violazione di CP nei B^0

CP è violata solo nei K^0?

- Nel 1964 viene scoperta la violazione di CP nel mescolamento dei K neutri (si invoca un'interazione debole superweak che interviene nelle transizioni con $\Delta S=2$).
- La violazione diretta di CP ($\Delta S=1$) viene verificata sperimentalmente solo 30 anni dopo.
- Nel 1973 K. e M. ipotizzano una matrice di mescolamento di 3 famiglie di quark per introdurre la violazione di CP nel Modello Standard attraverso una fase presente nella matrice
- Nel 1974 viene scoperto il quark c e nel 1977 il quark b
- Negli anni 80 inizia la ricerca del mescolamento (mixing) di mesoni neutri contenenti il quark b
- fine anni 90 inizia la ricerca della violazione di CP nei B^0.

Mixing di mesoni neutri

- Oltre ai K^0, altri mesoni neutri possono "mescolarsi"

	u	c	t
$\overline{u}$	$\times$	D^0	$\diamond$
$\overline{c}$	$\overline{D^0}$	$\times$	$\diamond$
$\overline{t}$	$\diamond$	$\diamond$	$\times$

	d	s	b
$\overline{d}$	$\times$	K^0	B^0
$\overline{s}$	$\overline{K^0}$	$\times$	B_s
$\overline{b}$	$\overline{B^0}$	$\overline{B_s}$	$\times$

- Need to be neutral and have distinct anti-particle (x)
- Needs to have a non-zero lifetime
  - top is so heavy, it decays long before it can even form a meson ($\diamond$)
- That leaves four distinct cases...

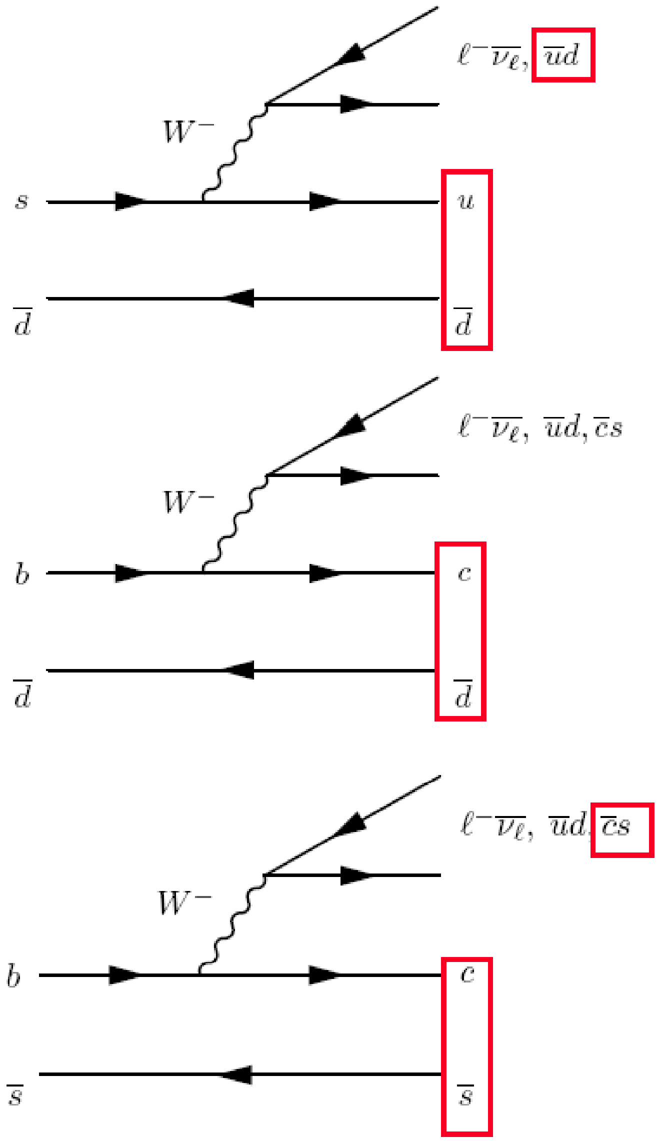
Mixing: Kaons vs. B mesons

- The difference between K mixing and 'the rest': Γ_{12}

$$\Gamma_{12} = \Gamma_1 - \Gamma_2$$

- A *large* fraction of Kaon decays produce CP eigenstates:
  - all decays *without* leptons are CP eigenstates..
- the CP even ones have more phase-space
  - Hence the lifetime difference (large Γ_{12}!)

- For B^0, (and, to a somewhat lesser extent, B_s), the dominant decays are *not* CP eigenstates
  - hence $\Delta\Gamma$=0 (smallish), and Γ_{12} does *not* contribute to B^0 mixing
  - note: as a result labeling eigenstates as 'S'hort and 'L'ong doesn't make sense -- hence the 'H'eavy and 'L'ight



Dominant decay amplitudes

Solving the Schrödinger Equation

$$i\frac{\partial}{\partial t}\psi(t)=\begin{pmatrix} M-\frac{i}{2}\Gamma & M_{12}-\frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{12}^{*}-\frac{i}{2}\Gamma_{12}^{*} & M-\frac{i}{2}\Gamma \end{pmatrix}\psi(t)$$

Solution (in terms of eigenvectors):

$$\psi(t) = a\,|B_H(t)\rangle + b\,|B_L(t)\rangle$$

(a and b determined by initial conditions)

Eigenvectors:

$$|B_H\rangle = p|B\rangle + q|\overline{B}\rangle$$

$$|B_L\rangle = p|B\rangle - q|\overline{B}\rangle$$

From the eigenvector calculation:

$$\frac{q}{p} = \sqrt{\frac{M_{12}^{*} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^{*}}{M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}}}$$

Evolution of eigenvectors:

$$|B_H(t)\rangle = |B_H\rangle\, e^{-i\left(M+\frac{1}{2}\Delta m-\frac{i}{2}(\Gamma-\Delta\Gamma)\right)t}$$

$$|B_L(t)\rangle = |B_L\rangle\, e^{-i\left(M-\frac{1}{2}\Delta m+\frac{i}{2}(\Gamma+\Delta\Gamma)\right)t}$$

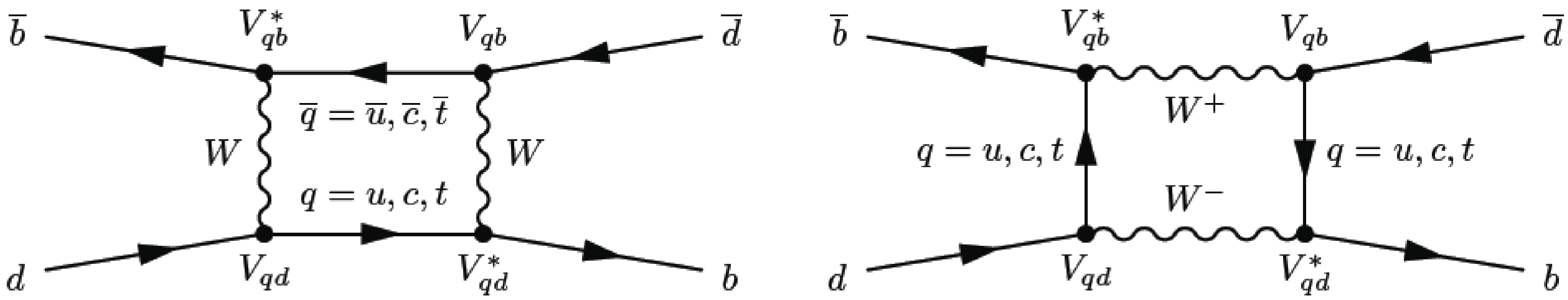
Δm and $\Delta\Gamma$ follow from the eigenvalues:

$$\Delta m + \frac{i}{2}\Delta\Gamma = 2\sqrt{\left(M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}\right)\left(M_{12}^{*} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^{*}\right)}$$

if: $\Gamma_{12} = 0 \Rightarrow \Delta\Gamma = 0, \left|\frac{q}{p}\right| = 1$

Mixing: Box diagrams

N.B. L'accoppiamento ai vertici si ottiene attraverso la matrice CKM



$$t-\bar{t}: \quad \propto m_t^2 \left|V_{tb}V_{td}^*\right|^2 \quad \propto m_t^2\lambda^6$$

$$c-\bar{c}: \quad \propto m_c^2 \left|V_{cb}V_{cd}^*\right|^2 \quad \propto m_c^2\lambda^6$$

$$c-\bar{t}, \bar{c}-t: \quad \propto m_c m_t V_{tb}V_{td}^* V_{cb}V_{cd}^* \propto m_c m_t \lambda^6$$

