

## 8. P,C, CP-Symmetrien

8.1 Parität, Symmetrie unter räumlicher Spiegelung

8.2 Ladungskonjugation

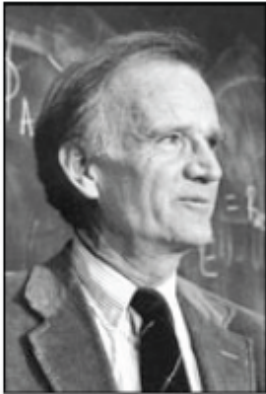
8.3 Physik der neutralen Kaonen, CP-Verletzung

8.4 Teilchen-Antiteilchen-Oszillationen im  $B^0$ -System

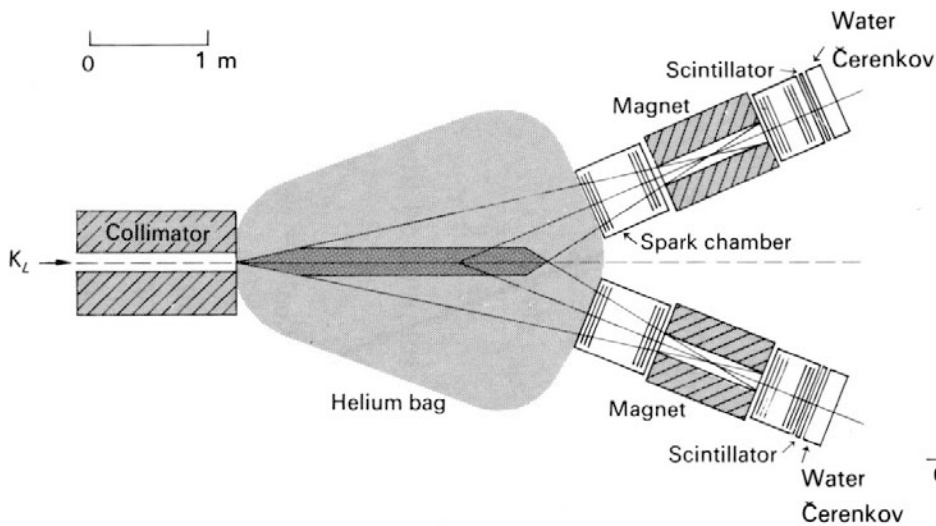
# Experiment zur Messung der CP-Verletzung im Kaon-System



