



- 
1. Einführung
  2. Beschleuniger
  3. Detektoren
  4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
  5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
  6. **CP-Verletzung im Standardmodell**
  7. Proton- und Photonstruktur
  8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
  9. Das Higgs-Boson
  10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



## Die C- und P-Transformationen - eine Erinnerung

- $C$  und  $P$  sind die Operatoren der Ladungskonjugation und der Paritätstransformation. Sie überführen Teilchen in Antiteilchen ( $C$ ) und spiegeln die Ortskoordinaten ( $P$ ).
- Die Operatoren  $C$  und  $P$  sind unitär, d.h.  $1 = UU^\dagger$  mit  $U = C, P$ . Zweimalige Anwendung liefert den Ausgangszustand,  $U^2|f\rangle = |f\rangle$ . Daraus folgt dann  $U^{-1} = U = U^\dagger$ .
- Die Eigenwerte zu  $C$  und  $P$  sind multiplikative Quantenzahlen.
- Für geladene Fermionen und Antifermionen gilt:  $C|f\rangle = |\bar{f}\rangle$  und  $C|\bar{f}\rangle = |f\rangle$ .
- Ungeladene Zustände ohne flavour-Quantenzahl können Eigenzustände zum Ladungsoperator sein, z.B.  $C|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^2|\pi^-\pi^+\rangle$  und  $C|\pi^0\pi^0\rangle = 1^2|\pi^0\pi^0\rangle$ .
- Für geladene Fermionen und Antifermionen gilt  $P|f\rangle = |f\rangle$  und  $P|\bar{f}\rangle = -|\bar{f}\rangle$ .
- Für Spin 0 Mesonen folgt:  $P|q\bar{q}\rangle = 1 \cdot (-1) \cdot (-1)^l|q\bar{q}\rangle = -|q\bar{q}\rangle$  für  $l = 0$ .
- Wenn  $C$  und  $P$  Erhaltungsgrößen sind, gilt:  $[S, C] = 0$ ,  $[S, P] = 0$  und  $[S, CP] = 0$ .
- Die Übergangsamplitude ist:  $\langle f|S|i\rangle = \langle f|(CP)^\dagger(CP)S(CP)^\dagger(CP)|i\rangle$ .  
Bei **CP-Erhaltung** und **Eigenzuständen** folgt:  $\langle f|S|i\rangle = \eta_{CP}(f)\eta_{CP}(i)\langle f|S|i\rangle$ .

Das heisst, bei CP-Erhaltung haben entweder  $|i\rangle$  und  $|f\rangle$  identische CP-Eigenwerte, oder die Amplitude  $\langle f|S|i\rangle$  muss verschwinden.



# Die CP-Verletzung und die CKM-Matrix

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

die down-type Quarks.

- Die CKM-Matrix hat 4 reelle Parameter, ( $4 = 18 - 9 [V^\dagger V = 1] - 5 [\text{Quarkphasen}]$ ):  $\lambda, A, \rho, \eta$ . Eine Rotation hat drei reelle Winkel  $\Rightarrow$  **Es gibt eine komplexe Phase.**
- Es lässt sich zeigen, dass im Standardmodell CP-verletzende Amplituden proportional zu  $J_{CP} = |\text{Im}(V_{ij} V_{il}^* V_{kj}^* V_{kl})|$ , mit  $i \neq k, j \neq l$  sein müssen.
- Dieses Produkt ist die doppelte Fläche des Dreiecks mit den zwei Seiten  $V_{ij} V_{il}^*$  und  $V_{kj} V_{kl}^*$ . CP-Verletzung ist also mit nicht verschwinden Flächen der Unitaritätsdreiecke verbunden.
- In der Wolfenstein-Parametrisierung bedeutet dies, dass  $\eta \neq 0$  sein muss.
- Die Dreiecke sehen sehr verschieden aus, haben aber alle die gleiche Fläche.

$$\begin{aligned} 0 &= V_{us}^* V_{ud} + V_{cs}^* V_{cd} + V_{ts}^* V_{td} & \text{mit} & \quad 0 = \mathcal{O}(\lambda^1) + \mathcal{O}(\lambda^1) + \mathcal{O}(\lambda^5). \\ 0 &= V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} & \text{mit} & \quad 0 = \mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3). \\ 0 &= V_{ub}^* V_{us} + V_{cb}^* V_{cs} + V_{tb}^* V_{ts} & \text{mit} & \quad 0 = \mathcal{O}(\lambda^4) + \mathcal{O}(\lambda^2) + \mathcal{O}(\lambda^2). \end{aligned}$$

**Die verschiedenen Formen haben Auswirkungen auf die Größe der CP-verletzenden Effekte.**



# Die CP-Verletzung im frühen Universum

- Wir leben in einem Universum, in dem es mehr Baryonen als Antibaryonen gibt.
- Im Big-Bang, im thermischen Gleichgewicht, sind Teilchen und Antiteilchen in gleicher Anzahl entstanden. Damit muss es einen Effekt geben, der diese Asymmetrie erzeugt hat.
- Sakharov hat 1967 drei Bedingungen für die Entstehung dieser Asymmetrie aufgestellt:
  - 1) Die Existenz Baryonenzahl-verletzender Zerfälle.
  - 2) Das Auftreten von Reaktionen die C- und CP-verletzend sind.
  - 3) Die Abweichung vom thermischen Gleichgewicht.
- Betrachten wir den Zerfall eines Teilchens  $X$  unter Änderung der Baryonenzahl,  $\Delta B \neq 0$ . Die Zerfallsrate sei  $f = \Gamma(X \rightarrow Y(\Delta B))$  und damit  $\bar{f} = \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{Y}(-\Delta B))$ .
- Die Differenz der Baryonenzahl durch die Zerfälle von  $X$  und  $\bar{X}$  ist  $B_{\text{net}}$  mit:
$$B_{\text{net}} = f \cdot \Delta B + \bar{f} \cdot (-\Delta B) = (f - \bar{f}) \cdot \Delta B \Rightarrow B_{\text{net}} \neq 0 \text{ nur für } f \neq \bar{f} \text{ und } \Delta B \neq 0.$$
- Im thermischen Gleichgewicht ist die Lebensdauer des Gesamtsystems unendlich groß im Vergleich zu den Reaktionszeiten. Deswegen würde sich nach einiger Zeit, trotz der unterschiedlichen Zerfallsraten, die gleiche Population der Zustände  $Y$  und  $\bar{Y}$  einstellen.

**Die CP-Verletzung ist essentiell zum Verständnis der Baryonenasymmetrie im Universum.**



# Drei mögliche Arten von CP-Verletzung im Standardmodell

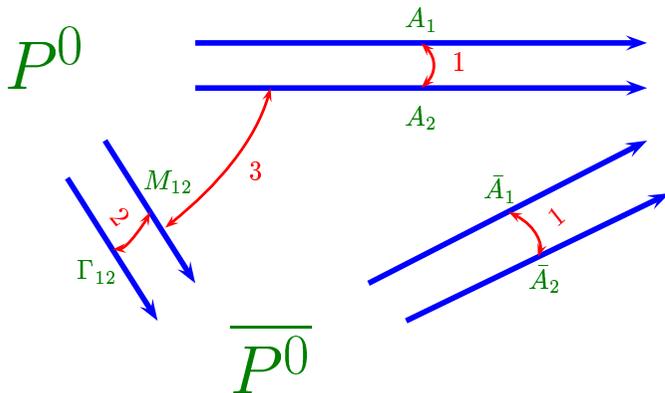
- Im Standardmodell gibt es drei Möglichkeiten zum Auftreten von CP-verletzenden Phasen:
  - 1) **CP-Verletzung im Zerfall von Teilchen, z.B. im Zerfall  $K_1 \rightarrow 2\pi$ .**  
Dies wird auch **direkte CP-Verletzung** genannt,  $\eta_{CP}(K_1) \neq \eta_{CP}(2\pi)$ .
  - 2) **CP-Verletzung in Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen z.B. in  $B^0 \leftrightarrow \overline{B^0}$  - Oszillationen.**  
Dies wird auch **indirekte CP-Verletzung, oder CP-Verletzung in der Mischung, genannt.**
  - 3) **CP-Verletzung durch eine Interferenz von Oszillations- und Zerfallsamplituden, z.B. in der Reaktion  $B^0 \overline{B^0} \rightarrow J/\psi K_S + X_{\text{flav}}$ .**
- Historisch erfolgte zuerst die Entdeckung der CP-Verletzung im Kaon-System durch Christenson, Cronin, Fitch und Turlay (1964).
- Danach wurde das Kaon-System mit großer Präzision vermessen. Die Experimente NA48 am CERN und KTeV am FermiLab haben die CP-Verletzung sowohl in  **$K^0 \leftrightarrow \overline{K^0}$  Oszillationen** als auch **in der Interferenz** eindeutig nachgewiesen.
- Heute konzentriert man sich auf das System der neutralen B-Mesonen, bei denen die CP-verletzenden Effekte wesentlich größer sind.
- Die Experimente BaBar am SLAC und Belle bei KEK haben die CP-Verletzung im  $B^0 \overline{B^0}$ -System **in der Interferenz** nachgewiesen.

**Die Verifizierung der CKM-Phase als Hauptquelle der CP-Verletzung dauerte etwa 30 Jahre.**



# CP-Verletzung und Pseudoskalare Mesonen

- Man studiert die Übergänge Pseudoskalarer Mesonen  $P^0$  in CP-Eigenzustände  $f_{CP}$ .



$f_{CP}$

- Die Transformationseigenschaften sind:

$$CP|P^0\rangle = -|\overline{P^0}\rangle \quad \text{und} \quad CP|\overline{P^0}\rangle = -|P^0\rangle.$$

- Das bedeutet, dass weder  $|P^0\rangle$  noch  $|\overline{P^0}\rangle$  ein CP-Eigenzustand ist.

- Die Linearkombinationen:

$$|P_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( p|P^0\rangle + q|\overline{P^0}\rangle \right) \quad \text{und} \quad |P_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( p|P^0\rangle - q|\overline{P^0}\rangle \right) \quad \text{mit} \quad p, q \in \mathbb{C} \quad \text{sind} \\ \text{CP-Eigenzustände falls } p = q = 1 \Rightarrow CP|P_1\rangle = -|P_1\rangle, \quad \text{und} \quad CP|P_2\rangle = |P_2\rangle.$$

- Zum Auftreten der CP-Verletzung braucht man die Interferenz zweier Übergangs-

Amplituden: **1) Im Zerfall:**  $|\frac{\bar{A}}{A}| \equiv |\frac{\bar{A}_1 + \bar{A}_2}{A_1 + A_2}| \neq 1$ , mit  $A_i \equiv \langle f_{CP} | S_i | P^0 \rangle$ .

