

# TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Mischungen von Quarks und Neutrinos

(teilweise in Anlehnung an Skript R. Klanner/T. Schörrer)

Caren Hagner  
Achim Geiser



Universität Hamburg, IExpPh  
Sommersemester 2007

1. Die quantenmechanische Beschreibung von Elektronen
2. Feynman-Regeln und –Diagramme
3. Lagrange-Formalismus und Eichprinzip
4. QED
5. Starke Wechselwirkung und QCD
6. Schwache Wechselwirkung, elektro-schwache Vereinigung und der Higgs-Mechanismus
7. Der Higgs-Mechanismus
8. Mischung von Quarks und Leptonen
- 8.1 Eigenschaften der Neutrinos – Massen und Oszillationen - > C. Hagner
- 8.2 Antimaterie, CKM-Matrix und CP-Verletzung
9. Teilchenphysik und Kosmologie
- 9.1 Big Bang Modell
- 9.2 Dunkle Materie und Dunkle Energie
10. Jenseits des Standardmodells: Wie geht es weiter?  
– Träume der Teilchenphysiker

# Antimaterie

relativistische Schrödinger-Gleichung  
(Dirac-Gleichung)  
Zwei Lösungen:

eine mit positiver, eine mit negativer Energie

Dirac: **interpretiere negative Lösung als**

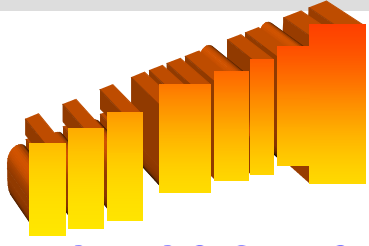
**Antiteilchen**

1932 Antielektronen (Positronen) entdeckt

1995 Antiwasserstoff (Atom aus Antiproton und  
Positron) produziert am CERN

**Im Prinzip: Konstruktion einer Antiwelt aus Antimaterie**

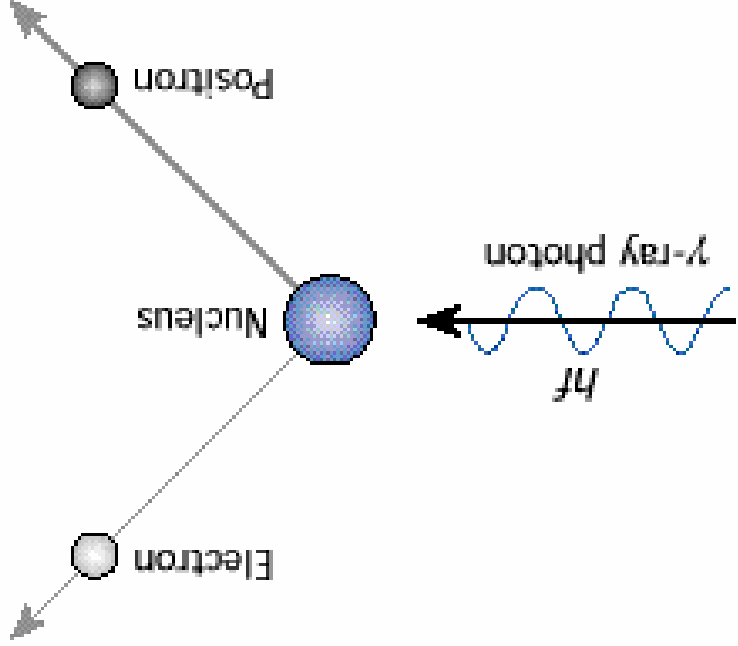
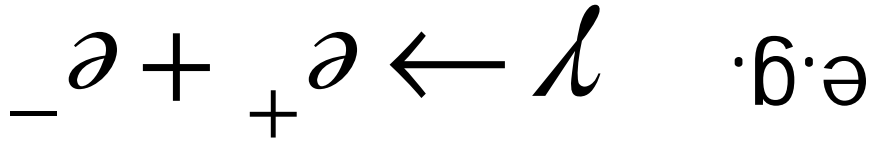
In der Praxis: Antimaterie kommt nur vor in  
Beschleunigern und kosmischer Strahlung