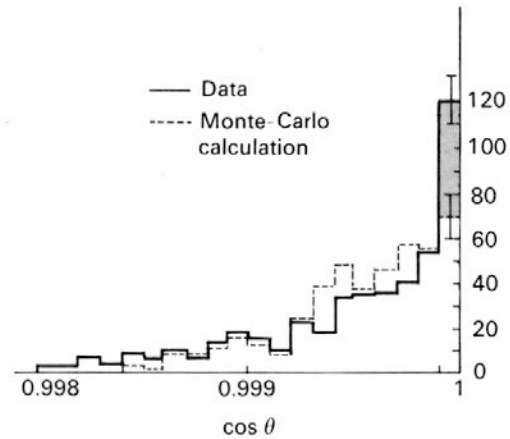
James Cronin



Val Fitch

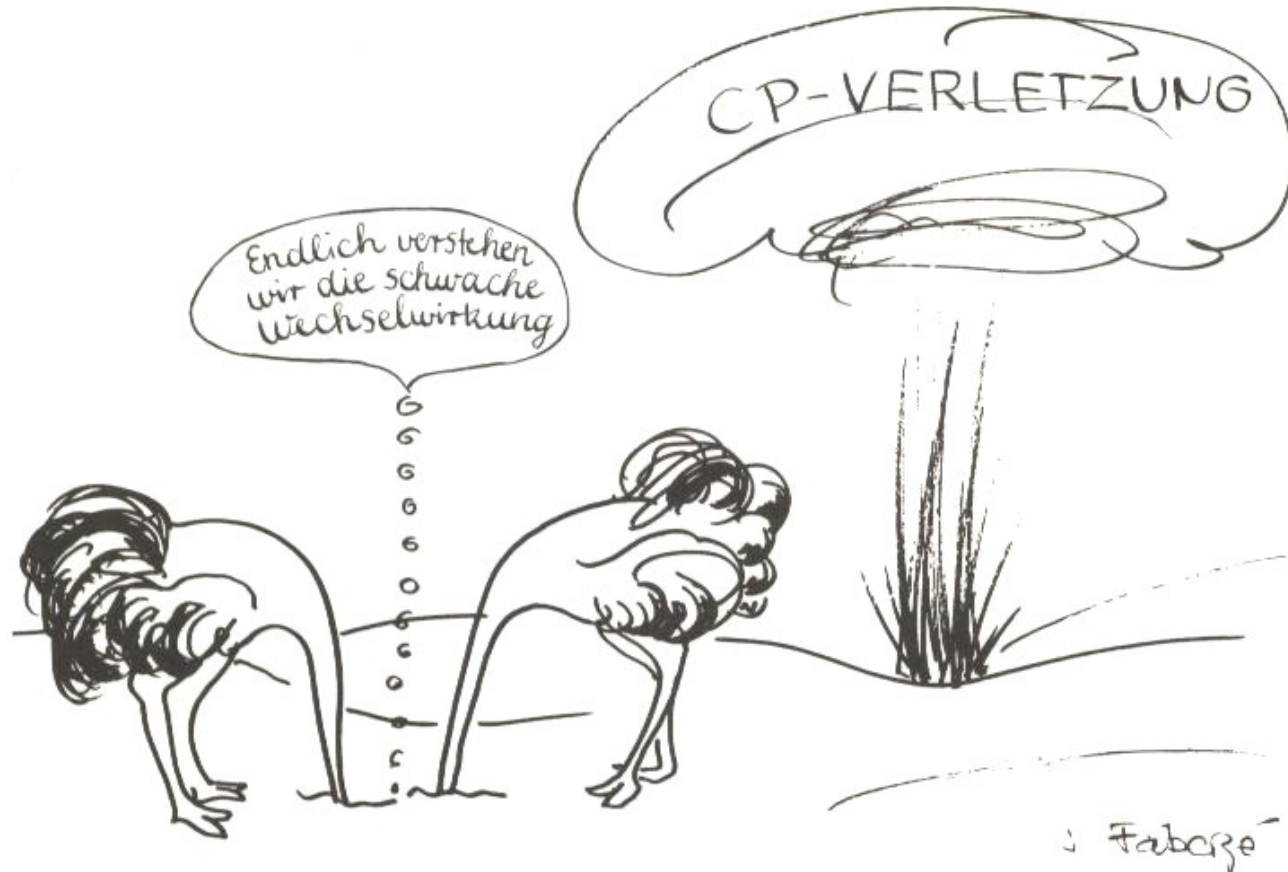


(a)



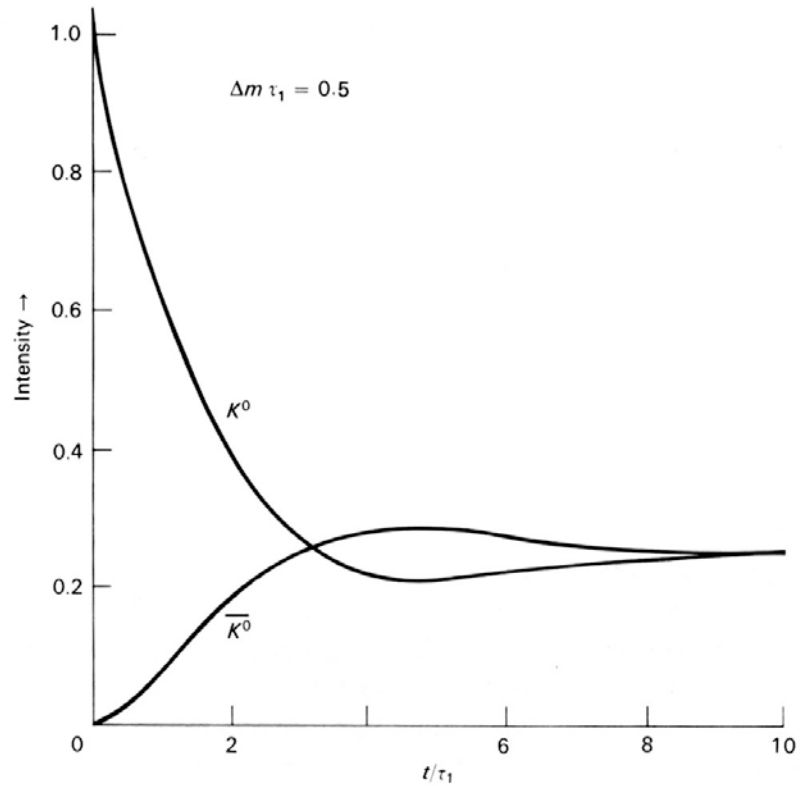
(b)

Experiment von Cronin und Fitch (1964) zum Nachweis des Zerfalls  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Der  $K^0$ -Strahl tritt von links ein, er besteht aus  $K_L$ , nachdem die  $K_S$ -Komponente zerfallen ist. Die seltenen Zwei-Pion-Zerfälle werden kinematisch von den häufigeren Drei-Pion-Zerfällen abgetrennt (Masse, Richtung des  $\pi\pi$ -Summenvektors zur Strahlachse). Rechts: gemessene Winkelverteilung für Ereignisse mit einer  $\pi^+\pi^-$ -Masse im Intervall  $490 < M_{\pi\pi} < 510$  MeV.