**2) In der Oszillation:**  $|\frac{p}{q}| \neq 1$ .

**3) Interferenz zwischen Oszillation und Zerfall:**  $\text{Im}\lambda = \text{Im} \left[ \frac{p}{q} \frac{\bar{A}}{A} \right] \neq 0$ .

**Alle drei Spielarten der CP-Verletzung wurden experimentell untersucht.**



# Die Entdeckung der CP-Verletzung - das Kaon-System

– Die Kaonen,  $K^0 = (\bar{s}d)$  mit  $S = 1$  und  $\bar{K}^0 = (s\bar{d})$  mit  $S = -1$ , werden in der starken Wechselwirkung als Zustände definierter Strangeness erzeugt.

– Die Transformationseigenschaften von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  sind:

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

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

Das bedeutet, dass weder  $|K^0\rangle$  noch  $|\bar{K}^0\rangle$  ein CP-Eigenzustand ist.

– Die allgemeine Form der Linearkombinationen ist:

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( q|K^0\rangle + p|\bar{K}^0\rangle \right) \quad \text{und} \quad |K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( q|K^0\rangle - p|\bar{K}^0\rangle \right).$$

– Aber es lassen sich auch CP-Eigenzustände durch Linearkombinationen erzeugen:

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

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( |K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right) \Rightarrow CP|K_2\rangle = |K_2\rangle \quad (CP|2\pi\rangle = |2\pi\rangle).$$

– Dies sind dann orthonormierte Zustände, im Kaon Raum und damit gilt z.B.:

$$\langle K_1 | K_1 \rangle = 1, \quad \langle K_2 | K_2 \rangle = 1 \quad \text{und} \quad \langle K_1 | K_2 \rangle = 0.$$

**Das Kaon System wurde als erstes auf CP-Verletzung untersucht.**



# Die Entdeckung der CP-Verletzung - der Formalismus

– Man kannte die K-short,  $K_S$ , und K-long,  $K_L$ , Mesonen. Sie sind die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung mit festen Massen,  $m(K_S) = 497.7 \text{ MeV}$ , und Lebensdauern.

– Es gibt einen minimalen, aber sehr wichtigen, Massenunterschied:

$$\Delta m = m(K_L) - m(K_S) \approx 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ eV, also } \Delta m/m(K_S) \approx 10^{-14},$$

aber einen riesigen Unterschied in den Lebensdauern:

$$\tau(K_L)/\tau(K_S) = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s}/9 \cdot 10^{-11} \text{ s, also } \tau(K_S)/\tau(K_L) \approx 580.$$

Der kleinere Phasenraum für den Zerfall in drei Pionen lässt  $K_L$  länger leben.

– Die Zeitentwicklung der Zustände, z.B. des  $K_L$  in seinem Ruhssystem ist:

$$|K_L(t)\rangle = e^{-iM_L t} e^{-\Gamma_L t/2} |K_L(0)\rangle. \quad \text{Damit folgt z.B. das Zerfallsgesetz:}$$

$$|\langle K_L(t) | K_L(0) \rangle|^2 = |e^{+iM_L t} \cdot e^{-\Gamma_L t/2} \cdot \langle K_L(0) | K_L(0) \rangle|^2 = e^{-\Gamma_L t}. \quad \checkmark$$

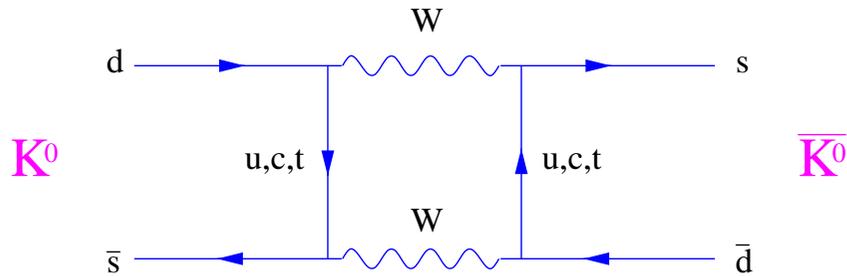
– Wenn  $K_L$  und  $K_S$  mit  $K_1$  und  $K_2$  identisch sind, dann kann bei CP-Erhaltung  $K_L$  nur in drei und  $K_S$  nur in zwei Pionen zerfallen. Die neutralen Kaonen sind dann:

$$|K^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_L\rangle + |K_S\rangle) \quad \text{und} \quad |\bar{K}^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_L\rangle - |K_S\rangle).$$

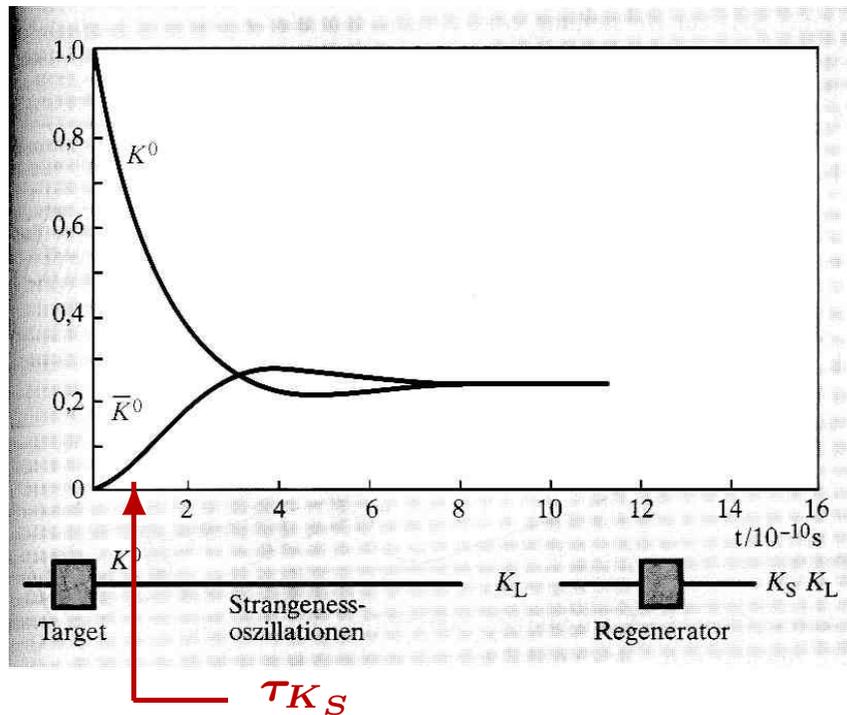
**Die unterschiedlichen Lebensdauern von  $K_L$  und  $K_S$  erzeugen einen interessanten Effekt.**



# Teilchen-Antiteilchen Oszillationen



- In der schwachen Wechselwirkung sind  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  Oszillationen durch Austausch zweier W-Bosonen mit  $\Delta S = 2$  möglich.

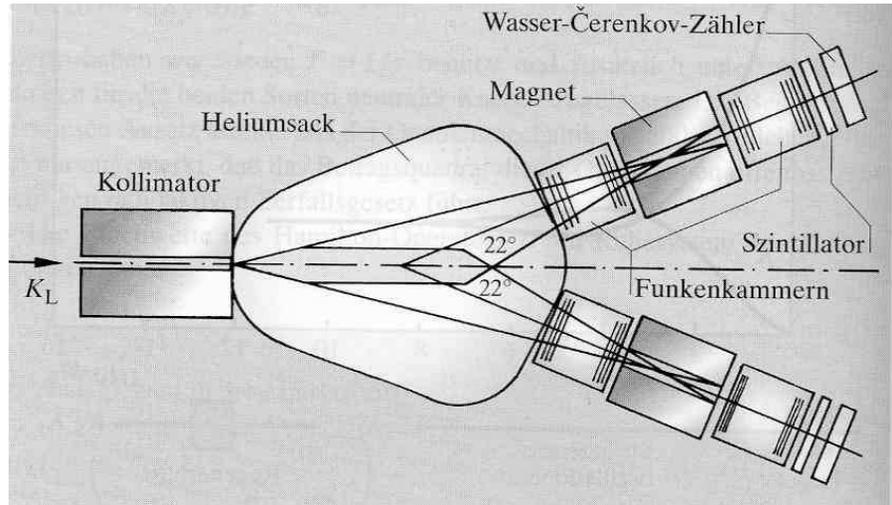


- Ein bei  $t = 0$  erzeugter  $K^0$  Strahl unterliegt den  $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$  Oszillationen und den  $K_L$  und  $K_S$  Zerfällen:  $|\langle \bar{K}^0(t) | K^0(0) \rangle|^2 = \frac{1}{4} |\langle K_L(t) | K_L(0) \rangle - \langle K_S(t) | K_S(0) \rangle|^2 = \frac{1}{4} (e^{-\Gamma_L t} + e^{-\Gamma_S t} - 2 \cos(\Delta m t) e^{-(\Gamma_L + \Gamma_S)t/2})$ ,
- Wegen  $\frac{\tau(K_L)}{\tau(K_S)} \approx 580$  ist nach einiger Zeit aus einem  $K^0$ -Strahl ein  $K_L$ -Strahl geworden:
- Aus  $\Delta m = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$  folgt  $T_{\text{osz}} = 0.12 \text{ ps}$ .
- $e^{-\Gamma_{S,L} \cdot 10 \tau_S} = 5 \cdot 10^{-5} (0.98)$  für  $K_S (K_L)$ .

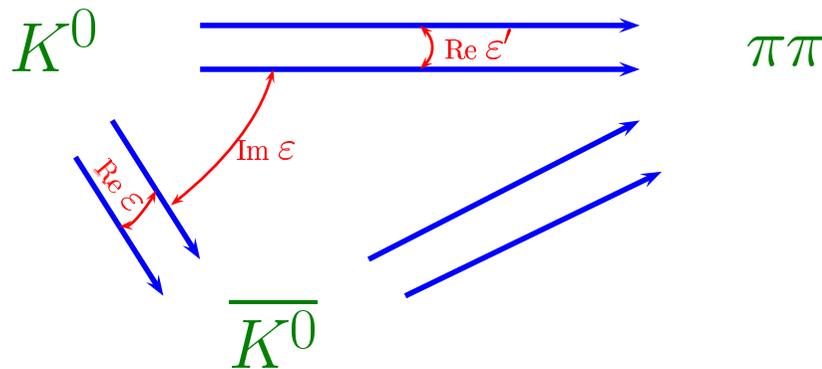
**Teilchen-Antiteilchen Oszillationen erfordern eine endliche Massendifferenz.**



# Die Entdeckung der CP-Verletzung - das Experiment



- Brookhaven AGS Beschleuniger, mit 30 GeV p auf Be-Target. Der Strahl neutraler Kaonen wird unter  $30^\circ$  zum p-Beam extrahiert.
- Im Experiment von Christenson et al. wurde der Zerfall  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$  mit einer Rate von  $(2.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$  gemessen.