P. A. M.  
Dirac  
(Nobel 1933)



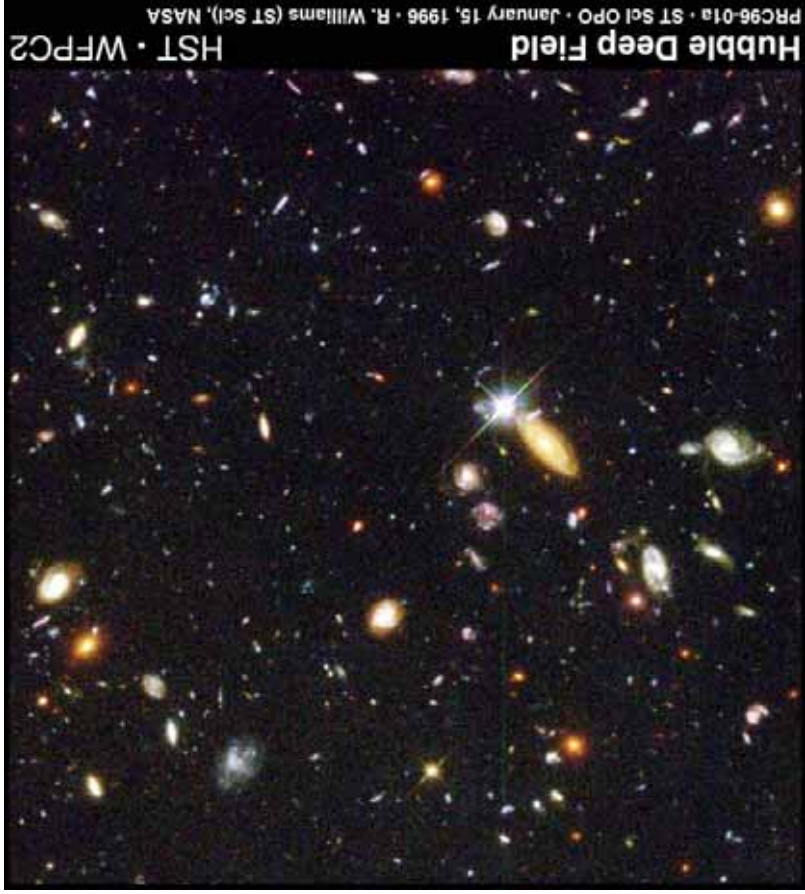
# Paarproduktion



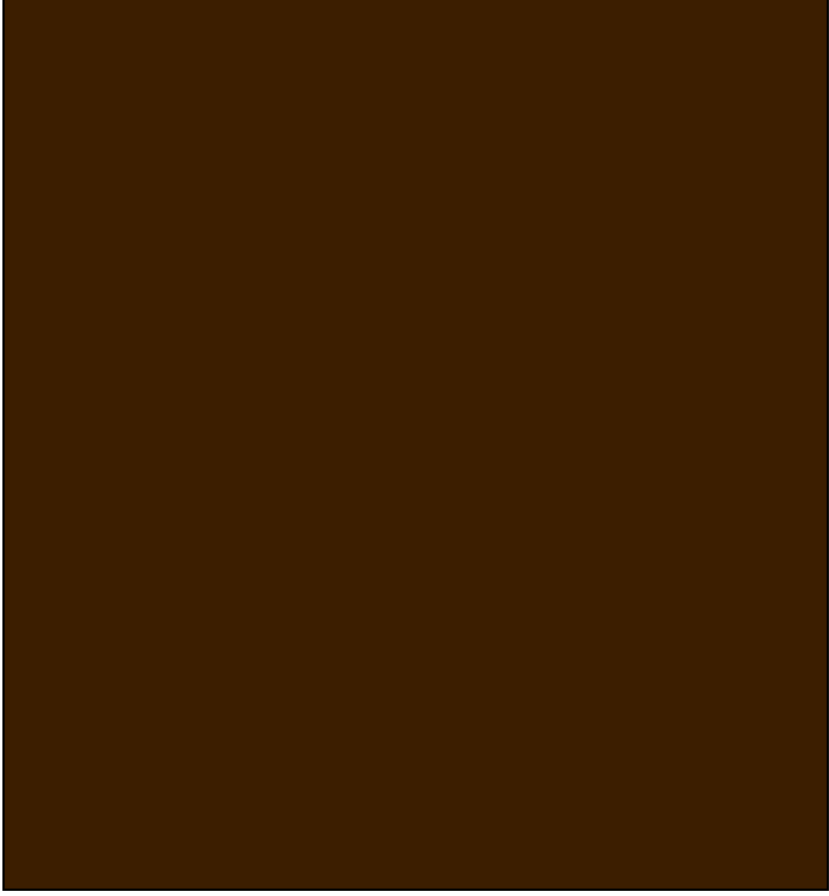
Materie und Antimaterie werden immer paarweise produziert, und annihilieren auch wieder paarweise

# Das Materie-Antimaterie-Rätsel

Warum sieht das Universum  
so aus



und nicht

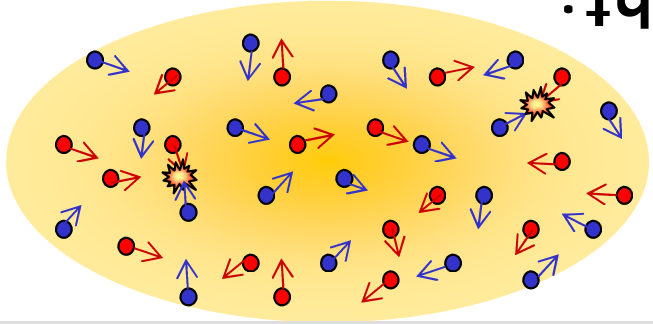


so?

So weit wir im Universum schauen können, überwiegt Materie  
-> CP-Verletzung!



-> Teilchen, Antiteilchen und Photonen im thermischen Gleichgewicht:

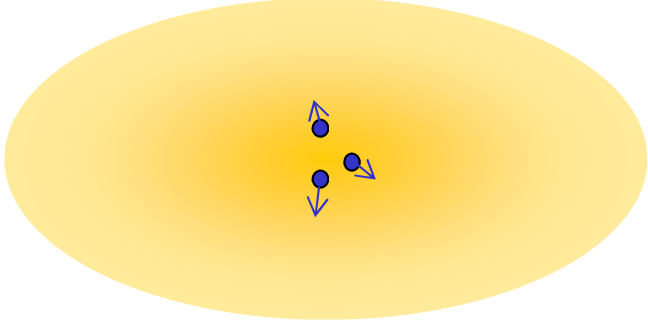


- kollidieren, annihilieren, Wiedererzeugung etc.

Kleine Differenz in fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Materie und Antimaterie ("CP violation") ?

