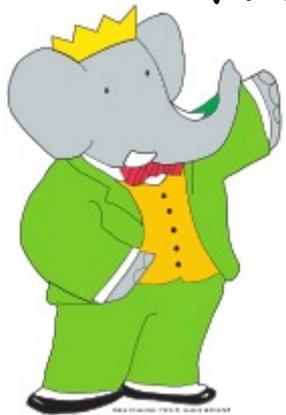


BABAR

Violazione di CP
& misura di
 $\sin 2\beta$

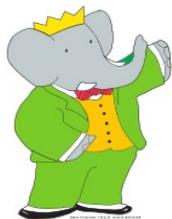
nel sistema di mesoni neutri

$B^0 \bar{B}^0$



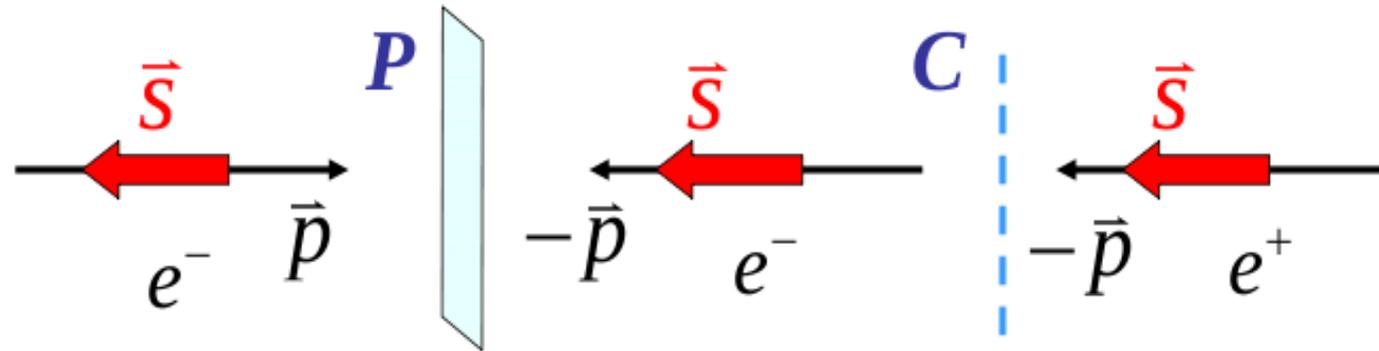
Perchè ci interessa la violazione di CP?

x La violazione di CP in cosmologia rappresenta una delle tre condizioni necessarie per generare l'eccesso globale di materia nell'universo. (Sakharov, 1967)

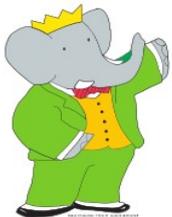


x Noi affronteremo lo studio della violazione di CP nel quadro globale del modello standard, ma è importante notare che l'entità di questa violazione non è abbastanza grande da giustificare l'asimmetria materia-antimateria nell'universo.

In cosa consiste la trasformazione CP? (1)



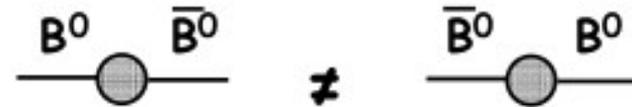
- ✗ L'azione combinata di parità, P, e coniugazione di carica, C, rappresenta un vero e proprio specchio materia antimateria.
- ✗ Dato che CP trasforma una particella nella sua antiparticella, quindi, si ha una violazione di CP se queste si comportano diversamente. Questo si traduce in un'interferenza quantistica tra due o più ampiezze di interazione.
- ✗ Nel 1964 si osservò per la prima volta la CPV nel sistema dei mesoni K neutri .



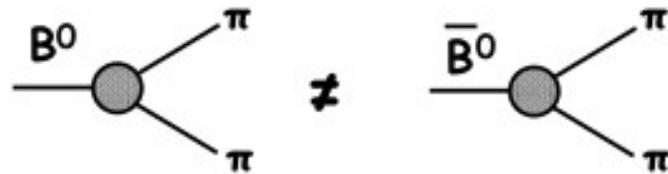
In cosa consiste la trasformazione CP? (2)

Esistono tre tipi di violazione CP:

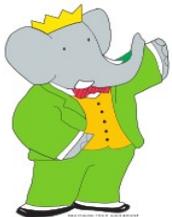
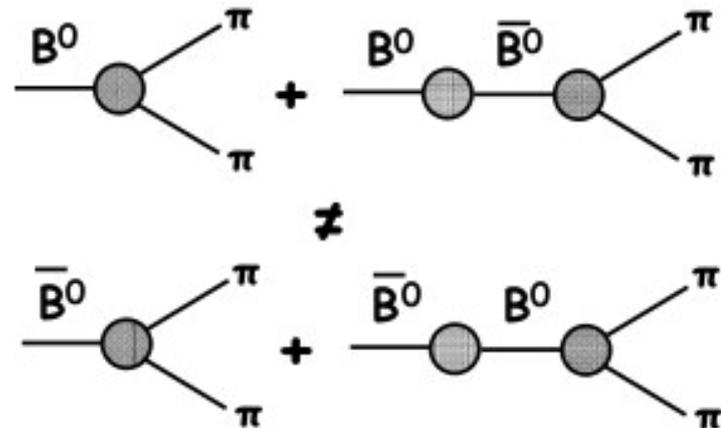
- Violazione di CP nel mescolamento (indiretta):



