

TEILCHENPHYSIK FÜR FORTGESCHRITTENE

Mischungen von Quarks (und Neutrinos)
(teilweise in Anlehnung an Skript R. Klanner/T. Schörner)

Olaf Behnke
Achim Geiser



Universität Hamburg, IExpPh
Sommersemester 2010

ÜBERBLICK

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 -> Spezialvorlesung
 - 8.2 Antimaterie, CKM-Matrix und CP-Verletzung**
9. 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

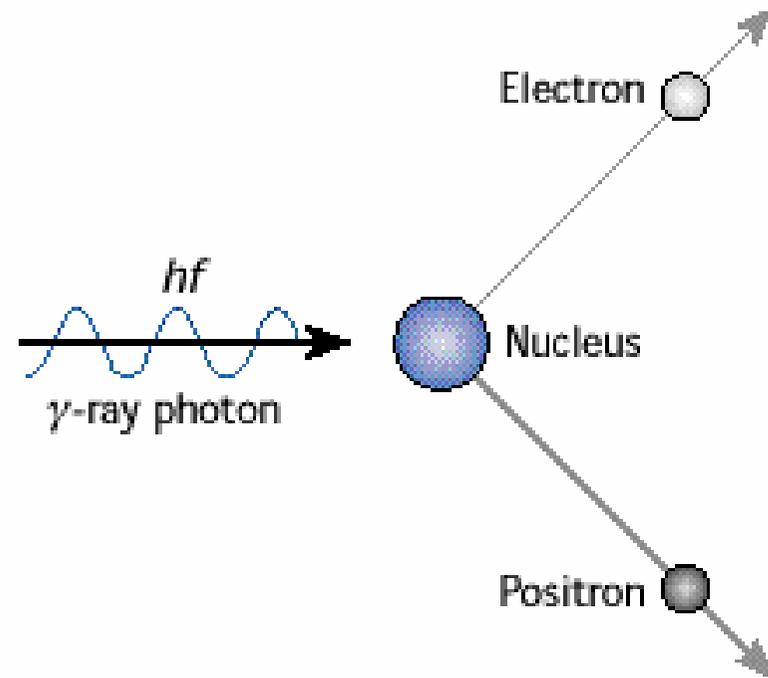


P.A.M.
Dirac
(Nobel 1933)

Warum???

Paarproduktion

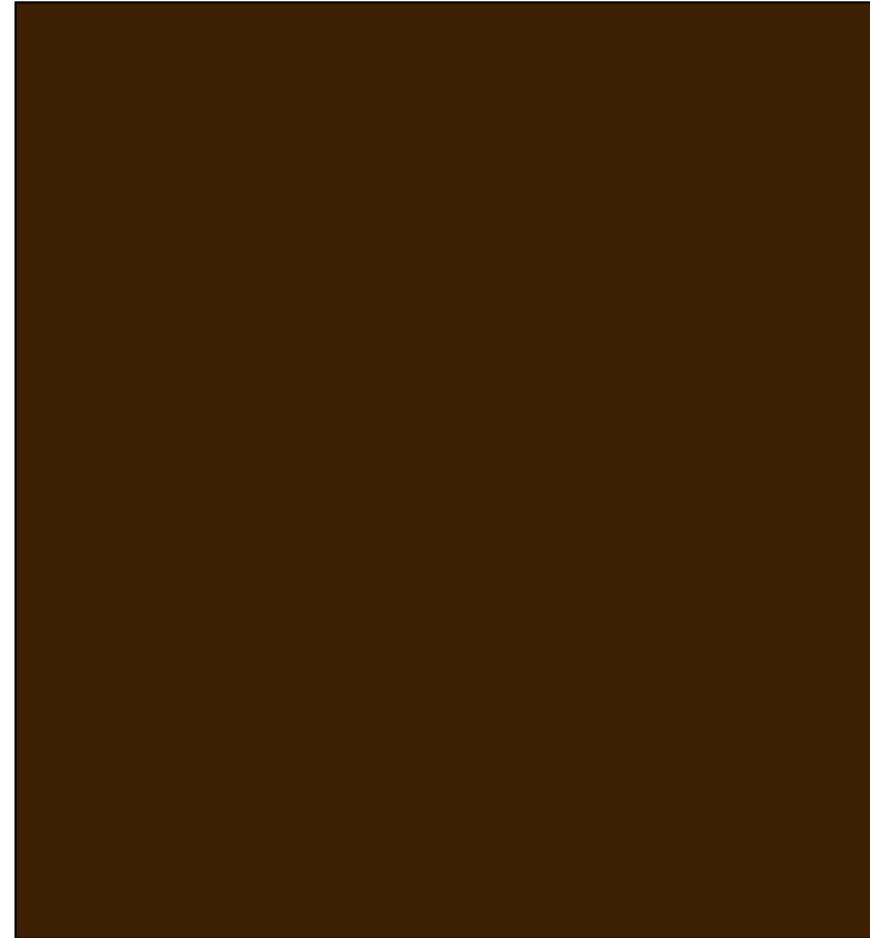
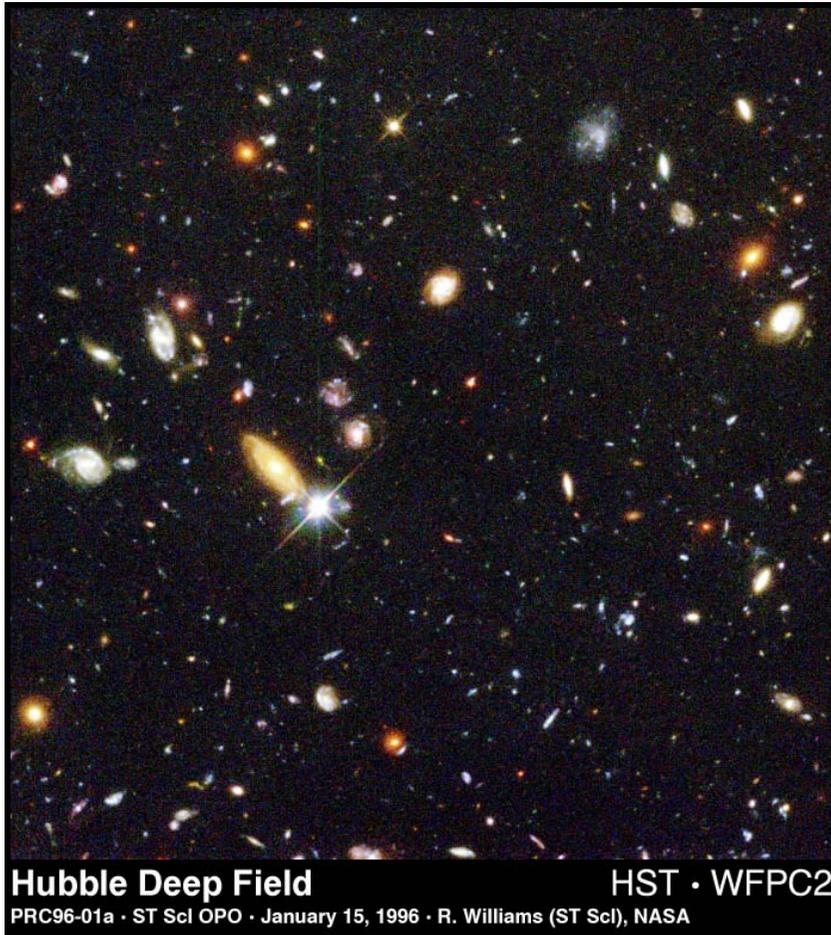
e.g. $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