GIM(V_{CKM} unitarity):
if u,c,t same mass, everything cancels *by construction*!

Dominated by top quark mass: $$\Delta m_B \approx 0.00002 \cdot \left(\frac{m_t}{\mathrm{GeV}/c^2}\right)^2 \mathrm{ps}^{-1}$$

reference: $\tau_B \sim 1.5$ ps

B^0 Mixing: ARGUS, 1987

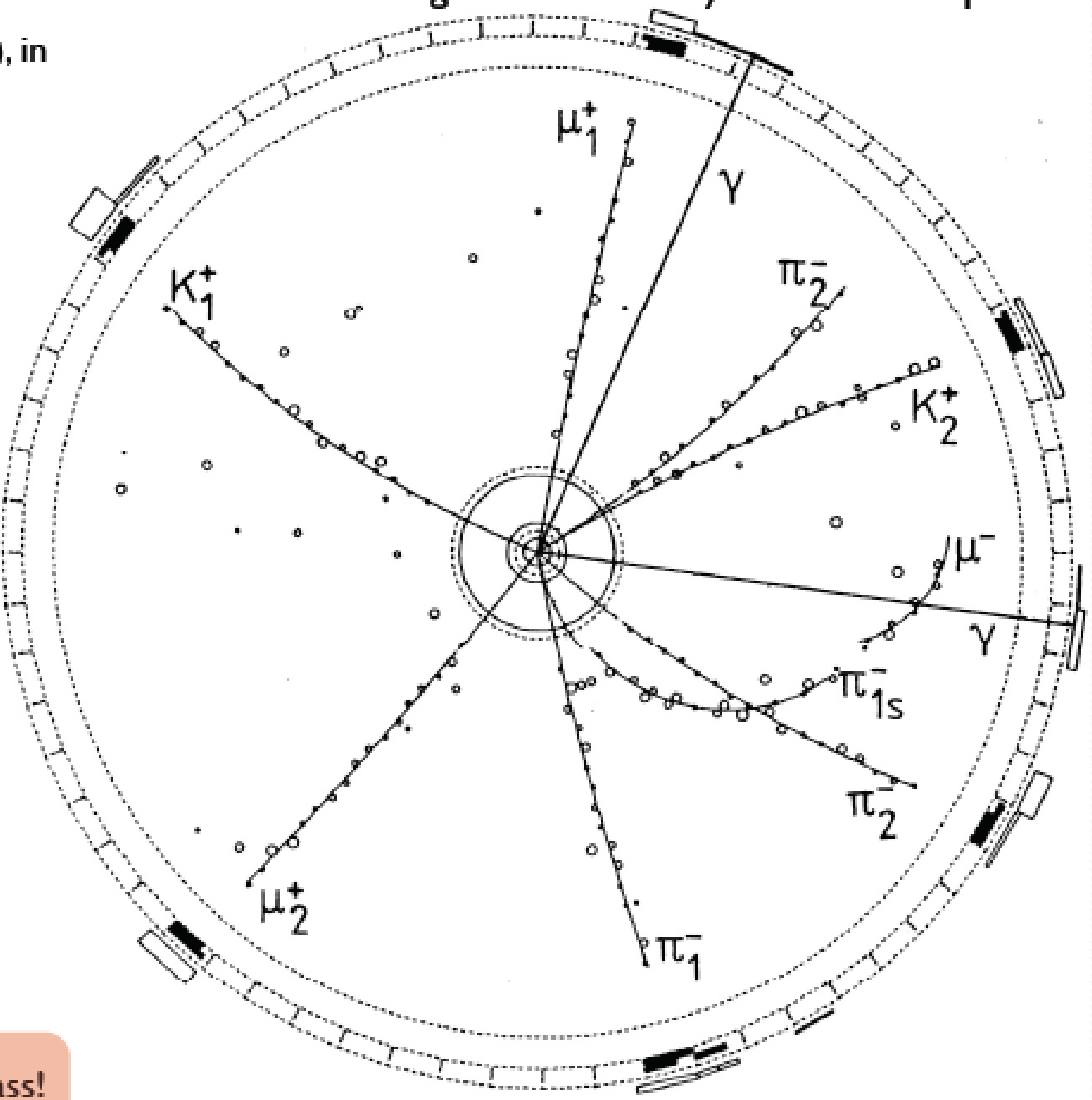
- Produce an $b\bar{b}$ bound state, $\Upsilon(4S)$, in e^+e^- collisions:
  - $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B^0\overline{B^0}$
- and then observe:

$$B_1^0 \rightarrow D_1^{*-}\mu_1^+\nu_1$$
$$D_1^{*-} \rightarrow \overline{D^0}\pi_{1s}^-$$
$$\overline{D^0} \rightarrow K_1^+\pi_1^-$$

$$B_2^0 \rightarrow D_2^{*-}\mu_2^+\nu_2$$
$$D_2^{*-} \rightarrow D^-\pi^0$$
$$D^- \rightarrow K_2^+\pi_2^-\pi_2^-$$
$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

- measure that ~17% of B^0 and $\overline{B^0}$ mesons oscillate before they decay
  - $\tau_B \sim 1.5$ ps $\Rightarrow$ $\Delta m_d \sim 0.5$/ps,

Integrated luminosity 1983-87: 103 pb^{-1}



First evidence of a really large top mass!

Misura della violazione di CP nei B^0?

- Ricordiamo la tecnica usata per misurare la violazione di CP nei K:
  1. Si ottiene un fascio puro di K_2 (questo è possibile per via della grande differenza nella vita media tra i due autostati di CP K_1 e K_2, quindi è sufficiente avere un lungo tunnel di decadimento per la componente K_1)
  2. Si cercano decadimenti del K_2 nello stato con autovalore di CP sbagliato.

