



-
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, ($4 = 18 - 9 [V^\dagger V = 1] - 5 [\text{Quarkphasen}]$): λ, A, ρ, η . 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_{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

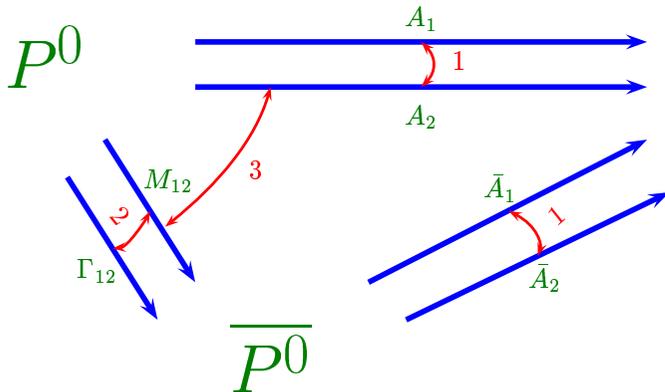
- Im Standardmodell gibt es drei Möglichkeiten zum Auftreten von CP-verletzenden Phasen:
 - 1) CP-Verletzung im Zerfall von Teilchen, z.B. im Zerfall $K_1 \rightarrow 2\pi$.
Dies wird auch direkte CP-Verletzung genannt.
 - 2) CP-Verletzung in Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen z.B. in $B^0 \leftrightarrow \overline{B^0}$ - 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 die 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:

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

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

– Die Linearkombinationen:

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

– 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.:

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

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:

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

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

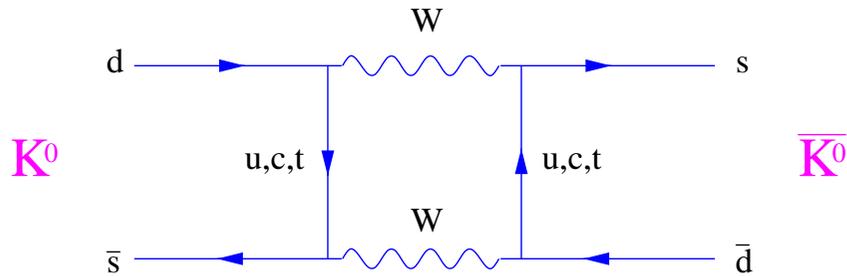
– Wenn K_L und K_S mit K_1 und K_2 identisch sind, dann kann bei CP-Erhaltung K_L nur in drei und K_S nur in zwei Pionen zerfallen. Die neutralen Kaonen sind dann:

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

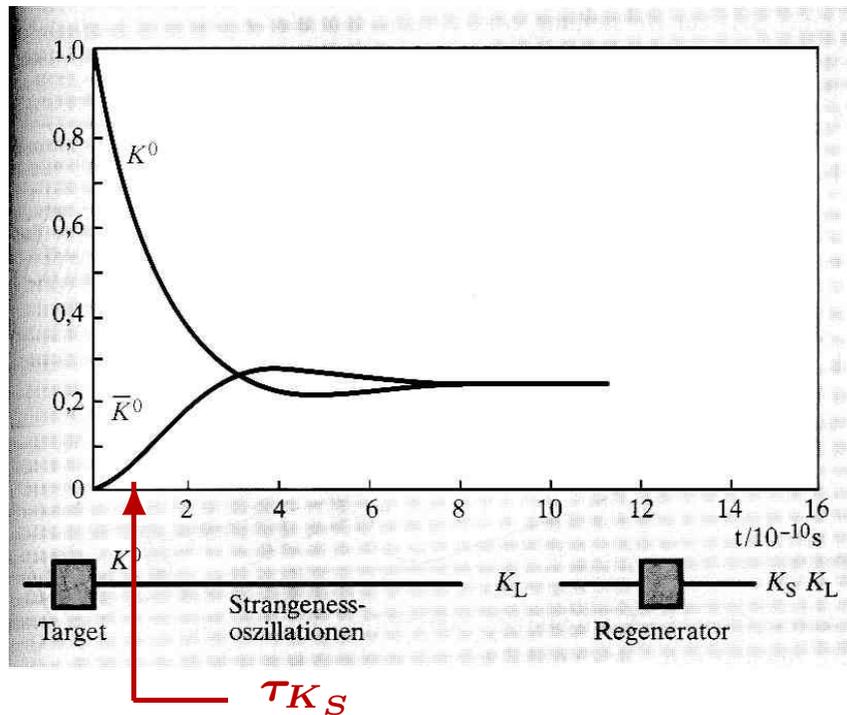
Die unterschiedlichen Lebensdauern von K_L und K_S erzeugen einen interessanten Effekt.



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.

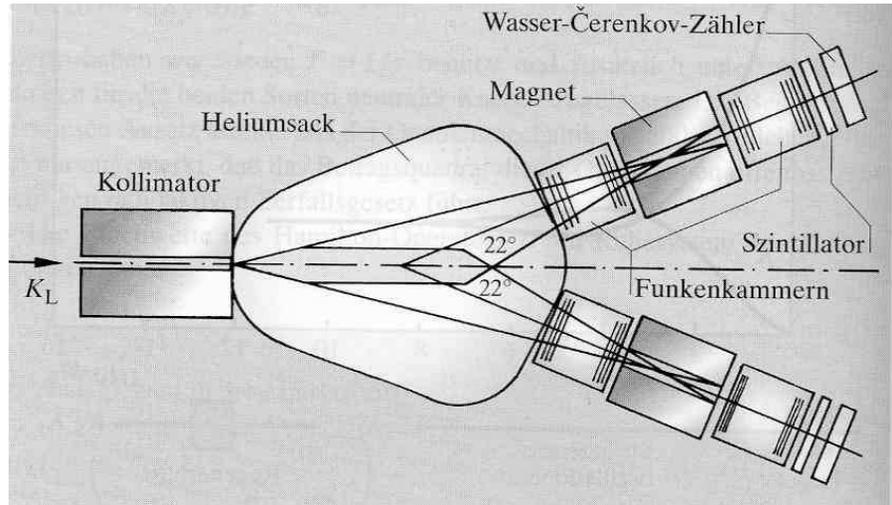


- Ein bei $t = 0$ erzeugter K^0 Strahl unterliegt den $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ Oszillationen und den K_L und K_S Zerfällen: $|\langle \bar{K}^0(t) | K^0(0) \rangle|^2 = \frac{1}{4} |\langle K_L(t) | K_L(0) \rangle - \langle K_S(t) | K_S(0) \rangle|^2 = \frac{1}{4} (e^{-\Gamma_L t} + e^{-\Gamma_S t} - 2 \cos(\Delta m t) e^{-(\Gamma_L + \Gamma_S)t/2})$,
- 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 $K_S (K_L)$.