- Dies ist die CP-Verletzung in der Mischung:
 
$$|K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_1\rangle + \epsilon|K_2\rangle)$$

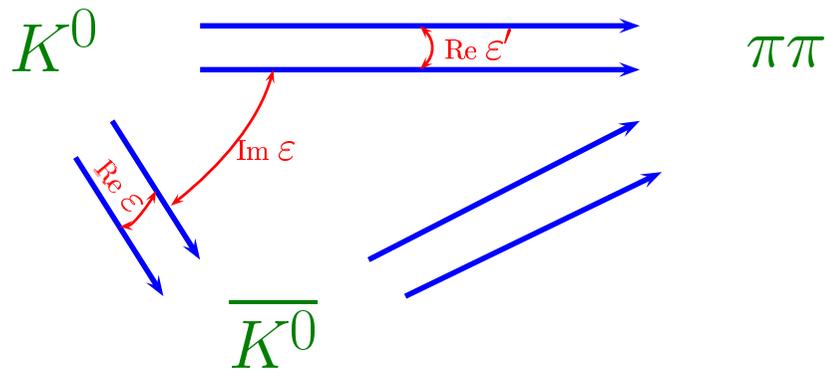
$$|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (\epsilon|K_1\rangle + |K_2\rangle)$$
- Dies bedeutet, dass das  $K_L$  mit einem kleinen Anteil  $\epsilon$  in  $2\pi$  zerfallen darf. Die zwei Amplituden sind  $2\pi(I=0)$  und  $2\pi(I=2)$ .

**Dies war der Start zu 30 Jahren Messung der CP-Verletzung.**



# Die Interferenz von Oszillation und Zerfall

- Nach der CP-Verletzung in der Oszillation wurde auch nach CP-Verletzung im Zerfall und nach der Interferenz gesucht.



- Die Amplitudenverhältnisse sind:

$$\eta_{+-} = \frac{\langle \pi^+ \pi^- | S | K_L \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- | S | K_S \rangle} = \epsilon + \epsilon'$$

$$\eta_{00} = \frac{\langle \pi^0 \pi^0 | S | K_L \rangle}{\langle \pi^0 \pi^0 | S | K_S \rangle} = \epsilon - 2\epsilon'$$

wobei  $\eta_{+-}$  und  $\eta_{00}$  komplexe Zahlen sind, und  $\epsilon' \neq 0 \Leftrightarrow \langle 2\pi | S | K_1 \rangle$ , was eine CP-Verletzung im Zerfall bedeutet.

- Experimentell wurde das Doppel-Verhältnis der Raten analysiert:

$$\left| \frac{\eta_{00}}{\eta_{+-}} \right|^2 = \left| \frac{\langle \pi^0 \pi^0 | S | K_L \rangle}{\langle \pi^0 \pi^0 | S | K_S \rangle} \right|^2 / \left| \frac{\langle \pi^+ \pi^- | S | K_L \rangle}{\langle \pi^+ \pi^- | S | K_S \rangle} \right|^2 \approx 1 - 6\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) \quad \text{studiert.}$$

- Das Verhältnis  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$  ist eine sehr kleine Zahl  $\mathcal{O}(10^{-3})$ .
- Ausserdem wurden die Zerfälle  $K_L \rightarrow \pi^+ e^- \bar{\nu}_e$  und  $K_L \rightarrow \pi^- e^+ \nu_e$  studiert.

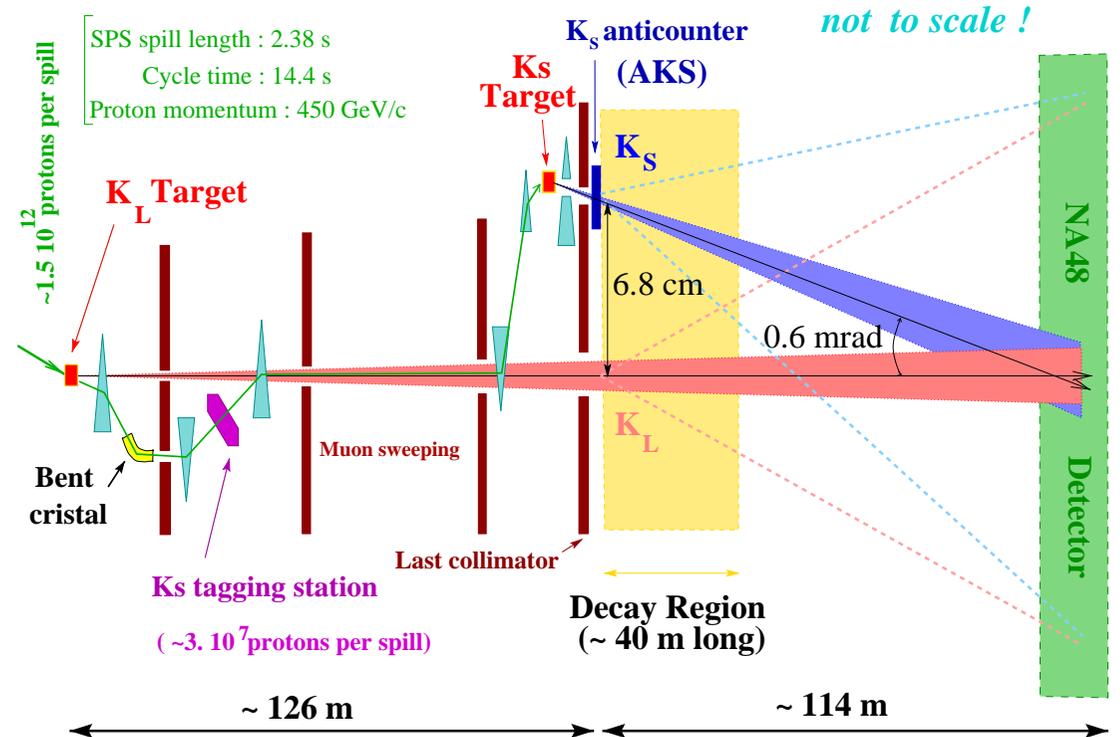
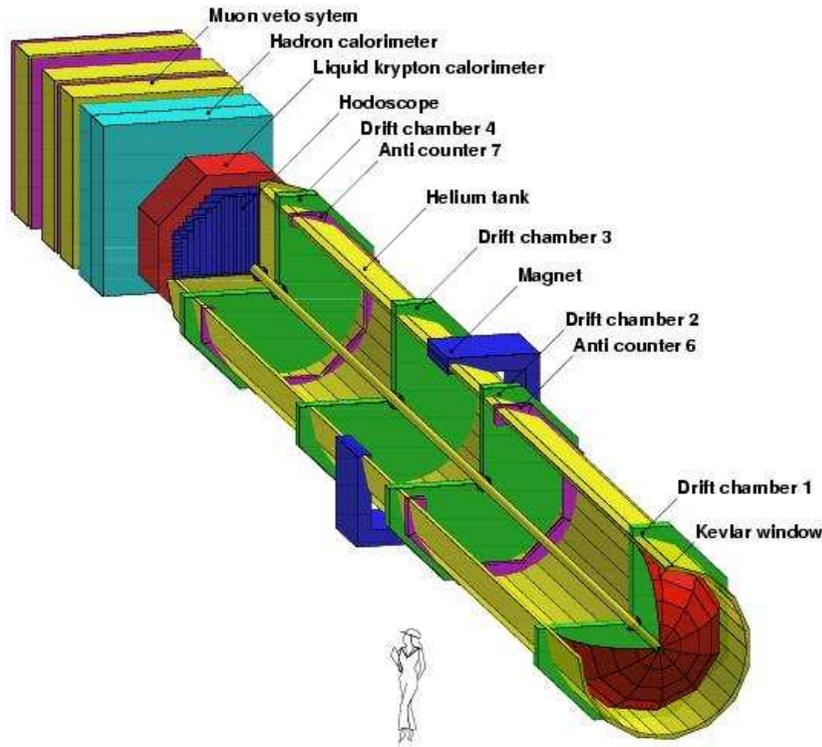
**Die Messung von  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$  ist sehr schwierig und aufwändig.**



# Das NA48 Experiment - generelle Überlegungen

## Das Experiment

## Die Strahlführung



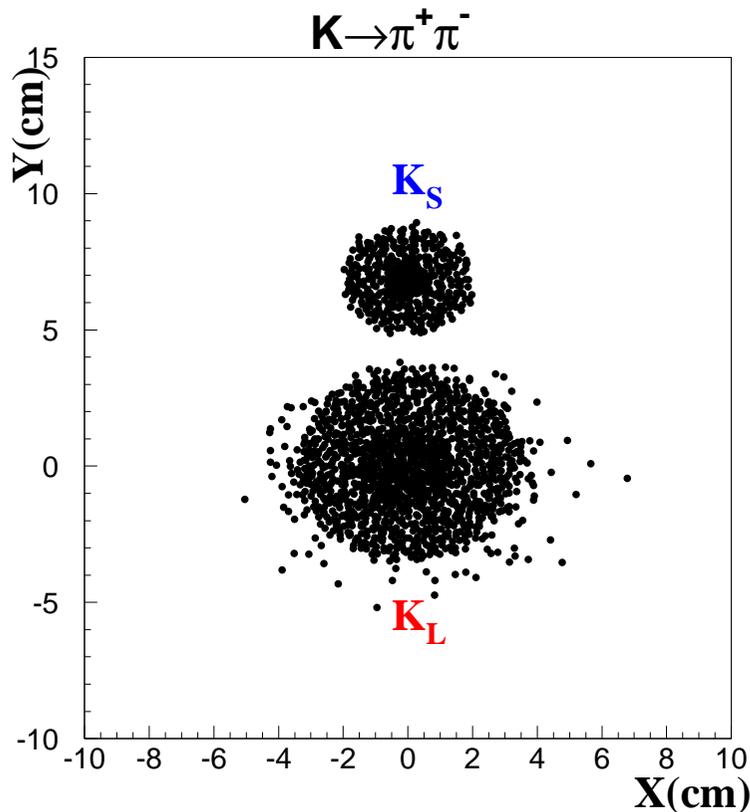
- Das Wichtigste ist die Kontrolle der systematischen Unsicherheiten. Deswegen werden die Zerfälle von  $K_L$  und  $K_S$  in  $2\pi^0$  und  $\pi^+\pi^-$  simultan gemessen.