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?

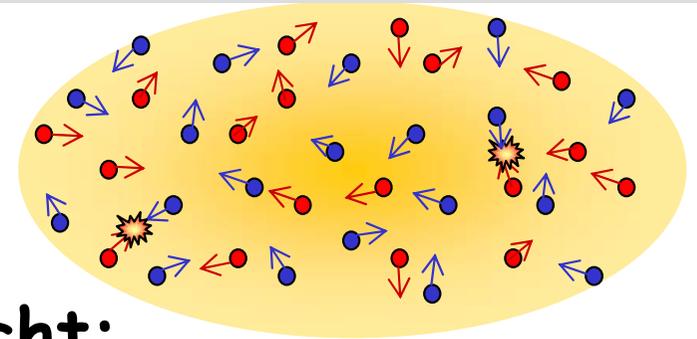


So weit wir im Universum schauen können, überwiegt Materie
-> CP-Verletzung!

Das Materie-Antimaterie-Rätsel

frühes Universum

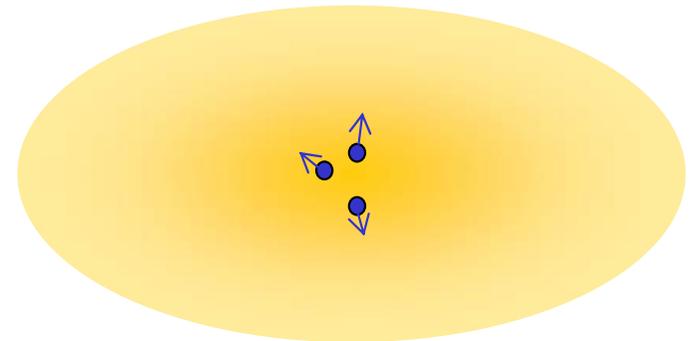
- > Teilchen, Antiteilchen und Photonen im thermischen Gleichgewicht:
- kollidieren, annihilieren, Wiedererzeugung etc.



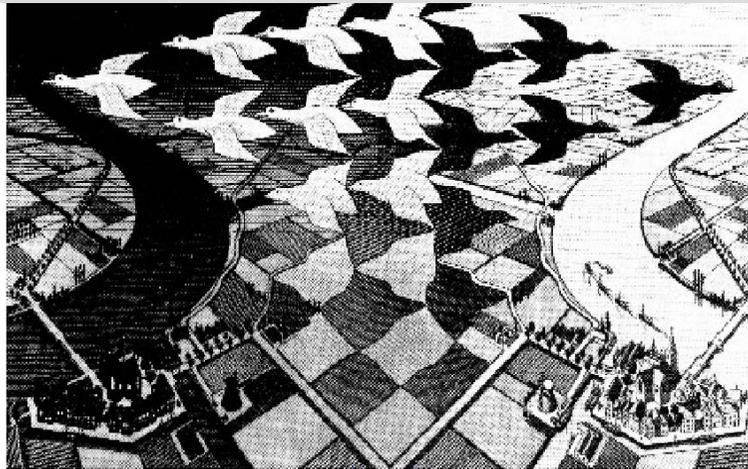
Kleine Differenz in fundamentalen Wechselwirkungen zwischen Materie und Antimaterie ("CP violation") ?