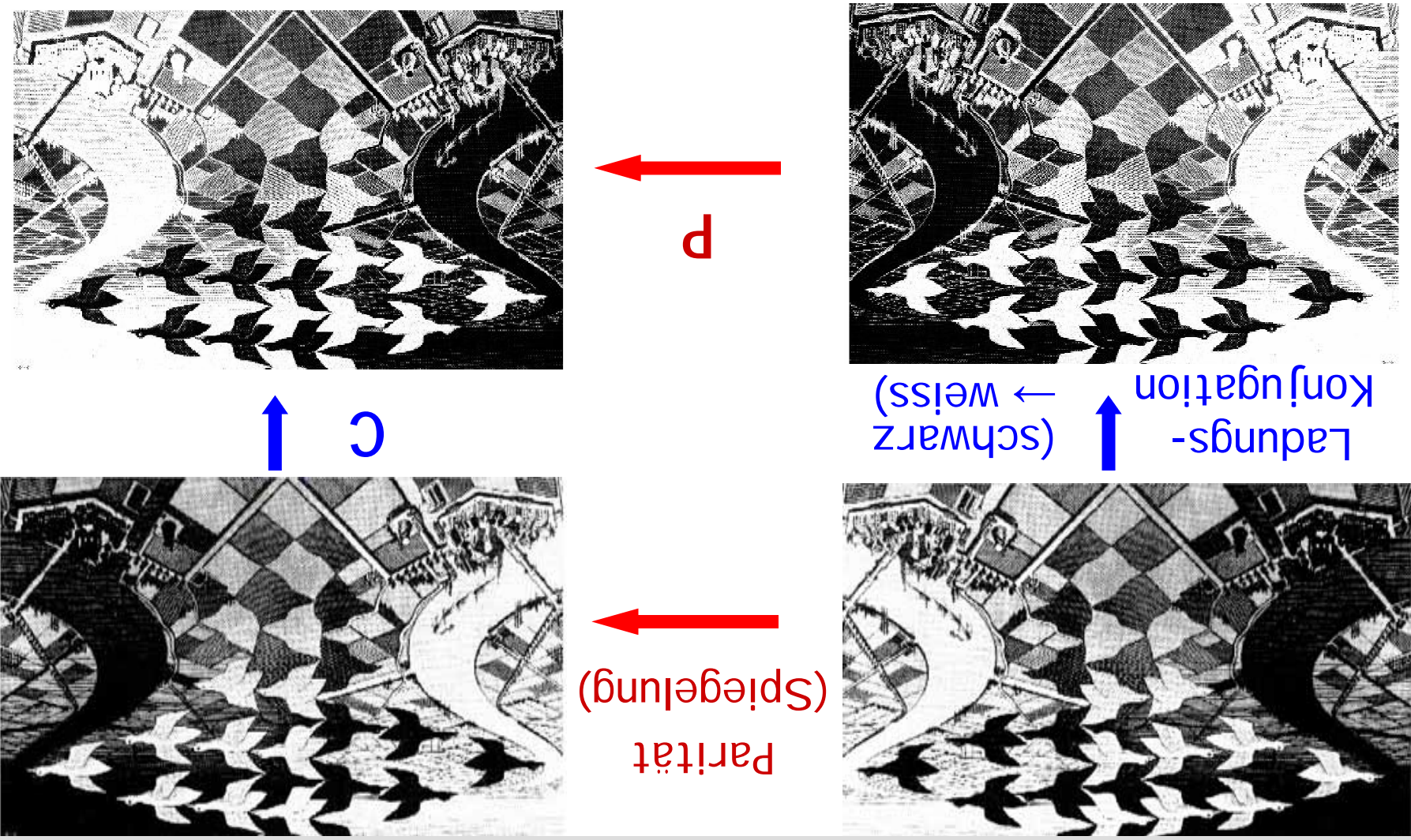
-> Materie hat geringfügig grössere Überlebenschance!

Verhältnis Baryonen (e.g. p, n) zu Photonen heute:  $\sim 1:10^9$





# CP-Symmetrie



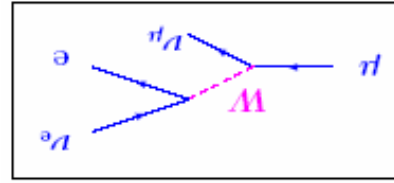
Wie schwache WW: symmetrisch unter CP (auf den ersten Blick!)  
 Interessantes neues Physikpotential !

# 8.2 CKM-MATRIX und CP-VERLETZUNG

Wiederholung: Cabibbo Winkel  $\theta_c$

$$\begin{pmatrix} e \\ \mu \\ \tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{en} \\ V_{e\mu} \\ V_{e\tau} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ n \\ s \end{pmatrix}$$

Fermionen kommen in Doublets: W-Bosonen vermitteln Übergänge zwischen Familien:



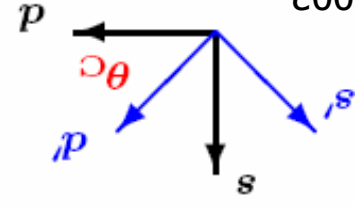
Ebenso wird beobachtet:

$$K^+ \leftrightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

Ausweg:

- starke WW erzeugt "Flavour Eigenzustände"  
- schwache WW koppelt an "gedrehte" Zustände

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



Experiment:  $\sin \theta_c = 0.223 \pm 0.002$

z.B. aus:  $\frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)} \approx \tan^2 \theta_c$

V ist eine komplexe, unitäre 3x3 Matrix → # reeller Parameter: 18-9(unitär)-5(q-Phasen)=4 Wahl (z.B.): **3 Winkel (Euler) + 1 Phase**

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

mit:  $c_{12} \equiv \cos \theta_{12}, s_{12} \equiv \sin \theta_{12}, \dots$

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

Erweiterung auf 3 Quarkfamilien: Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix

Anmerkung: es erscheint, als ob u- und d-Quarks verschieden behandelt werden → nur Konvention!