- Violazione di CP nei decadimenti (diretta):

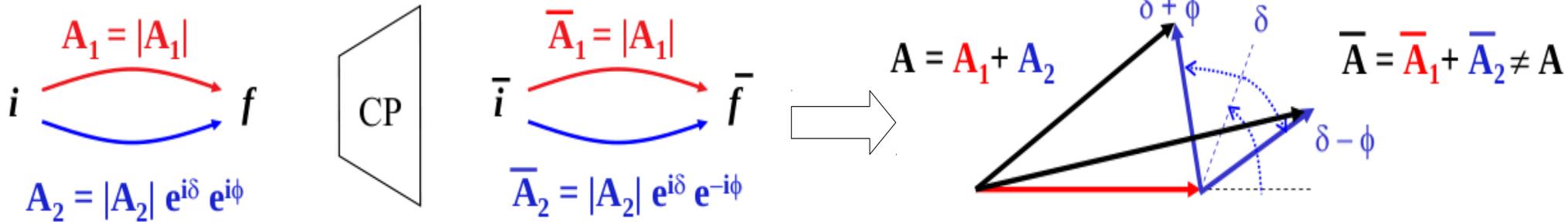


- Violazione di CP nell'interferenza tra decadimenti con e senza mescolamento (diretta-indiretta):



Quando si ha una violazione di CP di decadimento o di mixing?

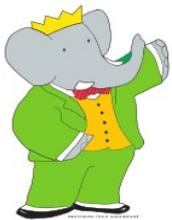
DECADIMENTO



$$Asymmetry = \frac{|\bar{A}|^2 - |A|^2}{|\bar{A}|^2 + |A|^2} = \frac{2|A_1||A_2|\sin(\delta_1 - \delta_2)\sin(\phi_1 - \phi_2)}{|A_1|^2 + |A_2|^2 + |A_1||A_2|\cos(\delta_1 - \delta_2)\cos(\phi_1 - \phi_2)}$$

MIXING

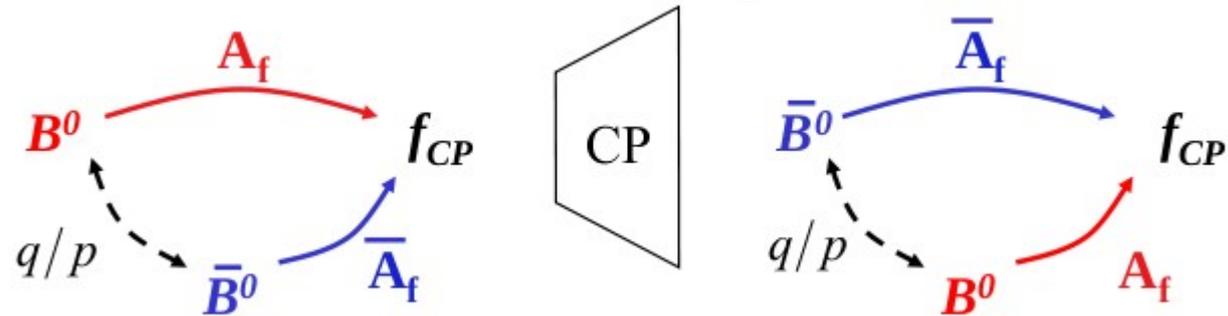
$$\langle B^0 | \bar{B}^0 \rangle = |q|^2 - |p|^2 \neq 0 \iff \left| \frac{q}{p} \right| \neq 1 \quad \left| \frac{q}{p} \right| = \left| \frac{1 - \epsilon_{B_d}}{1 + \epsilon_{B_d}} \right|$$



$$\left| \frac{\bar{A}}{A} \right| \neq 1 \iff \text{Condizione per la violazione di CP diretta}$$

$$\left| \frac{q}{p} \right| \neq 1 \iff \text{Condizione per la violazione di CP di mixing}$$

Quando si ha una violazione di CP dovuta all'interferenza mixing-decadimento?



x Si ha violazione di CP se: $\Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) \neq \Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})$

$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}$$

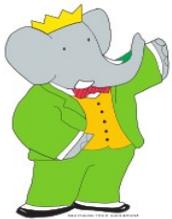
$$= C_{f_{CP}} \cos(\Delta m t) + S_{f_{CP}} \sin(\Delta m t)$$

$$C_{f_{CP}} = \frac{1 - |\lambda_{f_{CP}}|^2}{1 + |\lambda_{f_{CP}}|^2}$$

$$S_{f_{CP}} = \frac{-2 \text{Im} \lambda_{f_{CP}}}{1 + |\lambda_{f_{CP}}|^2}$$

$$\lambda_{f_{CP}} = \eta_{f_{CP}} \frac{q}{p} \cdot \frac{\bar{A}_{f_{CP}}}{A_{f_{CP}}}$$

Per avere CPV è sufficiente : $\Rightarrow A_{CP} = -\text{Im}(\lambda) \sin(\Delta m t)$



