

9. Vorlesung

- Quarkmassen und Mischungswinkel
 - CPT-Theorem und Massen von Teilchen/Antiteilchen
 - Massen- und WW-Eigenzustände
 - Die CKM-Matrix
 - Woher könnten die Massen und Mischungswinkel kommen?
 - CP-Verletzung
 - Baryon-Antibaryon-Symmetrie im Universum

einige Folien übernommen von Antrittsvorlesung Lutz Feld

Diskrete Symmetrien

- **Symmetrie** unter Transformation Q : $[H, Q]=0$, d.h.
 - die Wechselwirkung läuft im transformierten System gleich ab
 - der Eigenwert bzgl. Q ist Erhaltungsgrösse
 - der Erwartungswert von Grössen, die sich unter Q ändern, verschwindet
- **P**: räumliche Spiegelung $x \rightarrow -x$
P-Symmetrie: wir können nicht zwischen „links“ und „rechts“ unterscheiden
- **C**: Ladungskonjugation, alle ladungsartigen Quantenzahlen ändern ihr Vorzeichen
C-Symmetrie: wir können nicht zwischen „Materie“ und „Antimaterie“ unterscheiden
- **T**: Zeitumkehr, $t \rightarrow -t$
T-Symmetrie: in elementaren Prozessen gibt es keine ausgezeichnete Zeitrichtung

Diskrete Symmetrien

- Symmetrie unter **CPT** ist unter sehr allgemeinen Voraussetzungen gegeben (lokale Feldtheorie, Lorentz-Invarianz, Spin-Statistik-Theorem, hermitescher Hamilton-Operator [Lüders, Pauli])
 - Teilchen und Antiteilchen haben gleiche Masse und Lebensdauer
 - im thermischen Gleichgewicht haben Teilchen und Antiteilchen gleiche Dichte (Dichte hängt nur von der Masse ab)
- elektromagnetische und starke Wechselwirkung sind symmetrisch unter **P** oder **C** oder **T**

Masseneigenzustände

- Zustände mit eindeutiger Masse
 - > eindeutiger 4er-Impuls (Impuls, Energie, Masse)
 - > monochromatische Wellen (für feste Energie)
- Eigenzustände der Wellenausbreitung
 - Propagatorterme
- zeitlich konstant (solange keine Wechselwirkung auftritt)
 - => T-Eigenzustände
 - => CP-Eigenzustände (CPT erhalten)

Eigenzustände der Wechselwirkung

- Zustände mit eindeutiger Kopplung
Wechselwirkungsterme
- Eigenzustände der Wellenausbreitung (Masse) und der Wechselwirkung nicht notwendigerweise identisch
=> Mischung von Masseneigenzuständen in der Wechselwirkung und umgekehrt.
- Interne Wechselwirkungen ändern die Masse

Eigenzustände der Wechselwirkung

- elektromagnetische Wechselwirkung verändert Quantenzahlen nicht
=> Selbstenergie immer für eindeutige Quantenzahlen
=> **Masseneigenzustände = Wechselwirkungseigenzustände**

- starke Wechselwirkung ändert nur Quantenzahlen (Farbe), die keine Änderung der Masse bewirken
z.B. rotes u-Quark -> grünes u-Quark
Selbstenergieterme für alle Farben gleich
=> beliebige Rotation zwischen verschiedenen Zuständen der gleichen Masse (SU(3)-Symmetrie)

Masseneigenzustände = Wechselwirkungseigenzustände

Schwache Wechselwirkung

- vermittelt zwischen Komponenten von $SU(2)$ -Dubletts
z.B. $e \leftrightarrow \nu_e$, $u \leftrightarrow d'$, $c \leftrightarrow s'$, ... aber
 $SU(2)$ -Symmetrie gebrochen durch Higgs-Mechanismus
(und daraus resultierend durch Elektromagnetismus)
=> Komponenten haben nicht mehr die gleiche Masse
(siehe auch letzte Vorlesung)
- **Massen- und Wechselwirkungseigenzustände können verschieden und unterscheidbar sein**

Cabibbo Kobayashi Maskawa Matrix

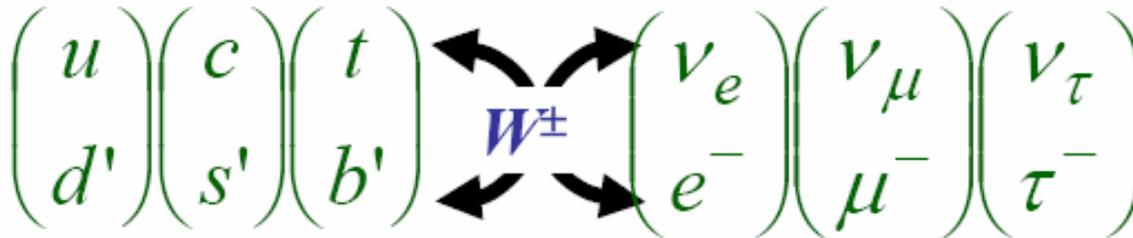
CKM Matrix:

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

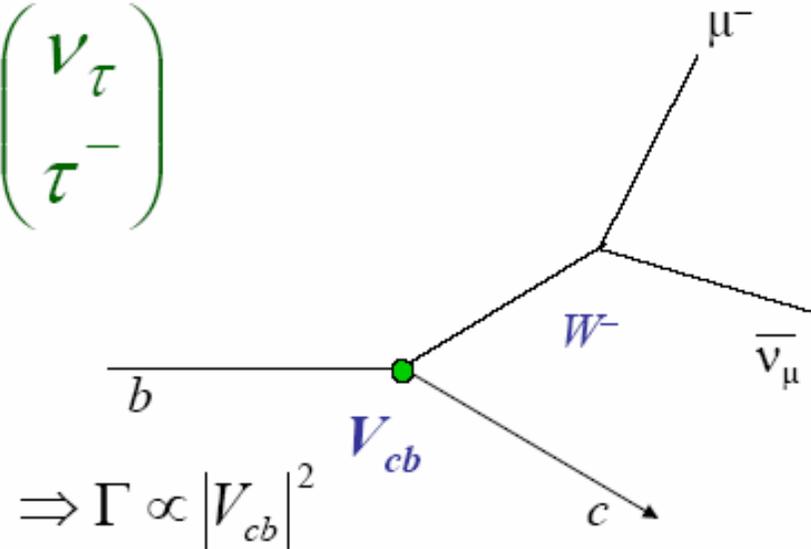
Massen-Eigenzustände

Eigenzustände zur schwachen Wechselwirkung

Können auch durch starke oder elektromagnetische WW erzeugt werden



CKM Matrix hat Ursprung in der Erzeugung der Massen der Teilchen (Kopplung ans Higgs-Feld)



Familiensymmetrie (S3xS3) ?