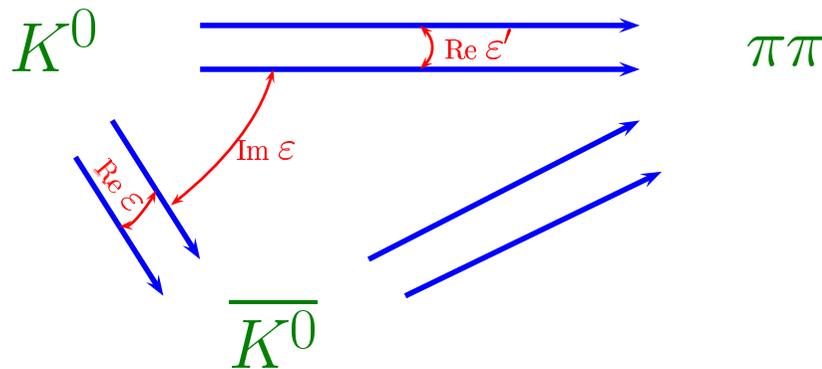
Teilchen-Antiteilchen Oszillationen erfordern eine endliche Massendifferenz.



Die Entdeckung der CP-Verletzung - das Experiment



- Brookhaven AGS Beschleuniger, mit 30 GeV p auf Be-Target. Der Strahl neutraler Kaonen wird unter 30° 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:

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

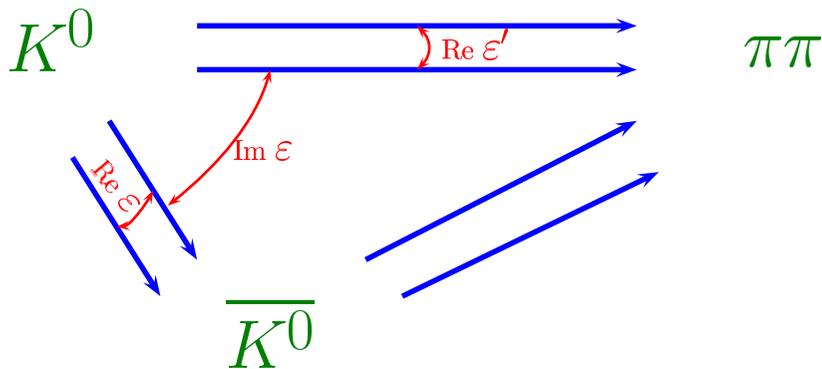
$$|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (\epsilon|K_1\rangle + |K_2\rangle)$$
- Dies bedeutet, dass das K_L mit einem kleinen Anteil ϵ in 2π zerfallen darf. Die zwei Amplituden sind $2\pi(I=0)$ und $2\pi(I=2)$.

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 η_{+-} und η_{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.

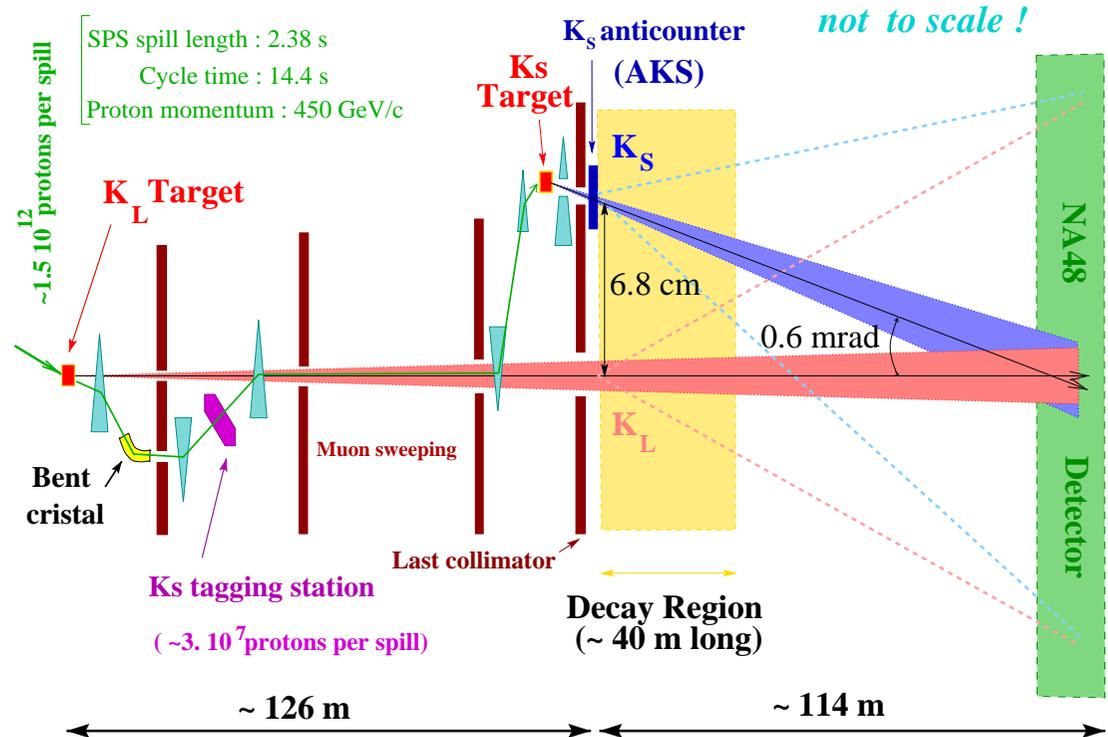
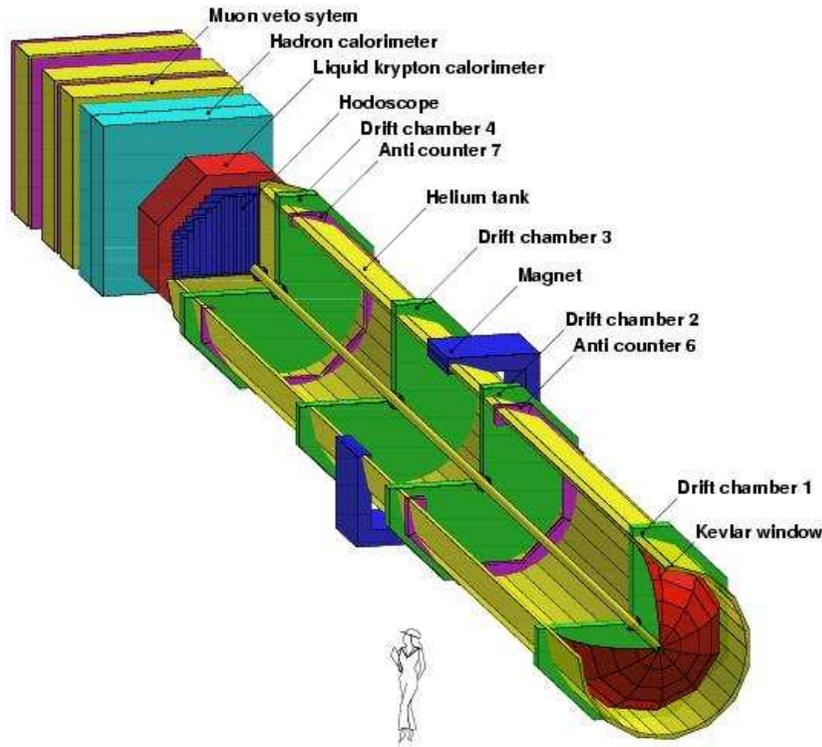
Die Messung von $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ ist sehr schwierig und aufwändig.