- La stessa tecnica non si può utilizzare per studiare la violazione di CP nel B, perché la vita media dei due autostati di CP è circa la stessa e quindi non c'è modo di separare le due componenti "aspettando abbastanza".
- Occorre quindi utilizzare un altro "trucco". Si studia l'evoluzione temporale della coppia Bo anti-Bo e si cercano degli osservabili che dipendono dalla violazione di CP. Ad esempio si cercano delle differenze nel rate di decadimento del B^0 e del anti-B^0 in alcuni stati finali che hanno lo stesso autovalore di CP

$$B.R.\left(B^0 \to f\right) \neq B.R.\left(\bar{B}^0 \to f\right)$$

Come si fa ad avere violazione di CP

$$B.R.\left(B^0 \to f\right) \neq B.R.\left(\bar{B}^0 \to f\right)$$

• Se l'ampiezza di decadimento contiene una fase che cambia segno per via dell'applicazione di CP, allora:

$$A = |A|\, e^{i\phi} \xrightarrow{CP} \bar{A} = |A|\, e^{-i\phi}$$

• Ma questo non è sufficiente per avere la violazione di CP, perché:

$$A^* A = |A|\, e^{-i\phi}\, |A|\, e^{i\phi} = \bar{A}^* \bar{A} = |A|\, e^{i\phi}\, |A|\, e^{-i\phi} = |A|^2$$

• Per avere violazione di CP dobbiamo avere:

a) due ampiezze

b) due fasi (fase debole, fase forte)

c) solo una fase cambia segno sotto CP (fase debole)

$$A = A_1 + A_2 = |A_1|\, e^{i\phi_W} e^{i\phi_s} + |A_2| \qquad \bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2 = |A_1|\, e^{-i\phi_W} e^{i\phi_s} + |A_2|$$

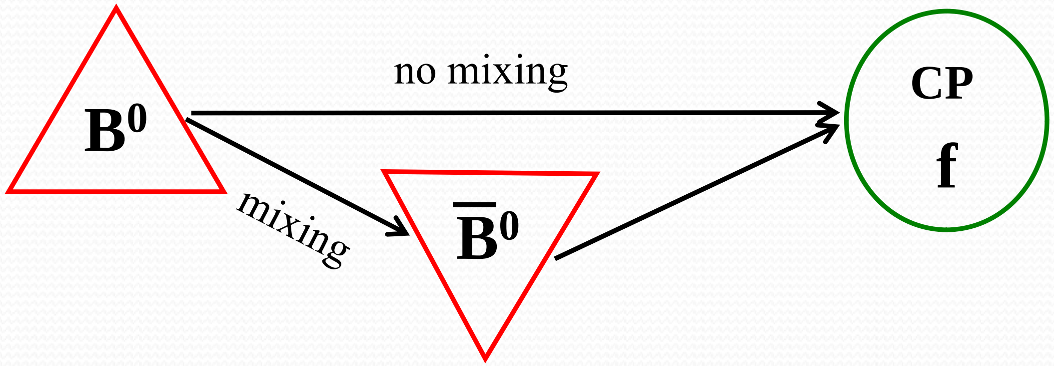
$$A^* A = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2\,|A_1|\,|A_2|\cos(\phi_s + \phi_W)$$

$$\bar{A}^* \bar{A} = |A_1|^2 + |A_2|^2 + 2\,|A_1|\,|A_2|\cos(\phi_s - \phi_W)$$

Le Γ dipendono dalle fasi relative

Violazione di CP nel mixing

- Per misurare la differenza di fase occorre ricorrere ad un fenomeno di interferenza, ad esempio il decadimento del B° in uno stato f con CP definita, che può avvenire direttamente oppure dal B° ottenuto attraverso il mescolamento B° –anti B°:



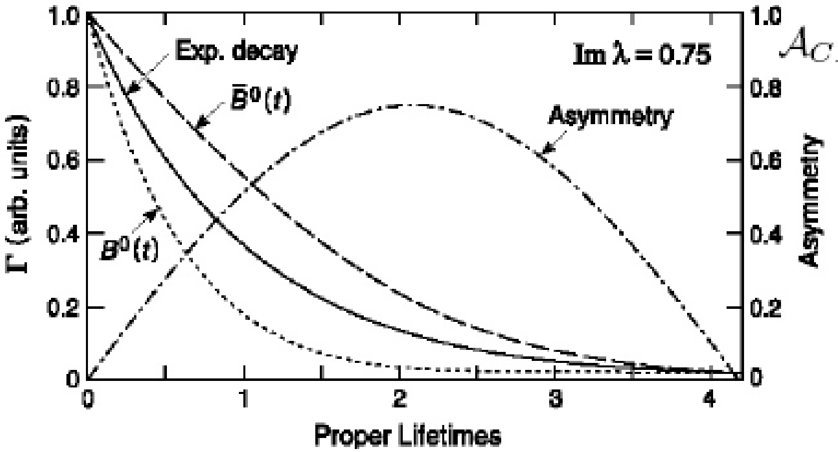
- In questo caso si hanno due ampiezze che interferiscono
- N.B. si può avere anche la violazione diretta di CP se le ampiezze di decadimento del Bo e dell'anti-Bo sono diverse.

Violazione di CP nell'interferenza

Interference!

$$\lambda_{f_{CP}} = \frac{q}{p}\frac{\overline{A}_{f_{CP}}}{A_{f_{CP}}}$$

$t=0$	t	Rate
B^0 ⟶	f_{CP}	$\frac{1}{2}e^{-\Gamma t}\left[1+\left(\frac{1-\lvert\lambda\rvert^2}{1+\lvert\lambda\rvert^2}\right)\cos(\Delta m t)-\left(\frac{2\mathcal{I}(\lambda)}{1+\lvert\lambda\rvert^2}\right)\sin(\Delta m t)\right]$
$\overline{B^0}$ ⟶	f_{CP}	$\frac{1}{2}e^{-\Gamma t}\left[1-\left(\frac{1-\lvert\lambda\rvert^2}{1+\lvert\lambda\rvert^2}\right)\cos(\Delta m t)+\left(\frac{2\mathcal{I}(\lambda)}{1+\lvert\lambda\rvert^2}\right)\sin(\Delta m t)\right]$



$$\mathcal{A}_{CP} \equiv \frac{\Gamma(\overline{B^0}\to f_{CP})-\Gamma(B^0\to f_{CP})}{\Gamma(\overline{B^0}\to f_{CP})+\Gamma(B^0\to f_{CP})}$$

$$= -C_{f_{CP}}\cos(\Delta m t)+S_{f_{CP}}\sin(\Delta m t)$$

CP in decay

CP in interference between decay and mixing

Next: find the right f_{CP}...

Matrice CKM e violazione di CP

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

Gli autostati delle interazioni deboli non sono uguali agli autostati delle interazioni forti.

- Riscriviamo la matrice CKM nella formulazione di Wolfstein, utile per descrivere la violazione di CP:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & \overbrace{A\lambda^3(\rho - i\eta)}^{V_{ub}} \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ \underbrace{A\lambda^3(1-\rho-i\eta)}_{V_{td}} & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

V_{td} e V_{ub} forniscono la fase debole necessaria per la violazione di CP nei decadimenti dei mesoni B

Unitarietà della matrice: $VV^\dagger=1$

$$|V_{ud}|^2 + |V_{cd}|^2 + |V_{td}|^2 = 1$$
$$|V_{us}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{ts}|^2 = 1$$
$$|V_{ub}|^2 + |V_{cb}|^2 + |V_{tb}|^2 = 1$$

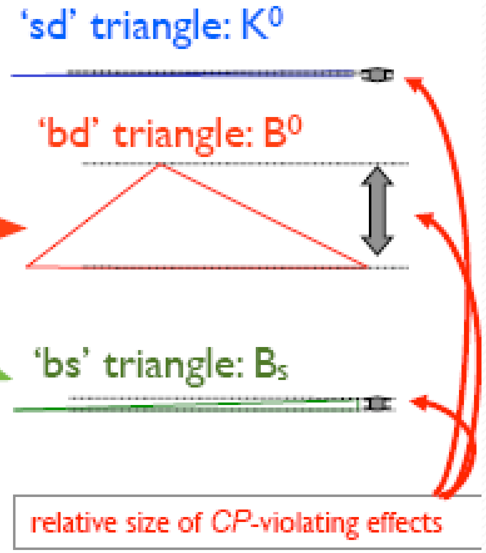
$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