La violazione di CP nel Modello Standard

x Gruppo di simmetria delle interazioni deboli

$$SU(2)_L \times U(1)_Y$$

x Lagrangiana di massa

$$\mathcal{L}_M = -\sqrt{\frac{1}{2}}v\mathbf{G}_{ij}\overline{d_{Li}^I}d_{Rj}^I - \sqrt{\frac{1}{2}}v\mathbf{F}_{ij}\overline{u_{Li}^I}u_{Rj}^I + \text{H.c.}$$

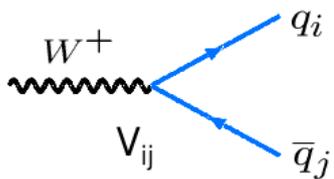
$$\mathbf{M}_d = \mathbf{G}v/\sqrt{2}, \quad \mathbf{M}_u = \mathbf{F}v/\sqrt{2}.$$

x Diagonalizzazione delle matrici

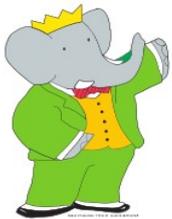
$$V_{dL}\mathbf{M}_dV_{dR}^\dagger = \mathbf{M}_d^{\text{diag}} \quad V_{uL}\mathbf{M}_uV_{uR}^\dagger = \mathbf{M}_u^{\text{diag}}$$

x Lagrangiana di interazione

$$\mathcal{L}_W = -\sqrt{\frac{1}{2}}g\overline{u_{Li}}\gamma^\mu \overline{\mathbf{V}}_{ij}d_{Lj}W_\mu^+ + \text{h.c.}$$



$$\overline{\mathbf{V}} = \mathbf{V}_{uL}\mathbf{V}_{dL}^\dagger \Rightarrow \mathbf{V}_{CKM} = \mathbf{V}_{uL}^\dagger\mathbf{V}_{dL} \quad \mathbf{V}_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



1972 Kobayashi-Maskawa →

Si ha CPV se nella matrice CKM compare una fase complessa.

→ **Il numero minimo di famiglie di quark necessario è 3!!**

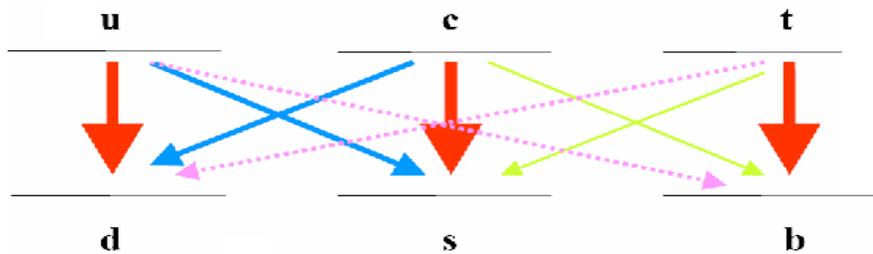
La violazione di CP nel Modello Standard

Diagonal elements ~ 1

$V_{cb}, V_{ts} \sim 4 \times 10^{-2}$

$V_{us}, V_{cd} \sim 0.2$

$V_{ub}, V_{td} \sim 4 \times 10^{-3}$



$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

x CKM è UNITARIA!

$$\left| \begin{array}{l} \sum_{(i=u,c,t)} V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk} ; \quad \sum_{(i=d,s,b)} V_{ij} V_{kj}^* = \delta_{ik} \end{array} \right|$$

x Tutte le righe e le colonne devono essere ortonormali:

$$V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* = 0,$$

ds

$$V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0,$$

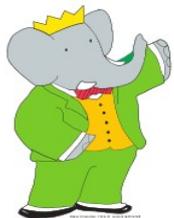
sb

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0.$$

db

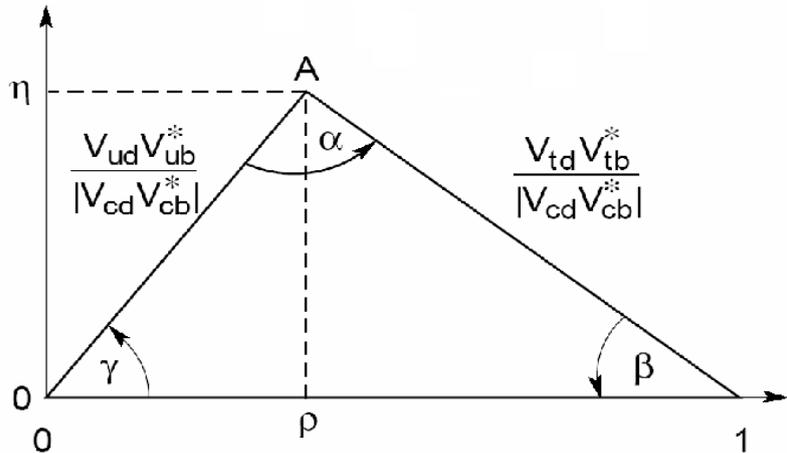
Mesoni B_d

x Per questo sistema fisico si possono osservare i maggiori effetti di violazione CP, dato che i lati del triangolo sono tutti dello stesso ordine!



