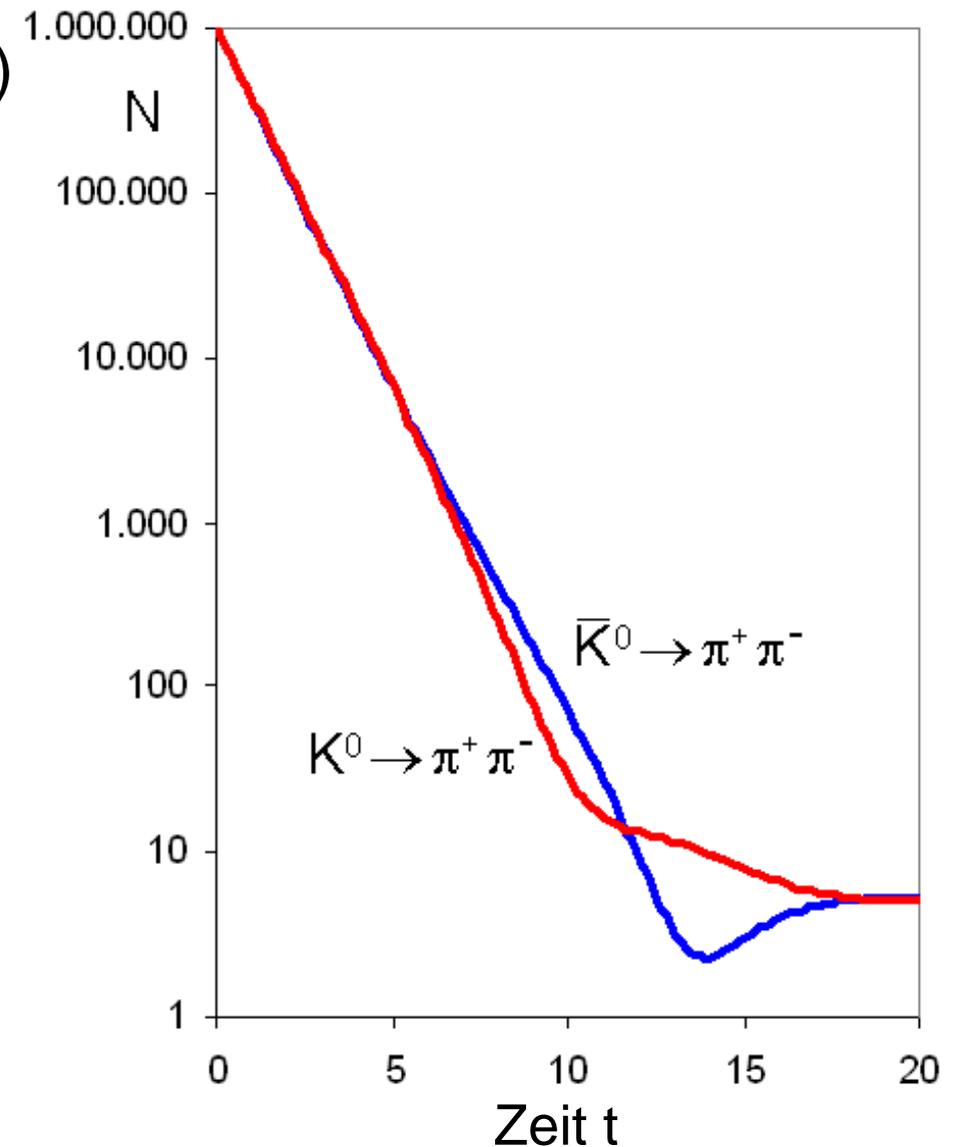
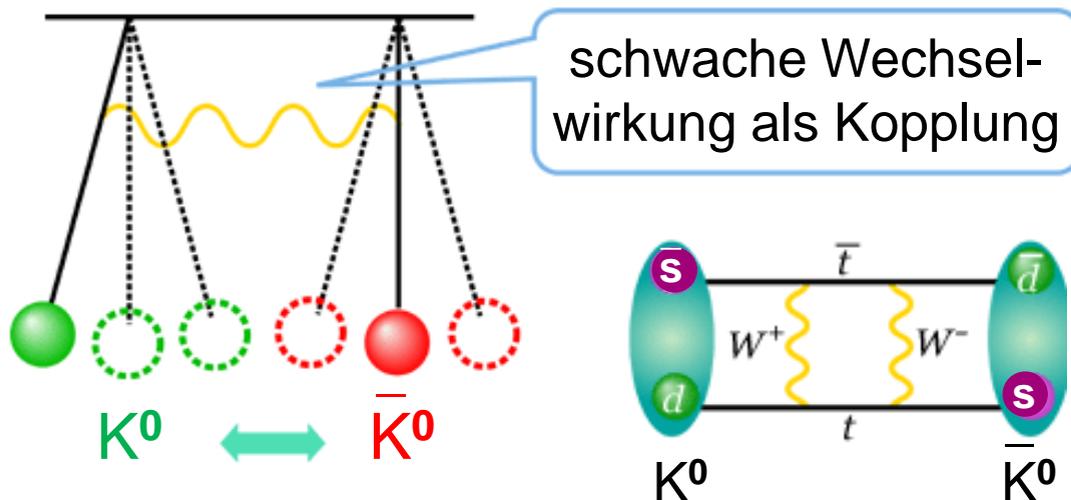