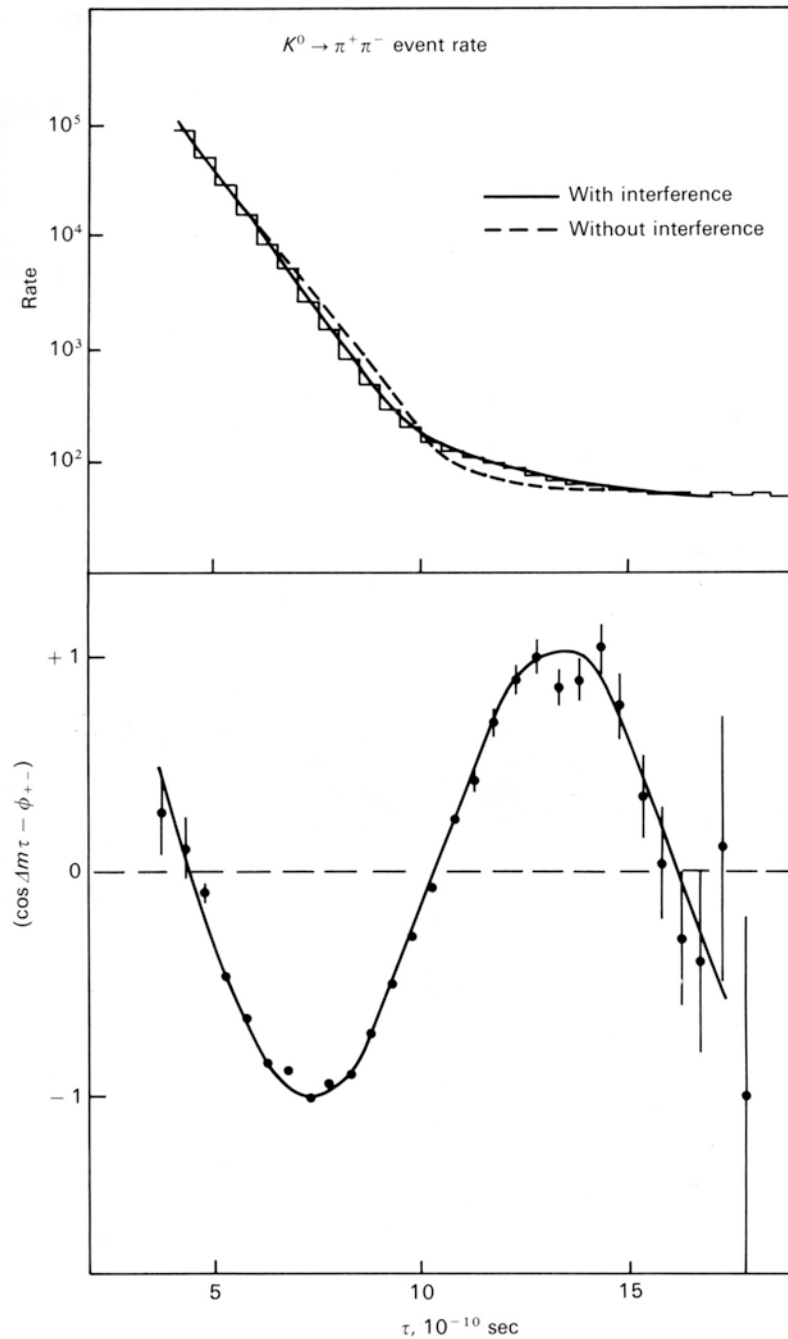
J. Fabergé, *CERN Courier*, 6, Nr. 10, 193 (Oktober 1966). (Mit freundlicher Genehmigung von Frau Fabergé.)

# $K^0$ -Oszillationen



Oszillationen der  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  –Intensitäten für einen zum Zeitpunkt  $t=0$  erzeugten reinen  $K^0$ -Strahl

# $K^0$ -Oszillationen



Oben: Ereignisrate von  $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ -Zerfällen von einem neutralen  $K^0$ -Strahl als Funktion der Flugzeit. Der beste Fit benötigt Beiträge der Interferenz von  $K_L$  und  $K_S$ -Amplituden.