Das NA48 Experiment - generelle Überlegungen

Das Experiment

Die Strahlführung



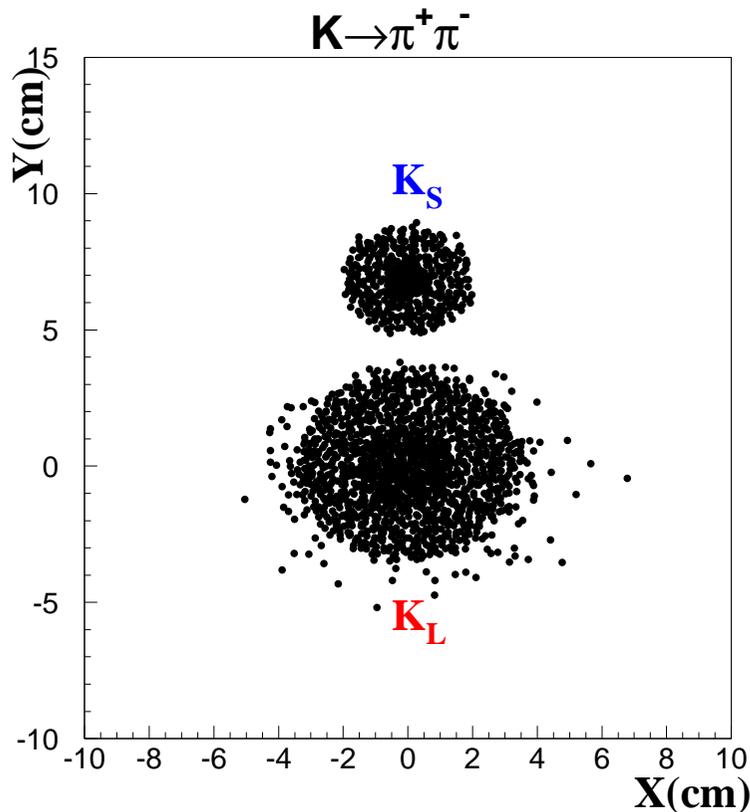
- Das Wichtigste ist die Kontrolle der systematischen Unsicherheiten. Deswegen werden die Zerfälle von K_L und K_S in $2\pi^0$ und $\pi^+\pi^-$ simultan gemessen.