The 6 complex "**Unitarity Triangles**" involve different physics processes

$$V_{us}^* V_{ud} + V_{cs}^* V_{cd} + V_{ts}^* V_{td} = 0 \qquad \mathcal{O}(\lambda) + \mathcal{O}(\lambda) + \mathcal{O}(\lambda^5) = 0$$

$$V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td} = 0 \qquad \mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3) = 0$$

$$V_{ub}^* V_{us} + V_{cb}^* V_{cs} + V_{tb}^* V_{ts} = 0 \qquad \mathcal{O}(\lambda^4) + \mathcal{O}(\lambda^2) + \mathcal{O}(\lambda^2) = 0$$

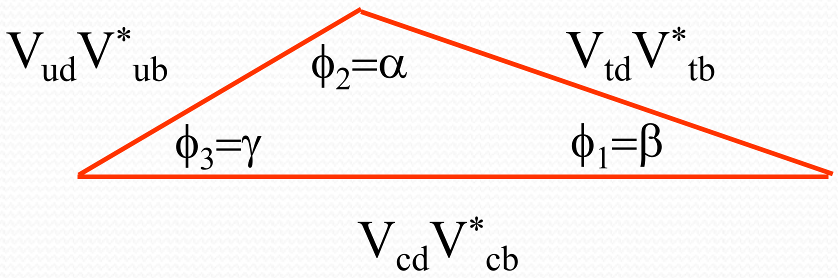


$$V_{ud} V_{cd}^* + V_{us} V_{cs}^* + V_{ub} V_{cb}^* = 0$$
$$V_{ud} V_{td}^* + V_{us} V_{ts}^* + V_{ub} V_{tb}^* = 0$$
$$V_{cd} V_{td}^* + V_{cs} V_{ts}^* + V_{cb} V_{tb}^* = 0$$

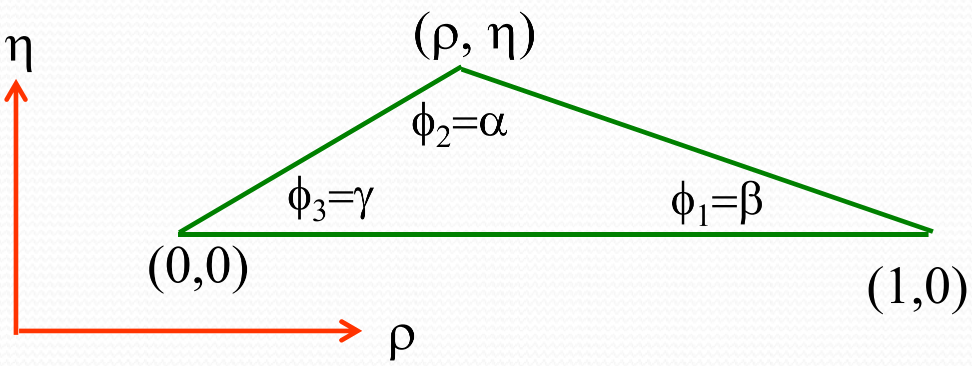
Queste relazioni si possono rappresentare come un triangolo in un piano complesso.

Triangolo di unitarietà

- Prendiamo il triangolo relativo ai mesoni B_d : $V_{ub}^{*}V_{ud} + V_{cb}^{*}V_{cd} + V_{tb}^{*}V_{td} = 0$



È conveniente normalizzare tutti i lati del triangolo di unitarietà rispetto alla base del triangolo ($V_{cd}V^{*}_{cb} = A\lambda^3$). Nel piano ($\rho,\eta$) il triangolo diventa:



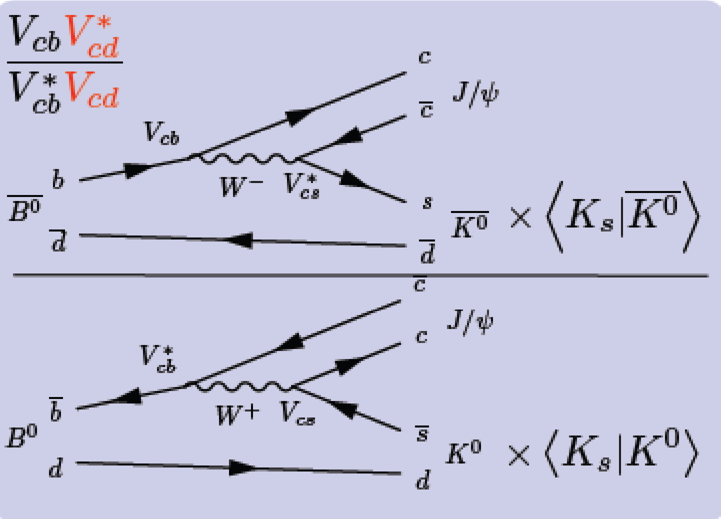
Un altro modo di verificare la violazione di CP nel sistema dei B è verificare che l'area di questo triangolo sia diversa zero.

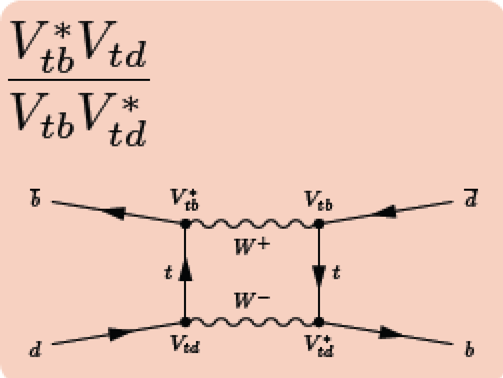
Misurando in maniera indipendente tutti gli angoli ed i lati del triangolo, si può controllare sperimentalmente se il triangolo si "chiude". Se così non fosse sarebbe un'evidenza di una nuova fisica non prevista dal Modello Standard.

Golden channel:B→ J/Ψ Ks

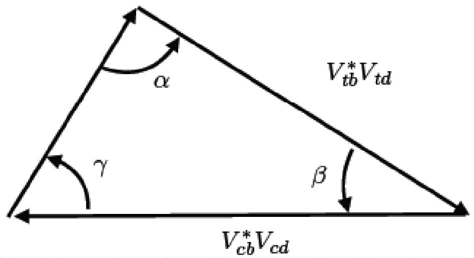
$$\lambda_{J/\psi K_S} \equiv \frac{q}{p}\frac{\overline{A}_{J/\psi K_S}}{A_{J/\psi K_S}}$$

$$= -\frac{q}{p}\frac{\overline{A}_{J/\psi \overline{K^0}, \overline{K^0}\to K_S}}{A_{J/\psi K^0, K^0\to K_S}}$$