**Die systematischen Fehler konnten bei NA48 auf etwa 14% begrenzt werden.**

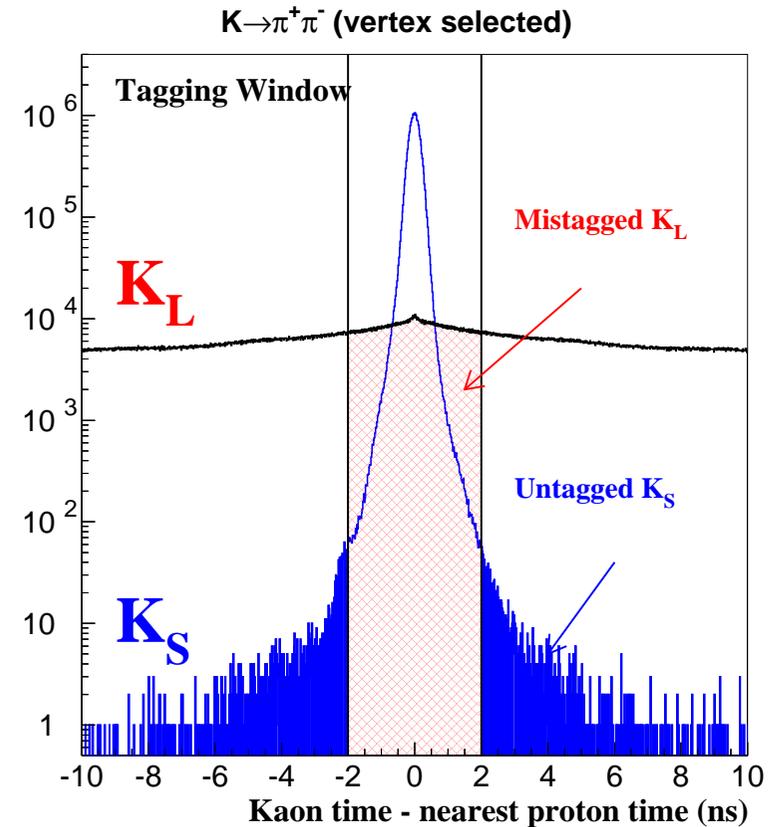


# Die Trennung von $K_L$ und $K_S$

## Die Vertex Position



## Das Zeitfenster der $K_S$

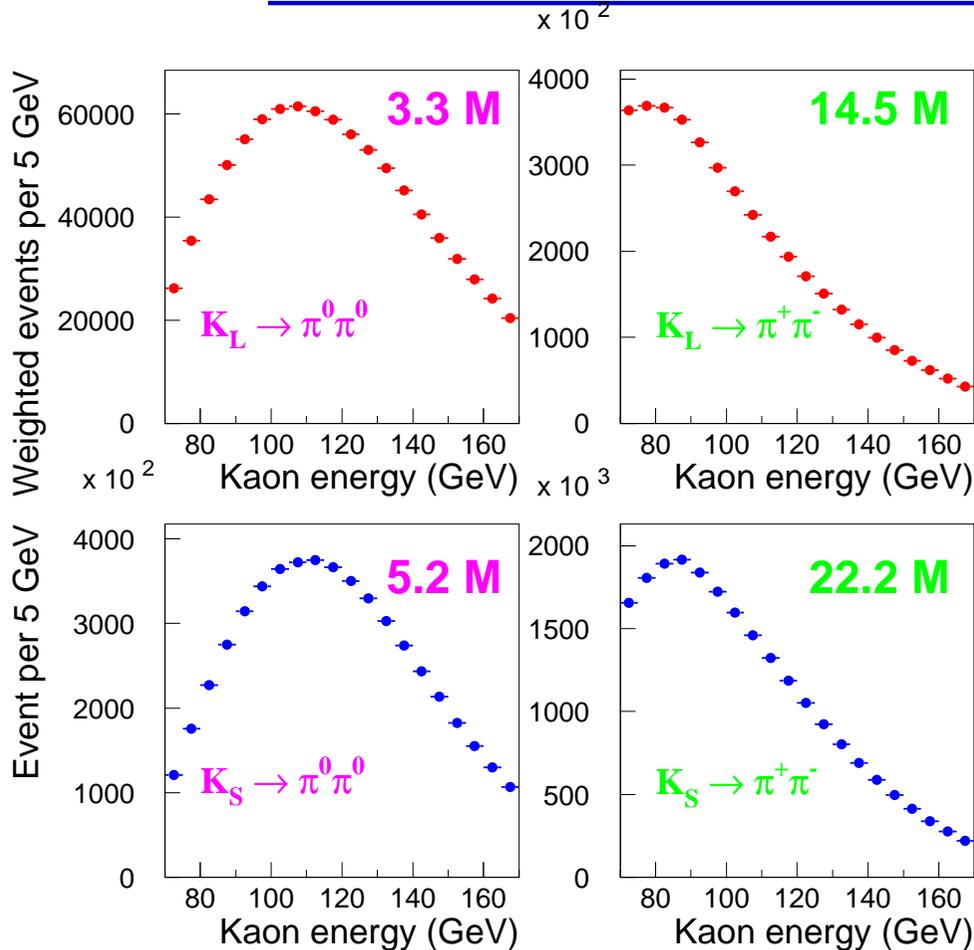


- Die Vertex Trennung ist nur für  $\pi^+ \pi^-$  Endzustände möglich.
- Die Zerfälle der  $K_S$  Mesonen fallen in ein enges Zeitfenster,  $|\Delta t(p - K_S)| \leq 2$  ns.

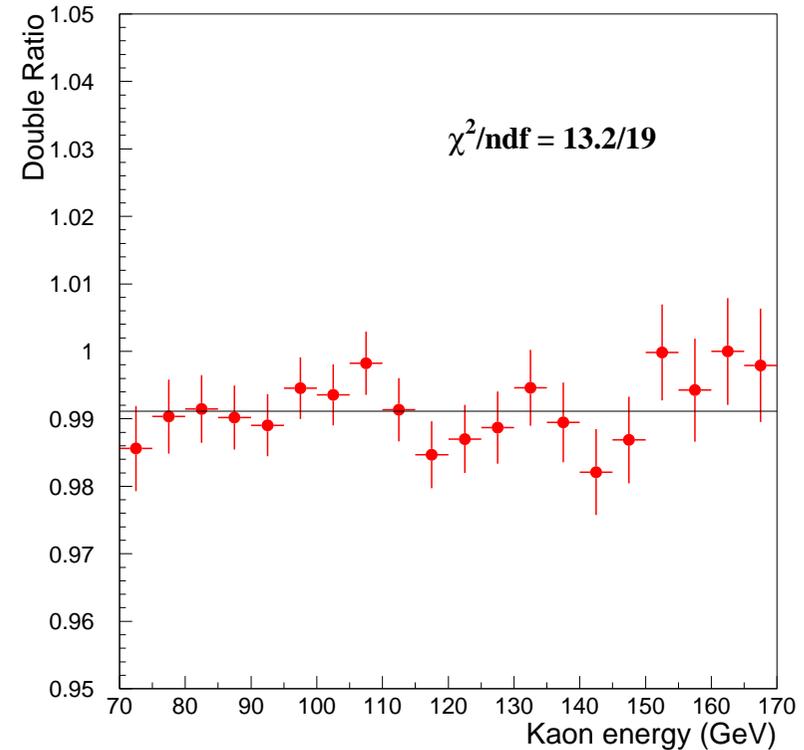
**Die beiden Mesonen lassen sich im Experiment in Ort und Zeit voneinander trennen.**



# Die Messung von $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$



## Die Energieunabhängigkeit



**NA48:**  $(15.0 \pm 1.7 \text{ (stat)} \pm 2.1 \text{ (sys)}) \cdot 10^{-4}$

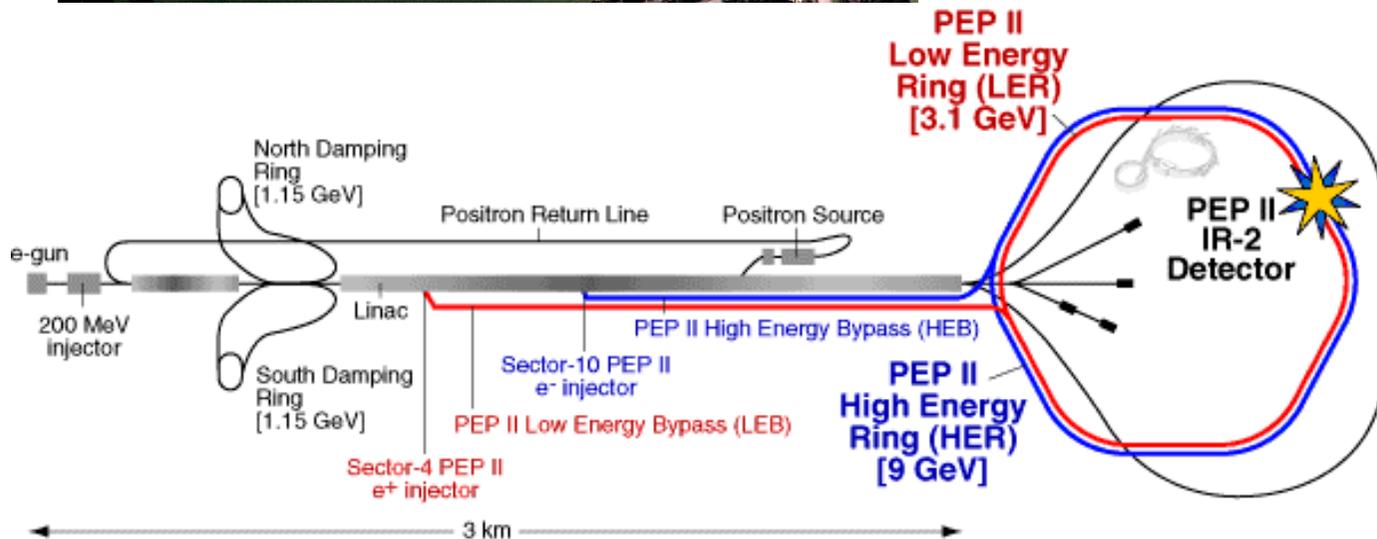
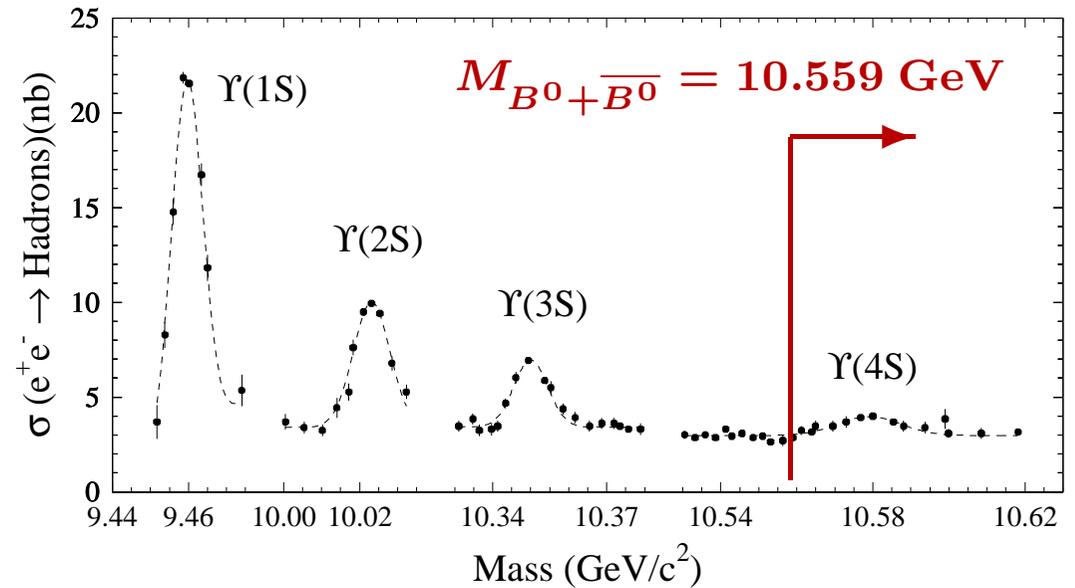
– Die aktuellen Resultate für  $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$  sind: **KTeV:**  $(20.7 \pm 1.5 \text{ (stat)} \pm 2.4 \text{ (sys)}) \cdot 10^{-4}$