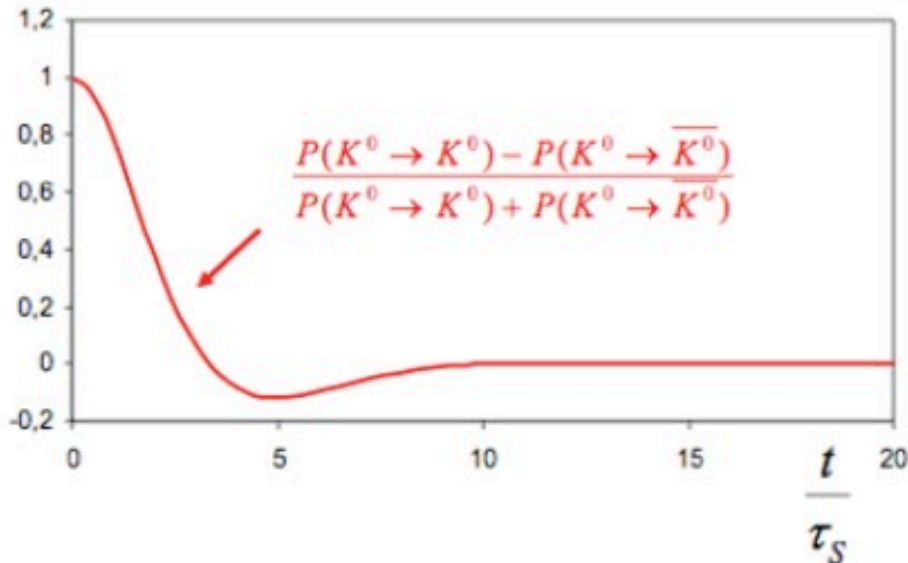
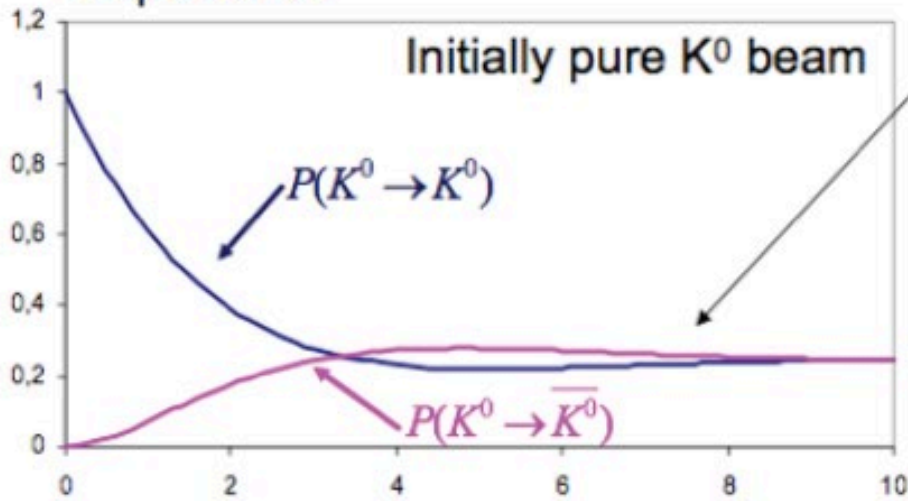
Unten: Interferenzterm der  $K_L$  und  $K_S$ -Beiträge, aus denen die  $K_L$ - $K_S$  Massendifferenz  $\Delta m$  bestimmt werden kann.

# Ergebnisse des CP-LEAR-Experiments (1992)

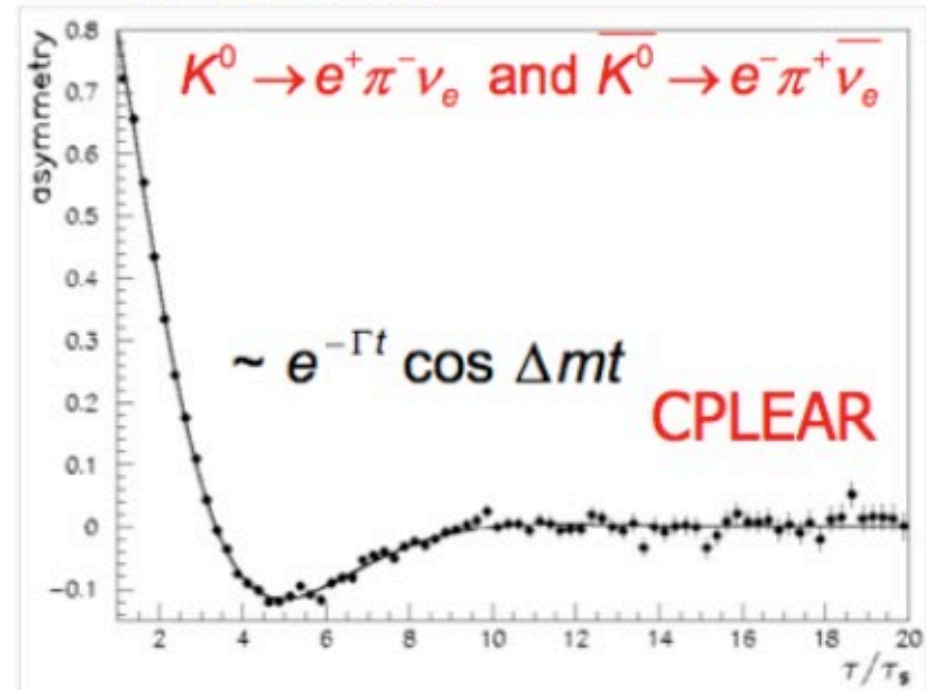
$K^0$  und  $\bar{K}^0$  identisch,  
alle  $K_S$  ausgestorben:  
 $K_L = 1/\sqrt{2} (K^0 - \bar{K}^0)$