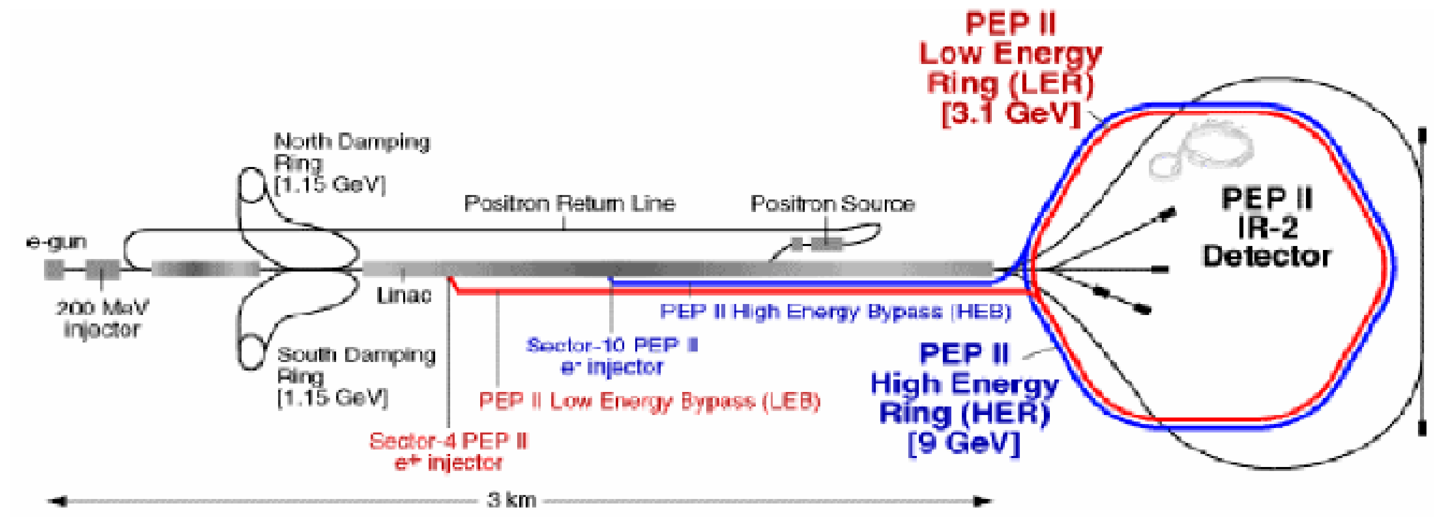
$$\lambda_{J/\psi K_S} = -e^{-2i\beta}$$

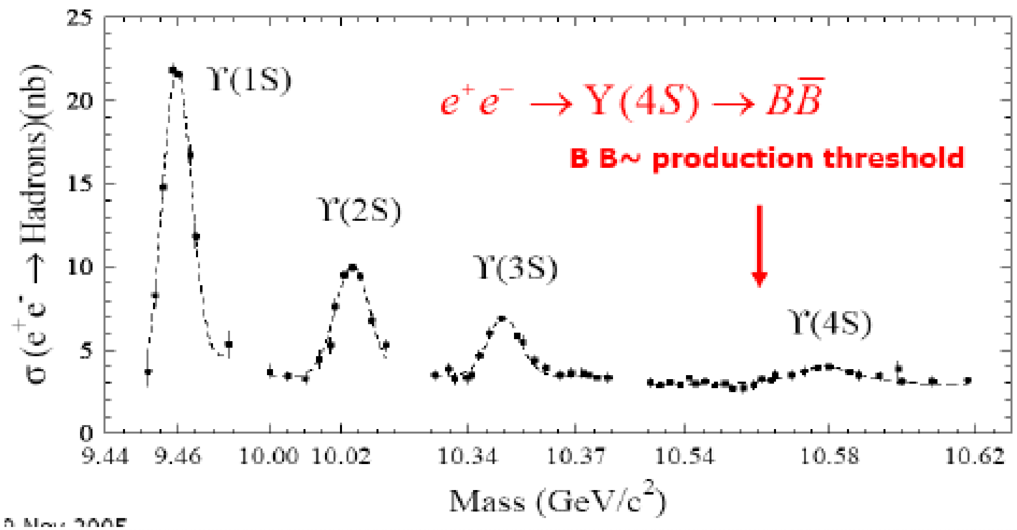


$$\mathcal{A}_{CP} = \frac{\Gamma(\overline{B^0}\to J/\psi K_S) - \Gamma(B^0\to J/\psi K_S)}{\Gamma(\overline{B^0}\to J/\psi K_S) + \Gamma(B^0\to J/\psi K_S)} = \sin(2\beta)\sin(\Delta m t)$$

Problema: come distinguere B^0 da anti-B^0?

PEP-II Asymmetric B-Factory at SLAC





- 9 GeV e^- on 3.1 GeV e^+
- $\Upsilon(4S)$ boost in lab frame
  - $\beta\gamma = 0.55$

Quantum Entanglement in $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$ Decays

$$\Upsilon(4s) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$$

With $L = 1$

Spin = 1 0 0

- Strong interaction: CP is and flavor beauty number are conserved
  - Must have one **b** and one **anti-b** quarks in final state

$$|B^0_{\text{phys}} \overline{B}^0_{\text{phys}}\rangle = \frac{a}{\sqrt{2}} |B_L B_H\rangle + \frac{b}{\sqrt{2}} |B_H B_L\rangle$$

- Time evolution given by mass eigenstates

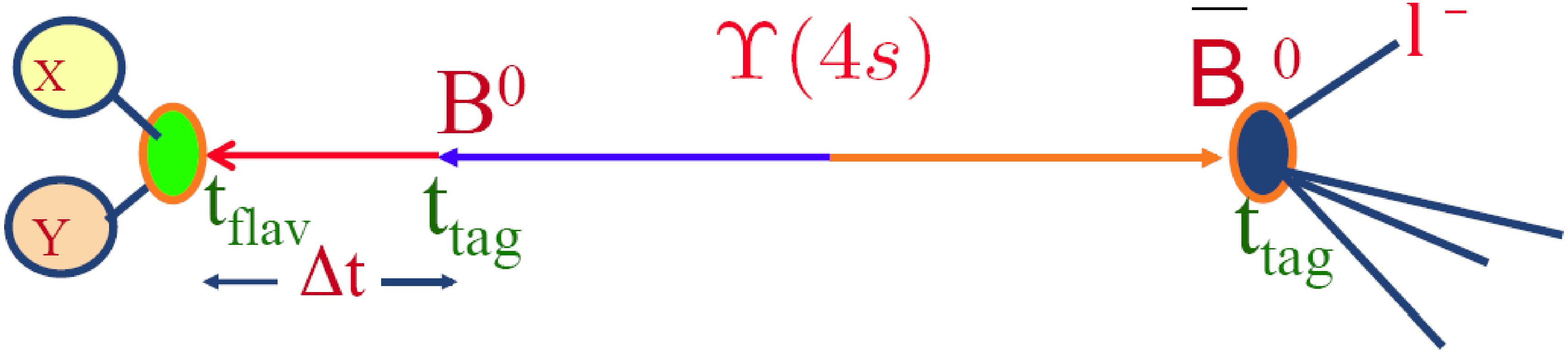
$$|B^0_{\text{phys}} \overline{B}^0_{\text{phys}}; t_1, t_2\rangle = a\, e^{i\lambda_+ t_1} e^{i\lambda_- t_2} |B_L B_H\rangle + b\, e^{i\lambda_- t_1} e^{i\lambda_+ t_2} |B_H B_L\rangle$$

- Bose-Einstein Statistics requires wave function $|\Psi\rangle$ to be symmetric at all times

$$|\Psi\rangle = |\Psi_{\text{flavor}}\rangle |\Psi_{\text{space}}\rangle$$

- L=-1 implies asymmetric spatial wave function
- We need a=-b which means a B^0 and a $\bar{B}^0$ meson at all times until one of them decays!
  - Example of Einstein-Podolsky-Rosen Paradox

Quantum Correlation at $\Upsilon(4S)$



- Decay of first B (B^0) at time t_{tag} ensures the other B is $\overline{B^0}$
  - End of Quantum entanglement ! Defines a ref. time (clock)