– Die größte systematische Unsicherheit resultiert aus der Messung der  $2\pi^0$  Endzustände.

**Der ersten konsistenten, von Null verschiedenen Werte wurden erst 1999 erreicht.**



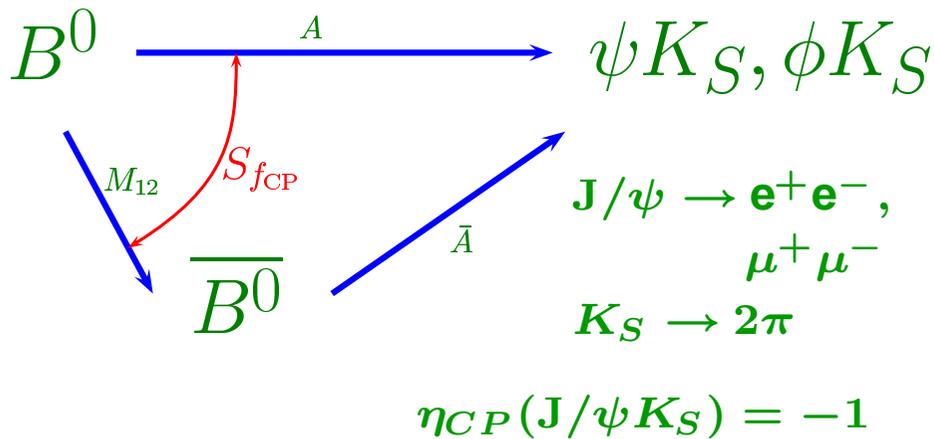
# Der asymmetrische $e^+e^-$ Beschleuniger PEP II am SLAC



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



# CP-Verletzung im B-System



- Im Zerfall  $B^0(\overline{B}^0) \rightarrow f$  mit  $f = J/\psi K_S$  gibt es nur eine Zerfallsamplitude  $\Rightarrow |\frac{\bar{A}}{A}| = 1$  und nur eine Oszillationsamplitude  $\Rightarrow |\frac{p}{q}| = 1$ , also sollte  $|\lambda| = |\frac{p}{q} \frac{\bar{A}}{A}| = 1$  sein, und nur die Interferenz  $\text{Im}\lambda = \text{Im}\left[\frac{p}{q} \frac{\bar{A}}{A}\right] \neq 0$  die CP-Verletzung induzieren.

- Dies führt zu einer zeitabhängigen Asymmetrie:  $A_f(t) = \frac{\Gamma(\overline{B}^0 \rightarrow f) - \Gamma(B^0 \rightarrow f)}{\Gamma(\overline{B}^0 \rightarrow f) + \Gamma(B^0 \rightarrow f)}$

–  $A_f(t) = \frac{2\text{Im}\lambda}{1+|\lambda|^2} \sin(\Delta m_d t) - \frac{1-|\lambda|^2}{1+|\lambda|^2} \cos(\Delta m_d t) = \text{Im}\lambda \sin(\Delta m_d t)$ , für  $|\lambda| = 1$ .

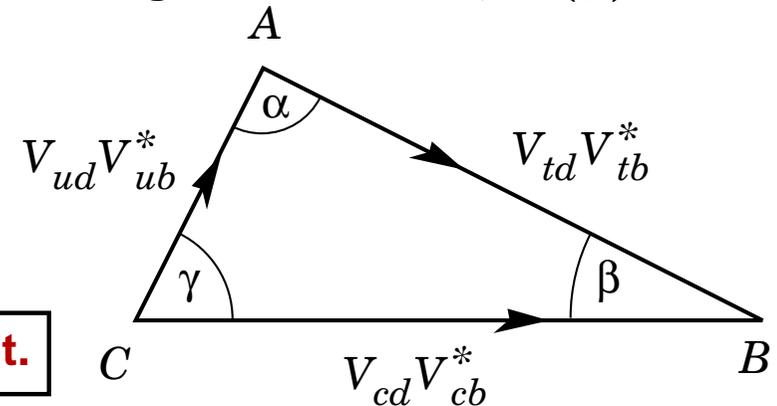
– Da  $\lambda = \eta_{CP}(f) \left(\frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{td}^* V_{tb}}\right) \left(\frac{V_{cd}^* V_{cb}}{V_{cb}^* V_{cd}}\right) = \eta_{CP}(f) e^{-2i\beta}$  folgt  $\text{Im}\lambda = -\eta_{CP}(f) \sin 2\beta$

$$A_f(t) = -\eta_{CP}(f) \sin 2\beta \sin(\Delta m_d t)$$

– In der Wolfenstein-P. gilt:  $\sin 2\beta = \frac{2\bar{\eta}(1-\bar{\rho})}{\bar{\eta}^2 + (1-\bar{\rho})^2}$ .

– Aus  $\Delta m_d = 3.2 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$  folgt  $T_{\text{osz}} = 12.8 \text{ ps}$ .

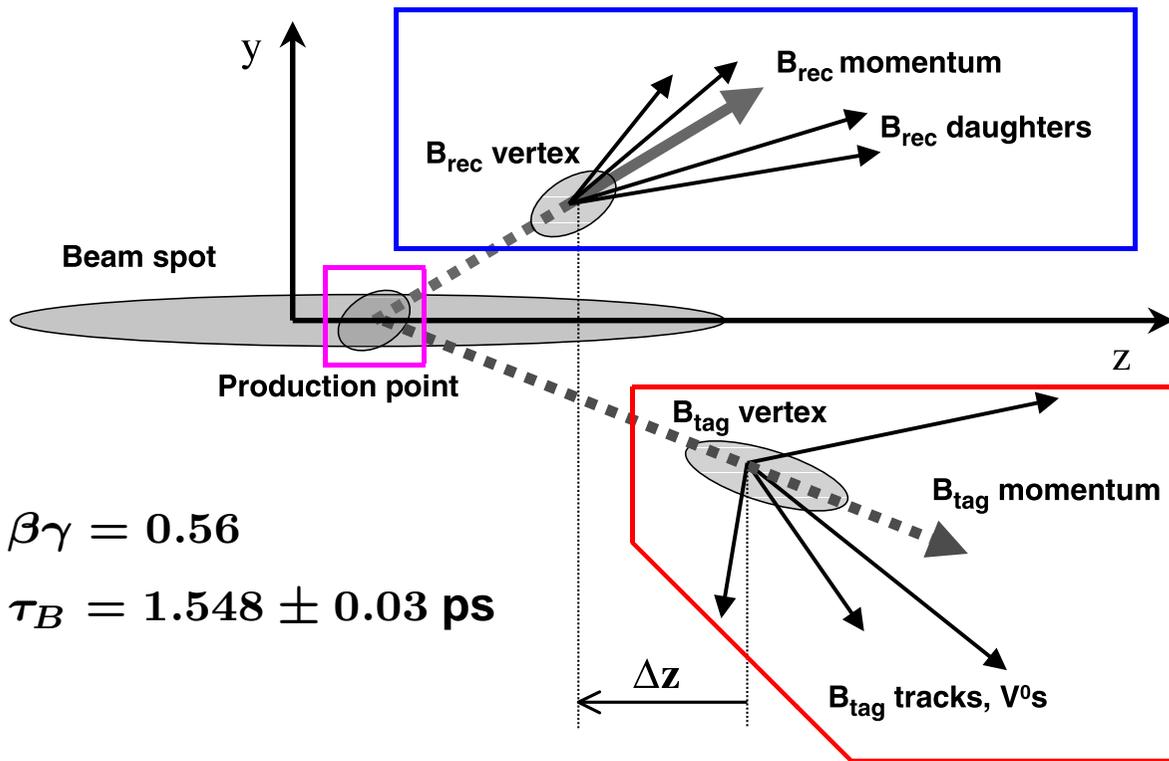
**Ein klarer Kanal mit geringer theoretischer Unsicherheit.**





# Die Rekonstruktion der Ereignisse

– Auf der  $\Upsilon(4S)$  Resonanz wird zur Zeit  $t = 0$  ein kohärenter  $B^0 \bar{B}^0$ -Zustand erzeugt.



$$\beta\gamma = 0.56$$

$$\tau_B = 1.548 \pm 0.03 \text{ ps}$$

– Falls zur Zeit  $t$  ein B-Meson als  $B^0$  erkannt wird **muss** das andere B-Meson ein  $\bar{B}^0$  sein, und umgekehrt.