LEAR Antiprotonen-Speicherring  
 $\bar{p}$  @ 200 MeV/c ;  $10^6 \bar{p}/s$

## Expectation



## Measurement

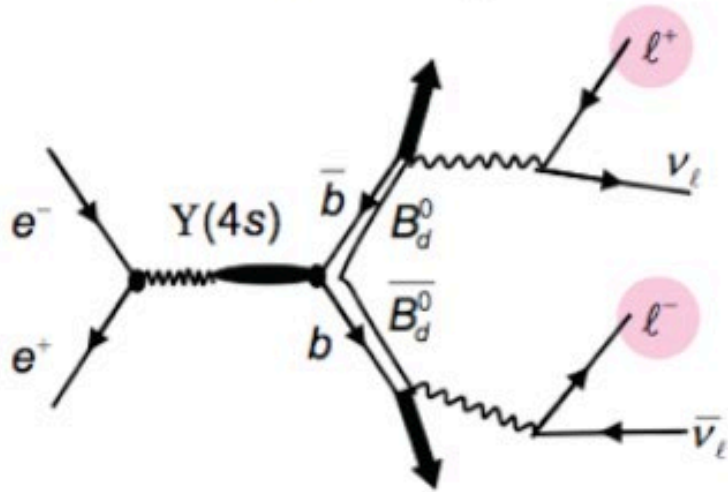


# Discovery of $B^0$ mixing

ARGUS 1987

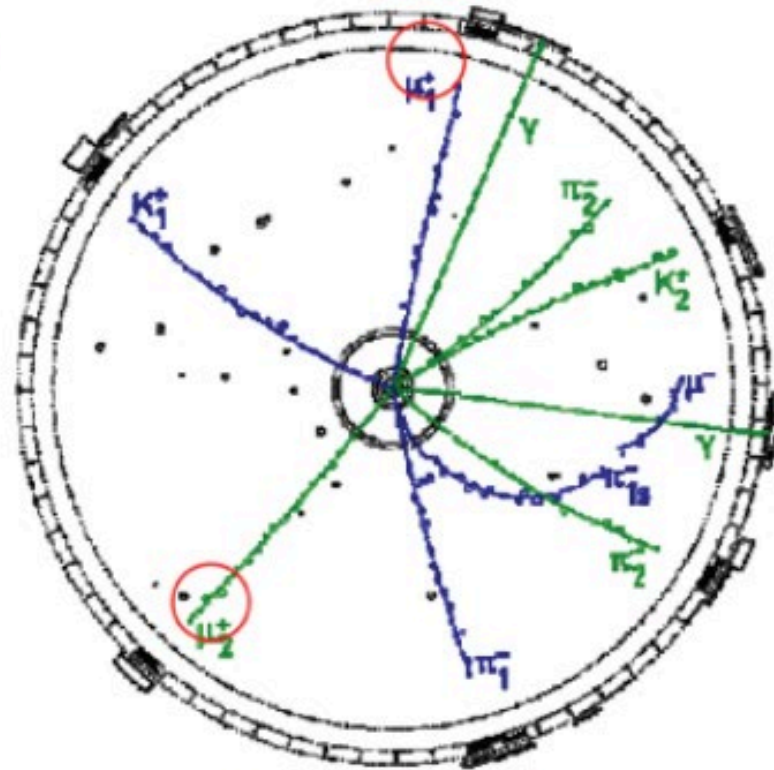
First  $e^+e^-$  B factory at DESY:

$$\left. \begin{array}{l} \text{at } \sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV :} \\ e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0 \end{array} \right\} \sigma(B\bar{B}) \approx 1\text{nb}$$



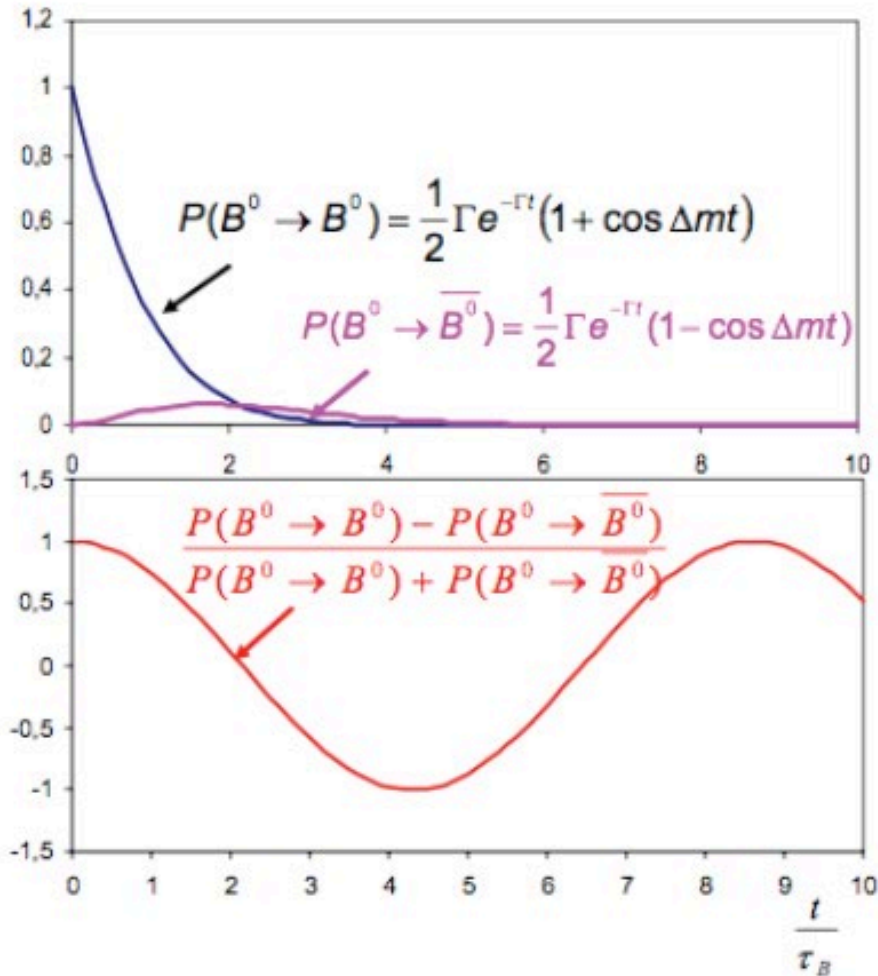
Unmixed:  $B^0\bar{B}^0 \rightarrow l^+l^-$