indirekte CP-Verletzung

**dominanter Beitrag** zur CP-Verletzung im System der neutralen Kaonen

# indirekte CP-Verletzung

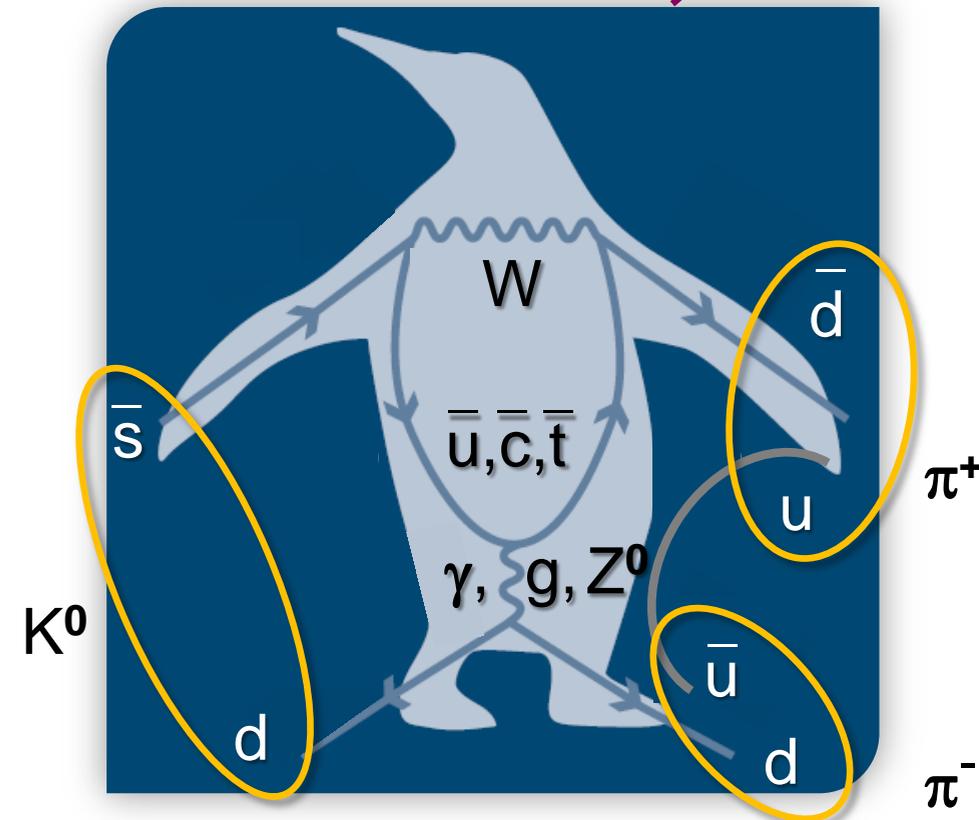
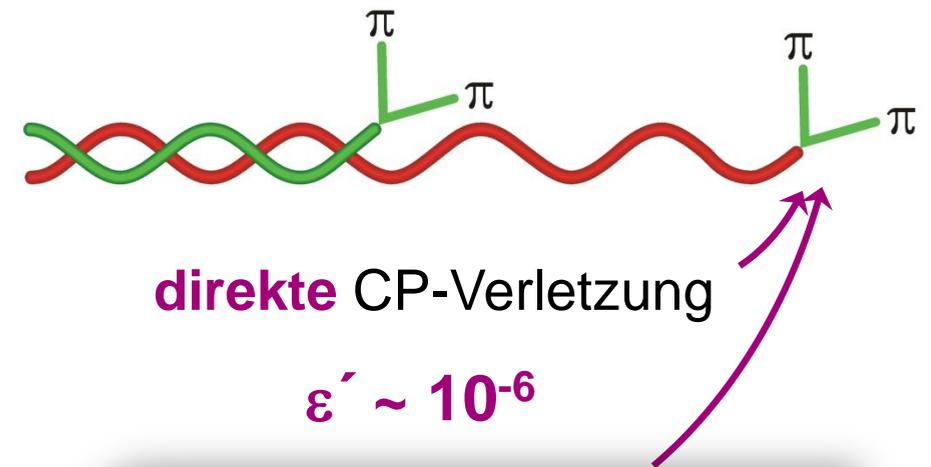
- indirekte CP-Verletzung resultiert aus der durch die schwache Wechselwirkung hervorgerufenen Oszillation zwischen  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  (d.h.  $K_1$  &  $K_2$  mischen)
  - Oszillationsperiode der Schwingung  
 $T = 2\pi / \Delta m \sim 1 \text{ ns}$
  - Lebensdauer des  $K_1$  ( $K_S$ ) Zustandes:  
 $\tau_S \sim 0.1 \text{ ns}$
  - Beginn der Oszillation ist gerade noch beobachtbar ( $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$   $\bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ )



# direkte CP-Verletzung

## ■ direkte CP-Verletzung

- die CP-Verletzung erfolgt in diesem Falle direkt am Zerfallsvertex  $K_2 \rightarrow 2 \pi$   
Feynman-Diagramm: **elektroschwacher 'Pinguin'** (John Ellis, CERN)
- die direkte CP-Verletzung ist nochmals wesentlich schwächer als die indirekte CP-Verletzung durch die Oszillationen (diese entsteht ja durch eine Asymmetrie in der Mischung neutraler Kaonen)
- ein Nachweis der direkten CP-Verletzung in der schwachen Wechselwirkung schließt dies eine von L. Wolfenstein postulierte **superschwache Ww.** aus



# direkte CP-Verletzung

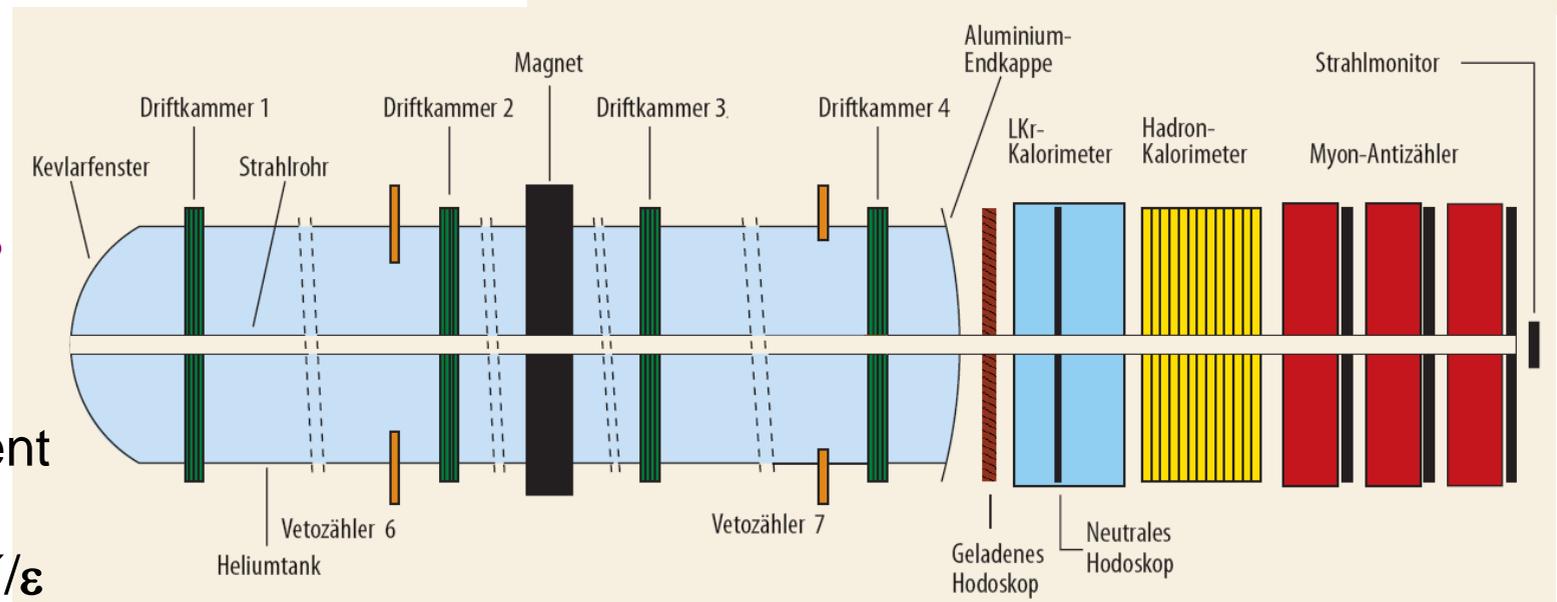
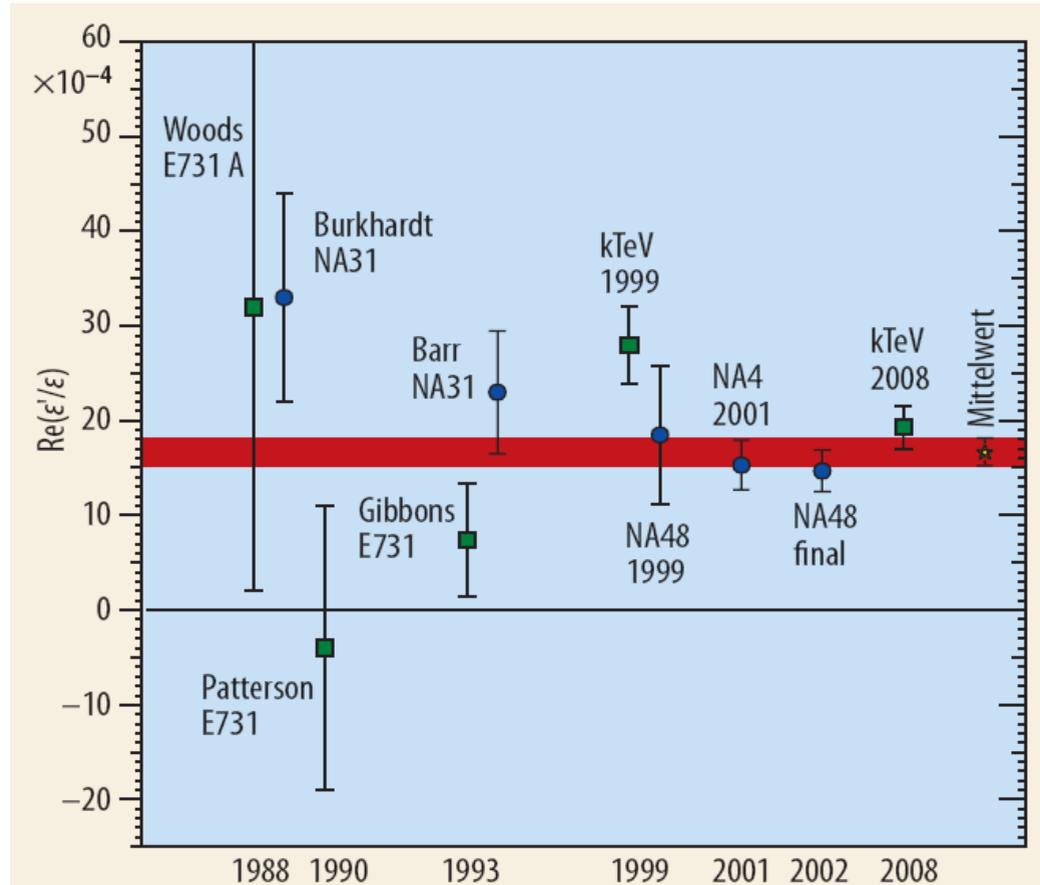
- die relative Stärke der beiden Prozesse wird durch  $|\varepsilon'/\varepsilon|$  beschrieben

$$\text{Re}\left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon}\right) = (16.5 \pm 2.6) \times 10^{-4}$$