La violazione di CP nel Modello Standard

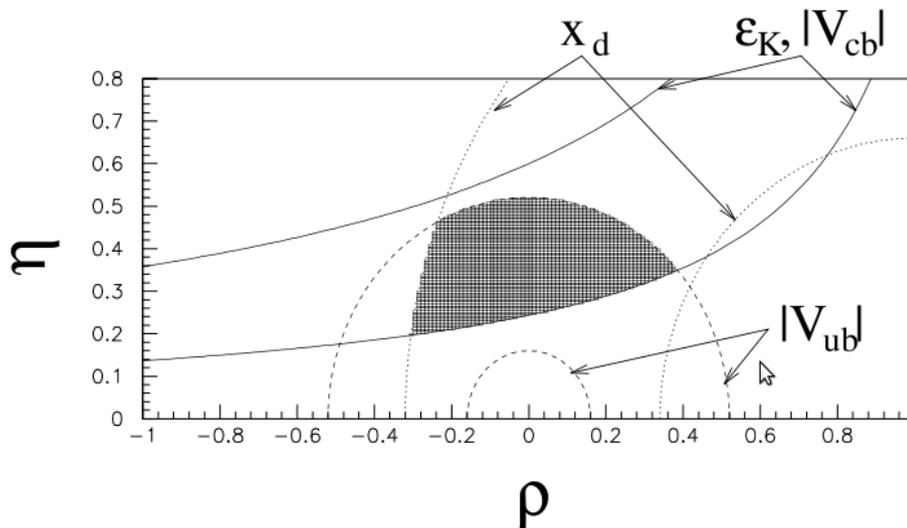
\times Se consideriamo allora il triangolo unitario $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$ e lo riscalamo e allineiamo in modo tale che il lato $V_{cd}V_{cb}^*$ sia reso reale e normalizzato a 1, si ottiene:



\times Le coordinate di A sono due dei parametri introdotti da Wolfenstein, mentre i tre angoli sono collegati agli elementi della matrice CKM dalle relazioni:

$$\alpha \equiv \arg \left(-\frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \right) \quad \beta \equiv \arg \left(-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*} \right) \quad \gamma \equiv \arg \left(-\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} \right)$$

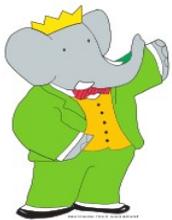
\times Situazione prima dell'introduzione delle B-factory:



$$-0.59 \leq \sin 2\alpha \leq 1.0$$

$$0.29 \leq \sin 2\beta \leq 0.88$$

$$-1.0 \leq \sin 2\gamma \leq 1.0$$

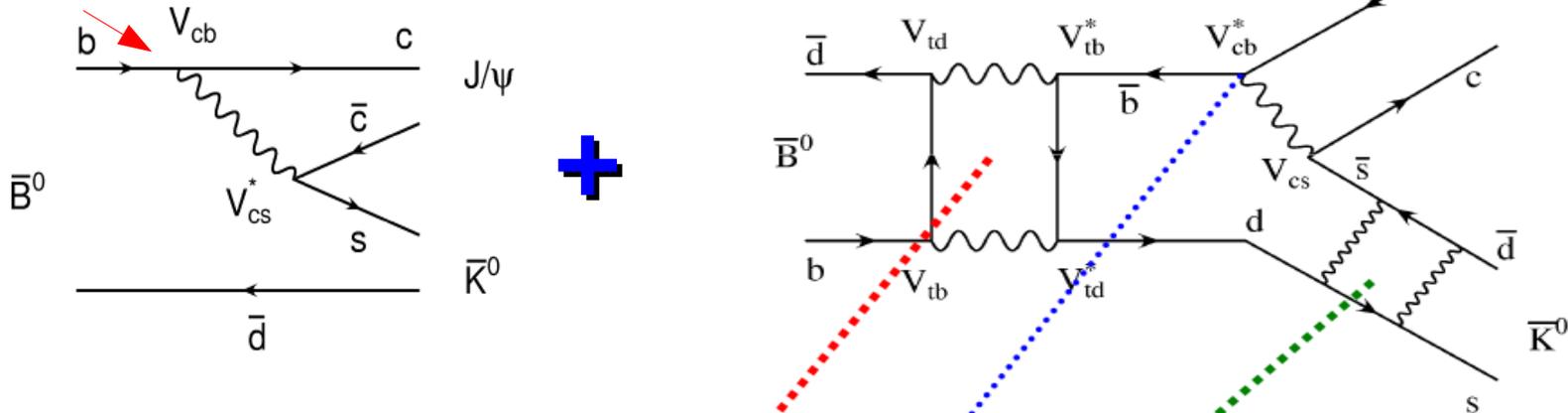


Golden channel per la misura di $\sin 2\beta$

× Sfruttiamo la CPV dovuta all'interferenza tra mixing e decadimento (in un autostato di CP) in:

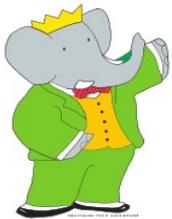
$b \rightarrow c\bar{c}s$

$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 \leftarrow \text{BR} \sim 4.5 \times 10^{-4}$$



$$\lambda_{\psi K_S} = \frac{q_B}{p_B} \frac{\bar{A}_{\psi K_S}}{A_{\psi K_S}} = - \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*} \frac{V_{cb} V_{cs}^*}{V_{cb}^* V_{cs}} \frac{V_{cs} V_{cd}^*}{V_{cs}^* V_{cd}} = e^{-2i\beta} \Leftrightarrow |\lambda| \cong 1$$

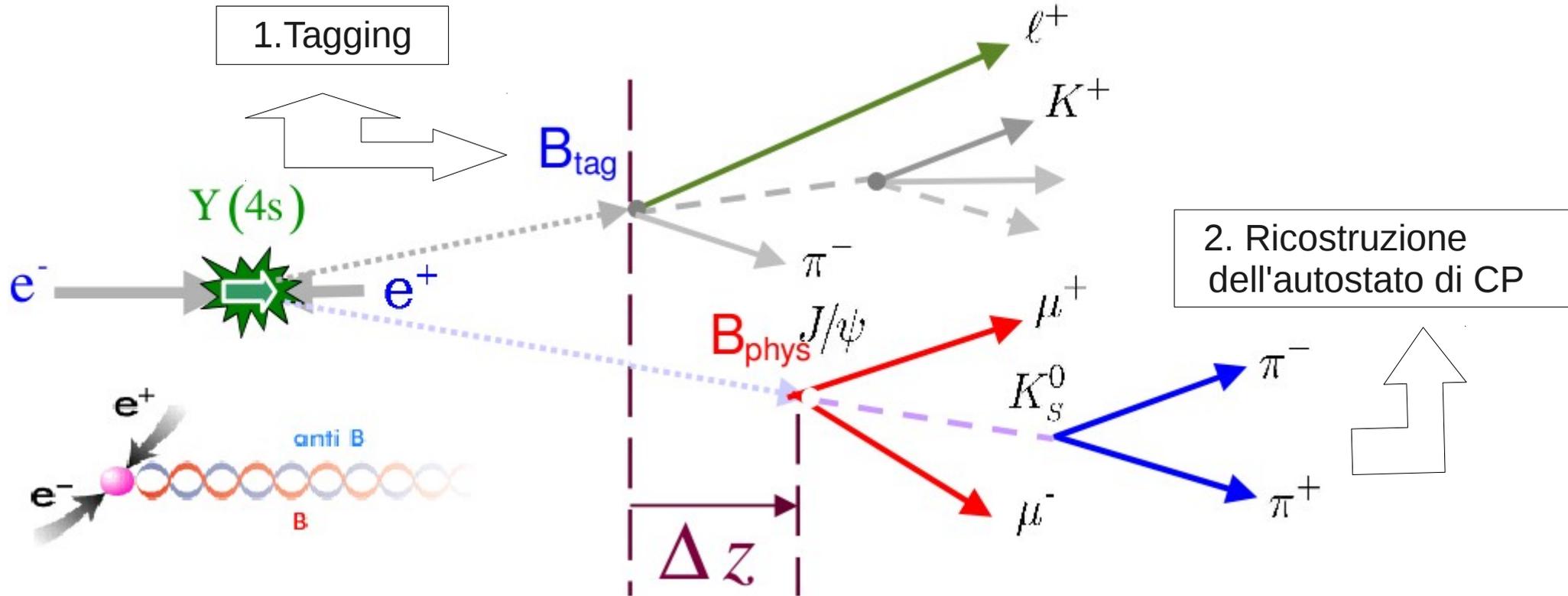
- × Apprezzabile BR
- × Semplice da ricostruire
- × Piccole incertezze teoriche



$$A_{J/\psi K_{S,L}^0}(t) = -\eta_{J/\psi K_{S,L}^0} \sin 2\beta \sin(\Delta m_{B_d} t)$$

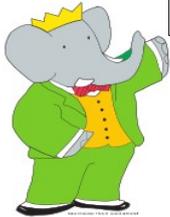
Tecnica sperimentale

x Ricostruiamo l'andamento dell'asimmetria in funzione del tempo e ricaviamo $\sin 2\beta$



3. Misura della differenza di posizioni dei due vertici

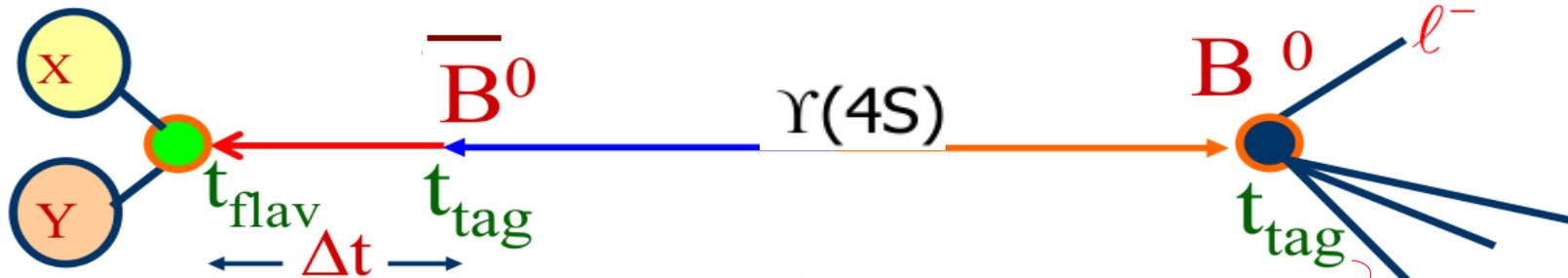
$$A_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}$$