- > Materie hat geringfügig grössere Überlebenschance!

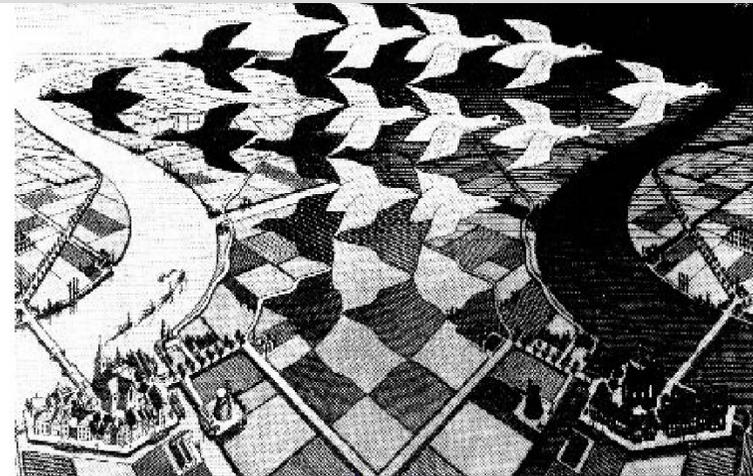
Verhältnis Baryonen (e.g. p, n) zu Photonen heute: $\sim 1:10^9$



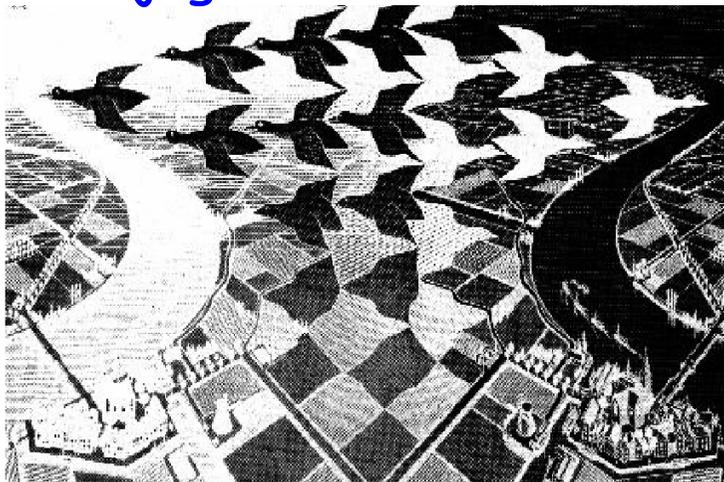
CP-Symmetrie



Parität
(Spiegelung)

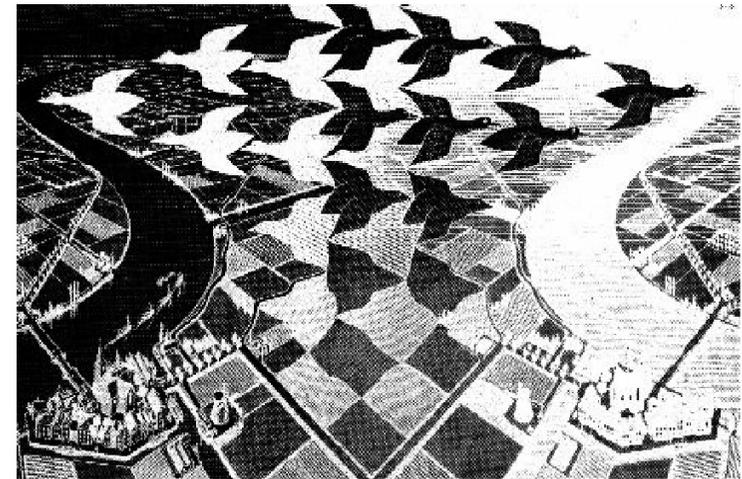


Ladungs-
Konjugation ↓ (schwarz
→ weiss)



C ↓

P
→



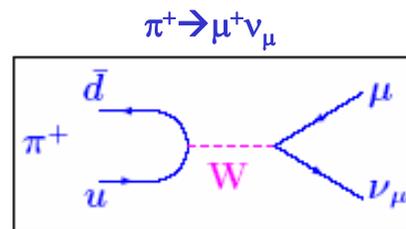
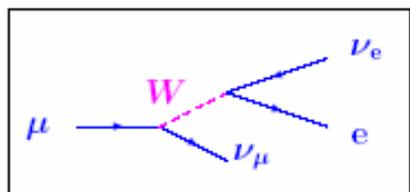
Wie schwache WW: symmetrisch unter CP (auf den ersten Blick!)
Interessantes neues Physikpotential !

8.2 CKM-MATRIX und CP-VERLETZUNG

Wiederholung: **Cabibbo Winkel** θ_c

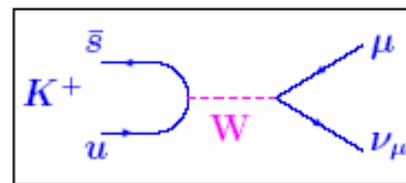
Fermionen kommen in Dubletts: $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$

W-Bosonen vermitteln Übergänge zwischen Familien:



Ebenso wird beobachtet:

$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$



Anmerkung:

- es erscheint, als ob u- und d-Quarks verschieden behandelt werden \rightarrow nur Konvention!