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

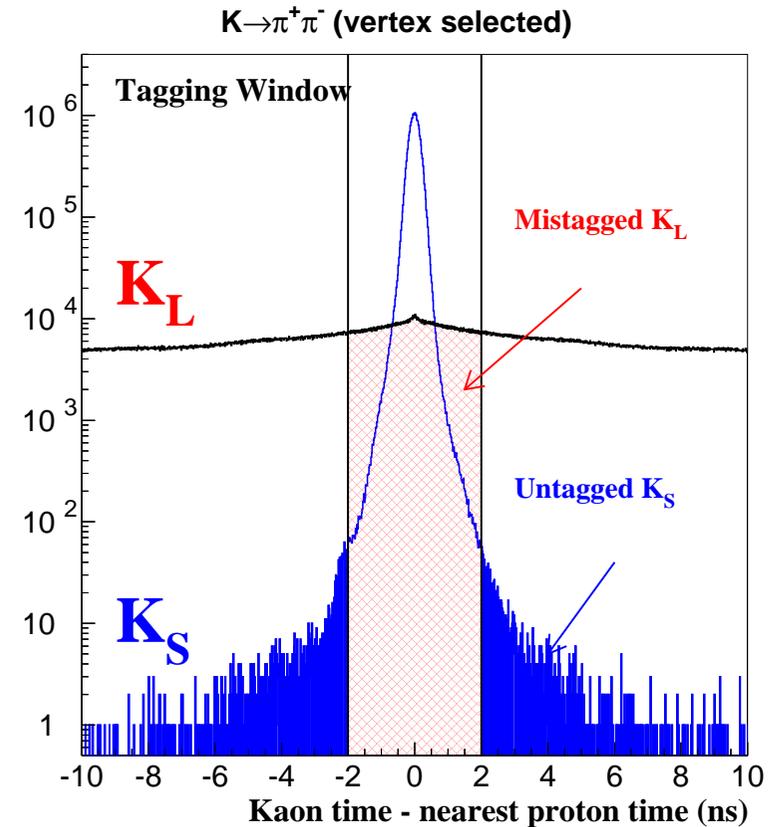


Die Trennung von K_L und K_S

Die Vertex Position



Das Zeitfenster der K_S

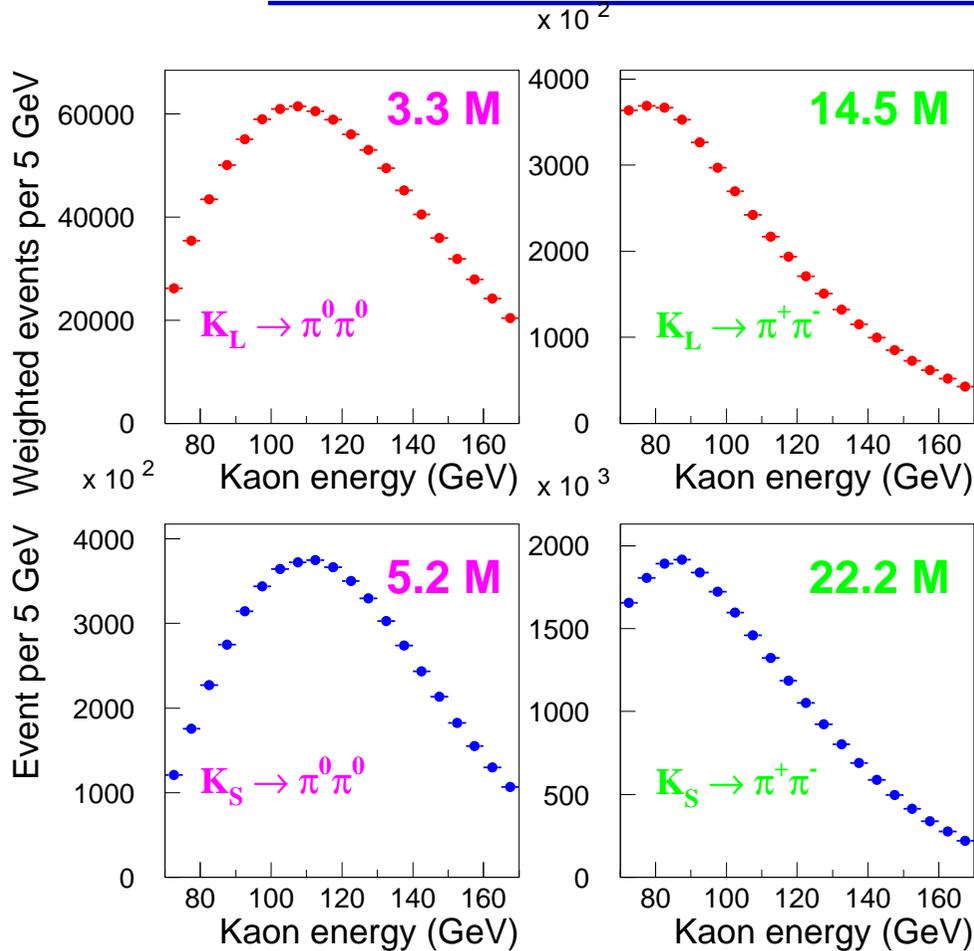


- Die Vertex Trennung ist nur für $\pi^+ \pi^-$ Endzustände möglich.
- Die Zerfälle der K_S Mesonen fallen in ein enges Zeitfenster, $|\Delta t(p - K_S)| \leq 2$ ns.

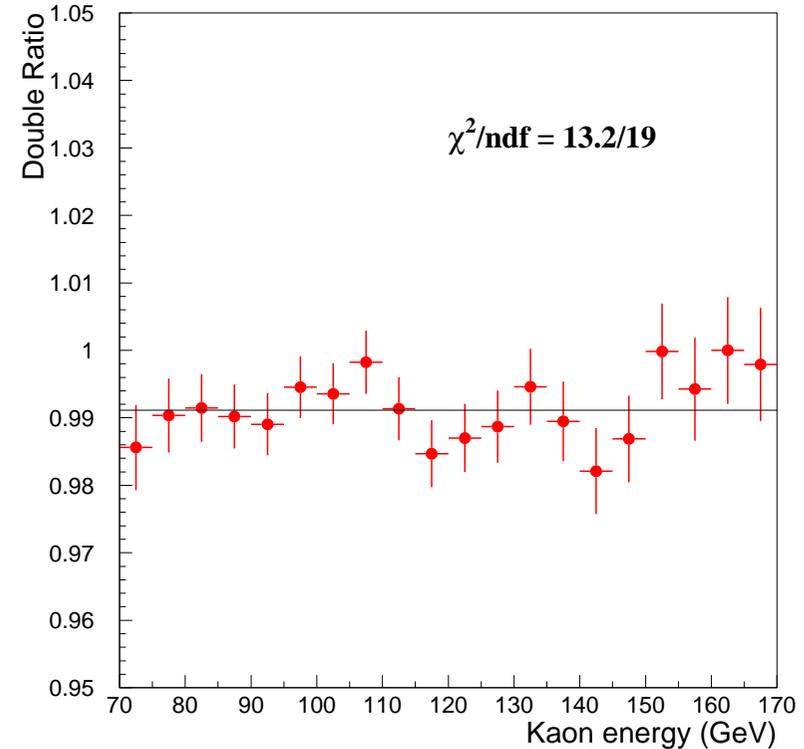
Die beiden Mesonen lassen sich im Experiment in Ort und Zeit voneinander trennen.



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



Die Energieunabhängigkeit



NA48: $(14.7 \pm 1.4 (\text{stat}) \pm 1.9 (\text{sys})) \cdot 10^{-4}$

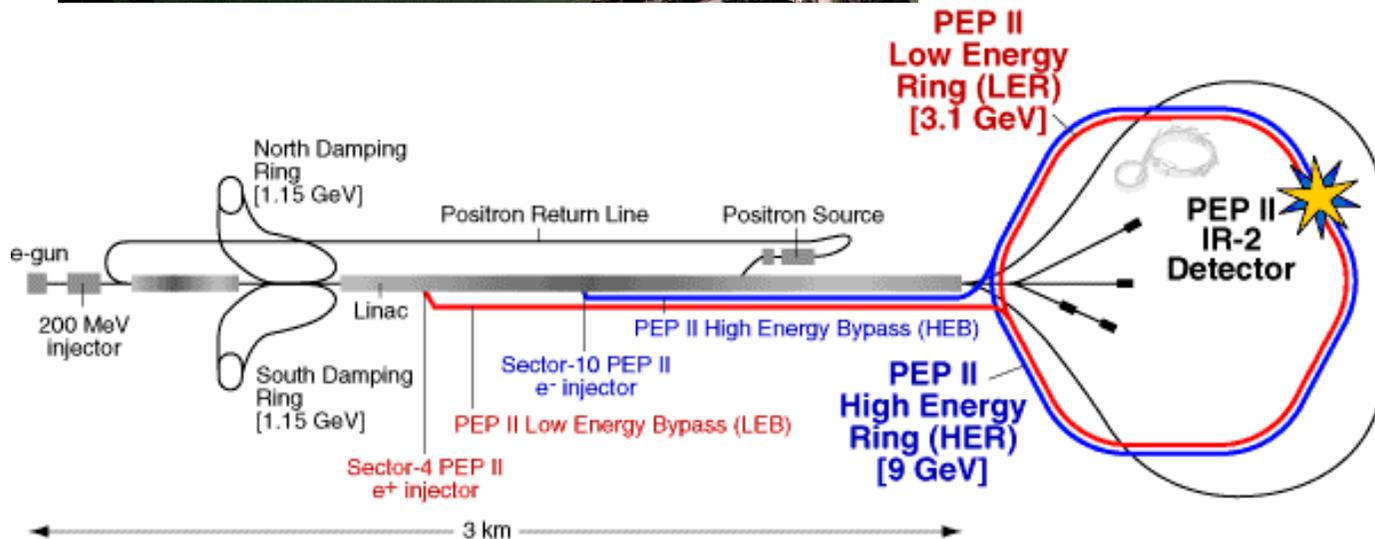
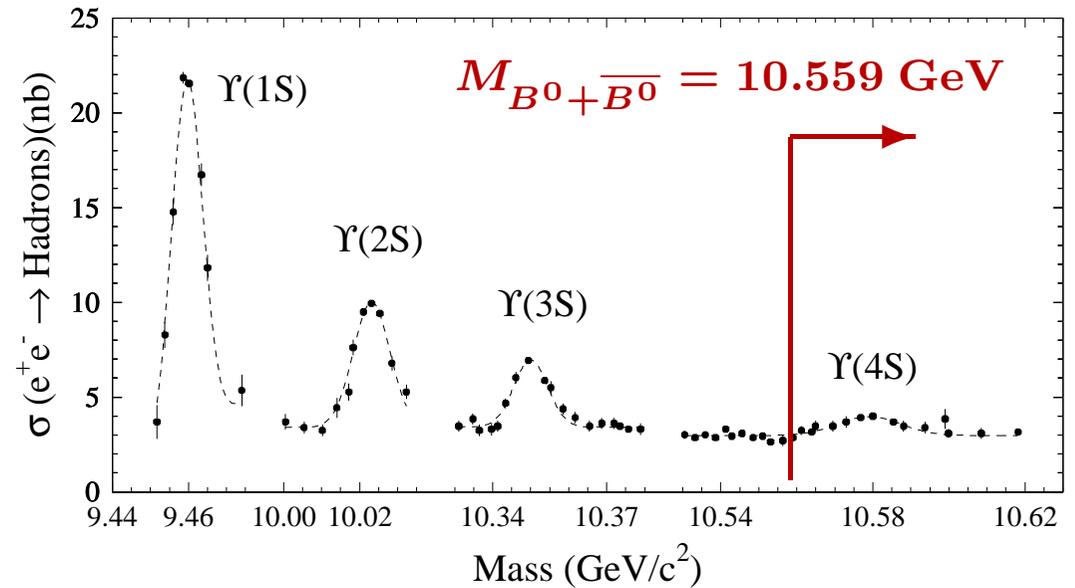
– Die aktuellen Resultate für $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$ sind: KTeV: $(20.7 \pm 1.5 (\text{stat}) \pm 2.4 (\text{sys})) \cdot 10^{-4}$