- erster Nachweis von direkter CP-Verletzung durch das Experiment NA31 am CERN (Bestätigung durch NA48 und kTeV)

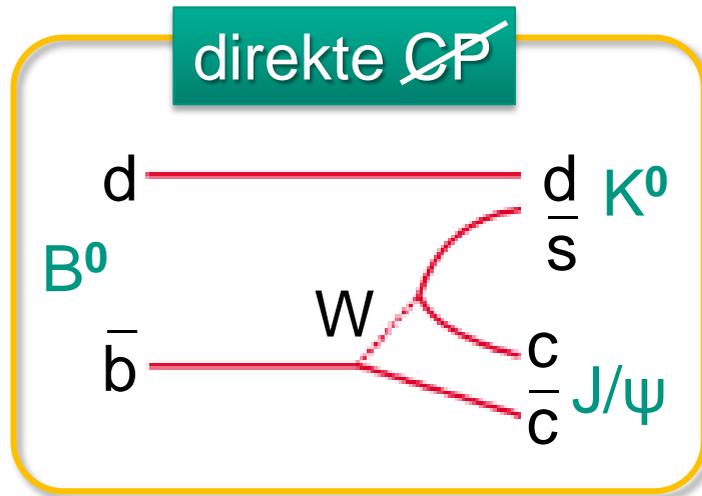
- CTP-Theorem:** da CP verletzt ist, muß auch T verletzt sein

NA48 Experiment am CERN zur Messung von  $\varepsilon'/\varepsilon$

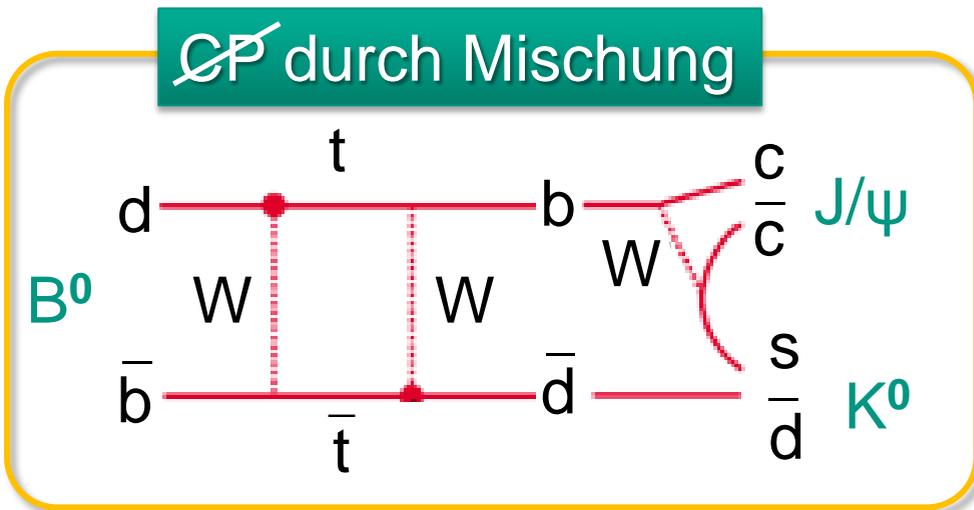
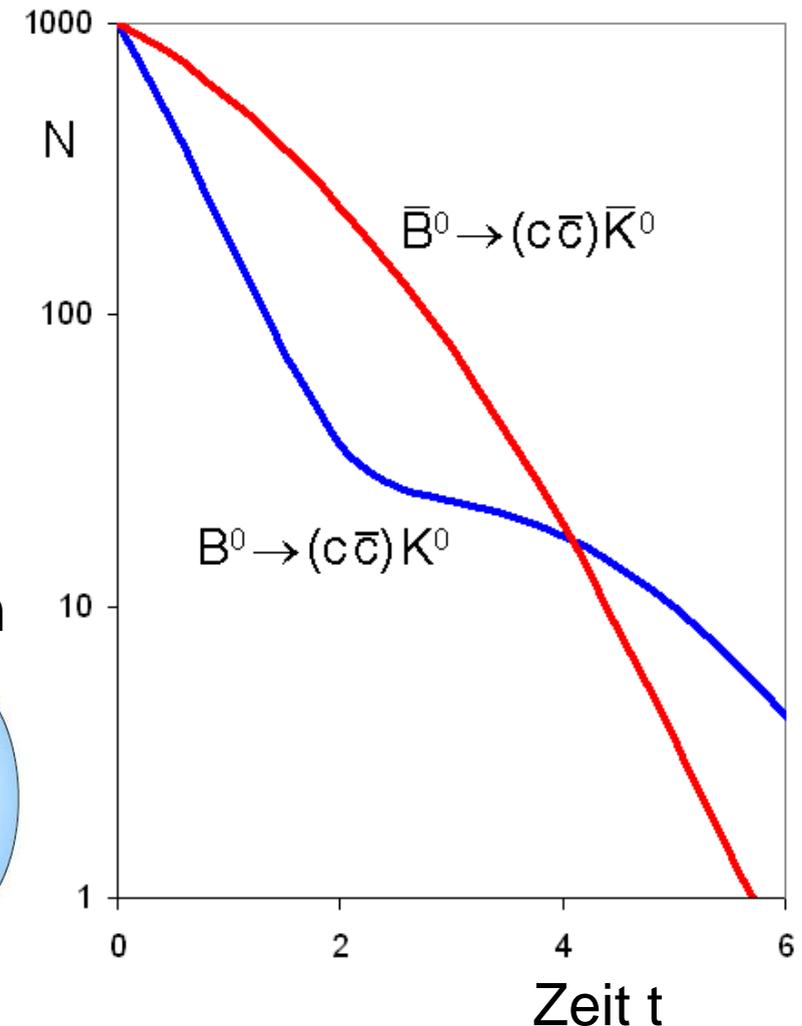
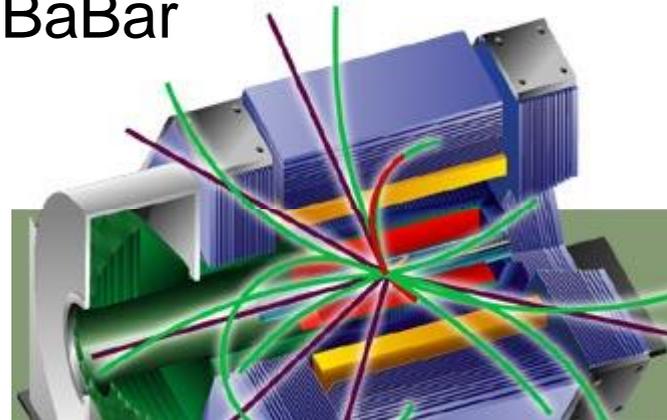