3 Familien, für jede Art von Teilchen:

"demokratische"
Massenmatrix $M = 1/3 M^0$ $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ z.B. Fritzsch et al.

diagonalisiere $\rightarrow M^0$ $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ "nackte" Masse

$m=0$ für die erste Familie: e, u, d, ν_e

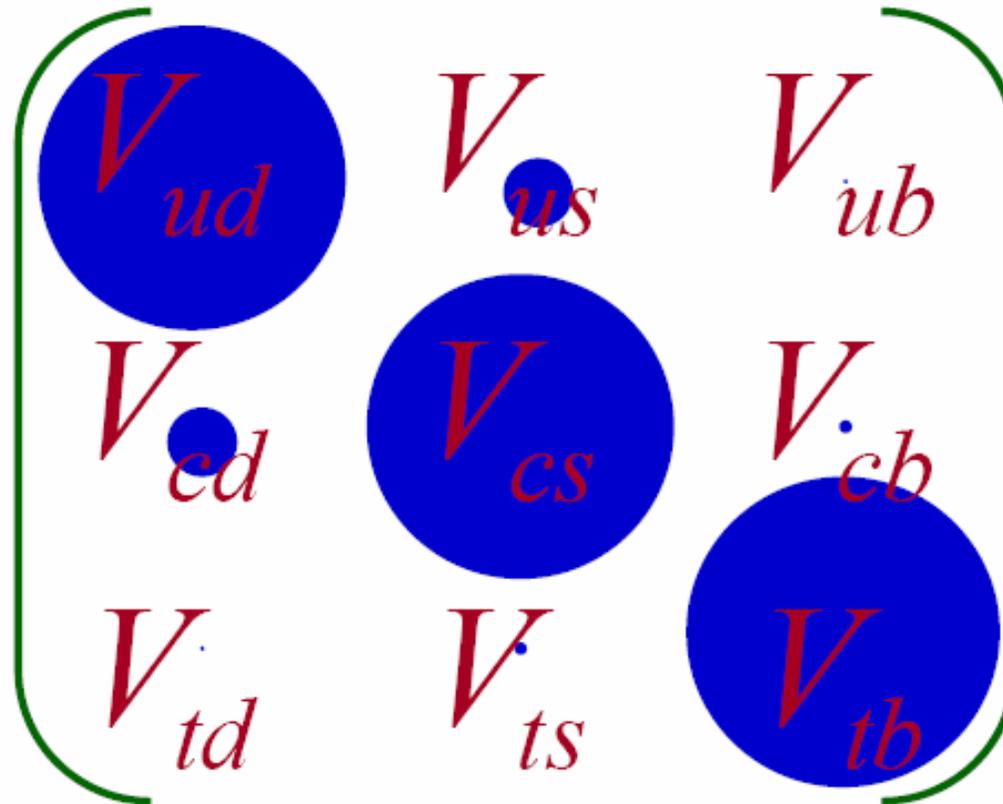
$m=0$ für die zweite Familie: μ, c, s, ν_μ

$m=m_{\text{nackt}}$ für die dritte Familie: τ, t, b, ν_τ

Brechung der Familiensymmetrie

- durch kleine Störungen
=> von 0 verschiedene Massen für alle
Generationen, Mischungswinkel
- Im Standardmodell: Willkürliche Parameter,
parametrisiert durch Higgs-Yukawa-Kopplungen
- Manche Erweiterungen des Standardmodells können
im Prinzip die Struktur der Störungen vorhersagen.
- **Viele Möglichkeiten, aber kein kohärentes Gesamtbild**

CKM-Matrix



Wichtige Eigenschaft: Matrix muss unitär sein!

Unsere Welt besteht aus Materie

... und nicht Antimaterie

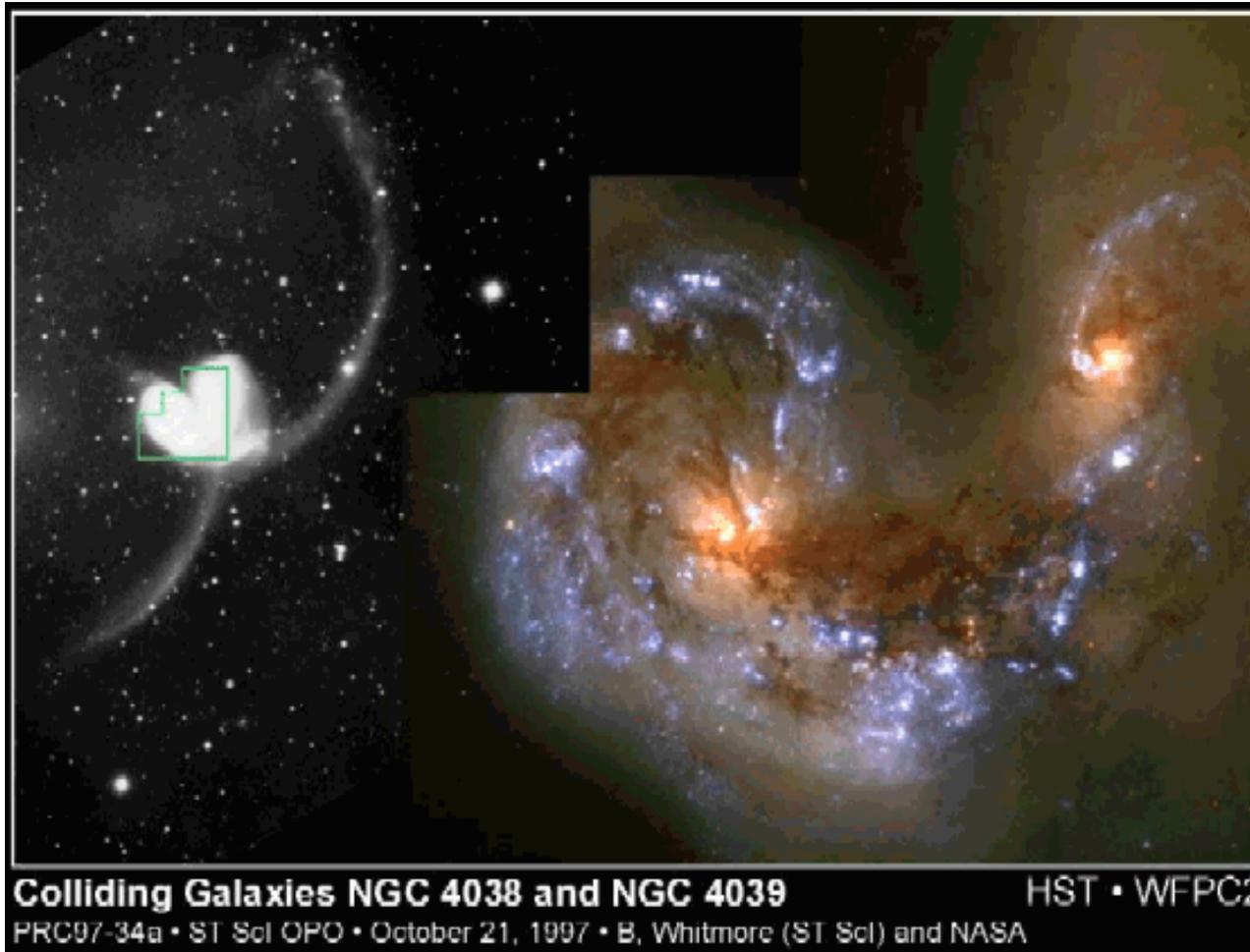


auf der Erde finden wir Antimaterie nur

- in Experimenten der Kern- und Teilchenphysik
- in der (sekundären) Höhenstrahlung
- in der kosmischen Strahlung
(konsistent mit pp -Kollisionen im interstellaren Gas)