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

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



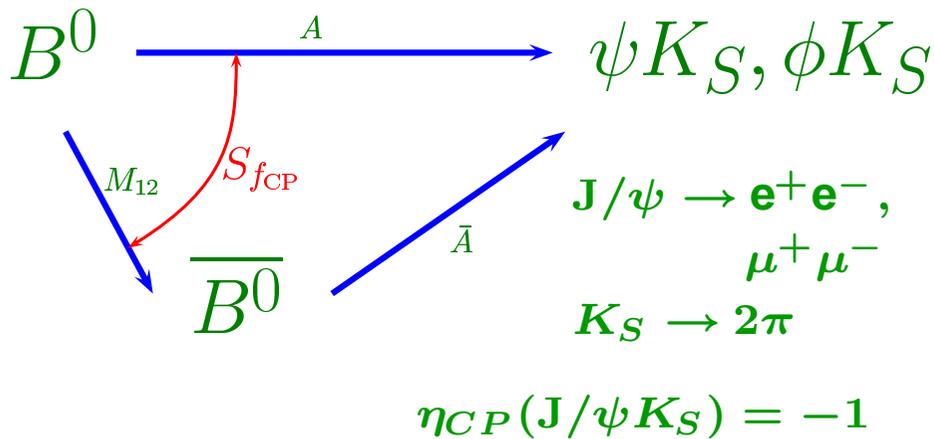
Der asymmetrische e^+e^- Beschleuniger PEP II am SLAC



	PEP-II	KEK-B
E_{e^+} [GeV]	3.1	3.5
E_{e^-} [GeV]	9.0	8.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	140	140



CP-Verletzung im B-System



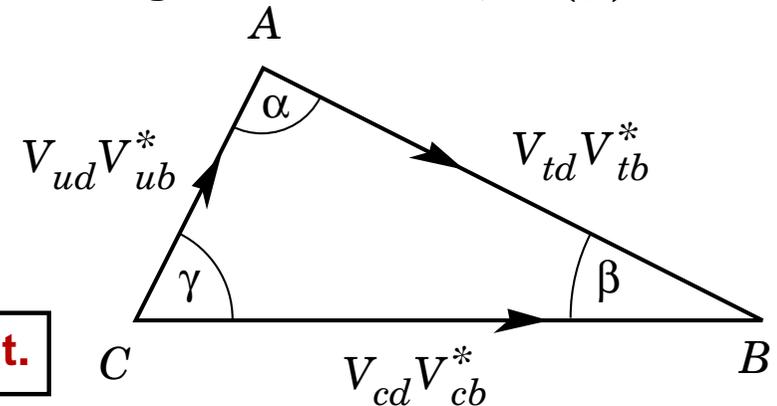
- Im Zerfall $B^0(\bar{B}^0) \rightarrow f$ mit $f = J/\psi K_S$ gibt es nur eine Zerfallsamplitude $\Rightarrow |\frac{\bar{A}}{A}| = 1$ und nur eine Oszillationsamplitude $\Rightarrow |\frac{p}{q}| = 1$, also sollte $|\lambda| = |\frac{p}{q} \frac{\bar{A}}{A}| = 1$ sein, und nur die Interferenz $\text{Im}\lambda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

- Dies führt zu einer zeitabhängigen Asymmetrie: $A_f(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) - \Gamma(B^0 \rightarrow f)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) + \Gamma(B^0 \rightarrow f)}$
- $A_f(t) = \frac{2\text{Im}\lambda}{1+|\lambda|^2} \sin(\Delta m_d t) - \frac{1-|\lambda|^2}{1+|\lambda|^2} \cos(\Delta m_d t) = \text{Im}\lambda \sin(\Delta m_d t)$, 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 $T_{\text{osz}} = 12.8 \text{ ps}$.

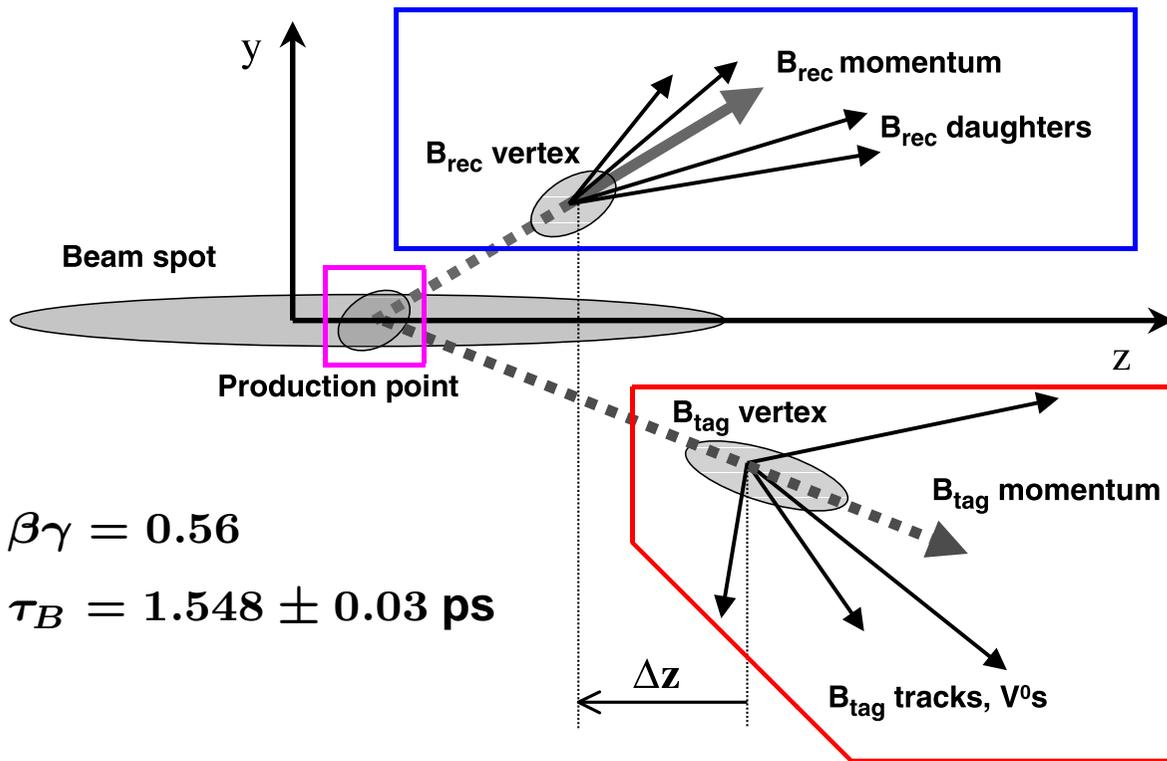
Ein klarer Kanal mit geringer theoretischer Unsicherheit.