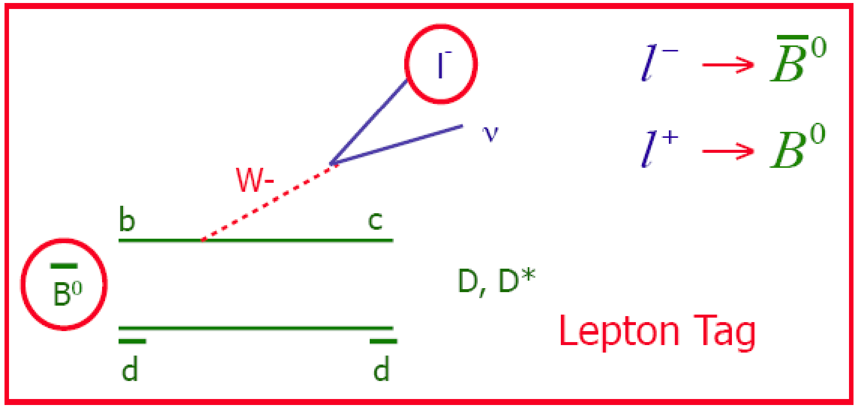
- At $t > t_{tag}$, B^0 has some probability to oscillate into B^0 before it decays at time t_{flav} into a flavor specific state

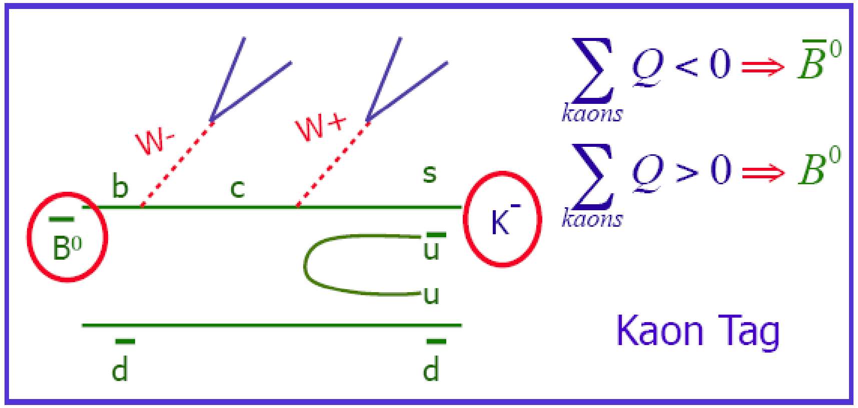
- Two possibilities in the $\Upsilon(4S)$ event depending on whether the 2nd B oscillated or not:

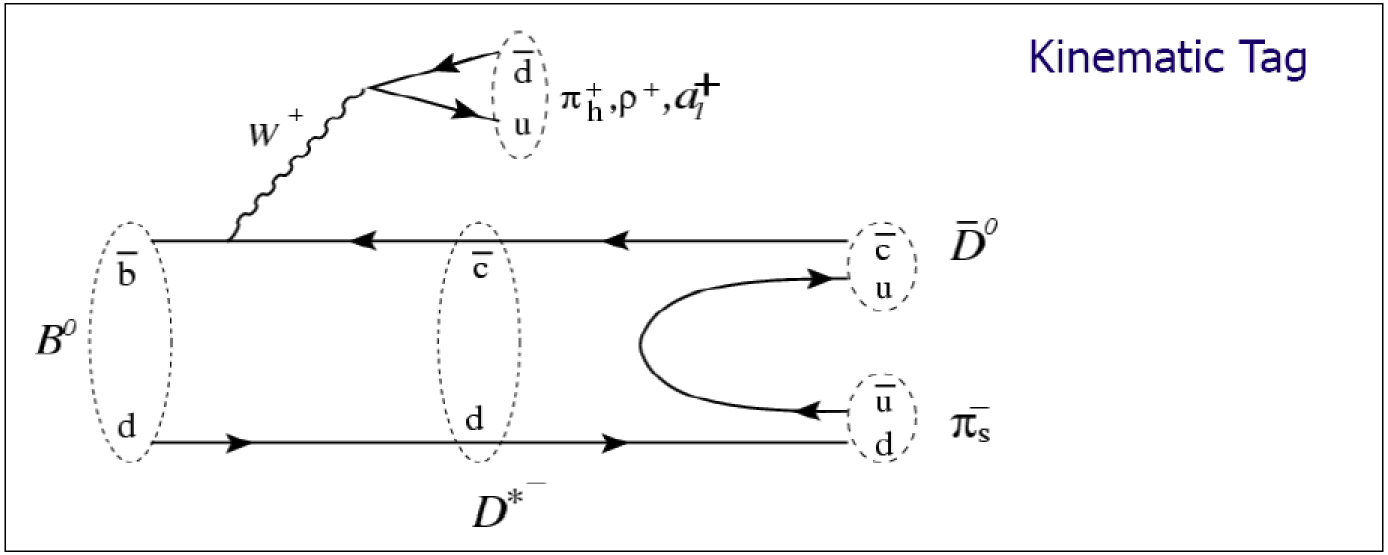
$$\text{no oscillation/mixing} \Rightarrow \mathrm{B}^0\, \bar{\mathrm{B}}^0 \text{ in final state}$$

$$\text{oscillation/mixing} \Rightarrow \bar{\mathrm{B}}^0\, \bar{\mathrm{B}}^0 \text{ in final state}$$

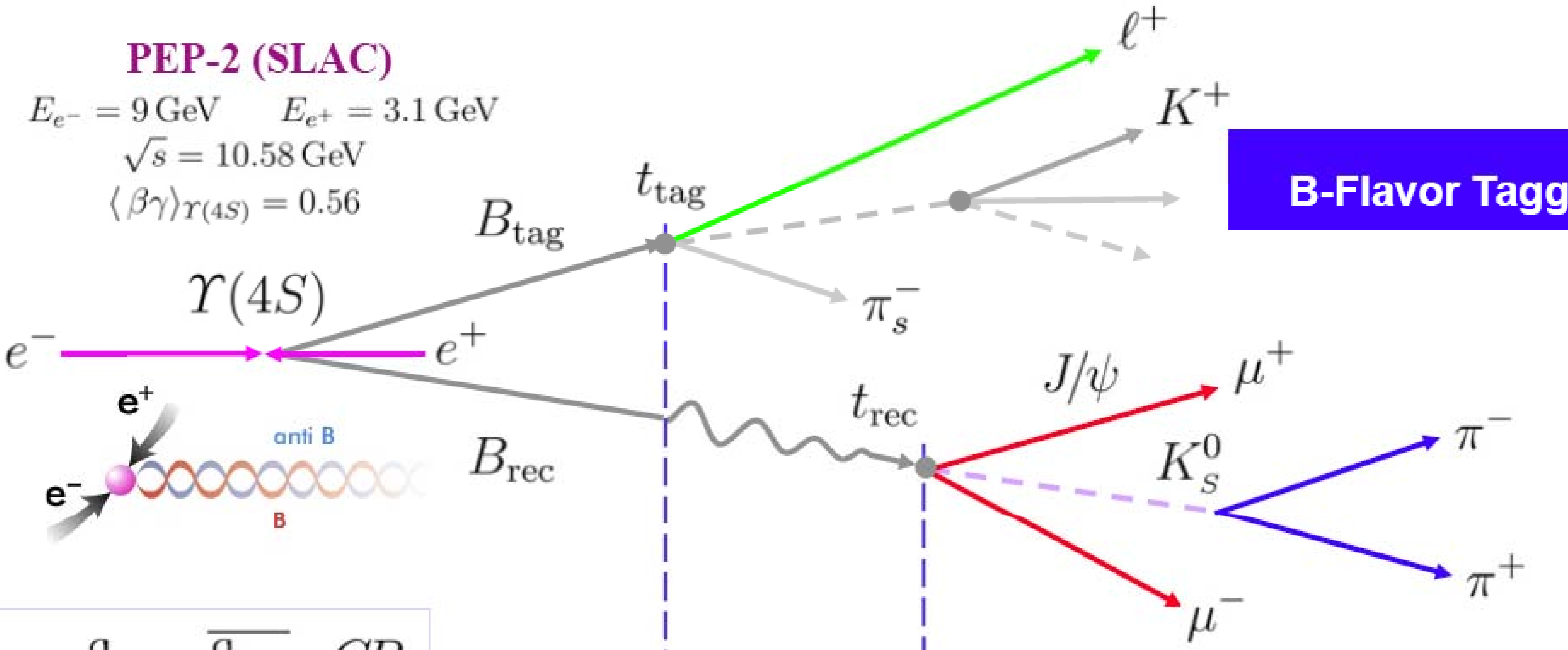
Separating B^0 and $\overline{B}^0$ mesons