Unsere Welt besteht aus Materie

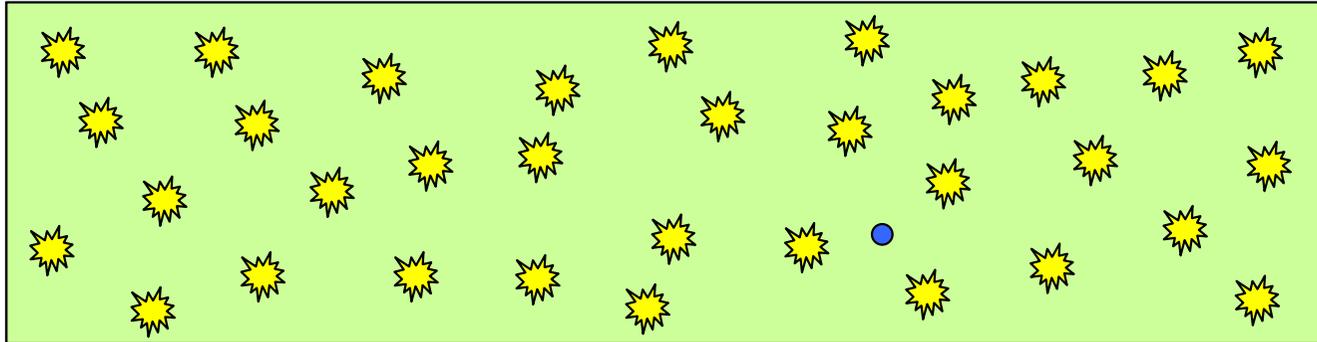
- es gibt keine astronomische Hinweise auf Antimaterie wie etwa Gamma-Strahlung aus Vernichtungsreaktionen



- Abschätzung: keine Antimaterie im Umkreis von ~1 Mrd. Lichtjahren

Materie-Antimaterie-Asymmetrie?

- kleine **Asymmetrie** in der Dichte von **Materie** und **Antimaterie**



→ nach der Teilchen-Antiteilchen-Annihilation bleibt gewisse Materiedichte übrig: Baryonenzahl

$$B \equiv n_b - n_{\bar{b}} \neq 0$$

und $n_\gamma \gg n_b$ ($n_b/n_\gamma \sim 5 \times 10^{-10}$)

- Ursprüngliche Asymmetrie? ...wenig attraktiv (und unwirksam falls eine kosmische Inflation stattgefunden hat)
- kann Materie-Antimaterie-Asymmetrie **dynamisch** erzeugt worden sein?

Die Sacharow-Bedingungen

■ *A. D. Sacharow, 1967:*

Materie-Asymmetrie kann dynamisch erzeugt werden, falls es Prozesse (Wechselwirkungen) gibt in denen

1. Baryonenzahl nicht erhalten ist
2. Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie (**C**, **CP**) verletzt sind
3. thermisches Gleichgewicht gestört ist



■ Beispiel:

Zerfall	Verzweigungsverhältnis	Baryonenzahl
$X \rightarrow qq$	r	$B_1 = 2/3$
$X \rightarrow l\bar{q}$	$1-r$	$B_2 = -1/3$
$\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$	\bar{r}	$-B_1$
$\bar{X} \rightarrow \bar{l}q$	$1-\bar{r}$	$-B_2$

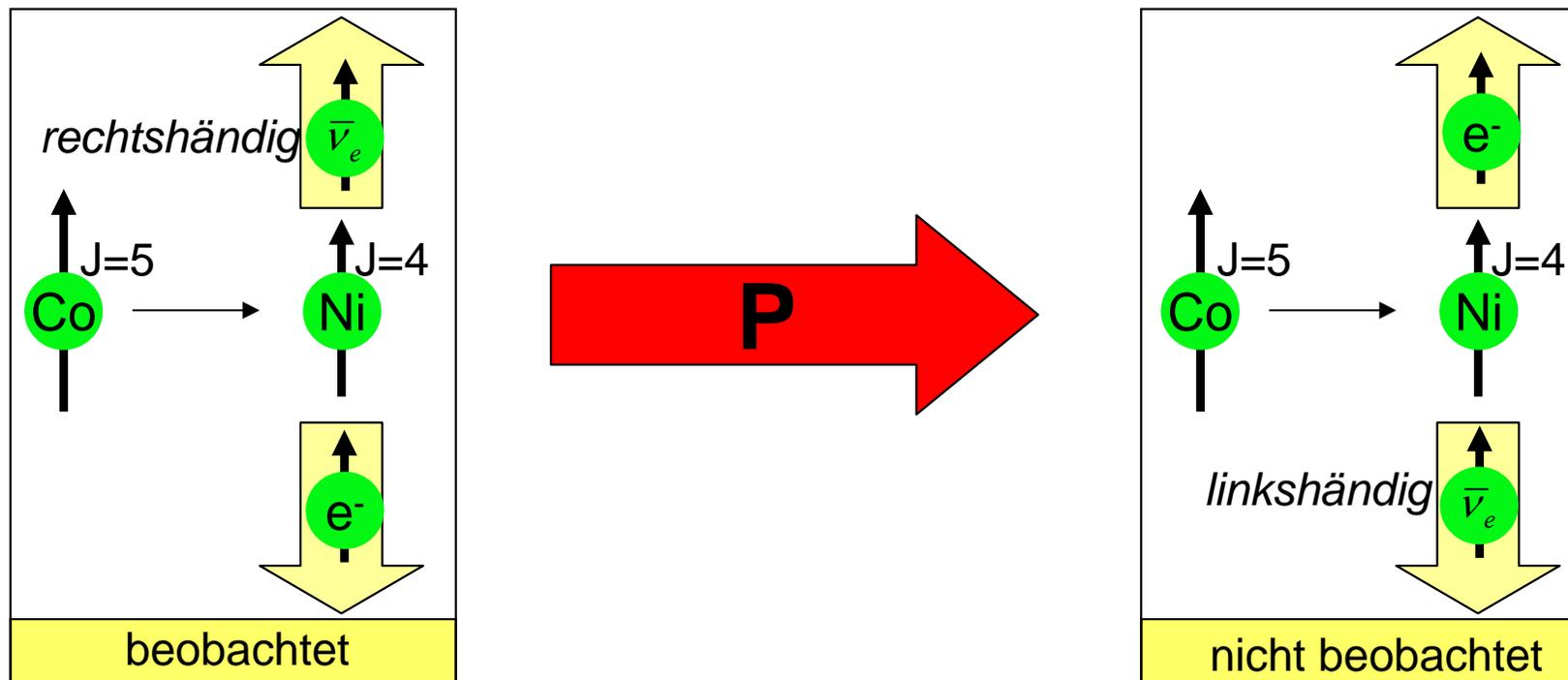
$$\Rightarrow \Delta B = rB_1 + (1-r)B_2 - \bar{r}B_1 - (1-\bar{r})B_2$$