Quark-Strom:  $f_n^b = \frac{1 - \gamma_5}{2} \gamma_\mu \bar{u}(n, c, t) \gamma_\mu \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}$



# MESSUNG DER CKM-MATRIX-ELEMENTE

Experimentelle Werte:

$$V = \begin{pmatrix} 0.9742 - 0.9757 & 0.219 - 0.226 & 0.002 - 0.005 \\ 0.219 - 0.225 & 0.9734 - 0.9749 & 0.035 - 0.043 \\ 0.004 - 0.014 & 0.035 - 0.043 & 0.9990 - 0.9993 \end{pmatrix}$$

Phase:  $\delta = 59^\circ \pm 13^\circ$

Messungen der CKM-Matrixelemente kommen von:

– $ V_{ud}  = 0.9734 \pm 0.0008$	O(0.1%)	aus dem Neutron- und aus Kern $\beta$ -Zerfällen.
– $ V_{us}  = 0.2196 \pm 0.0026$	O(1%)	aus $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu_e$ und $K^0 \rightarrow \pi^\pm e^\pm \nu_e$ Zerfällen.
– $ V_{cd}  = 0.224 \pm 0.016$	O(7%)	aus Neutrino-Nukleon Streuung an d Quarks, $\nu_\mu d \rightarrow e \mu^-$ und $\bar{\nu}_\mu \bar{d} \rightarrow e^+ \mu^+$ .
– $ V_{cs}  = 0.996 \pm 0.013$	O(1%)	indirekt aus W Zerfällen am LEP Beschleuniger.
– $ V_{ub}  = 0.0036 \pm 0.0007$	O(20%)	exklusive aus $B \rightarrow \pi^0 (\rho^0) \ell \nu_e$ . aus semileptonischen $b \rightarrow u \ell^- \nu_e$ Zerfällen, und der Heavy Quark Effective Theory, HQET.
– $ V_{cb}  = 0.0412 \pm 0.0020$	O(5%)	aus $B^+ \rightarrow D^{*+} \ell^+ \nu_e$ Zerfällen unter Benutzung klein oder gut bekannt. Damit folgt $ V_{cs} $ .
– $ V_{ub}  = 0.97 \pm 0.16$	O(15%)	aus semileptonischen $t \rightarrow q \ell^+ \nu_e$ Zerfällen,
– $ V_{ts} $ und $ V_{td} $		Die Elemente konnten noch nicht bestimmt werden.

$$q = b, s, d, \text{ folgt } \frac{|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2}{|V_{cb}|^2} = 0.94 \pm 0.31 - 0.24$$

# STRANGENESS-OZILLATIONEN

Wegen Erhaltung der Seltsamkeit S werden durch die starke WW Eigenzustände von S erzeugt:

$$S = +1: K_0 = \bar{s}d \quad S = -1: \bar{K}_0 = sd$$

Transformationseigenschaften unter C, P, CP:  
(Erinnerung:  $P|f\rangle = +|f\rangle, P|\bar{f}\rangle = -|\bar{f}\rangle$ )

$$C|K_0\rangle = |\bar{K}_0\rangle, P|K_0\rangle = -|\bar{K}_0\rangle \Rightarrow CP|K_0\rangle = -|K_0\rangle$$

$$C|\bar{K}_0\rangle = |K_0\rangle, P|\bar{K}_0\rangle = -|K_0\rangle \Rightarrow CP|\bar{K}_0\rangle = -|\bar{K}_0\rangle$$

→ weder  $K_0$  noch  $\bar{K}_0$  sind CP-Eigenzustände;

die CP-Eigenzustände sind:

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_0\rangle + |\bar{K}_0\rangle) \Rightarrow CP|K_1\rangle = -|K_1\rangle \quad [CP|3\pi\rangle = -|3\pi\rangle]$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K_0\rangle - |\bar{K}_0\rangle) \Rightarrow CP|K_2\rangle = +|K_2\rangle \quad [CP|2\pi\rangle = +|2\pi\rangle]$$

schwache WW verletzt P u. C:  $P\psi_L = \psi_R, C\psi_L = \psi_L$

aber CP ist (fast %) erhalten!

Experiment: 2 neutrale K-Mesonen

- $K_S$  Zerfall (vor allem) in  $2\pi, \tau = 9 \cdot 10^{-11}$  s
- $K_L$  Zerfall (vor allem) in  $3\pi, \tau = 5 \cdot 10^{-8}$  s

$$\Leftrightarrow |K_L\rangle \approx |K_1\rangle, |K_S\rangle \approx |K_2\rangle$$

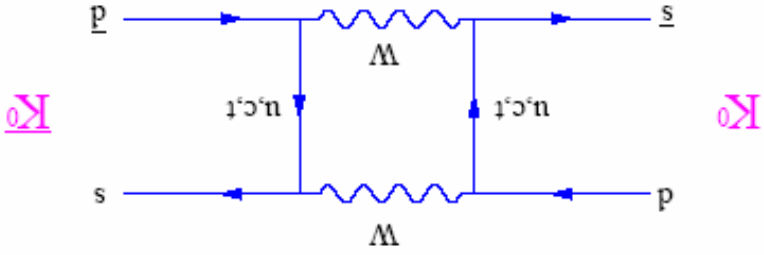
# STRANGENESS-OZILLATIONEN

Für die Zerfälle der  $K_i$  ( $i=L,S$ ) gilt im Ruhesystem:

$$\Rightarrow |K_i(t)\rangle = e^{-iMt} e^{-\Gamma t/2} |K_i(0)\rangle \quad \text{so dass}$$

$$\left| \langle K_i(t) | K_j(0) \rangle \right|_2 = \left| e^{-iMt} e^{-\Gamma t/2} \langle K_j(0) | K_i(0) \rangle \right|_2 = e^{-\Gamma t}$$