– Zur Zeit  $t = t_{tag}$  wird die flavour eines B-Mesons im Zerfall getaggt, z.B. durch Leptonen.

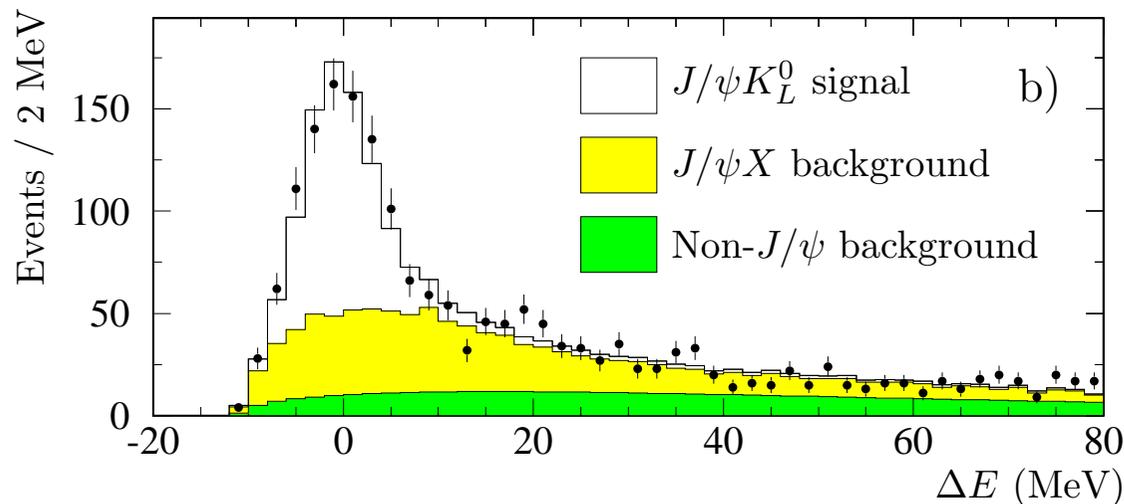
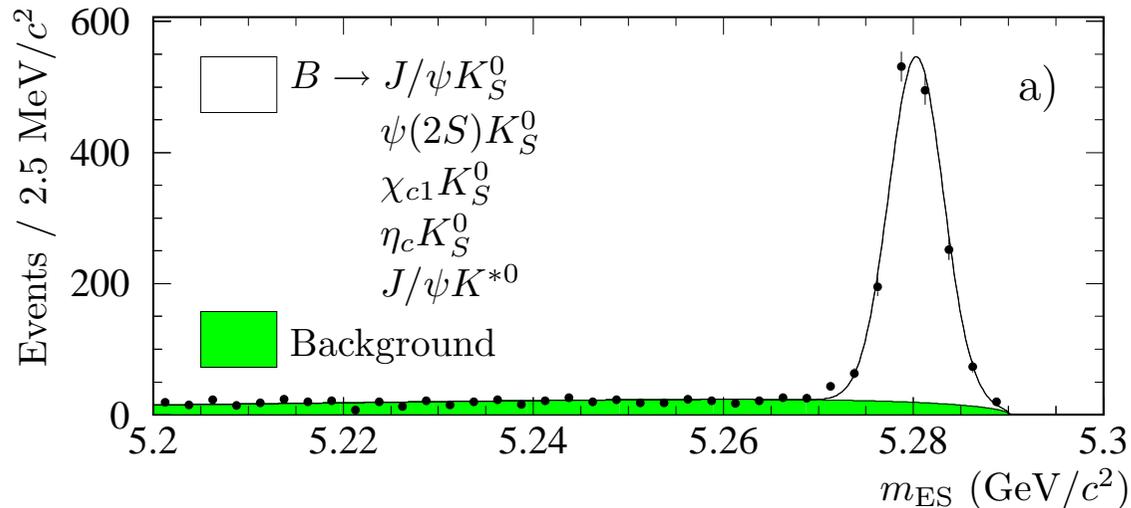
– Zur Zeit  $t = t_{rec}$  wird der Zerfall des anderen B-Mesons in einen CP-Eigenzustand, z.B.  $J/\psi K_S$ , vollständig rekonstruiert.

– Die räumliche Differenz:  $\Delta z = \beta\gamma c \Delta t$  ( $\Delta z \approx 250 \mu m$ , für  $\Delta t = \tau(B)$ ), wird in eine Zeitdifferenz  $\Delta t = t_{tag} - t_{rec} = \frac{\Delta z}{\beta\gamma c}$  umgerechnet, die mit einer Genauigkeit von etwa  $\sigma_{\Delta t} = 1.1 \text{ ps}$  gemessen wird.

**Durch den asymmetrischen Beschleuniger wird die Zerfallslänge im Detektor gestreckt.**



# Die Ausnutzung der Kenntnis der Strahlenergie



$$m_{ES} = \sqrt{E_{\text{beam}}^{*2} - \vec{p}_B^{*2}}$$

Hierbei ist  $(E_B^*, \vec{p}_B^*)$  der Vierer-Vektor des B-Mesons und  $E_{\text{beam}}^*$  die Energie des einlaufenden Elektrons im  $\Upsilon(4S)$ -Schwerpunktsystem.

–  $\sigma_{m_{ES}} \approx 2.5 \text{ MeV}$

$$\Delta E = E_{\text{beam}}^* - E_B^*$$

–  $\sigma_{\Delta E} \approx 10 \text{ MeV}$

– Ein zweidimensionaler Schnitt mit:

$|\Delta E| = 3\sigma_{\Delta E}$  und

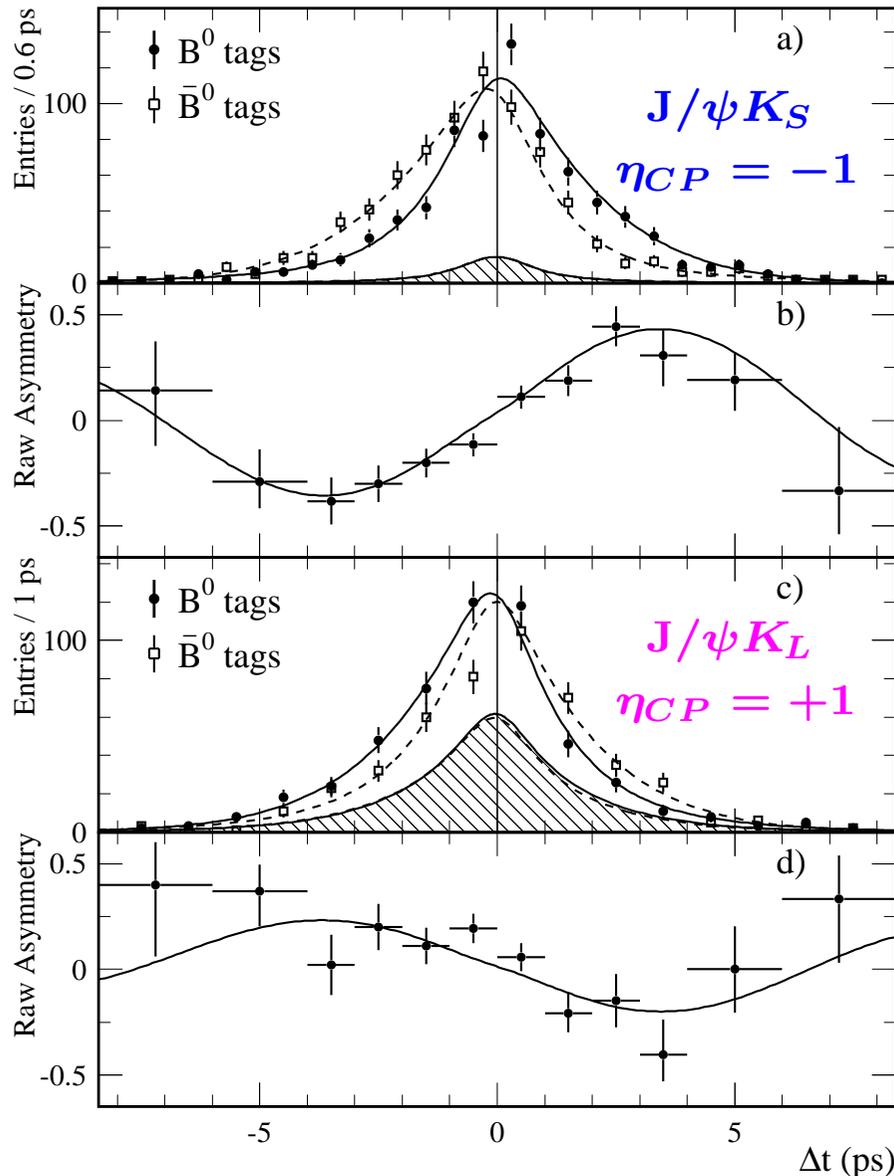
$5.27 < m_{ES} < 5.29 \text{ GeV}$

selektiert das Signal.

**Der zweidimensionale Schnitt ergibt eine gute Unterdrückung des Untergrunds.**



# Die CP-Asymmetrien



– Die zeitabhängigen Ereignisraten der zur Zeit  $t_{rec}$  als  $J/\psi K_S$  ( $K_L$ ) rekonstruierten Ereignisse bei denen das andere B-Meson zur Zeit  $t_{tag}$  als  $B^0$  bzw.  $\bar{B}^0$  identifiziert wurde.

– Die Untergrundereignisse sind als schraffiertes Histogramm dargestellt.

– Von Babar (Belle) wurden etwa 88 M (152 M) Ereignisse analysiert. Die heutige Statistik ist erheblich grösser. Das Ergebnis ist:

$$\sin 2\beta = 0.741 \pm 0.067 \pm 0.034 \text{ (BaBar)}$$
$$\sin 2\beta = 0.728 \pm 0.056 \pm 0.023 \text{ (Belle)}$$

– Beide Experimente finden  $|\lambda| = 1$ , z.B.  $|\lambda| = 1.007 \pm 0.041 \pm 0.033$  (Belle), also keine Evidenz für direkte CP-Verletzung.