$$= \underbrace{(r-\bar{r})}_{\neq 0} \times \underbrace{(B_1 - B_2)}_{\neq 0}$$

wenn **C** und **CP** verletzt wenn **B** verletzt

P-Verletzung

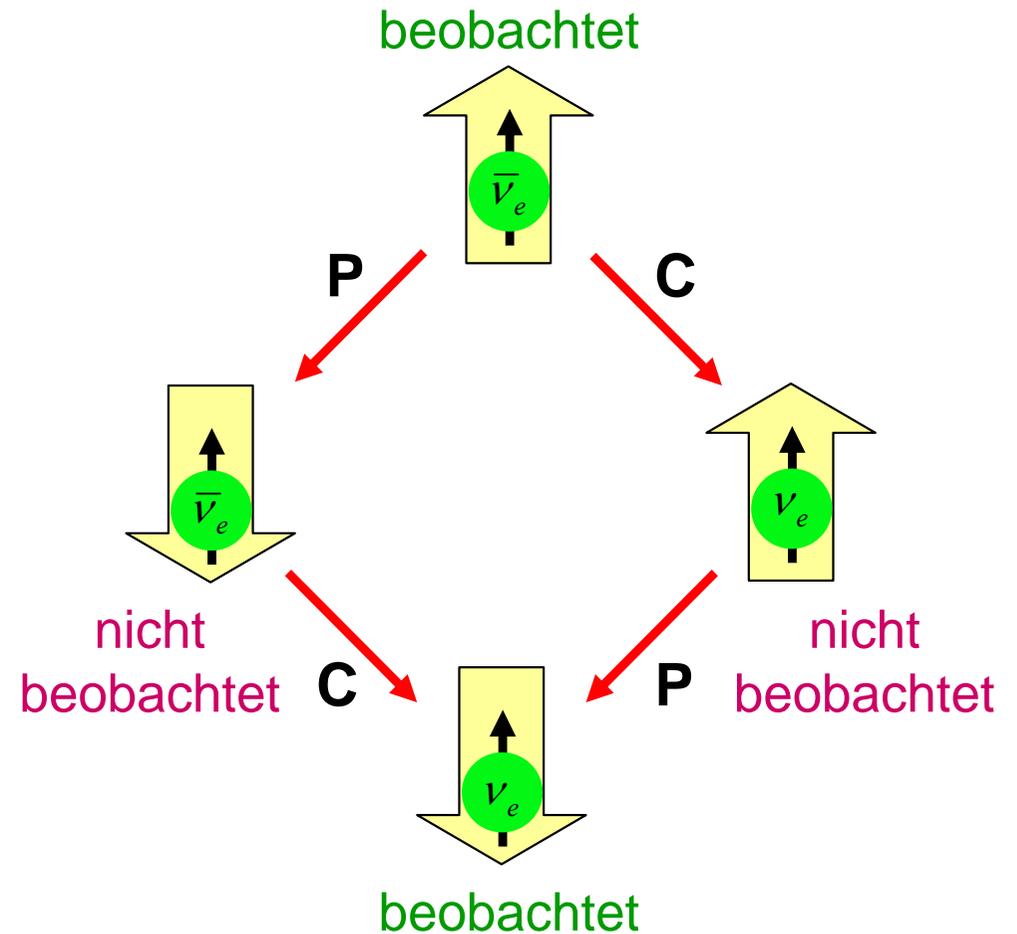
- Lee & Yang zeigten 1956: in der schwachen Wechselwirkung gibt es keine experimentelle Evidenz für P-Symmetrie
- P-Verletzung war für viele „undenkbar“
(R. Feynman wettete 50\$ dass P-Symmetrie nicht gebrochen ist)
- C.S.Wu et al. (Ende 1956): im Betazerfall ist P maximal verletzt



- → Anti-Neutrino tritt nur rechtshändig auf
- → damit ist auch C maximal verletzt

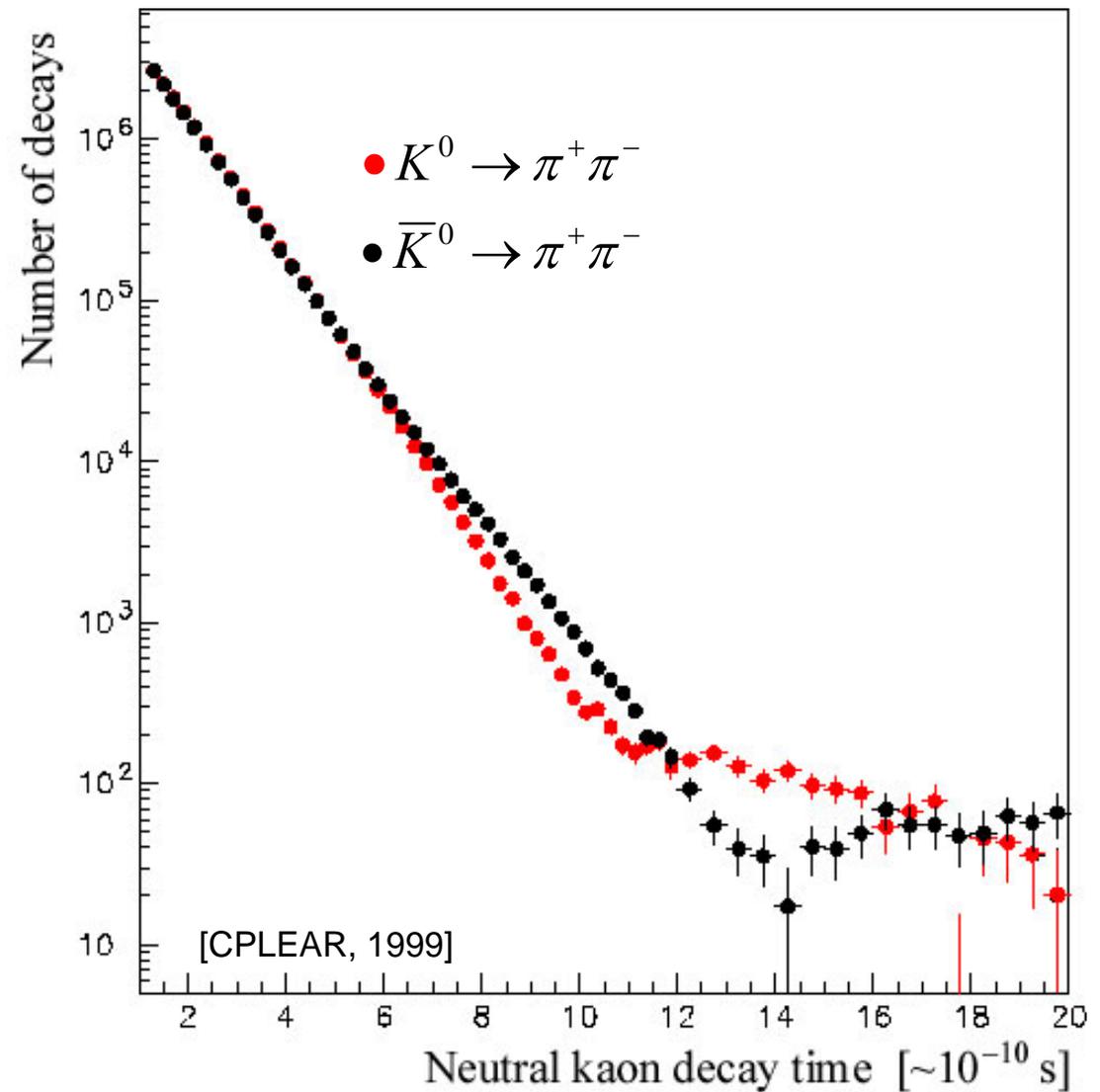
CP-Symmetrie

- **CP-Symmetrie** ist nicht maximal verletzt, sondern sehr gut erfüllt
- **CP** verknüpft die beobachteten Teilchen und Antiteilchen
- „links“ und „rechts“ sowie „Materie“ und „Antimaterie“ immer noch nicht absolut unterscheidbar
- via **CPT**-Theorem ist damit auch T-Symmetrie gegeben
- jedoch...