In der schwachen WW:  $K_0 \leftrightarrow \bar{K}_0 \quad \Delta S = 2$



$$A^{K_0}(t) = \langle \bar{K}_0(t) | K_0(0) \rangle = \left\langle \bar{K}_0(0) \left| K^T(0) e^{-iM^T t} e^{-\Gamma^T t/2} \right| K^T(0) + K^S(0) \right\rangle$$

$$I^{K_0} = \left| A^{K_0} \right|_2 = \frac{1}{2} \left( e^{-\Gamma t} + e^{-\Gamma^T t} \right)$$

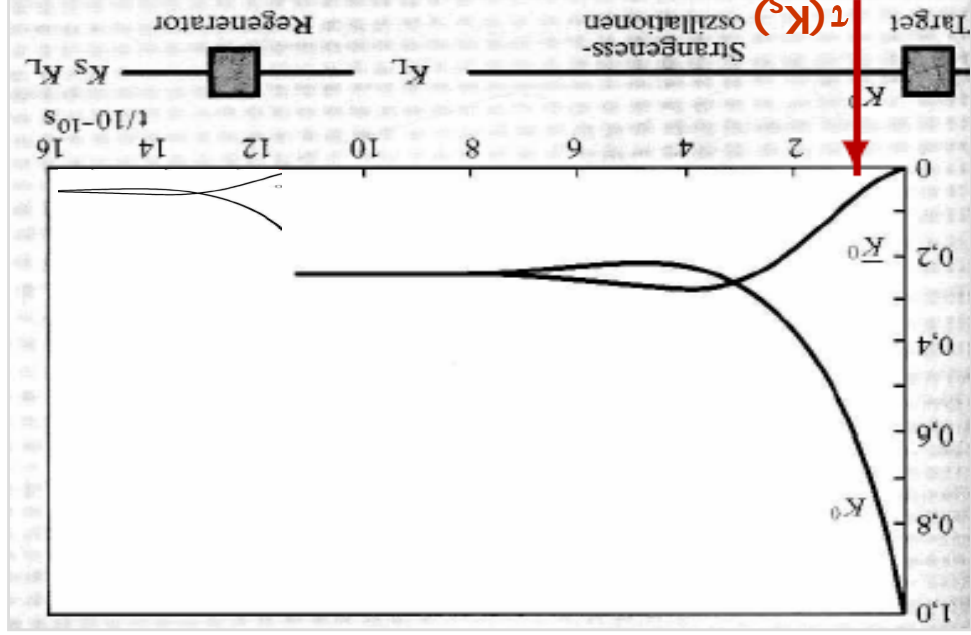
$$- e^{-\Gamma t} e^{-i(M^T t/2)} + e^{-\Gamma^T t} e^{-i(M^T t/2)}$$

$$= \frac{1}{2} \left( e^{-\Gamma t} + e^{-\Gamma^T t} \right) \cos(\Delta M \cdot t) e^{-i(\Gamma + \Gamma^S)t/2}$$

→ analog zu gekoppelten Pendeln → ein bei  $t=0$  reiner  $K_0$ -Strahl "oszilliert"  $K_0 \leftrightarrow \bar{K}_0$  mit Frequenz  $\Delta M = |M_L - M_S|$

# STRANGENESS-OZILLATIONEN-CP-VERLETZUNG

$K_0 - \bar{K}_0$ -Ozillationen:



Regeneration:

- da  $c_{K_0}^{K_0} \gg c_{K_0}^{K_0}$  ( $K_0$  kann Hyperonen ( $S=-1$ ) erzeugen)  $\rightarrow$  kann  $I(K_0)$  gemessen werden; außerdem können aus dem  $K_L$ -Strahl  $K_S$  „regeneriert“ werden.

- aus Messungen:  $\Delta M = (3.490 \pm 0.006) \cdot 10^{-6} eV$

( $M_K=498$  MeV iii)

(10<sup>-14</sup>: kleiner Effekt 2<sup>te</sup> Ordnung in der schwachen WW – dank Quantenmechanischer Interferenz präzise vermessen)

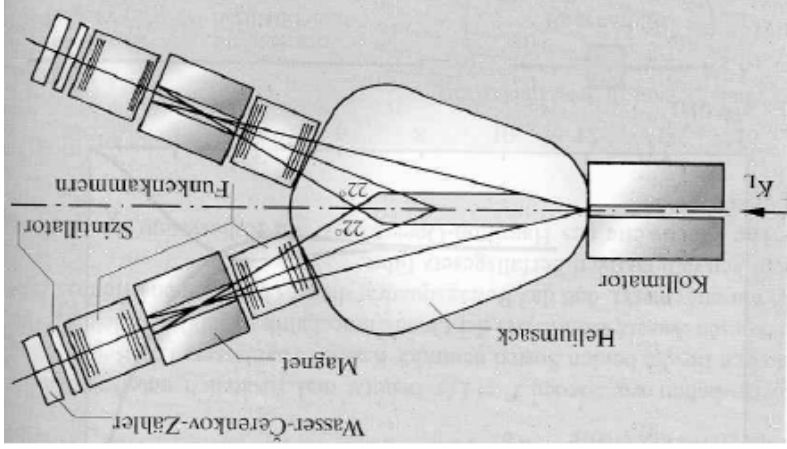
$B_0 - \bar{B}_0$ -Ozillationen:

analog zu  $K$ , aber Zustände  $B_L$  und  $B_H$  haben praktisch gleiche Lebensdauern und ( $\Delta M=3.22 \pm 0.04$ )  $10^{-4} eV$  (bei  $M_B=5.3$  GeV)

Entdeckung der CP-Verletzung bei  $K_0$ s

1964: Christenson, Cronin, Fitch, Turlay (BNL):

$$\frac{\Gamma(K_0^L \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_0^L \rightarrow \text{all})} = (2.084 \pm 0.032) \cdot 10^{-3}$$