Mixed:  $B^0B^0 \rightarrow l^+l^+$   
 $\bar{B}^0\bar{B}^0 \rightarrow l^-l^-$  } Same charge

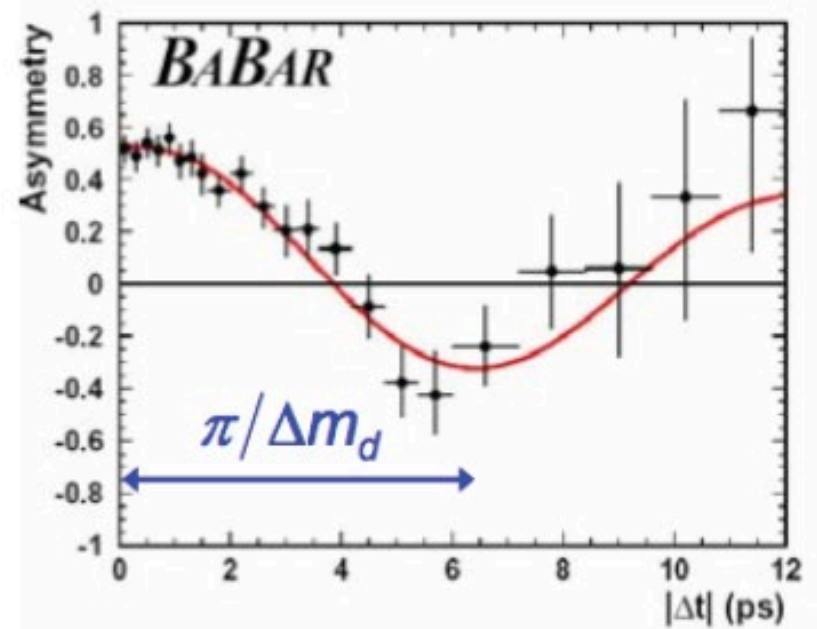


$$\begin{array}{l} B^0 \rightarrow D^+ \mu^- \nu_\mu \\ \quad \downarrow \\ \quad D^0 \pi^+ \\ \quad \downarrow \\ \quad K^+ \pi^- \end{array} \quad \begin{array}{l} B^0 \rightarrow D^+ \mu^- \nu_\mu \\ \quad \downarrow \\ \quad D^+ \pi^0 \\ \quad \downarrow \\ \quad K^+ \pi^- \pi^- \end{array}$$

# Ergebnisse des BaBar-Experiments zu $B_0^d$ -Oszillationen (2001)



$$A = \frac{\text{unmixed} - \text{mixed}}{\text{unmixed} + \text{mixed}}$$

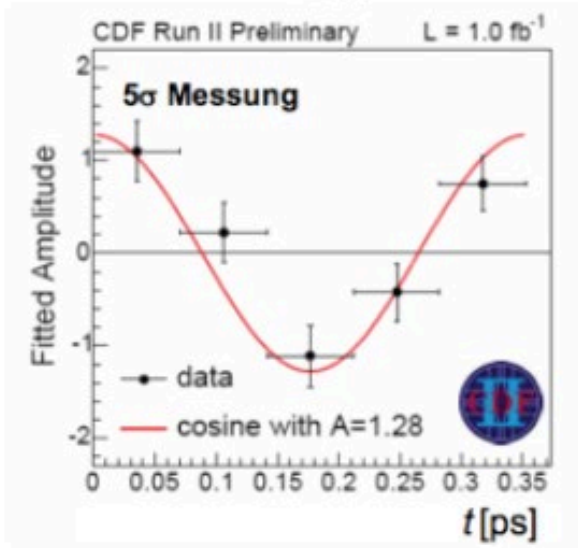
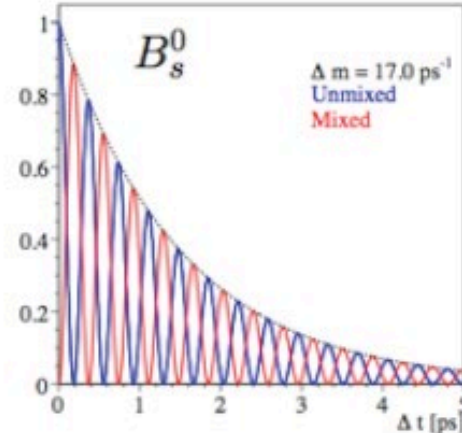
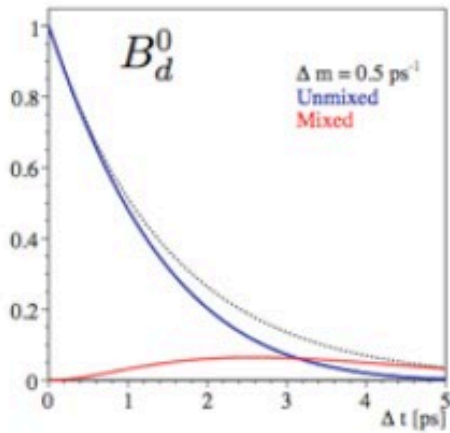