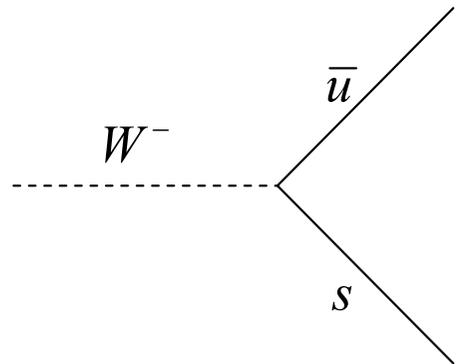
CP-Verletzung

- Materie und Antimaterie (K^0 und \bar{K}^0) verhalten sich verschieden



CP-Verletzung im Standardmodell: CKM-Matrix

- schwache Wechselwirkung mit geladenem Strom im Standardmodell:



A Feynman diagram showing a dashed line representing a W^- boson on the left. It splits into two solid lines on the right: the upper one is labeled \bar{u} and the lower one is labeled s .

$$L = -\frac{g_w}{\sqrt{2}} (\bar{u} \quad \bar{c} \quad \bar{t}) \gamma^\mu \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \overbrace{\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}}^{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} W_\mu^+ + h.c.$$

- eine irreduzible Phase in dieser (unitären) Cabbibo-Kobayashi-Maskawa-Matrix, die CP-Verletzung verursacht

$$CKM(\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{13}) = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}; \quad s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$

- im Standardmodell ist δ_{13} der einzige CP-verletzende Parameter

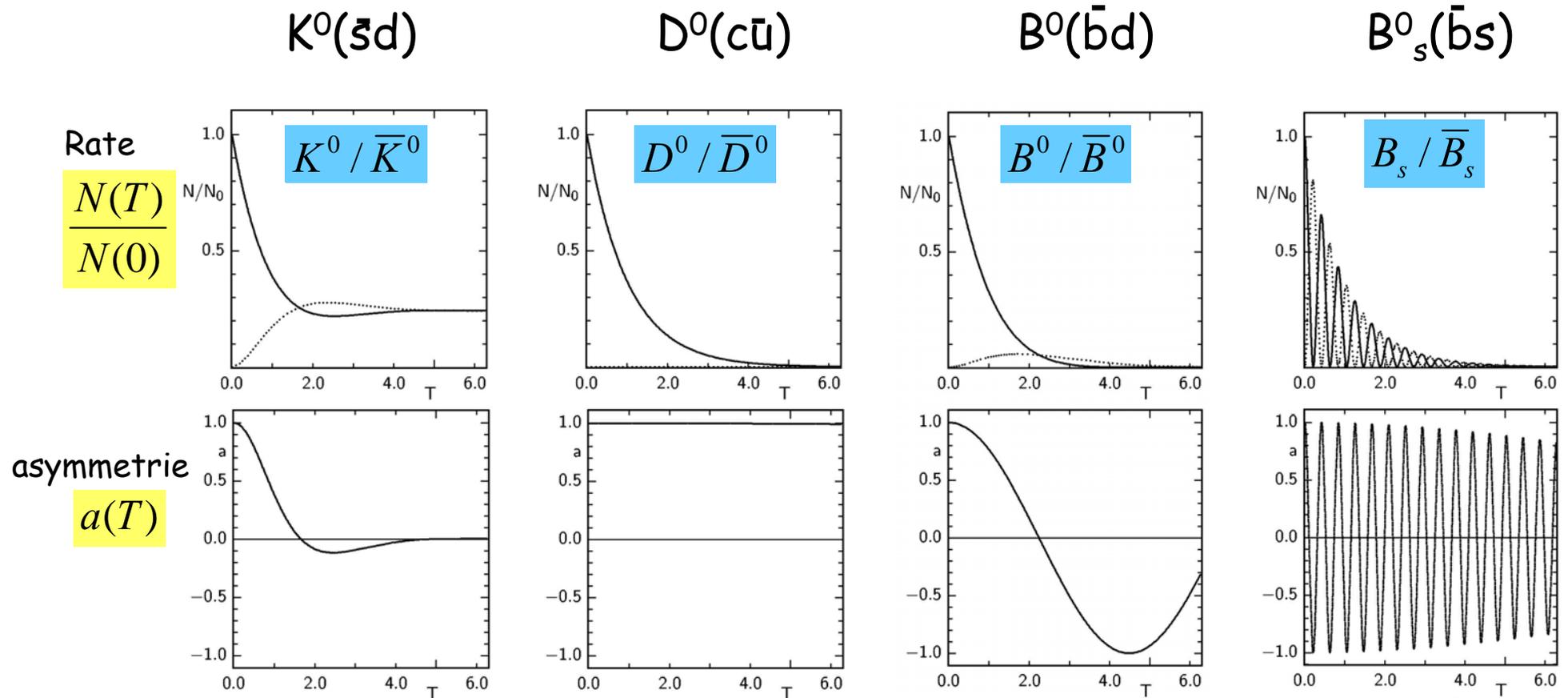
- CP-verletzende Effekte können nur bei Interferenz verschiedener Amplituden beobachtet werden, da sonst

$$\Gamma = |A|^2 \propto |e^{i\delta_{13}}|^2 = 1$$

→ CP-Verletzung in Oszillationen beobachtbar

Oszillationen sind Fenster zur CP-Verletzung:

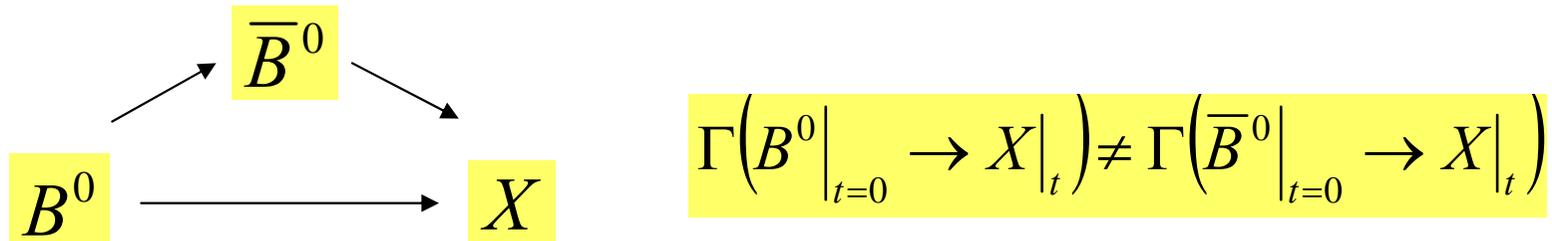
- in welchen anderen Systemen könnte CP-Verletzung beobachtbar sein?