# Oszillation von $B^0$ Mesonen

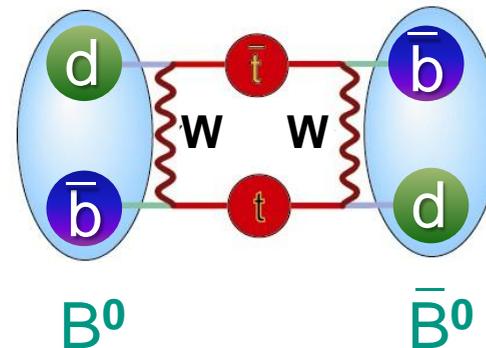
- die Verletzung der CP-Symmetrie wurde in den letzten Jahren auch im System der neutralen  $B^0$ -Mesonen beobachtet (B-Fabriken am KEK, SLAC)
- die **CP-verletzenden Effekte sind wesentlich größer**



BaBar



$B^0$ -Oszillationen



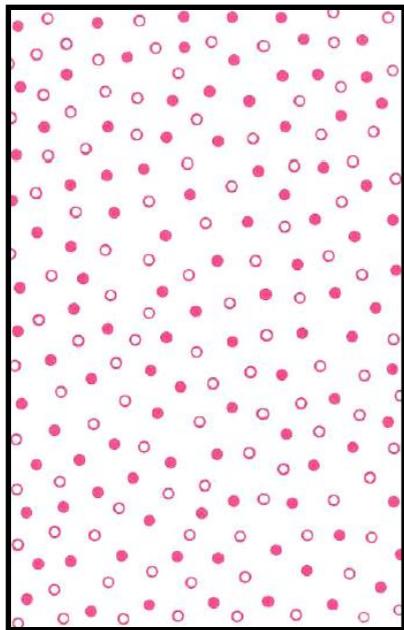
# CP-Verletzung & Materie/Antimaterie

- Vernichtung von Materie – Antimaterie bei  $t \sim 0.1 \text{ ms}$   $\rightarrow$  Erzeugung der CMB