$$\Delta m_d = 0.506 \pm 0.006 \pm 0.004 \text{ ps}^{-1}$$

$$\approx \frac{0.774}{\tau_B}$$



# Ergebnisse der CDF/D0-Experimente zu $B_0^s$ -Oszillationen (2006)



**Observation:**  
 Spring 2006  


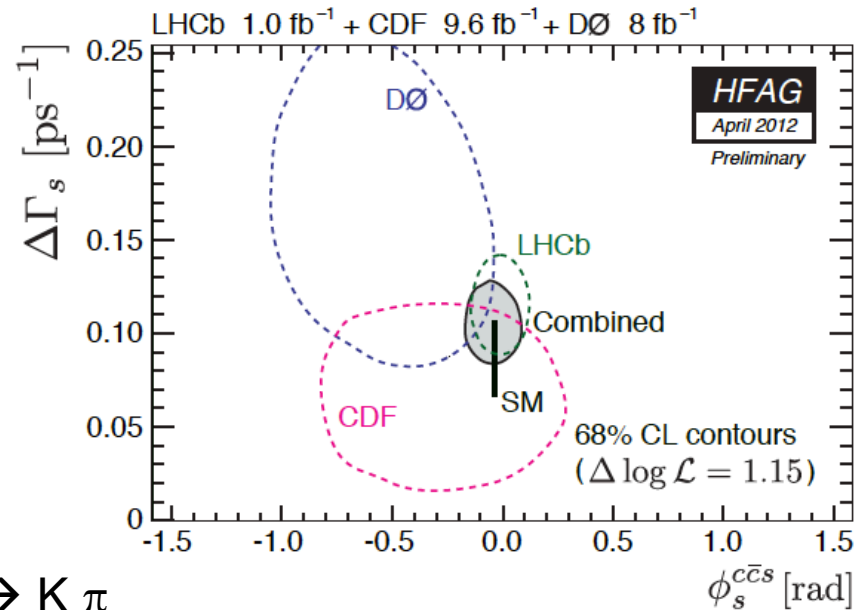
$$\Delta m_s = 17.77 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.07(\text{syst.}) \text{ ps}^{-1} = \frac{26}{\tau}$$

(CDF Collaboration, September 2006)

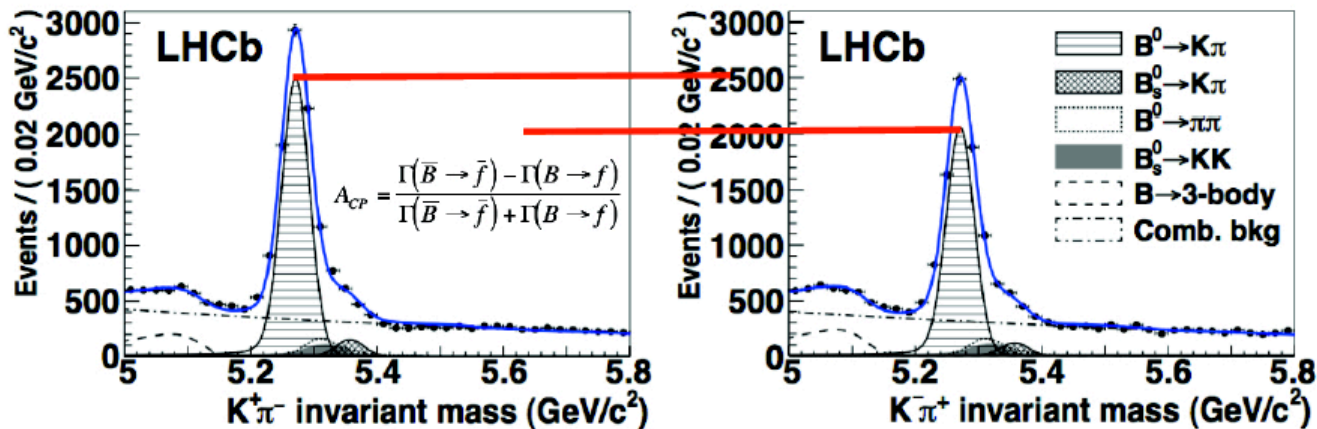
35 times faster than  $B^0$

# CP violation in B decays

- Precise measurement of CP phase  $\phi_s$  :  
LHCb result consistent with Standard Model
- First significant direct measurement of  
 $\Delta\Gamma_s = 0.116 \pm 0.018 \pm 0.006 \text{ ps}^{-1}$
- First evidence for direct CP violation in  $B_0^s \rightarrow K\pi$