CP-Verletzung im B^0 -System



- CP-Verletzung durch Interferenz zwischen Oszillation und Zerfall:



$$a(T) \equiv \frac{\dot{N}(\bar{B}^0 \rightarrow X) - \dot{N}(B^0 \rightarrow X)}{\dot{N}(\bar{B}^0 \rightarrow X) + \dot{N}(B^0 \rightarrow X)} \Big|_T = \Lambda_0 \sin(xT)$$

Λ_0 enthält die für den Zerfall nach X relevanten Elemente der CKM-Matrix:

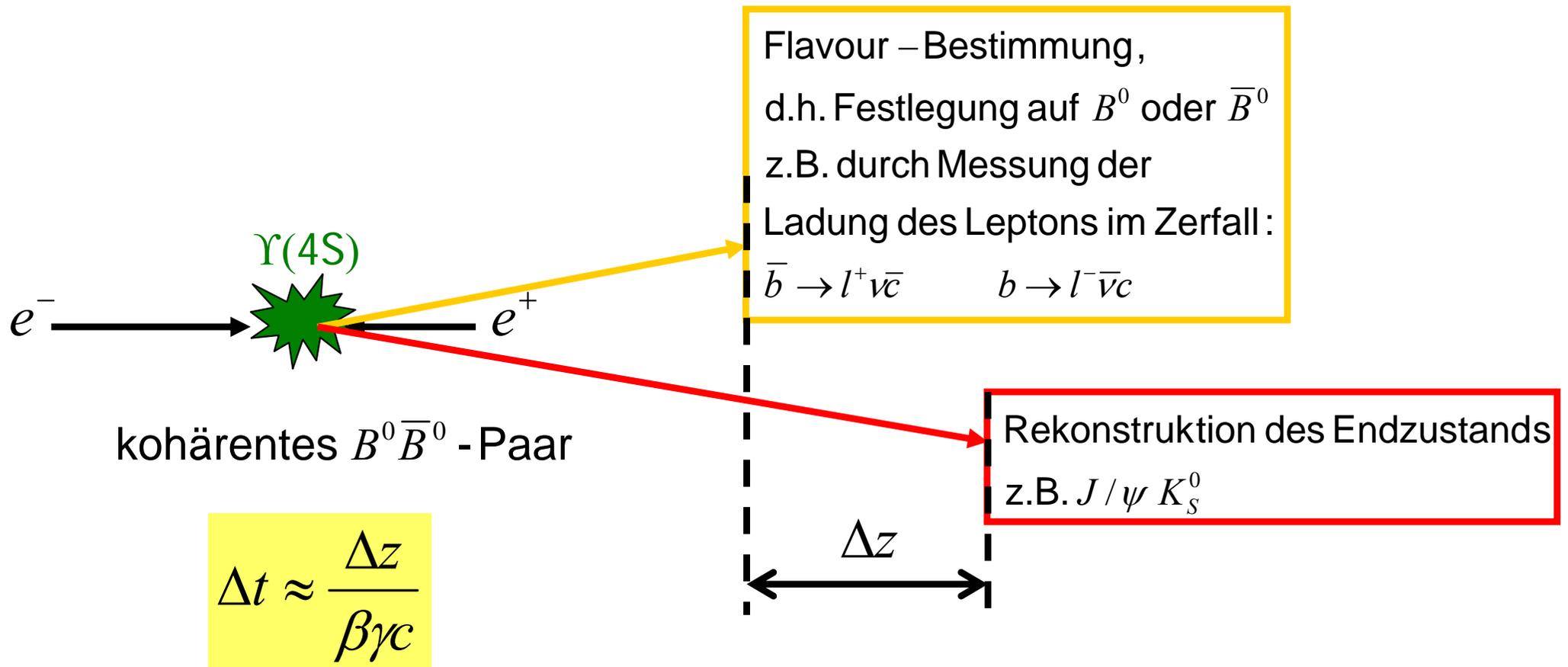
Beispiel: $B \rightarrow J/\psi K_s^0 \Rightarrow \Lambda_0 = \sin(2\beta)$

$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B B$

- Messung der Zeitabhängigkeit durch Ortsmessung in einem geboosteten System:

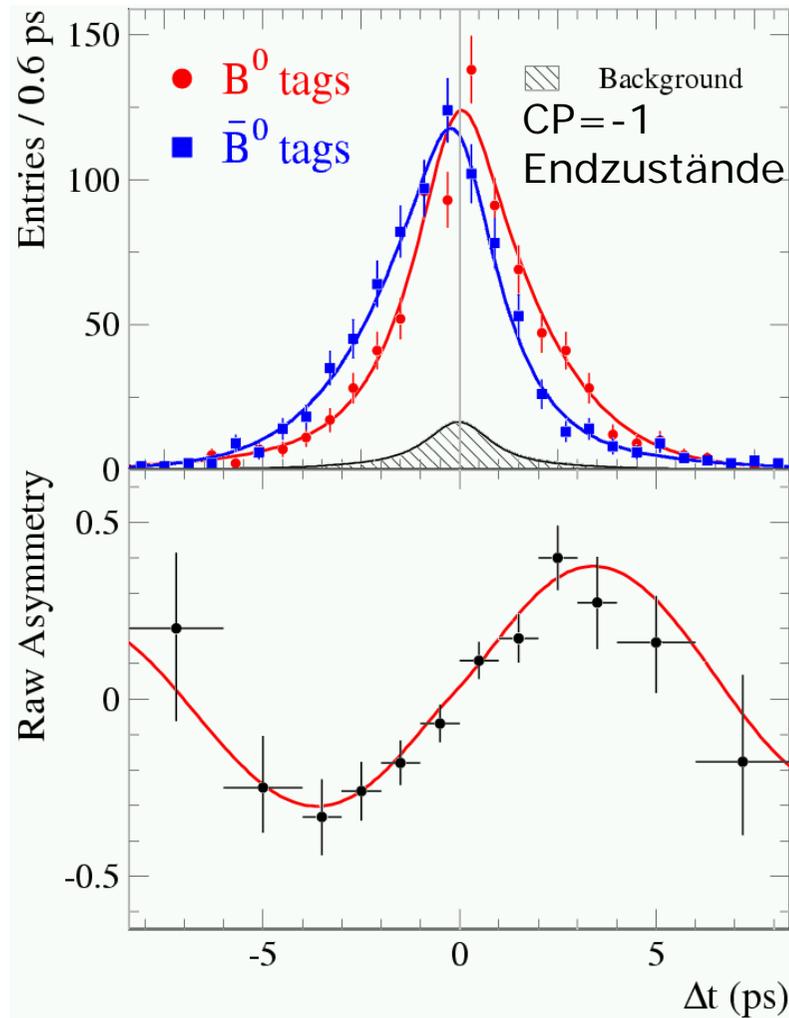
$$E(e^-) = 9 \text{ GeV}, E(e^+) = 3.1 \text{ GeV} \Rightarrow \beta\gamma = 0.55 \text{ (PEPII, BaBar)}$$

$$E(e^-) = 8 \text{ GeV}, E(e^+) = 3.5 \text{ GeV} \Rightarrow \beta\gamma = 0.42 \text{ (KEK - B, Belle)}$$