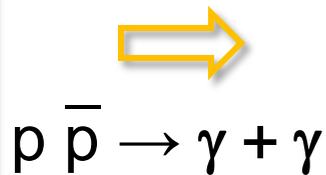
BBN: Baryon-Photon-Verhältnis  $\eta \sim 10^{-9}$

hier: **kein thermisches Gleichgewicht**

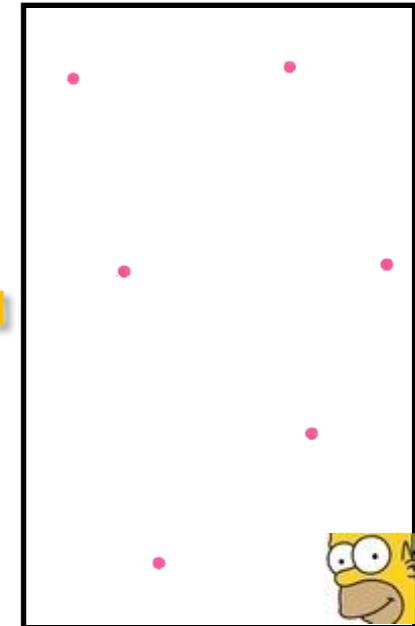
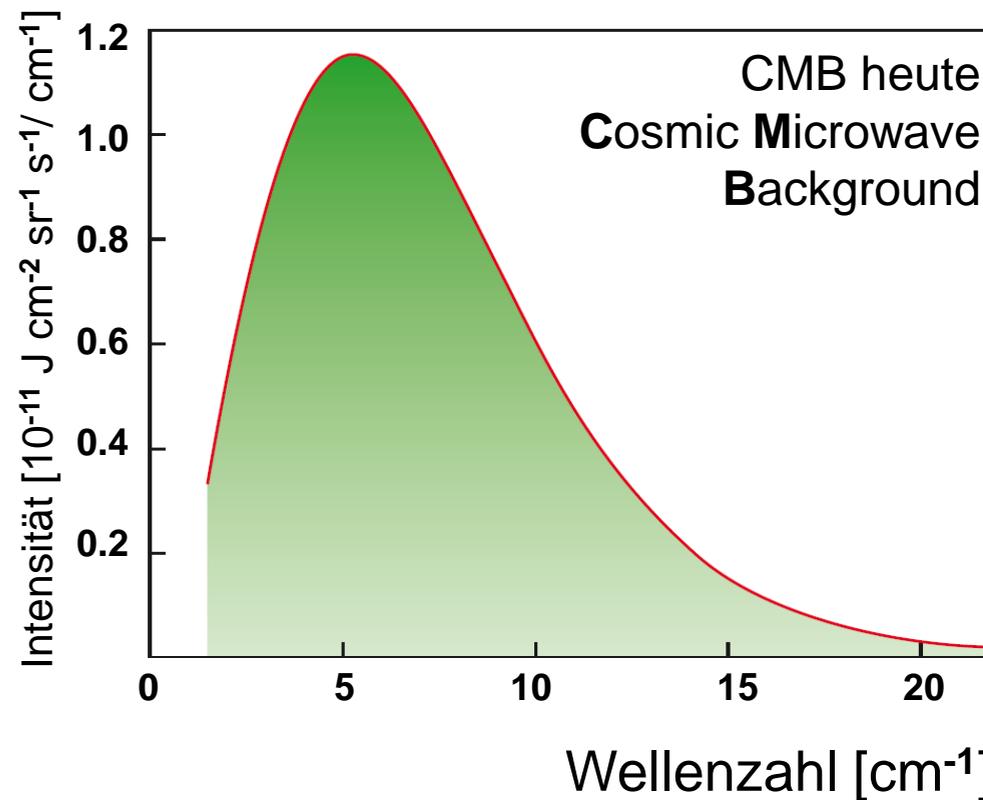
sonst wärer  $\eta \sim 10^{-18}$  !



Annihilation



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



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