**Der Kanal  $J/\psi K_S$  liefert das klarste Signal.**



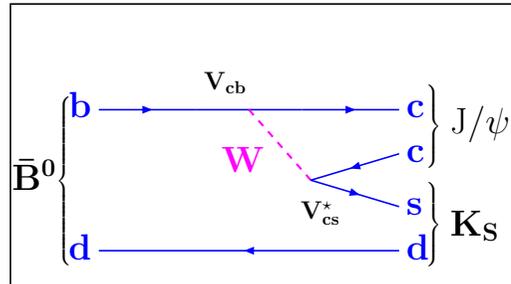
# Von Baumgraphen und Pinguinen

–  $b \rightarrow c \bar{c} s$

ein Baumgraph

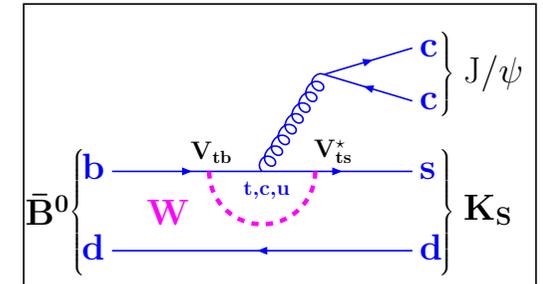
$$V_{cb} V_{cs}^* = \mathcal{O}(\lambda^2 1)$$

$$\mathcal{O}(\lambda^2)$$



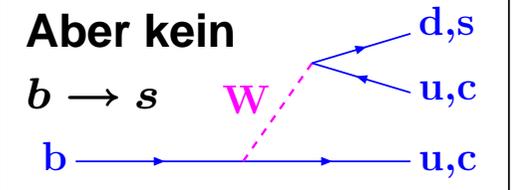
und ein Pinguin

$$V_{tb} V_{ts}^* = \mathcal{O}(1 \lambda^2)$$



– CKM Matrix:

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

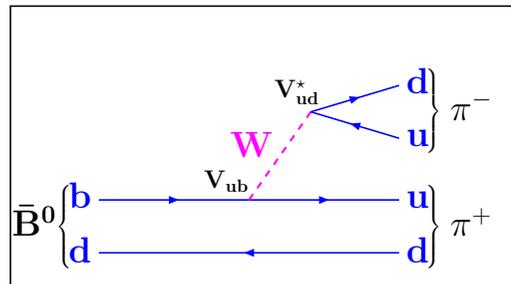


–  $b \rightarrow u \bar{u} d$

ein Baumgraph

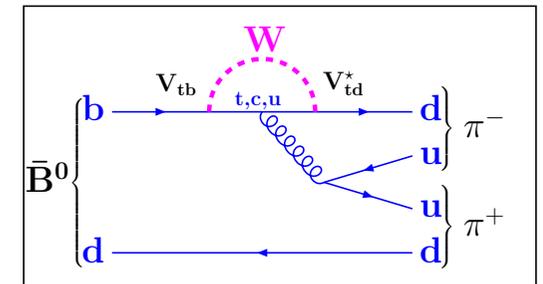
$$V_{ub} V_{ud}^* = \mathcal{O}(\lambda^3 1)$$

$$\mathcal{O}(\lambda^3)$$



und ein Pinguin

$$V_{tb} V_{td}^* = \mathcal{O}(1 \lambda^3)$$

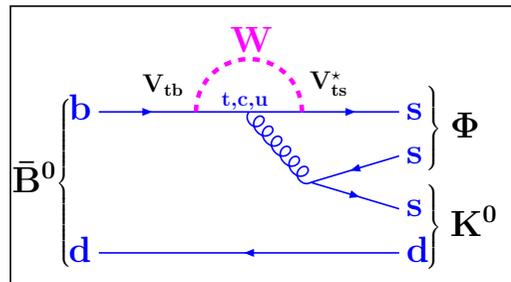


–  $b \rightarrow s \bar{s} s$

geht nur als Pinguin

$$V_{tb} V_{ts}^* = \mathcal{O}(1 \lambda^2)$$

$$\mathcal{O}(\lambda^2) \alpha_s$$

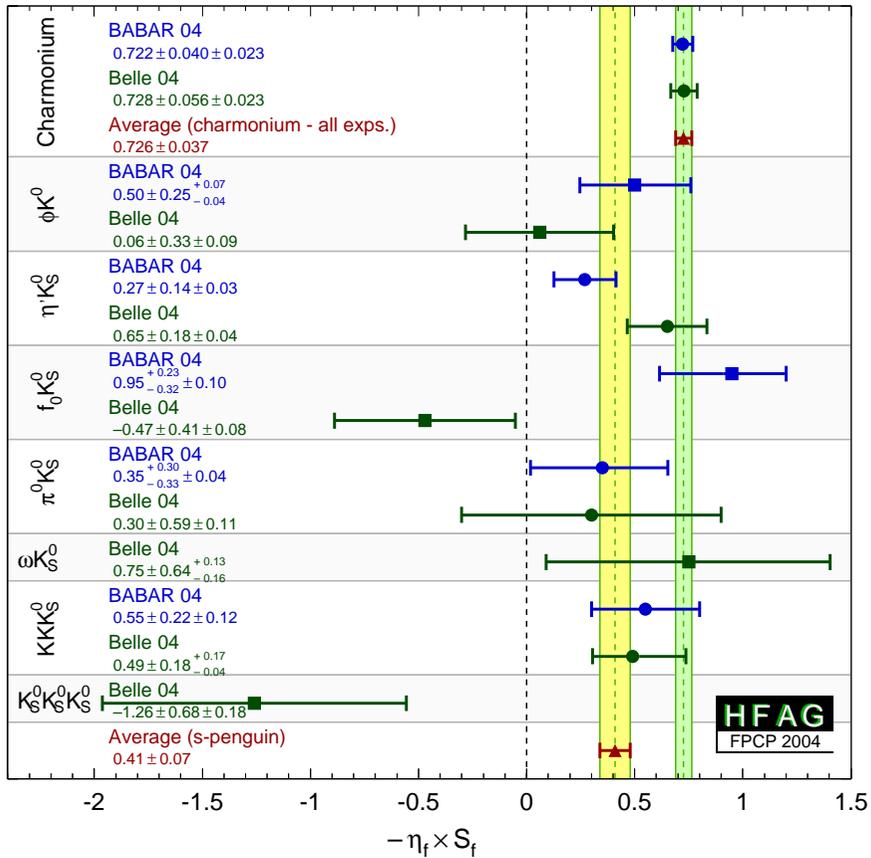


Es gibt eine interessante Diskrepanz in den  $\sin 2\beta$  Messungen mit s-Pinguinen.

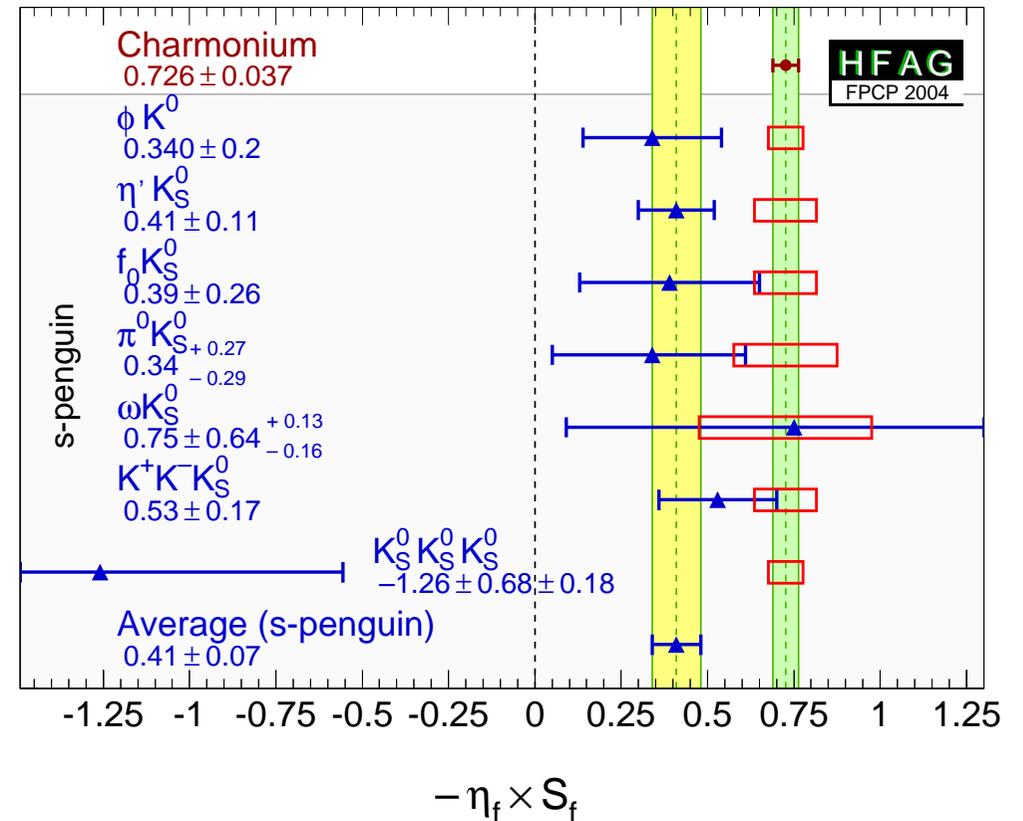


# Die Messungen von $\sin 2\beta$

## Verschieden Kanäle



## Charmonium vs Strange-Pinguine

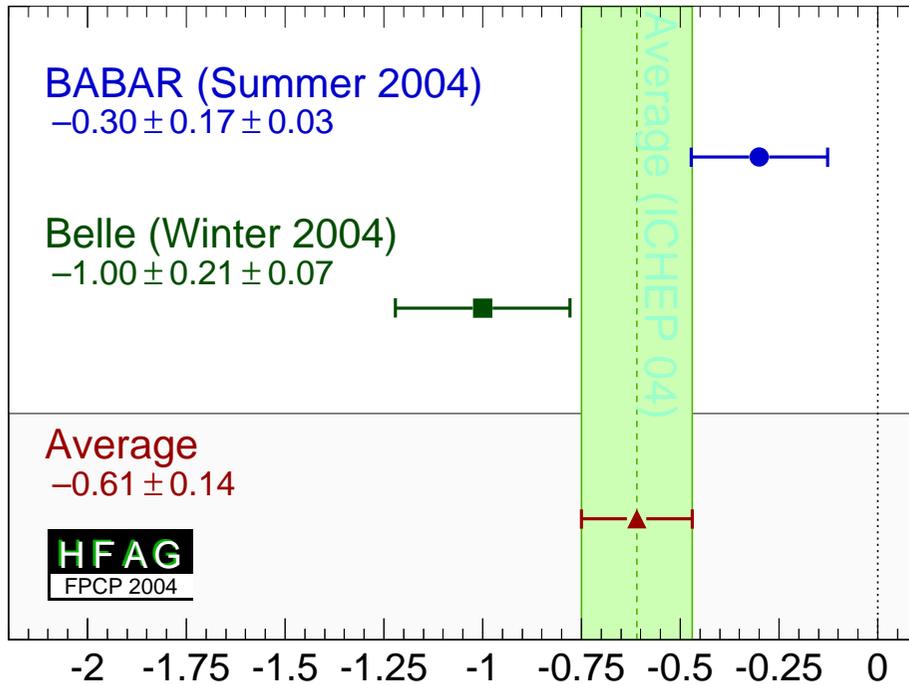


Für Charmoniumendzustände ist  $\sin 2\beta$  auf etwa 5% genau bekannt.