Die Rekonstruktion der Ereignisse

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



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

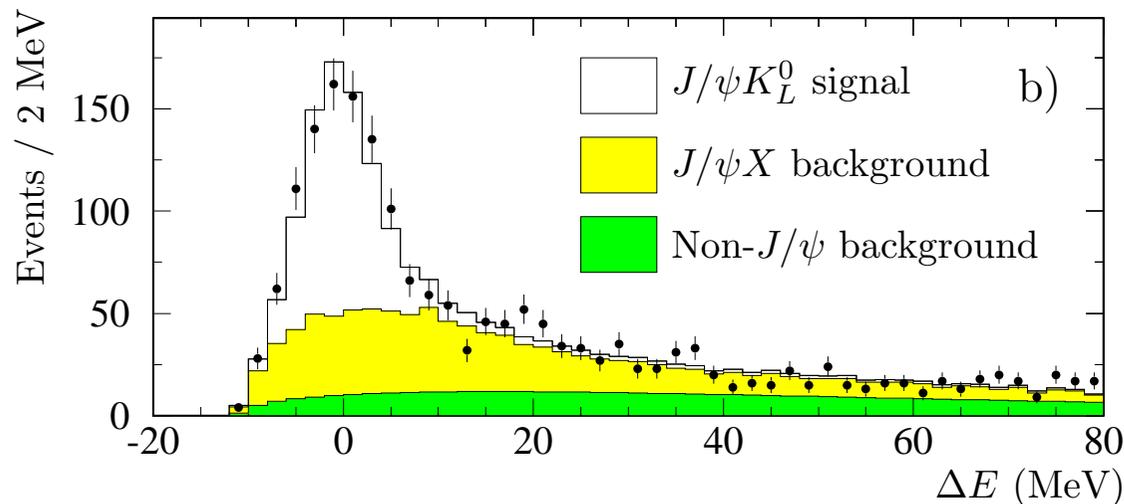
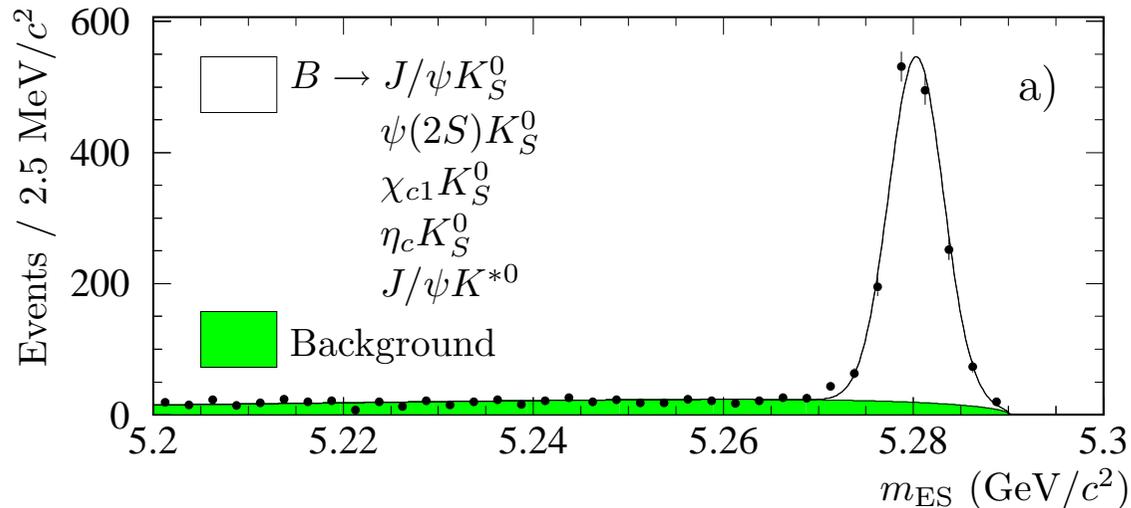
– Zur Zeit $t = t_{\text{rec}}$ wird der Zerfall des anderen B-Mesons in einen CP-Eigenzustand, z.B. $J/\psi K_S$, vollständig rekonstruiert.

– Die räumliche Differenz: $\Delta z = \beta\gamma c \Delta t$ ($\Delta z \approx 250 \mu\text{m}$, für $\Delta t = \tau(B)$), wird in eine Zeitdifferenz $\Delta t = t_{\text{tag}} - t_{\text{rec}} = \frac{\Delta z}{\beta\gamma c}$ 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_{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