$\rightarrow K_L, K_S$  sind keine reinen CP-Eigenzustände

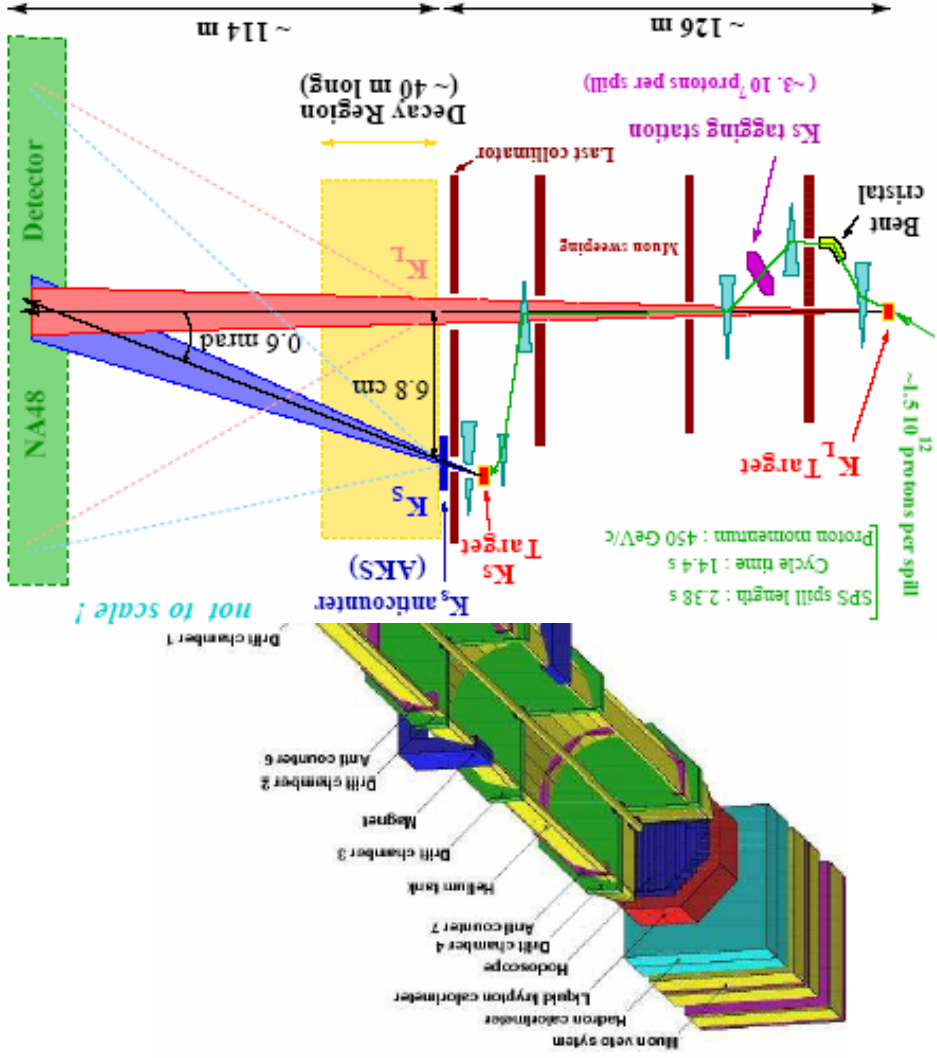
$$|K_S\rangle = (|K_2\rangle + \epsilon |K_1\rangle) / \sqrt{1 + |\epsilon|^2}$$

$$|K_L\rangle = (|K_2\rangle - \epsilon |K_1\rangle) / \sqrt{1 + |\epsilon|^2}$$

$$\epsilon \gg 1$$

# CP-VERLETZUNG IM K-ZERFALL

CERN NA48 Experiment (1988-2000!)



$$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (16.7 \pm 2.6) \cdot 10^{-4}$$

~~CP~~ auch im Zerfall

Def.:  $\eta_{+-} = \frac{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_L \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_S \rangle}$

mit  $\eta_{+-} = |\eta_{+-}| e^{i\phi_{+-}}$

falls CP im Zerfall erhalten, i.e.  $\langle \pi^+ \pi^- | T | K_1 \rangle = 0$

$$\eta_{+-} = \frac{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_1 \rangle + \epsilon \langle \pi^+ \pi^- | T | K_2 \rangle}{\epsilon \langle \pi^+ \pi^- | T | K_1 \rangle + \langle \pi^+ \pi^- | T | K_2 \rangle} = \epsilon$$

falls CP im Zerfall verletzt

$$\eta_{+-} \approx \epsilon + \frac{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_1 \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- | T | K_2 \rangle} = \epsilon + \epsilon'$$