Erweiterung auf 3 Quarkfamilien:

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix

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

Quark-Strom:

$$j_q^\mu = (\bar{u}, \bar{c}, \bar{t}) \gamma^\mu \frac{1 - \gamma^5}{2} \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}$$

V ist eine komplexe, unitäre 3x3 Matrix \rightarrow

reeller Parameter: $18 - 9(\text{unitär}) - 5(\text{q-Phasen}) = 4$

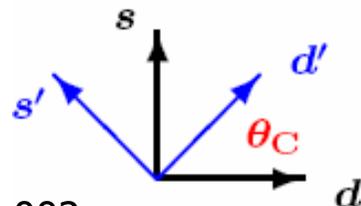
Wahl (z.B.): **3 Winkel** (Euler) + **1 Phase**

Ausweg:

- starke WW erzeugt „Flavour Eigenzustände“
- schwache WW koppelt an „gedrehte“ Zustände

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

u \rightarrow s Kopplung $\sim \sin \theta_c$
u \rightarrow d Kopplung $\sim \cos \theta_c$



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

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

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

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

MESSUNG DER CKM-MATRIX-ELEMENTE

Experimentelle Werte:

$$V = \begin{pmatrix} 0.9742 - 0.9757 & 0.219 - 0.226 & 0.002 - 0.005 \\ 0.219 - 0.225 & 0.9734 - 0.9749 & 0.035 - 0.043 \\ 0.004 - 0.014 & 0.035 - 0.043 & 0.9990 - 0.9993 \end{pmatrix} \quad \text{Phase: } \delta = 59^\circ \pm 13^\circ$$

Messungen der CKM-Matrixelemente kommen von:

– $ V_{ud} = 0.9734 \pm 0.0008$	$O(0.1\%)$	aus dem Neutron- und aus Kern β -Zerfällen.
– $ V_{us} = 0.2196 \pm 0.0026$	$O(1\%)$	aus $K^\pm \rightarrow \pi^0 e^\pm \nu_e$ und $K^0 \rightarrow \pi^\mp e^\pm \nu_e$ Zerfällen.
– $ V_{cd} = 0.224 \pm 0.016$	$O(7\%)$	aus Neutrino-Nukleon Streuung an d Quarks, $\nu_\mu d \rightarrow c \mu^-$ und $\bar{\nu}_\mu \bar{d} \rightarrow \bar{c} \mu^+$.
– $ V_{cs} = 0.996 \pm 0.013$	$O(1\%)$	indirekt aus W Zerfällen am LEP Beschleuniger. Das Verhältnis von leptonischen, $W \rightarrow \ell \nu$ mit $\ell = e, \mu$, und hadronischen, z.B. $W \rightarrow c s$, Zerfällen, liefert $\sum_{i,j} V_{ij} ^2$ mit $i = u, c$ und $j = d, s, b$. Die anderen Terme in der Summe sind entweder klein oder gut bekannt. Damit folgt $ V_{cs} $.
– $ V_{cb} = 0.0412 \pm 0.0020$	$O(5\%)$	aus $B^+ \rightarrow \bar{D}^* \ell^+ \nu_\ell$ Zerfällen unter Benutzung der Heavy Quark Effective Theory, HQET.
– $ V_{ub} = 0.0036 \pm 0.0007$	$O(20\%)$	aus semileptonischen $b \rightarrow u \ell^- \bar{\nu}_\ell$ Zerfällen, und exklusive aus $B \rightarrow \pi^0 (\rho^0) \ell \nu_\ell$.
– $ V_{tb} = 0.97^{+0.16}_{-0.12}$	$O(15\%)$	aus semileptonischen $t \rightarrow q \ell^+ \bar{\nu}_\ell$ Zerfällen, $q = b, s, d$, folgt $\frac{ V_{tb} ^2}{ V_{td} ^2 + V_{ts} ^2 + V_{tb} ^2} = 0.94^{+0.31}_{-0.24}$.
– $ V_{ts} $ und $ V_{td} $		Die Elemente konnten noch nicht bestimmt werden.

STRANGENESS-OSZILLATIONEN

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

$$S=+1: K^0 = \bar{s}d \quad S=-1: \bar{K}^0 = s\bar{d}$$

Transformationseigenschaften unter C, P, CP:

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

$$C|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle, P|K^0\rangle = -|K^0\rangle \Rightarrow CP|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

$$C|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle, P|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \Rightarrow CP|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$$

→ weder K^0 noch \bar{K}^0 sind CP-Eigenzustände;
die CP-Eigenzustände sind:

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \Rightarrow CP|K_1\rangle = -|K_1\rangle [CP|3\pi\rangle = -|3\pi\rangle]$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \Rightarrow CP|K_2\rangle = +|K_2\rangle [CP|2\pi\rangle = +|2\pi\rangle]$$

schwache WW verletzt P u. C: $P\psi_L = \psi_R, C\psi_L = \bar{\psi}_L$
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