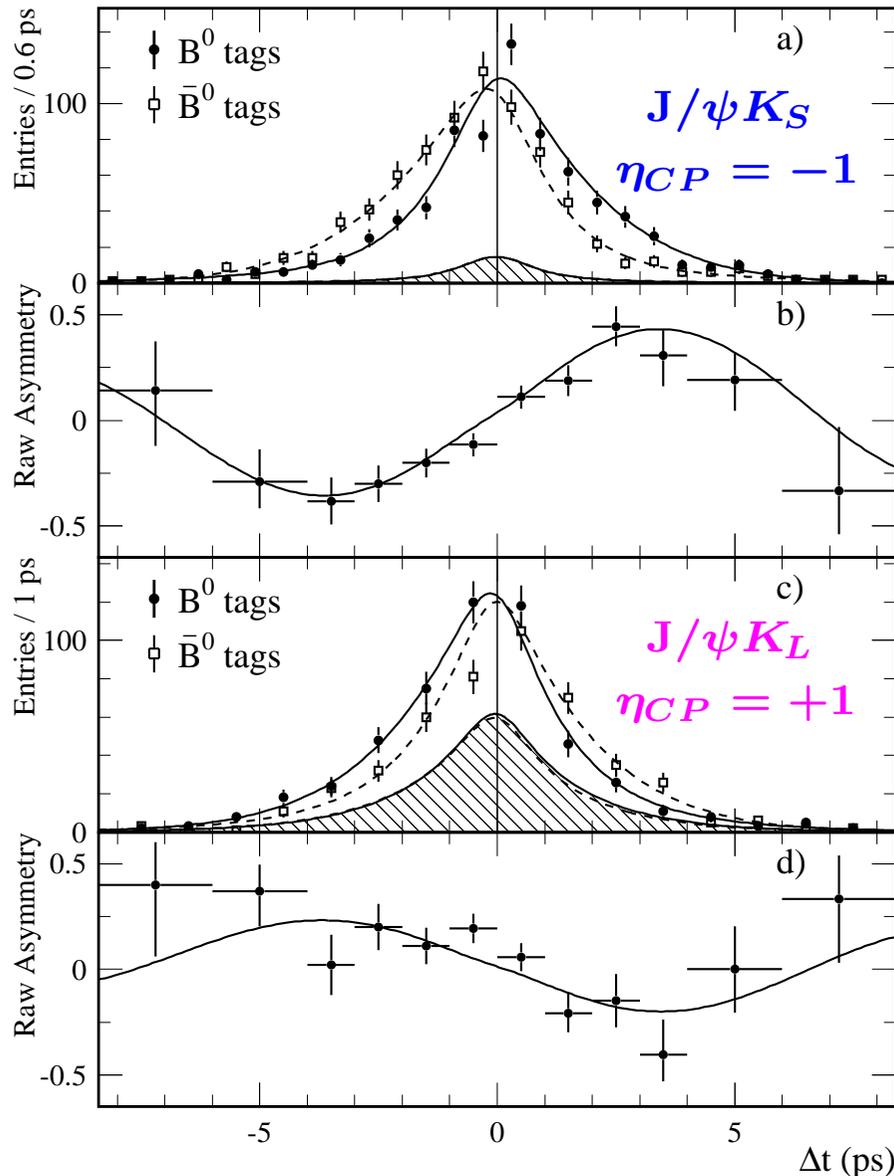
$5.27 < m_{ES} < 5.29 \text{ GeV}$

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 und Belle wurden je etwa 88M Ereignisse analysiert. Die heutige Statistik ist etwa zweimal so groß. Das Ergebnis ist:

$$\sin 2\beta = 0.741 \pm 0.067 \pm 0.033 \text{ (BaBar)}$$
$$\sin 2\beta = 0.719 \pm 0.074 \pm 0.035 \text{ (Belle)}$$

– Beide Experimente finden:

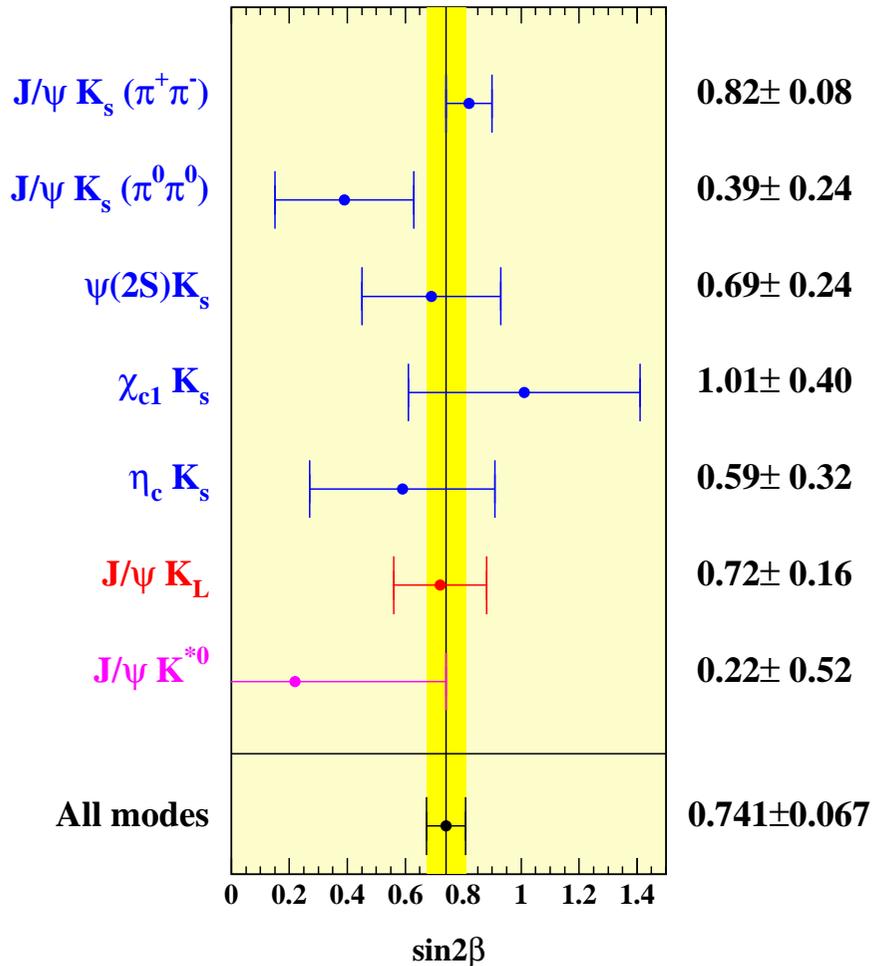
$|\lambda| = 0.95 \pm 0.05 \pm 0.03$, also $|\lambda| = 1$ und damit keine Evidenz für direkte CP-Verletzung.