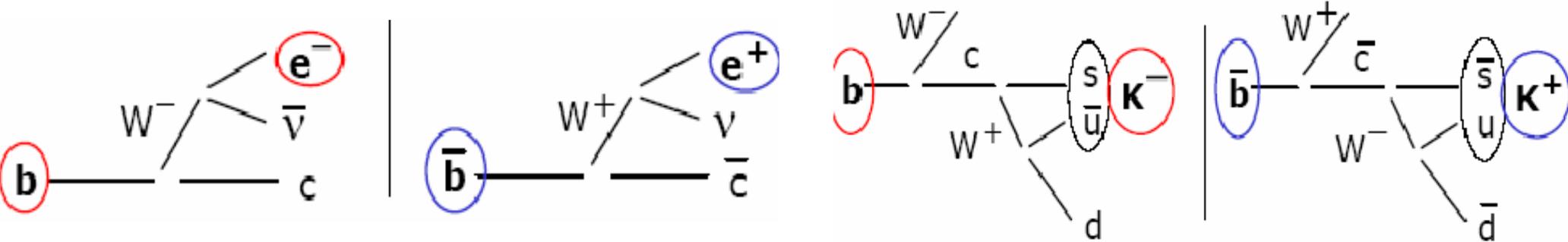
Si devono determinare anche

- Mistagging
- Risoluzione sulla posizione

Metodo del tagging



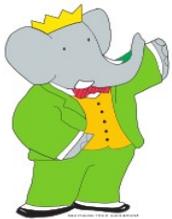
- Esistono tre categorie di tagging:
- A. Segno di un leptone veloce
 - B. Segno di un Kaone veloce
 - C. Algoritmo tramite reti neurali
- } anche insieme



A. E' richiesta la presenza di un leptone (elettrone o muone) con un momento maggiore di 1.1 GeV/c

B. E' richiesto che $\sum Q_K$ sia diversa da zero in particolare positiva per un B^0 e negativa per un \bar{B}^0 .

C. Un algoritmo di reti neurali viene utilizzato per taggare gli eventi in cui non si è riusciti ad identificare né un leptone né un kaone, mettendo insieme tutte le informazioni dell'evento.



Efficienza nel metodo di tagging

x Per ogni categoria di tagging si definisce la quantità:

$$Q_i = \epsilon_i (1 - 2w_i)^2$$

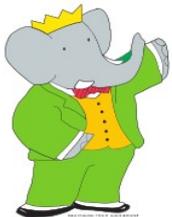
Efficienza della categoria di tagging i ;

“Mistag fraction”: probabilità di sbagliare il tag per questa categoria;

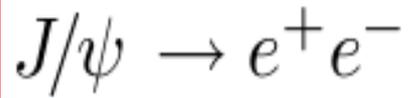
x Risulta che l'errore statistico su $\sin 2\beta$ è proporzionale a $1/\sqrt{Q}$ dove $Q = \sum_i Q_i$.

x I parametri w_i vengono calcolati tramite massimizzazione della log-likelihood

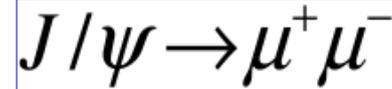
Category	ϵ_i (%)	w_i (%)	Δw_i (%)	Q_i (%)
<i>Lepton</i>	8.96 ± 0.07	2.8 ± 0.3	0.3 ± 0.5	7.98 ± 0.11
<i>Kaon I</i>	10.82 ± 0.07	5.3 ± 0.3	-0.1 ± 0.6	8.65 ± 0.14
<i>Kaon II</i>	17.19 ± 0.09	14.5 ± 0.3	0.4 ± 0.6	8.68 ± 0.17
<i>KaonPion</i>	13.67 ± 0.08	23.3 ± 0.4	-0.7 ± 0.7	3.91 ± 0.12
<i>Pion</i>	14.18 ± 0.08	32.5 ± 0.4	5.1 ± 0.7	1.73 ± 0.09
<i>Other</i>	9.54 ± 0.07	41.5 ± 0.5	3.8 ± 0.8	0.27 ± 0.04
All	74.37 ± 0.10			31.2 ± 0.3



Ricostruzione dell'autostato di CP $\Rightarrow B_{CP}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$



$$(5.94 \pm 0.06) 10^{-2}$$



$$(5.93 \pm 0.06) 10^{-2}$$

- × Gli elettroni vengono rivelati sia dal calorimetro che dalla camera a drift.
- × Se entrambe le tracce rientrano nell'accettanza del calorimetro e hanno un E/p maggiore di 0.5

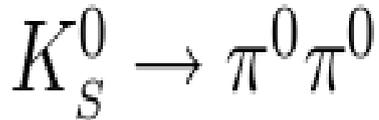
- × Un prodotto dell'interazione viene identificato come un muone e l'altro viene rivelato nel calorimetro come una MIP.