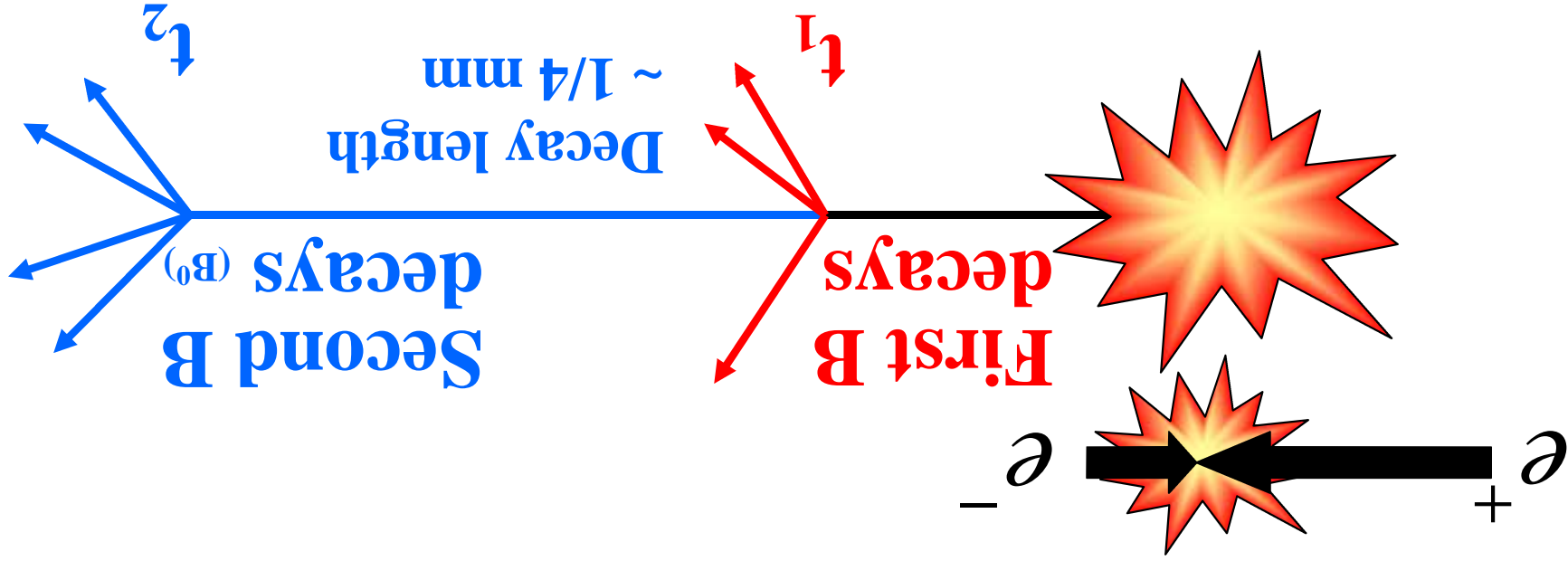
CP-Verletzung „Mischung“  $\Delta S = 2$  „Amplitude“  $\Delta S = 1$

$$\text{für } k_1 \rightarrow \pi_0 \pi_0: \quad \eta_{00} \approx \epsilon + \frac{\langle \pi_0 \pi_0 | T | K_1 \rangle}{\langle \pi_0 \pi_0 | T | K_2 \rangle} = \epsilon - 2\epsilon'$$

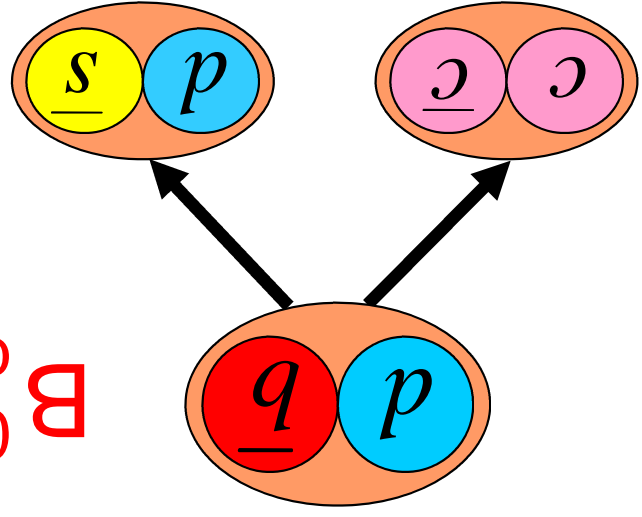
(Ableitung verwendet CPT + Isospin-Argumente)  
experimentell gemessen wird:

$$\text{Re}\left(\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right) = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right) = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\Gamma_L(\pi_0 \pi_0) \Gamma_S(\pi^+ \pi^-)}{\Gamma_L(\pi^+ \pi^-) \Gamma_S(\pi_0 \pi_0)}\right)$$

# CP-Verletzung in B-Zerfällen



$B_0^d$  (or  $\bar{B}_0^d$ )