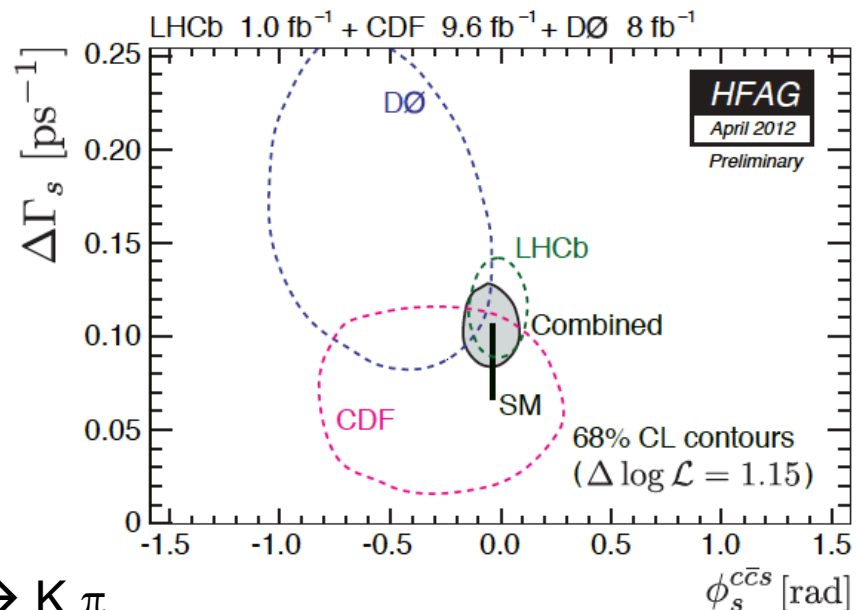
$$\int L dt = 0.35 \text{ fb}^{-1} \rightarrow \sim 13 \text{ k } B^0 \rightarrow K\pi$$



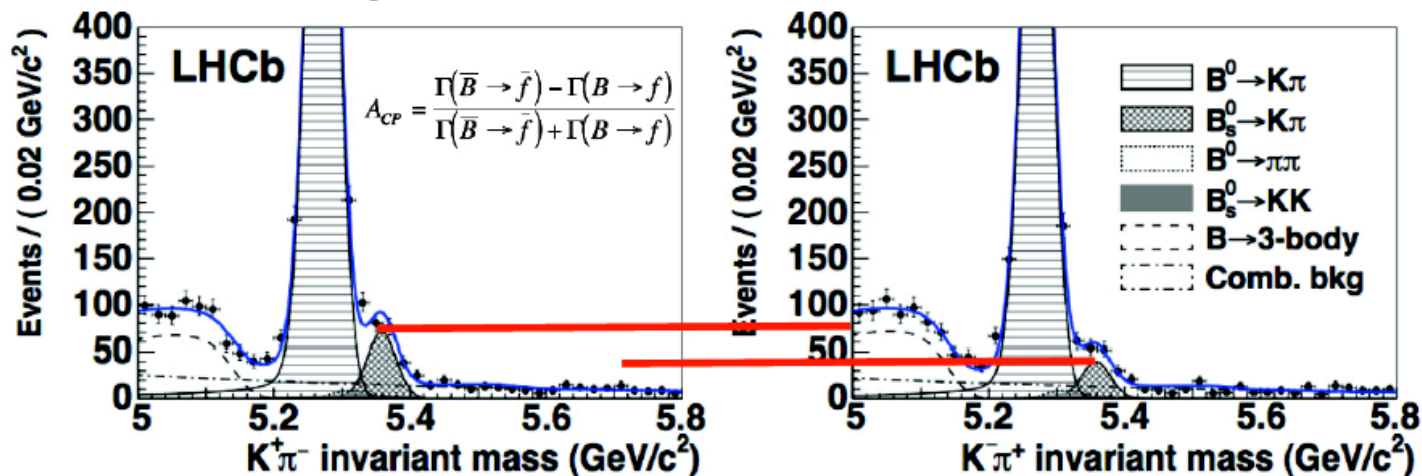
LHCb:  $A_{CP}(B^0 \rightarrow K\pi) = -0.088 \pm 0.011(\text{stat}) \pm 0.008(\text{syst})$

# CP violation in B decays

- Precise measurement of CP phase  $\phi_s$  :  
LHCb result consistent with Standard Model
- First significant direct measurement of  
 $\Delta\Gamma_s = 0.116 \pm 0.018 \pm 0.006 \text{ ps}^{-1}$
- First evidence for direct CP violation in  $B_0^s \rightarrow K\pi$



$$\int L dt = 0.35 \text{ fb}^{-1} \rightarrow \sim 300 B_s^0 \rightarrow K\pi$$



LHCb:  $A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K\pi) = 0.27 \pm 0.08(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst})$

CDF:  $A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K\pi) = 0.39 \pm 0.15(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst})$



# Beispiele für Zerfälle, die zur Vermessung der Größe von CKM-Matrixelementen verwendet werden