Ingredients of the measurements



$$\mathrm{rec} = \mathrm{flav},\ \overline{\mathrm{flav}},\ CP$$

$$f_{\mathrm{flav}} = D^{*-}\pi^+, \ldots$$

$$f_{CP} = J/\psi\, K_S^0,\ J/\psi\, K_L^0, \ldots$$

$$\mathrm{tag} = B^0,\ \overline{B}^0$$

$$f_{B^0} = X\ell^+\nu,\ XK^+,\ X\pi_s^-, \ldots$$

$$\Delta t \equiv t_{rec} - t_{tag}$$

Vertexing & Time Difference Determination

Exclusive B Meson Reconstruction

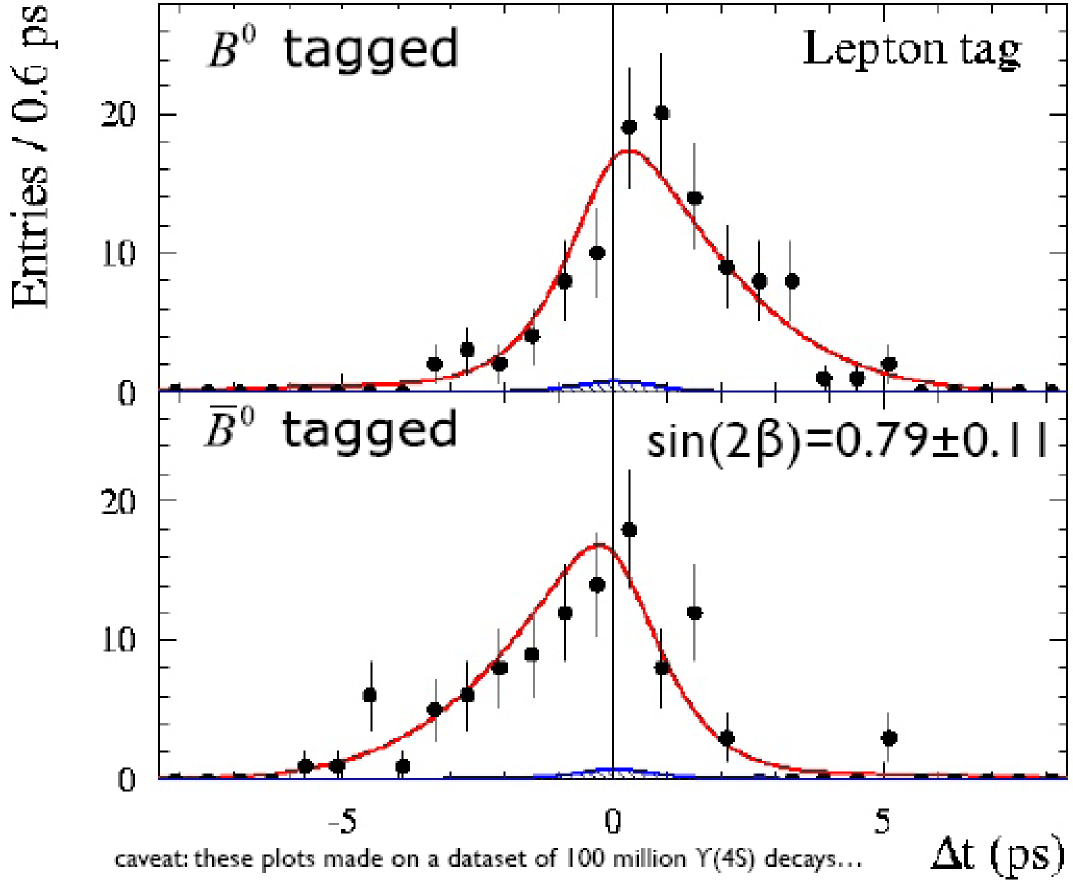
$$\Delta t \approx \Delta z / c \langle \beta\gamma \rangle_{\Upsilon(4S)}$$

$$\langle \Delta z \rangle_{B\overline{B}} \approx 260\,\mu\mathrm{m}$$

Risultato:

CP violation in B system!

$$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B_{\rm rec}B_{\rm tag} \qquad \begin{array}{ll} B_{\rm rec} \rightarrow & J/\psi K_S \\ B_{\rm tag} \rightarrow & \ell^\pm X \end{array}$$



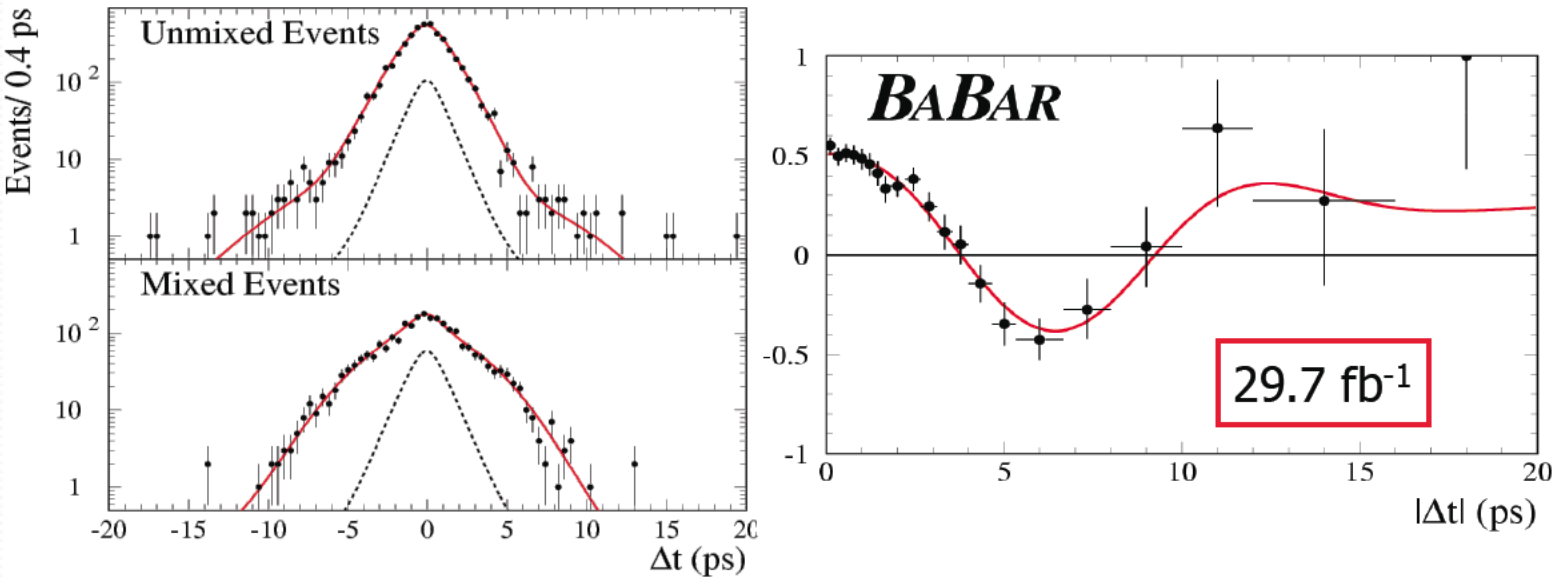
220 events

98% signal purity!
3.3% mistag rate!
20% better Δt resolution!