$$\text{Asymmetry}(t) = \frac{B_0^- - B_0^+}{B_0^- + B_0^+}$$

Simply count decays as function of  $t$

# CP-Verletzung in B-Zerfällen

Current state of the art from Babar at SLAC

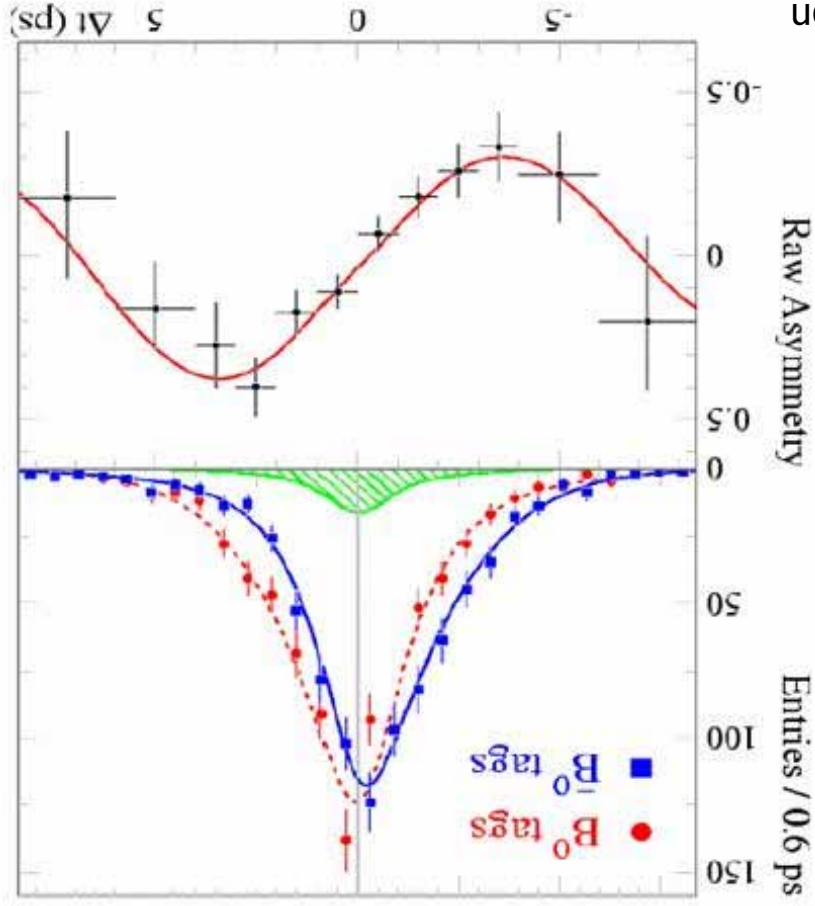
B and anti-B  
are indeed  
different

(also found  
earlier for  
K decays: )



James Watson Cronin (Nobel 1980)

Val  
Logsdon  
Fitch



Weak  
Interactions  
violate CPT



# CP-VERLETZUNG UND DIE CKM-MATRIX

→ Experimente Babar und Belle,

Außerdem ab 2008 LHCb-Experiment am LHC

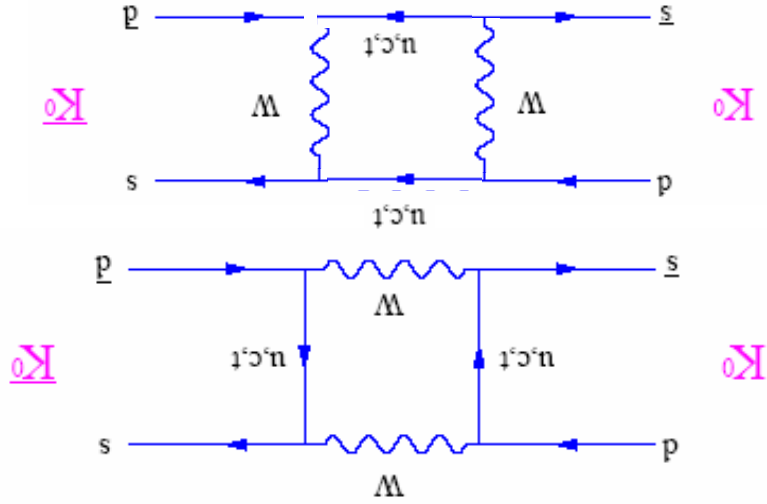
## Zusammenfassung:

- Quarks: Eigenzustände starke WW (Flavour)  $\neq$  Eigenzust. schwache WW  $\rightarrow$  W koppelt an Zustände, die um CKM-Matrix  $V^{CKM}$  gedreht
- $V^{CKM}$ : 3x3 unitäre Matrix  $\rightarrow$  3 Winkel + 1 Phase
- $V^{CKM}$ : experimentelle Bestimmung vor allem aus Teilchenzerfällen
- $K^0$ -System: starke WW erzeugt Flavour-Eigenzustände, schwacher Zerfall verletzt Flavour, aber erhält ( $\sim$ ) CP  $\rightarrow$  Flavour-Oszillationen

- CP-Symmetrie in der schwachen WW %o verletzt
- CP-Verletzung sowohl in der  $K^0$ -Mischung wie im Zerfall experimentell beobachtet
- CP-Verletzung kann im SM erklärt werden, wenn die  $V^{CKM}$ -Phase  $\delta \neq 0$
- CP-Effekte im  $B^0$ ,  $B_s$ -System  $>$  als bei  $K^0$ s  $\rightarrow$  aktives experimentelles Programm

**Alle experimentellen Ergebnisse können im SM erklärt werden** (SM sagt aber  $V^{CKM}$  nicht vorher)

Feynmandiagramme zu  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$



$$M \propto V_{*u}^{ud} V_{*u}^{us} V_{*u}^{ns} f^n + V_{*c}^{cd} V_{*c}^{cs} V_{*c}^{cs} f^c + V_{*t}^{td} V_{*t}^{ts} V_{*t}^{ts} f^t$$

CP-Verletzung:  $\langle K^0 | T | K^0 \rangle \neq \langle \bar{K}^0 | T | K^0 \rangle$  wenn  $\delta \neq 0$

- CP bei  $K^0$  klein ergibt sich aus den experimentell gefundenen Werten von  $V^{ub}$
- Berechnung von  $\epsilon$  wegen QCD schwierig
- **CP-Verletzung bei  $B^0 \bar{B}^0, B_s \bar{B}_s$**  wesentlich stärker,  $\rightarrow$  spezielle  $e^+e^-$  Speicherringe

	KEK-B	PEP-II
$E_{e^+}$ [GeV]	3.1	3.5
$E_{e^-}$ [GeV]	9.0	8.0
$L_{int}$ [fb $^{-1}$ ]	260	440
$B^0 \bar{B}^0$ [ $10^6$ ]	290	490

Speicherringe mit aktivem Forschungsprogramm  $\rightarrow$

# Beitrag zum Antimaterie-Rätsel von HERA?

- Bisher gemessene CP-Verletzung im Standardmodell nicht stark genug um Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären

- mögliche Lösung: CP-Verletzung in Neutrino-Oszillationen und/oder starke Leptonzahl-Asymmetrie im frühen Universum.

- Standard-Modell sagt Baryon- und Leptonzahlverletzung voraus über

sogenannte "Sphaleron"-Tunnelprozesse: konvertiere 3 Leptonen in 3 Baryonen!

- seltener Prozess bei sehr hohen Energien -> bisher nicht beobachtbar

- verwandter Prozess: QCD-"Instantonen"

- Prinzipiell beobachtbar bei HERA!

- wir suchen noch ...