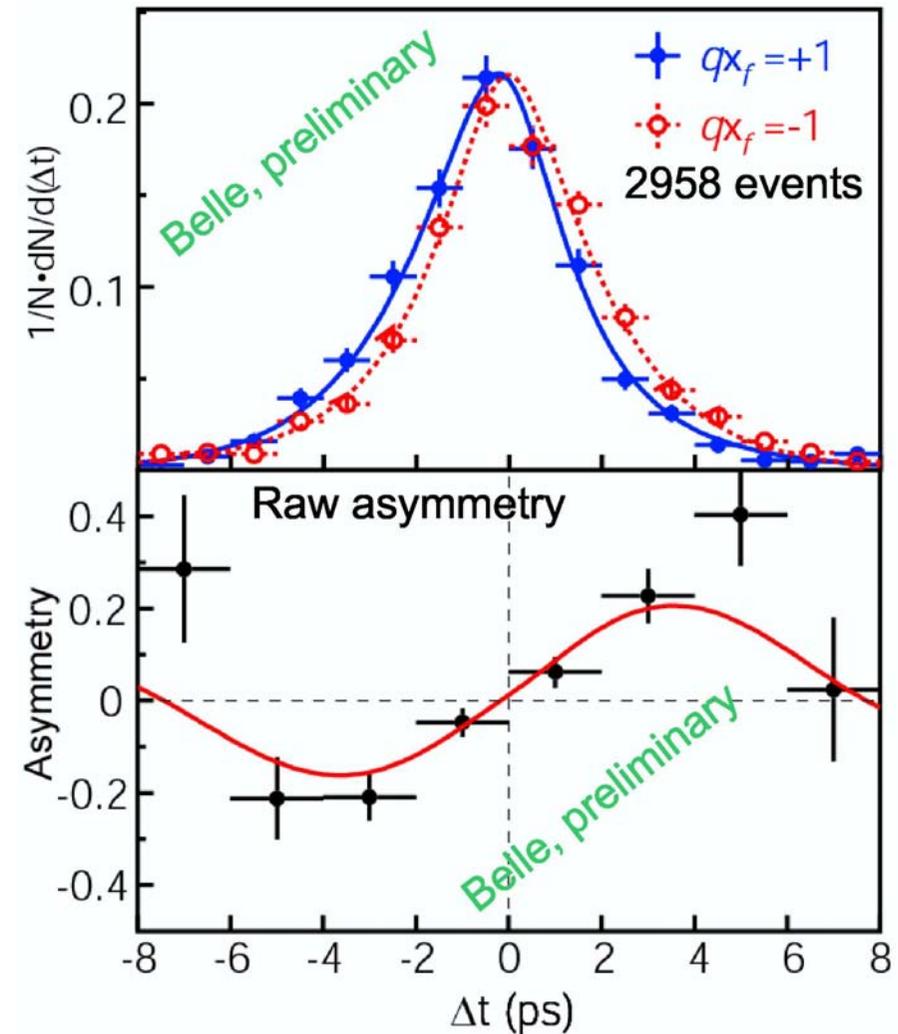


Messung von CP-Verletzung im B-System

BaBar



Belle



BaBar: $\sin 2\beta = 0.741 \pm 0.067$ (stat) ± 0.033 (sys)

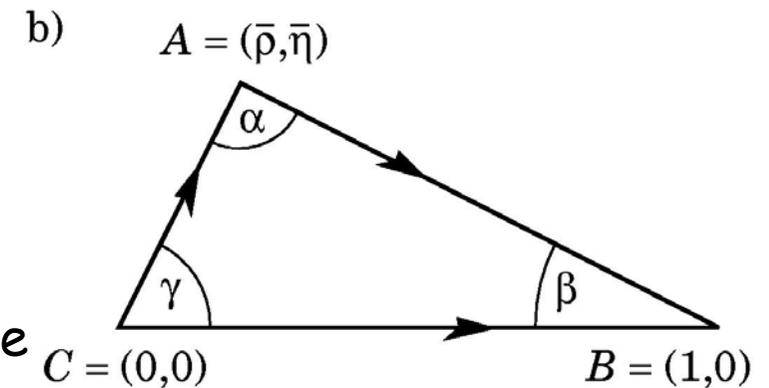
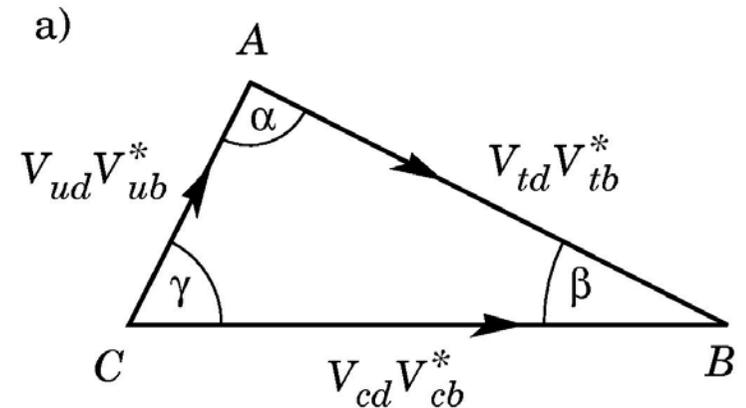
Belle: $\sin 2\beta = 0.719 \pm 0.074$ (stat) ± 0.035 (sys) [ICHEP2002]

Unitaritätsdreiecke

- Unitarität der CKM-Matrix \rightarrow Relationen zwischen Elementen die als Dreiecke in der komplexen Ebene dargestellt werden können

- Beispiel:

$$\begin{aligned}
 & V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \\
 \Leftrightarrow & \frac{V_{ud}V_{ub}^*}{\underbrace{V_{cd}V_{cb}^*}} + \frac{V_{cd}V_{cb}^*}{\underbrace{V_{cd}V_{cb}^*}} + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{\underbrace{V_{cd}V_{cb}^*}} = 0 \\
 & \equiv (\bar{\rho}, \bar{\eta}) \approx (-1, 0) \\
 & \frac{V_{td}}{|V_{td}|} \approx e^{-i\beta} ; \quad \frac{V_{ub}}{|V_{ub}|} = e^{-i\delta_{13}} \approx e^{-i\gamma}
 \end{aligned}$$



- Länge der Seiten etwa 1% der Diagonalelemente der CKM-Matrix \rightarrow Präzisionsmessungen

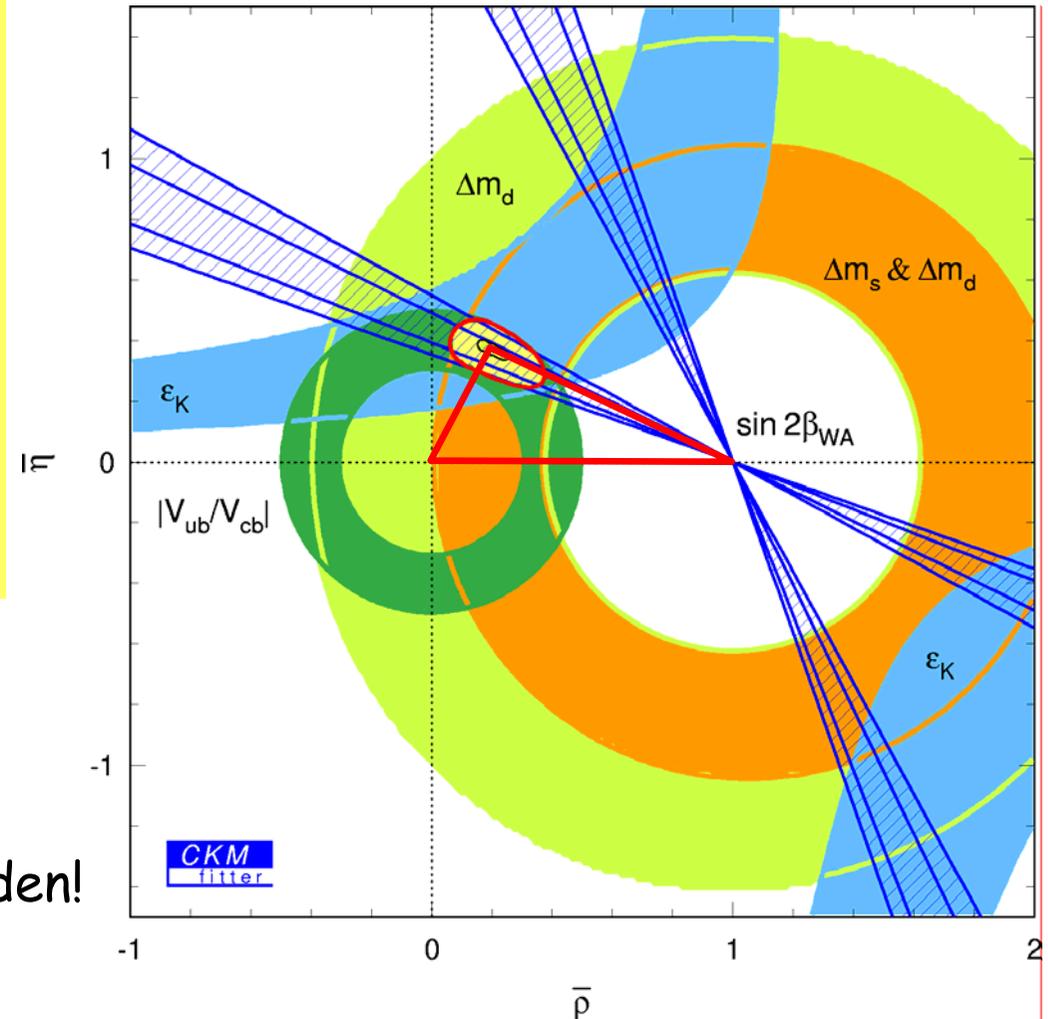
- CP-Verletzung \sim Fläche der Unitaritätsdreiecke