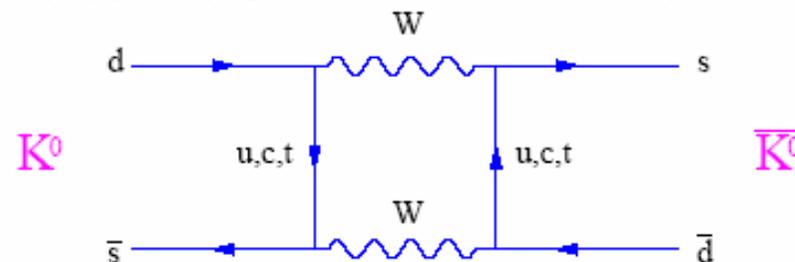
$$\Rightarrow |K_L\rangle \approx |K_1\rangle, |K_S\rangle \approx |K_2\rangle$$

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

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

$$|\langle K_i(t) | K_i(0) \rangle|^2 = |e^{iM_i t} e^{-\Gamma_i t/2} \langle K_i(0) | K_i(0) \rangle|^2 = e^{-\Gamma_i t}$$

In der schwachen WW: $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0 \quad \Delta S=2$



$$A_{\bar{K}^0}(t) = \langle \bar{K}^0(t) | K^0(0) \rangle = \frac{1}{2} \langle K_L(0) e^{iM_L t} e^{-\Gamma_L t/2} - K_S(0) e^{iM_S t} e^{-\Gamma_S t/2} | K_L(0) + K_S(0) \rangle$$

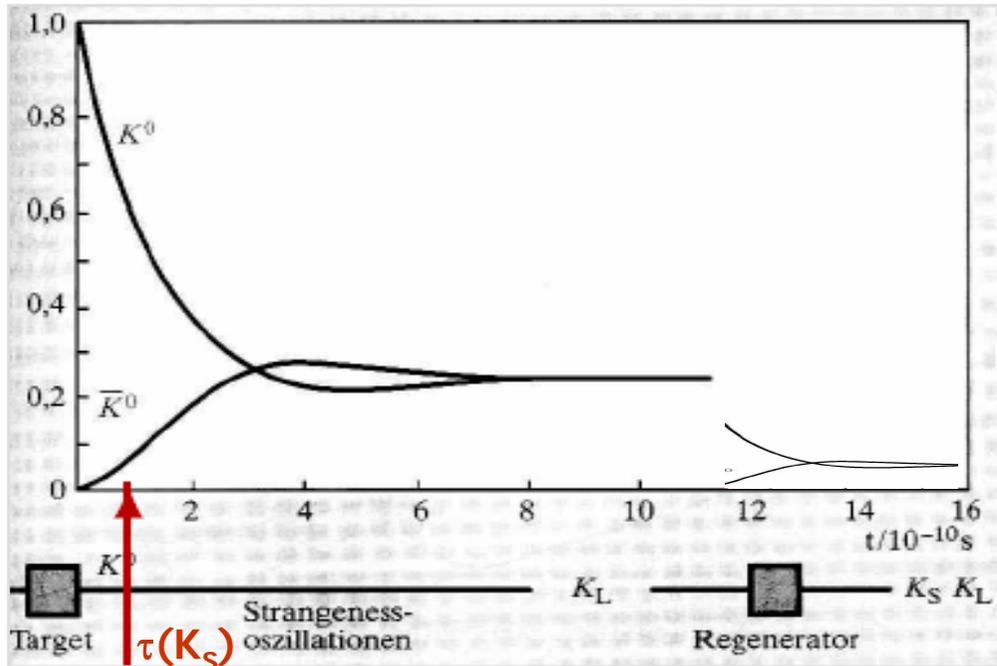
$$I_{\bar{K}^0} = |A_{\bar{K}^0}|^2 = \frac{1}{4} (e^{-\Gamma_L t} + e^{-\Gamma_S t} - e^{-(\Gamma_L + \Gamma_S)t/2} (e^{i(M_L - M_S)t} + e^{-i(M_L - M_S)t}))$$

$$= \frac{1}{4} (e^{-\Gamma_L t} + e^{-\Gamma_S t} - 2 \cos(\Delta M \cdot t) e^{-(\Gamma_L + \Gamma_S)t/2})$$

→ 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-OSZILLATIONEN-CP-VERLETZUNG

$K^0 - \bar{K}^0$ -Oszillationen:



Regeneration:

- da $\sigma_{K^0} \gg \sigma_{\bar{K}^0}$ (\bar{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: $\Delta M = (3.490 \pm 0.006) \cdot 10^{-6} eV$
($M_K = 498 \text{ MeV}$!!!)

(10^{-14} : kleiner Effekt 2^{te} Ordnung in der schwachen WW – dank Quantenmechanischer Interferenz präzise vermessen)

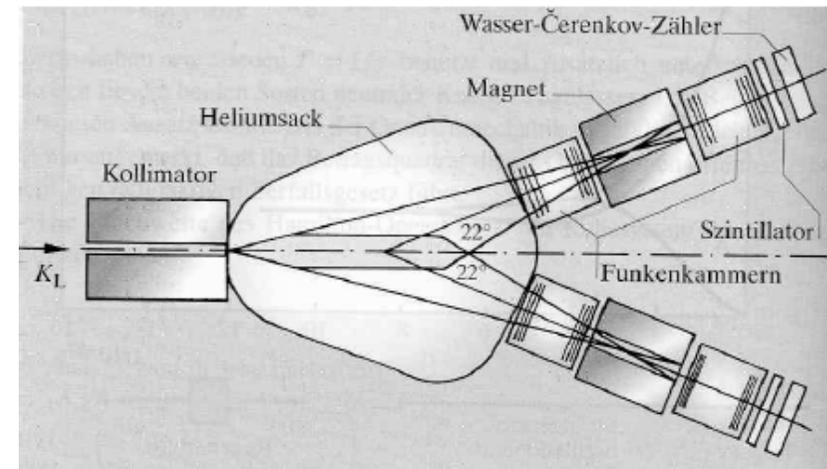
$B^0 - \bar{B}^0$ -Oszillationen:

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

Entdeckung der CP-Verletzung bei K^0 s

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

$$\frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \text{all})} = (2.084 \pm 0.032) \cdot 10^{-3}$$



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

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

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

$$\varepsilon \ll 1$$

CP-VERLETZUNG IM K-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. $\langle \pi^+ \pi^- | T | K_1 \rangle = 0$

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

falls CP im Zerfall verletzt

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

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

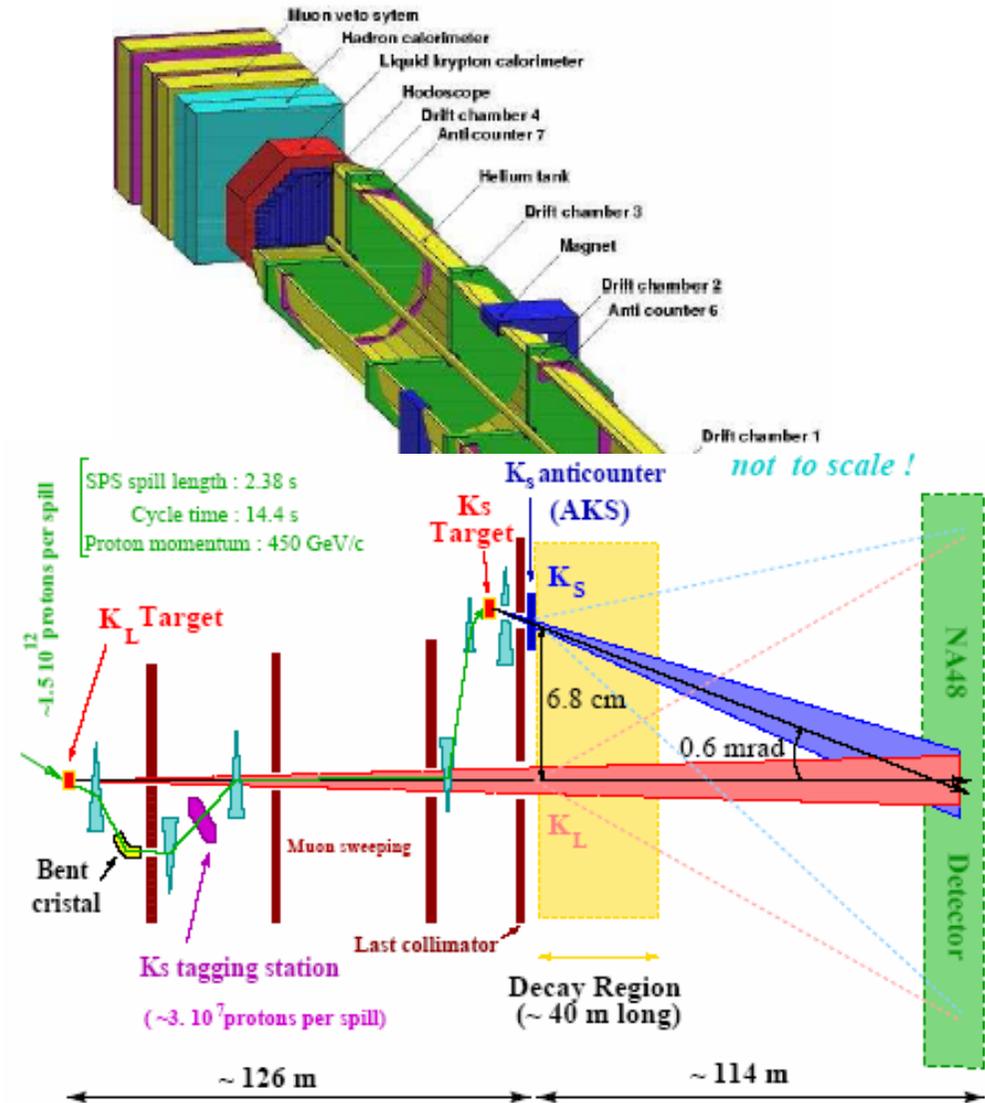
für $K_1 \rightarrow \pi^0 \pi^0$:

$$\eta_{00} \approx \varepsilon + \frac{\langle \pi^0 \pi^0 | T | K_1 \rangle}{\langle \pi^0 \pi^0 | T | K_2 \rangle} = \varepsilon - 2\varepsilon'$$

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

$$\text{Re}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right) = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}}\right) = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{\Gamma_L(\pi^0 \pi^0) \Gamma_S(\pi^+ \pi^-)}{\Gamma_S(\pi^0 \pi^0) \Gamma_L(\pi^+ \pi^-)}\right)$$