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

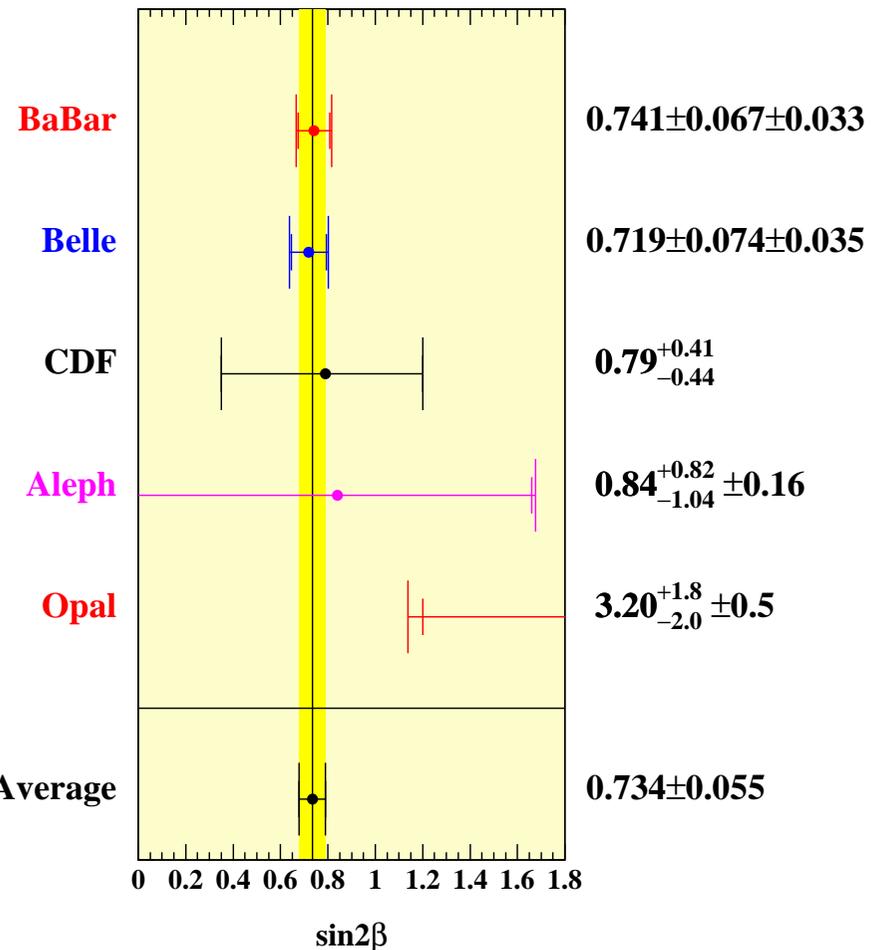


Die Messungen von $\sin 2\beta$

Verschieden Kanäle (BaBar)



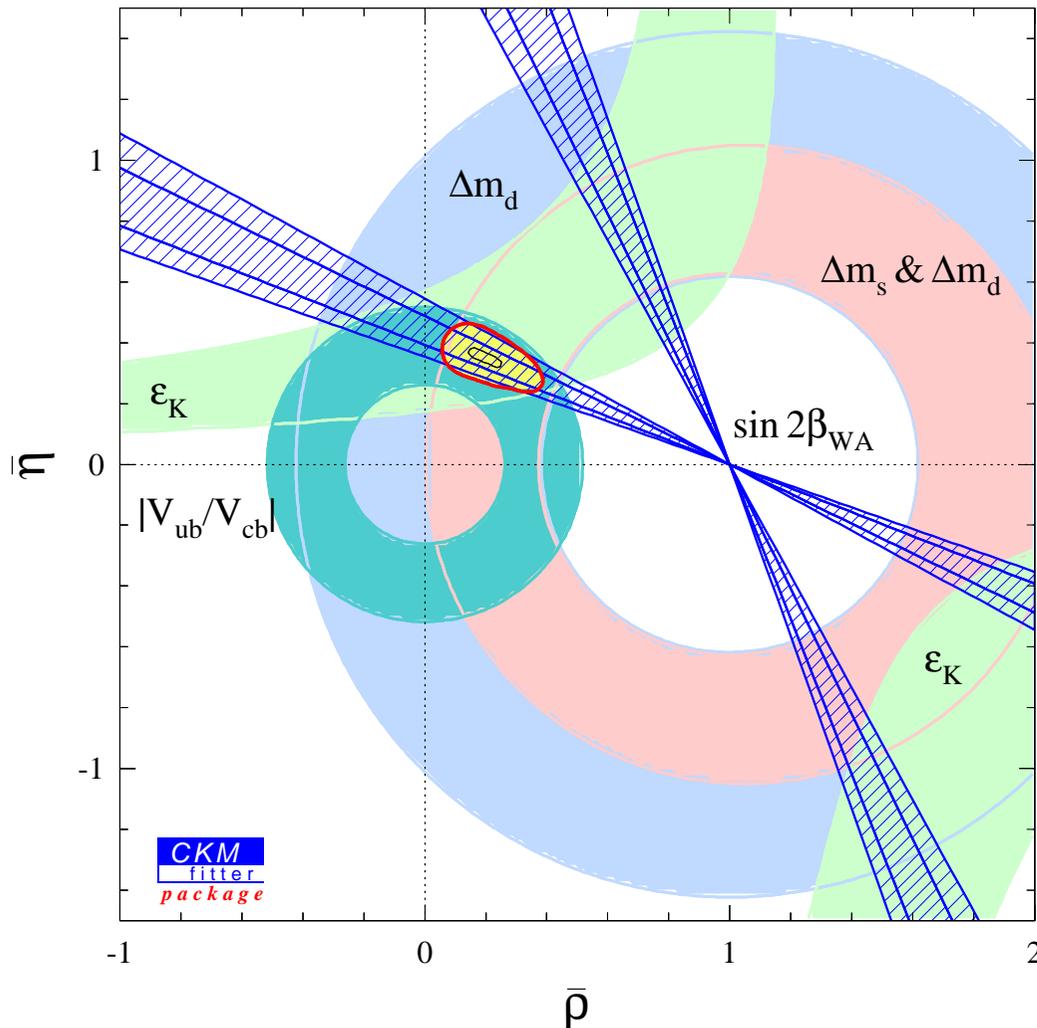
Verschiedene Experimente



Heute ist die CP-Verletzung im B-System etabliert und $\sin 2\beta$ auf 7% genau bekannt.



Einschränkung der Parameter der CKM-Matrix



- $\epsilon_K \equiv \epsilon = \frac{2}{3}\eta_{+-} + \frac{1}{3}\eta_{00}$ wird aus $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ Oszillationen bestimmt.
- $\Delta m_d \propto |V_{tb}^* V_{td}|^2$ wird aus $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ - und $\Delta m_s \propto |V_{tb}^* V_{ts}|^2$ aus $B_s^0 \leftrightarrow \bar{B}_s^0$ -Oszillationen gewonnen. Das Verhältnis $\Delta m_d/\Delta m_s$ liefert eine starke Einschränkung da einige theoretische Unsicherheiten herausfallen.
- $|\frac{V_{ub}}{V_{cb}}|$ erhält man aus charmlosen semi-leptonischen B-Zerfällen.
- $\sin 2\beta_{WA} \equiv \sin 2\beta = \frac{2\bar{\eta}(1-\bar{\rho})}{\bar{\eta}^2 + (1-\bar{\rho})^2}$ kommt aus $B^0 \leftrightarrow \bar{B}^0$ -Oszillationen mit Zerfällen in CP-Eigenzustände, wie z.B. $J/\psi K_S$.
- Die Berechnung der Ausschlussgrenzen erfolgt mit dem CKM-Fitter Softwarepaket.

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 keine Evidenz für die **CP-Verletzung im Zerfall**.
- In naher Zukunft werden wir weitere präzise Messungen von Babar und Belle bekommen.