Vermessung des Unitaritätsdreiecks

- im Standardmodell gibt es nur einen CP-verletzenden Parameter
- liefern die verschiedenen Messungen ein konsistentes Bild?

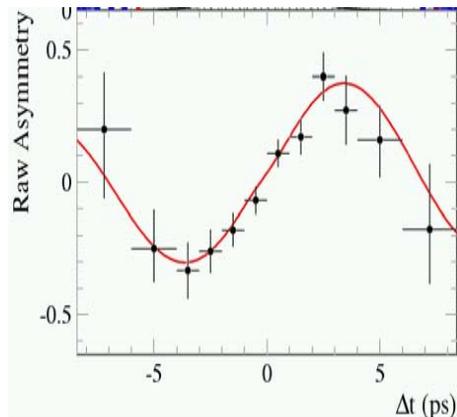
Messung	CKM	$(\bar{\rho}, \bar{\eta})$
$\frac{b \rightarrow u}{b \rightarrow c}$	$\left \frac{V_{ub}}{V_{cb}} \right ^2$	$\bar{\rho}^2 + \bar{\eta}^2$
$\Delta m(B_d^0)$	$ V_{td} ^2 f_{B_d}^2 B_{B_d}$	$(1 - \bar{\rho})^2 + \bar{\eta}^2$
$\frac{\Delta m(B_d^0)}{\Delta m(B_s^0)}$	$\left \frac{V_{td}}{V_{ts}} \right ^2 \xi^2$	$(1 - \bar{\rho})^2 + \bar{\eta}^2$
ε_K	$f(A, \bar{\rho}, \bar{\eta}, B_K)$	$\propto \bar{\eta}(1 - \bar{\rho})$
$A(J/\psi K^0)$	$\sin(2\beta)$	$\frac{2\bar{\eta}(1 - \bar{\rho})}{\sqrt{\bar{\eta}^2 + (1 - \bar{\rho})^2}}$

- alle Messungen können gut vom Standardmodell beschrieben werden!



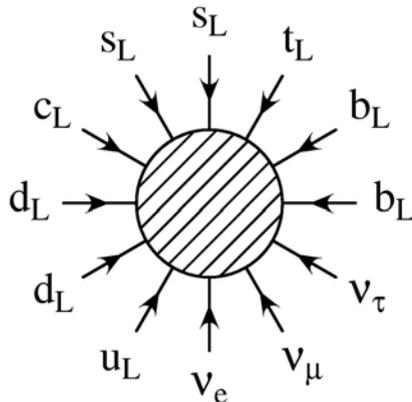
Ist die Baryon-Asymmetrie im SM erklärbar?

- erfüllt das Standardmodell die Sacharow-Bedingungen?



(1) CP-Verletzung in K und B gemessen

(2) Baryonzahl-Verletzung:



- prinzipiell möglich durch nicht-perturbative Effekte (Sphaleronen)
- kommen heute ($T \sim 0$) nicht vor, jedoch vor elektroschwachen Symmetriebrechung häufig ($T > 100 \text{ GeV}$)
- Baryonzahl und Leptonzahl ändern sich um mind. 3 Einheiten (Im SM!)
- B-L erhalten

Ist die Baryon-Asymmetrie im SM erklärbar?

(3) thermisches Ungleichgewicht:

- Brechung der elektroschwachen Symmetrie durch Higgs-Mechanismus kann einen Phasenübergang 1. Ordnung erzeugen
- jedoch nur für Higgs-Masse $< 73 \text{ GeV}$, sonst adiabatischer Übergang
- direkte Higgs-Suche der LEP-Experimente: $m_H > 114 \text{ GeV}$

→ die Baryon-Asymmetrie ist im Standardmodell nicht zu erklären

- selbst wenn ein genügendes thermisches Ungleichgewicht künstlich erzeugt würde, wäre die CP-Verletzung aus der CKM-Matrix wohl nicht gross genug

Erweiterung des Standardmodells notwendig

- hinreichendes thermisches Ungleichgewicht möglich z.B. in
 - supersymmetrischen Erweiterungen des SM
 - Modelle mit 2 Higgs-Doubletsdie eine große Zahl neuer freier Parameter enthalten
- starke CP-Verletzung tritt in Erweiterungen des SM „automatisch“ auf durch zusätzliche Vertizes
- CP-verletzende Zerfälle von sehr schweren Bosonen einer „Grossen Vereinheitlichten Theorie“
- Lepton-Asymmetrie durch Zerfälle von sehr schweren Majorana-Neutrinos könnten via B+L-verletzende SM-Prozesse eine Baryon-Asymmetrie erzeugen

■

Neue Messungen notwendig ...

- zum Higgs-Boson, um die elektroschwache Symmetriebrechung aufzuklären (LHC, ILC)
- zur CP-Verletzung, um nicht-SM-Beiträge zu finden (B-Fabriken)
- zu neuen Teilchen, um Erweiterungen des SM zu finden (LHC, ILC)
- zur Proton-Stabilität, um Baryonzahl-Erhaltung zu testen
- zur Natur der Neutrinos: Majorana oder Dirac?
- ...

Zusammenfassung Baryon-Asymmetrie

- Im Urknall-Modell ist eine Baryon-Asymmetrie notwendig um die beobachtete Dominanz von Materie zu erklären
- trotz CP -Verletzung kann das Standardmodell der Teilchenphysik die Baryon-Asymmetrie nicht erklären
- nach dem Standardmodell sollte es uns also nicht geben, d.h. das SM ist unvollständig oder teilweise falsch
- die Erklärung der Baryon-Asymmetrie steht noch aus, und bleibt ein spannendes Forschungsgebiet zwischen experimenteller und theoretischer Teilchenphysik und Kosmologie