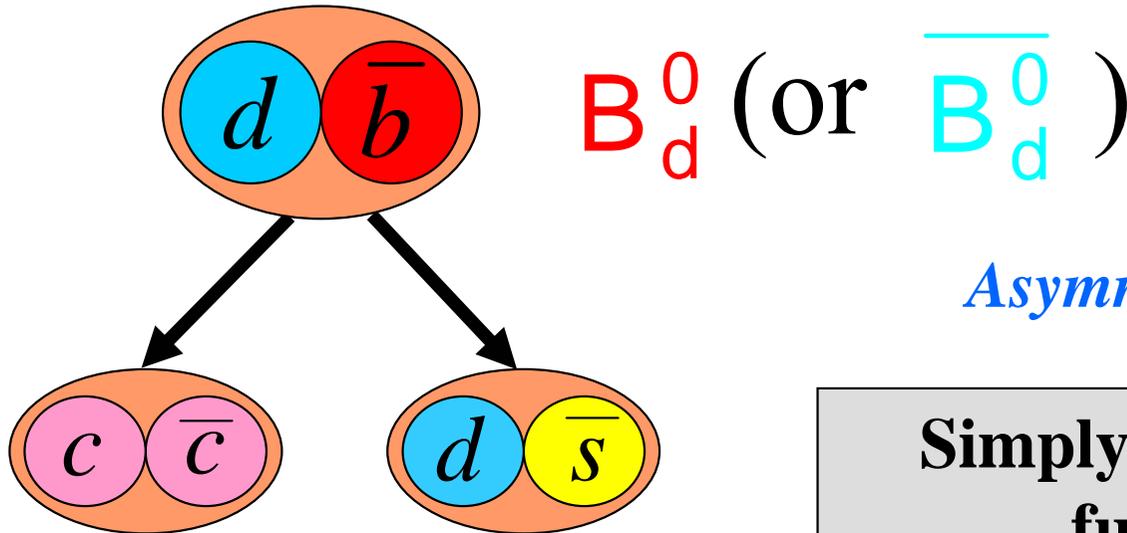
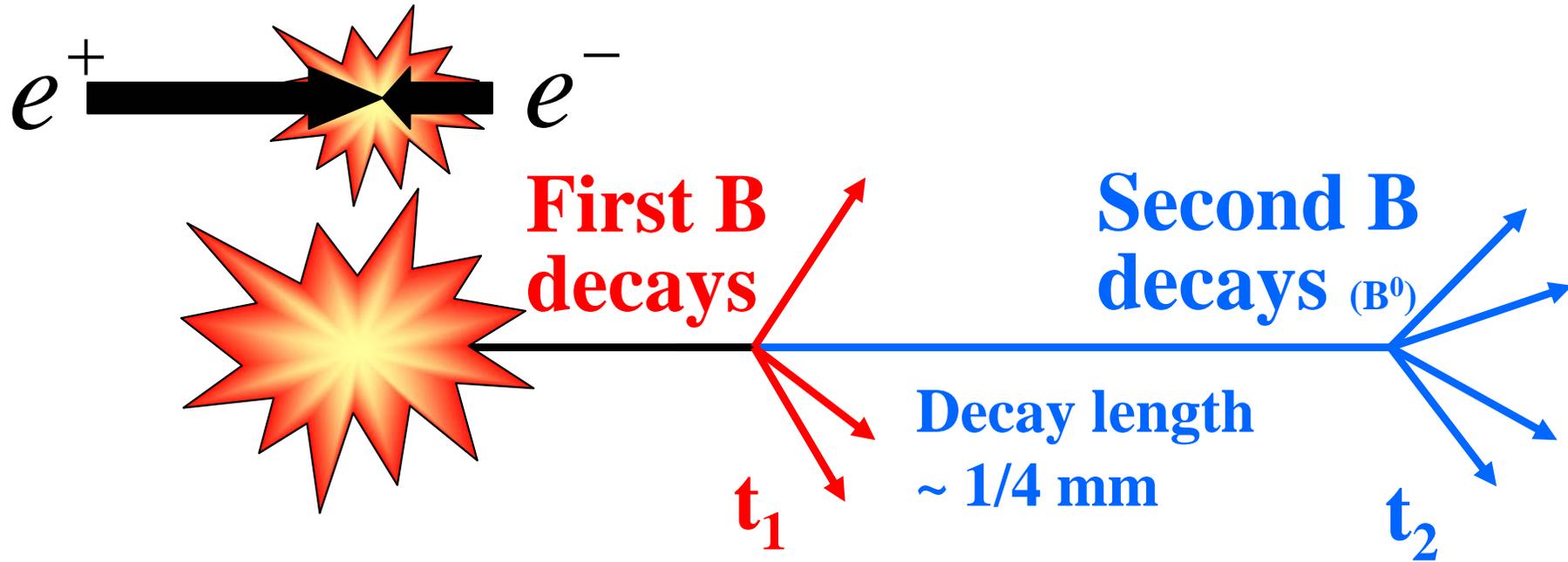
CERN NA48 Experiment (1988-2000!)



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

$\not\propto$ auch im Zerfall

CP-Verletzung in B-Zerfällen



$$Asymmetry(t) = \frac{\overline{B}^0 - B^0}{\overline{B}^0 + B^0}$$

Simply count decays as function of t !