caveat: these plots made on a dataset of 100 million Υ(4S) decays…

$B^0\overline{B}^0$ Mixing Fit Result

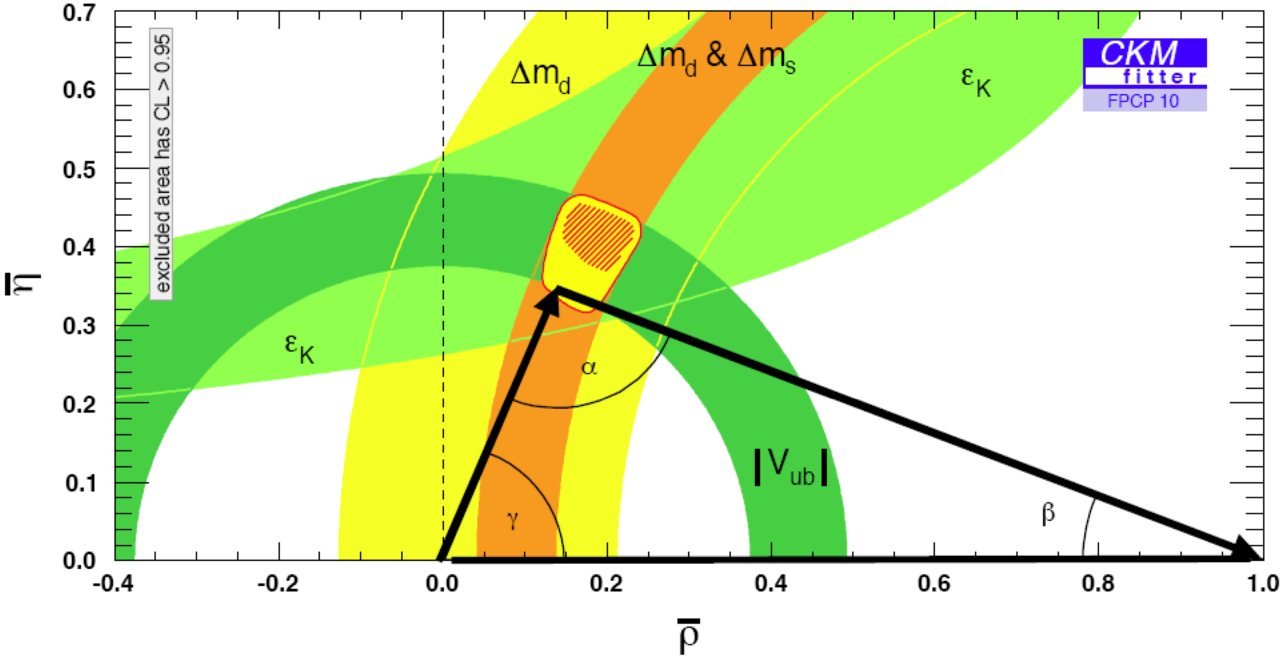
$$Asym\,(\Delta t) = \frac{N(unmixed) - N(mixed)}{N(unmixed) + N(mixed)} \sim (1 - 2\langle w \rangle) \times \cos\,(\Delta m_d \Delta t)$$



Δm_d = 0.516 ± 0.016 (stat) ± 0.010 (syst) ps^{-1}

hep-ex/0112044
Published in PRL

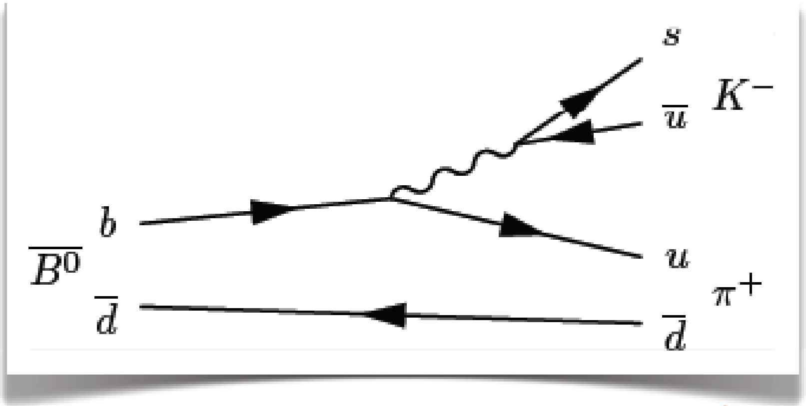
$(\bar{\rho},\bar{\eta})$: the magnitudes and ε_K...



Direct CP violation: $\Gamma(B^0 \to f) \neq \Gamma(\overline{B}^0 \to \overline{f})$

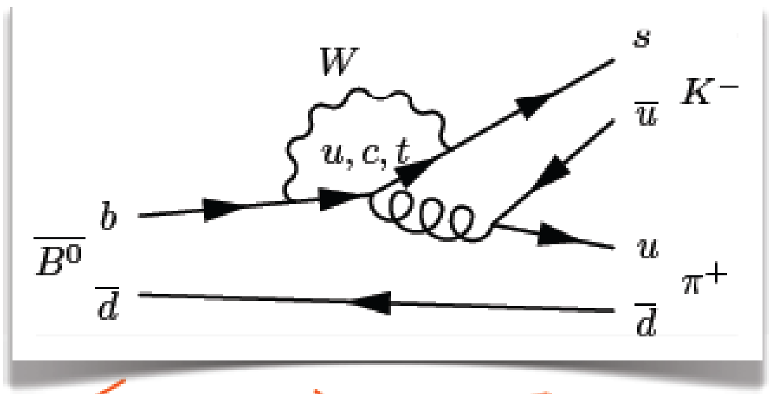
needs (at least!) 2 interfering amplitudes

Amplitude 1



\+

Amplitudes 2,3 and 4…



$$A_{\overline{B^0}\to K^-\pi^+} = V_{ub}V_{us}^*(T + P_u - P_t) + V_{cb}V_{cs}^*(P_c - P_t)$$

$= \mathcal{O}(\lambda^4)$ relative phase: γ $= \mathcal{O}(\lambda^2)$

Now the otherwise dominant tree diagram is suppressed by λ^2!

potentially ~equal amplitudes with *both* different strong and weak phases !

→ $\Gamma(B^0 \to f) \neq \Gamma(\overline{B}^0 \to \overline{f})$

Observation of Direct CPV in B0→K⁻π⁺

$$A_{K^-\pi^+} \equiv \frac{\Gamma(\overline{B} \to K^-\pi^+) - \Gamma(B \to K^+\pi^-)}{\Gamma(\overline{B} \to K^-\pi^+) + \Gamma(B \to K^+\pi^-)}$$

$$n_{K\pi} = 1606 \pm 51$$

$$A_{K\pi} = -0.133 \pm 0.030 \pm 0.009$$

$$n\left(B^0 \to K^+\pi^-\right) = 910$$

$$n\left(\overline{B}^0 \to K^-\pi^+\right) = 696$$