Massa Invariante:

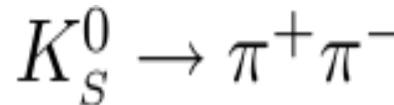
$$[2.95 \text{ GeV}/c^2, 3.14 \text{ GeV}/c^2]$$

Massa Invariante:

$$[3.06 \text{ GeV}/c^2, 3.14 \text{ GeV}/c^2]$$



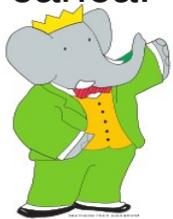
$$(30.69 \pm 0.05) 10^{-2}$$



$$(69.20 \pm 0.05) 10^{-2}$$

- × Vengono selezionati gli eventi in cui il calorimetro registra la presenza di 4 fotoni senza la comparsa di una traccia di particella carica.

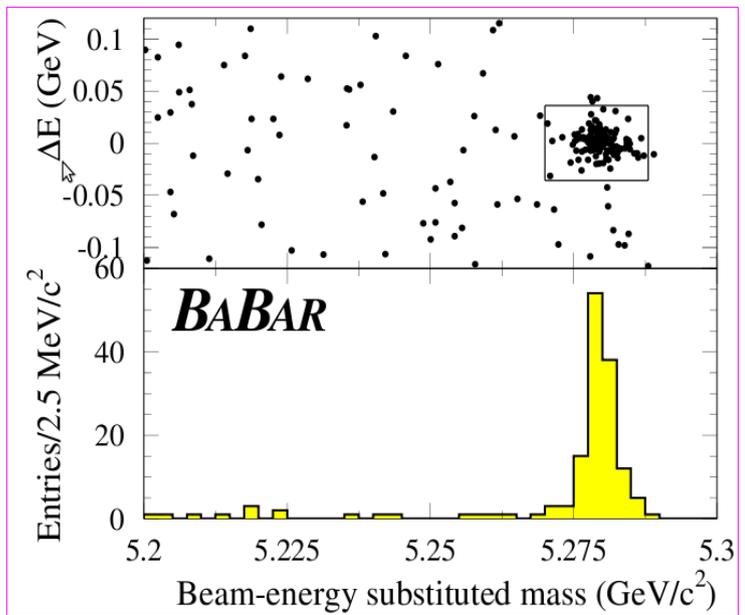
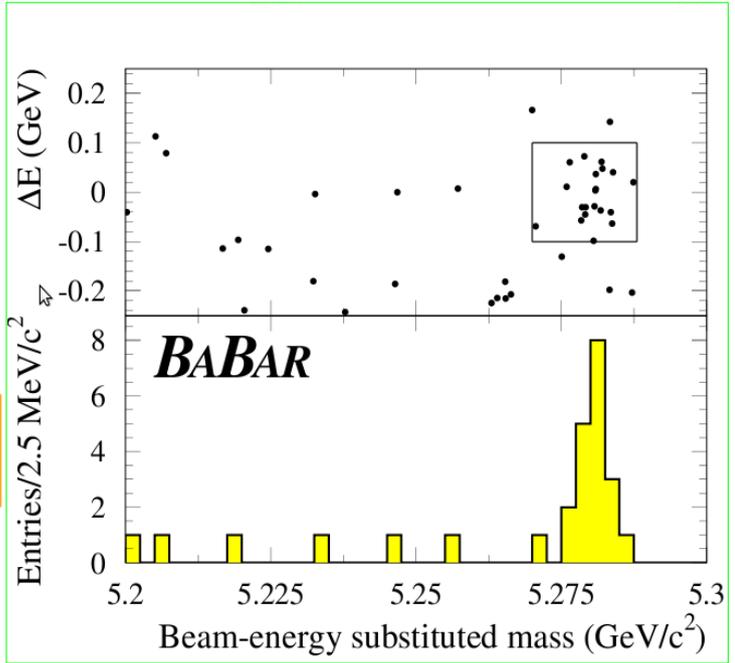
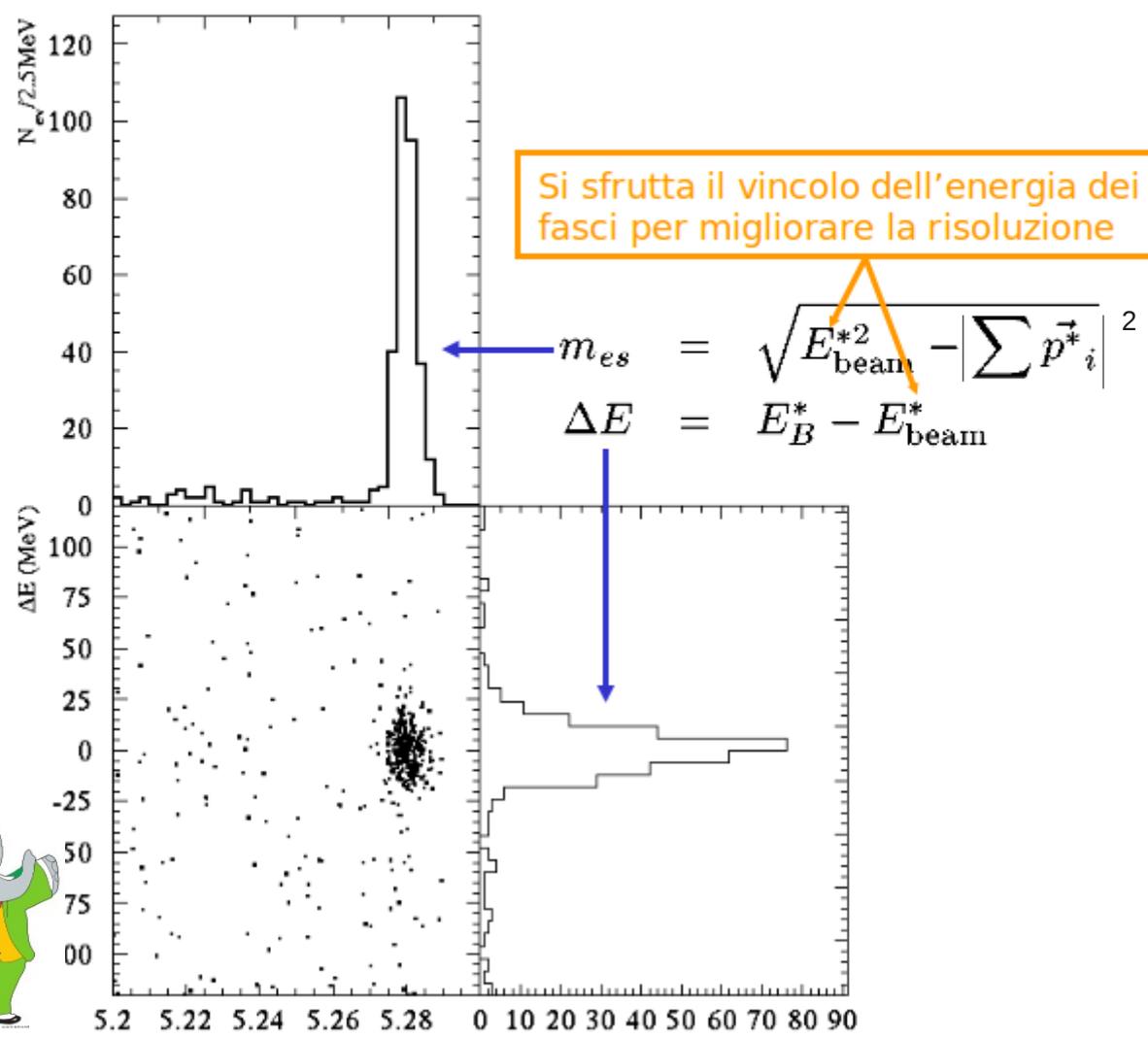
- × Vengono selezionate tutte le coppie di particelle cariche che possono essere fittate a un vertice comune e hanno una massa invariante pari al valore nominale de K_S^0 entro $13 \text{ MeV}/c^2$