CP-Verletzung in B-Zerfällen

Resultate von BaBar am SLAC

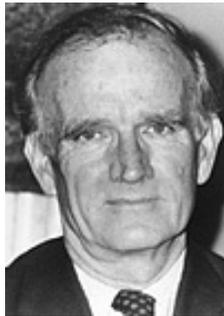
(auch Belle
am KEK)

**B und Anti-B
unterscheiden
sich!**

(we vorher
bereits für
K-Zerfälle:)

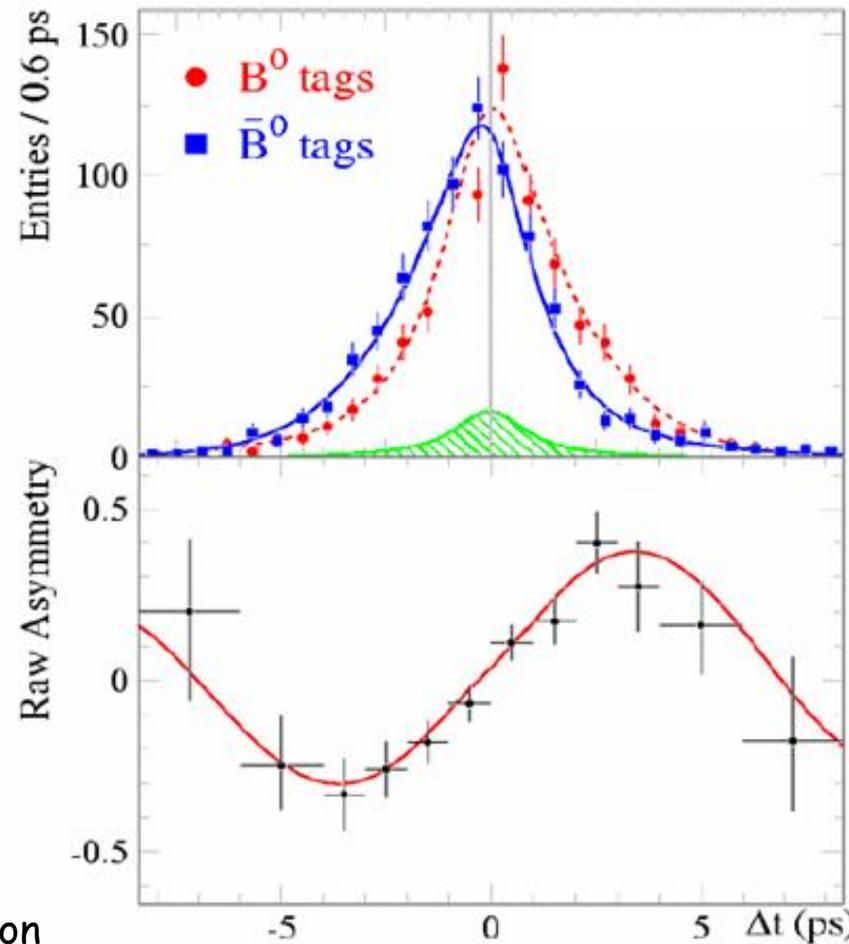


James Watson Cronin



Val
Logsdon
Fitch

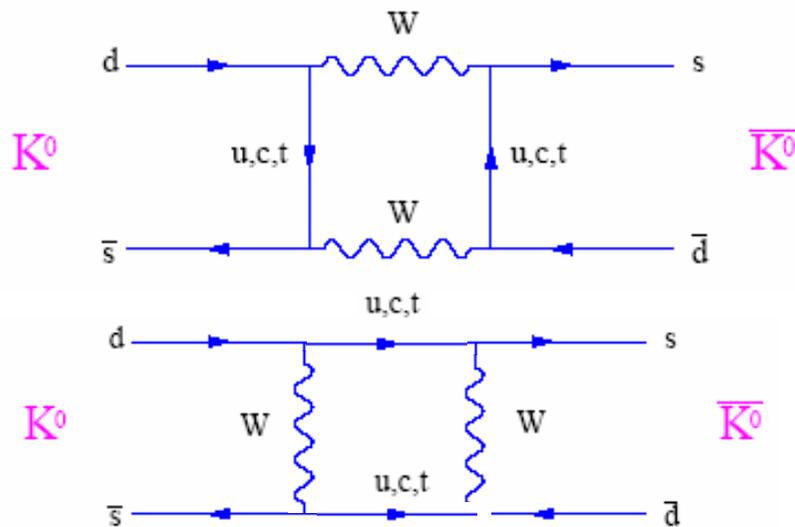
(Nobel 1980)



**Schwache
Wechselw.
verletzt CP!**

CP-VERLETZUNG UND DIE CKM-MATRIX

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



$$M \propto V_{ud}^* V_{ud} V_{us} V_{us} f_u + V_{cd}^* V_{cd} V_{cs} V_{cs} f_c + V_{td}^* V_{td} V_{ts} V_{ts} f_t$$

CP-Verletzung: $\langle K_0 | T | \bar{K}_0 \rangle \neq \langle \bar{K}_0 | T | K_0 \rangle$ wenn $\delta \neq 0$

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

Speicherringe
mit aktivem
Forschungs-
programm \rightarrow

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

\rightarrow Experimente BaBar und BELLE,
Außerdem ab 2010 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 $\%_0$ 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 \gg als bei K^0 s \rightarrow aktives experimentelles Programm

Alle experimentellen Ergebnisse können im SM erklärt werden (SM sagt aber V_{CKM} nicht vorher)

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 ...