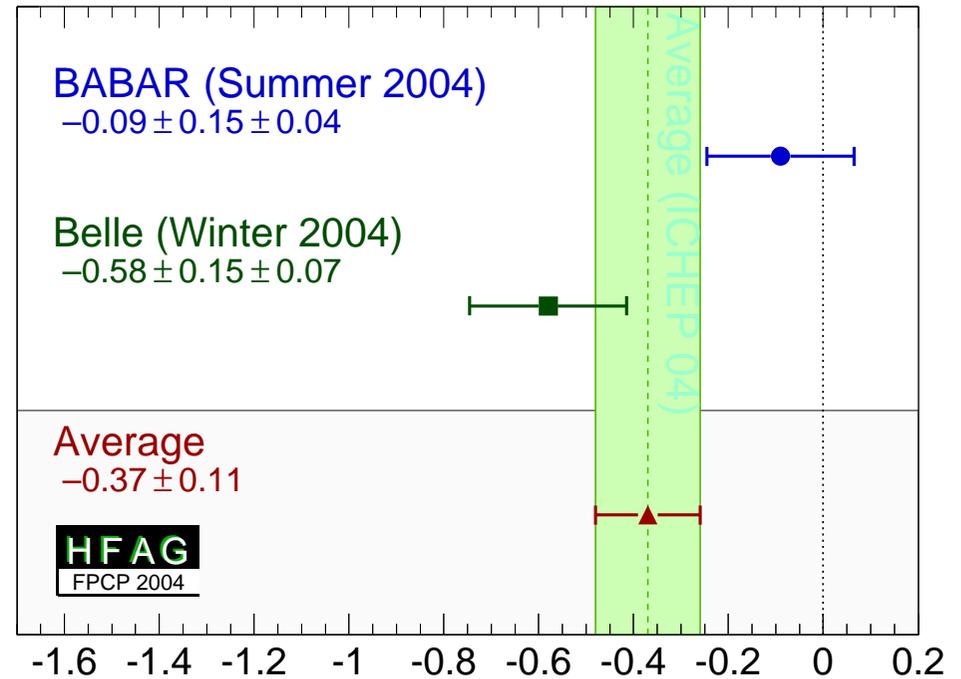
$\sin 2\beta$  aus Pinguindiagrammen ist tendenziell kleiner aber auch theoretisch unsicher.



# Die Messungen von $B \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ( $b \rightarrow u \bar{u} d$ )



$S_{\pi\pi}$



$C_{\pi\pi}$

–  $\Gamma(B \rightarrow f) \propto 1 \mp \frac{2\text{Im}\lambda}{1+|\lambda|^2} \sin(\Delta m_d t) \pm \frac{1-|\lambda|^2}{1+|\lambda|^2} \cos(\Delta m_d t)$  für  $B^0/\bar{B}^0$

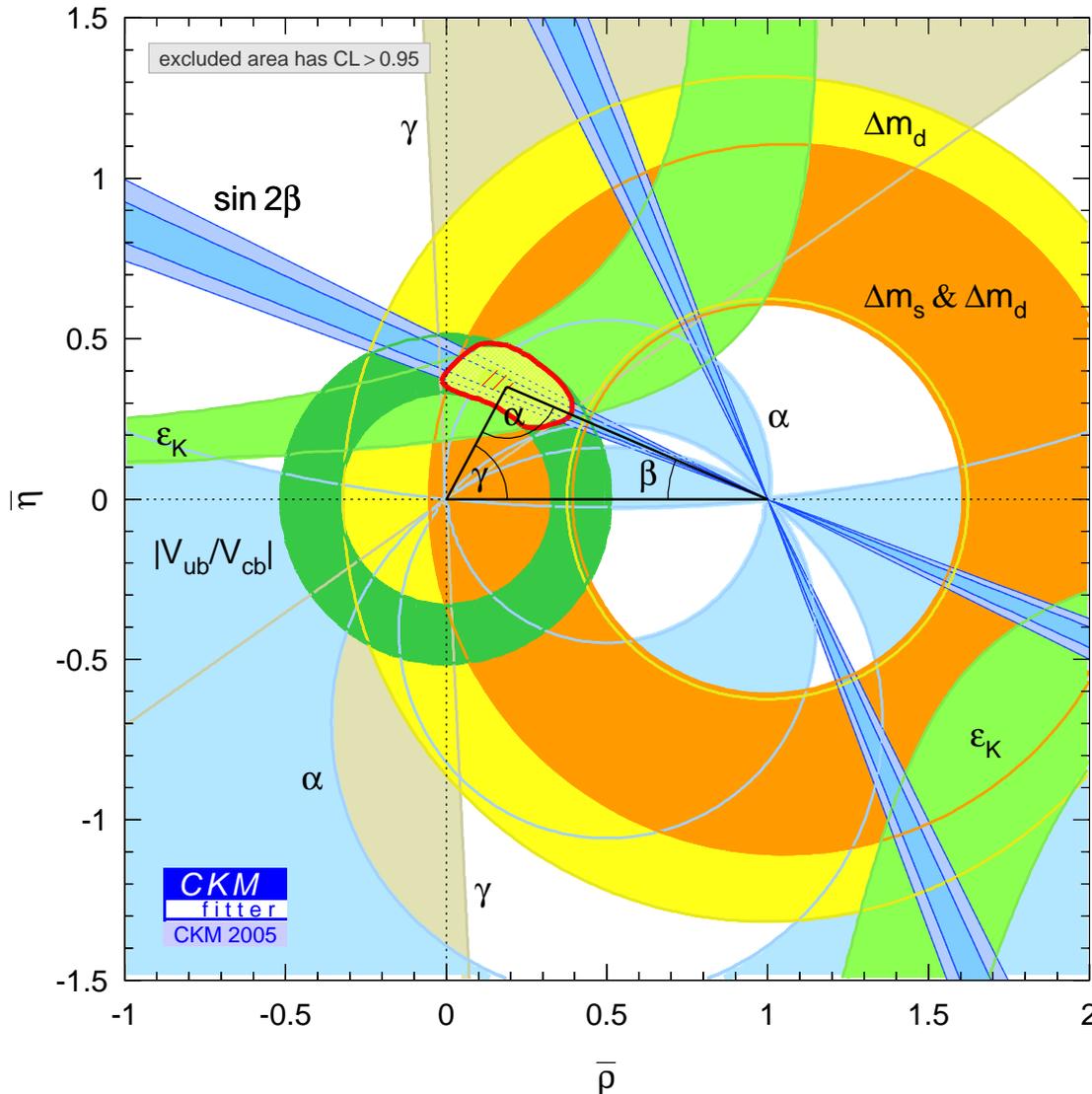
–  $|\lambda| = 1$  liefert  $\Gamma(B \rightarrow f) \propto -\eta_{CP}(f) \sin 2\alpha \sin(\Delta m_d t)$ .

–  $|\lambda| \neq 1$  wäre der Nachweis der **direkten CP-Verletzung**.

**Es gibt eine Evidenz, aber die Messungen von Babar und Belle sind inkonsistent.**



# Einschränkung der Parameter der CKM-Matrix



- $\epsilon_K \equiv \epsilon = \frac{2}{3}\eta_{+-} + \frac{1}{3}\eta_{00}$  wird aus  $K^0 \leftrightarrow \overline{K^0}$  Oszillationen bestimmt.
- $\Delta m_d \propto |V_{tb}^* V_{td}|^2$  wird aus  $B^0 \leftrightarrow \overline{B^0}$ - und  $\Delta m_s \propto |V_{tb}^* V_{ts}|^2$  aus  $B_s^0 \leftrightarrow \overline{B_s^0}$ -Oszillationen gewonnen. Das Verhältnis  $\Delta m_d / \Delta m_s$  liefert eine starke Einschränkung da einige theoretische Unsicherheiten herausfallen.
- $|V_{ub}/V_{cb}|$  erhält man aus charmlosen semileptonischen B-Zerfällen.
- $\sin 2\beta = \frac{2\bar{\eta}(1-\bar{\rho})}{\bar{\eta}^2 + (1-\bar{\rho})^2}$  kommt aus  $B^0 \leftrightarrow \overline{B^0}$ -Oszillationen mit Zerfällen in CP-Eigenzustände, wie z.B.  $J/\psi K_S$ .
- $\alpha$  bekommt man aus  $B \rightarrow \rho\rho$ .
- $\gamma$  bekommt man aus  $b \rightarrow c\bar{u}s$ , z.B. aus  $B^-(b\bar{u}) \rightarrow D^0(c\bar{u}) K^-(\bar{u}s)$ .

**Durch Messungen verschiedener Observablen wird das Unitaritätsdreieck eingeschränkt.**



# Zusammenfassung

---

---

- Die Entdeckung der CP-Verletzung erfolgte 1964 durch Christenson, Cronin, Fitch und Turlay. Dies geschah **vor** der theoretischen Motivation im Standardmodell.
- Die CP-Verletzung ist von fundamentaler Bedeutung, weil sie eine notwendige Voraussetzung für die beobachtete Baryonasymmetrie im Universum ist.
- Die CKM-Matrix erzwingt und erklärt die CP-Verletzung durch das Auftauchen einer komplexen Phase.
- Im Standardmodell gibt es drei Arten von CP-Verletzung
  - 1) **CP-Verletzung im Zerfall von Teilchen,**
  - 2) **CP-Verletzung in Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen** und
  - 3) **CP-Verletzung durch eine Interferenz von Oszillations- und Zerfallsamplituden.**
- Heute ist die CP-Verletzung im Kaon-System sowohl **im Zerfall** als auch **in  $K^0 \rightarrow \overline{K}^0$ -Oszillationen** etabliert.
- im System neutraler B-Mesonen hat man die CP-Verletzung **in der Interferenz von Oszillations- und Zerfallsamplituden** gesehen, aber zur Zeit noch noch keinen klaren Nachweis für die **CP-Verletzung im Zerfall**.
- In naher Zukunft werden wir weitere präzise Messungen von Babar und Belle bekommen.