Il coseno dell' angolo tra la direzione del K_S^0 e del vettore che collega la J/ψ e il K_S^0 deve essere positivo!

Ricostruzione dell'autostato di CP $\Rightarrow B_{CP}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$

Si ricostruiscono 2 variabili cinematiche indipendenti per ciascun candidato B ricostruito



03/06/2010

$$\sqrt{s} = m(Y(4s)) = 10.58 \text{ GeV} / c^2$$

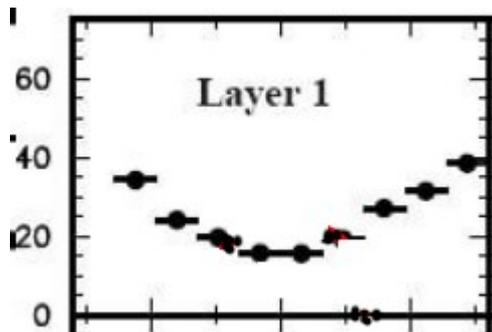
Misura di δz ...diamo i numeri

x Le posizioni dei vertici di decadimento sono ricostruite principalmente dal rivelatore di vertice composto di 5 strati di microstripes di Silicio.

x Risoluzione sul singolo layer

$$\sigma \approx 15 \mu m$$

$$\sigma \approx 40 \mu m$$



x Risoluzione sulla misura

$$\sigma \approx 80 \mu m$$

$$\sigma \approx 130 \mu m$$

$$M_Y = 10.58 \text{ GeV}/c^2 \rightarrow \begin{matrix} P_B = 0.330 \text{ GeV}/c \\ M_B = 5.28 \text{ GeV}/c^2 \end{matrix} \quad c\tau_B = 450 \mu m$$

x Se avessimo avuto un acceleratore a fasci simmetrici...

$$\beta\gamma = \frac{0.330}{5.28} = 0.0625$$

$$\langle \delta z \rangle \approx 30 \mu m$$

Inferiore alla risoluzione del rivelatore!!!

x Invece con i fasci asimmetrici...

$$\beta\gamma_Y = 0.55$$

$$\langle \delta z \rangle \approx 250 \mu m$$

Grandezza apprezzabile dal rivelatore di vertice



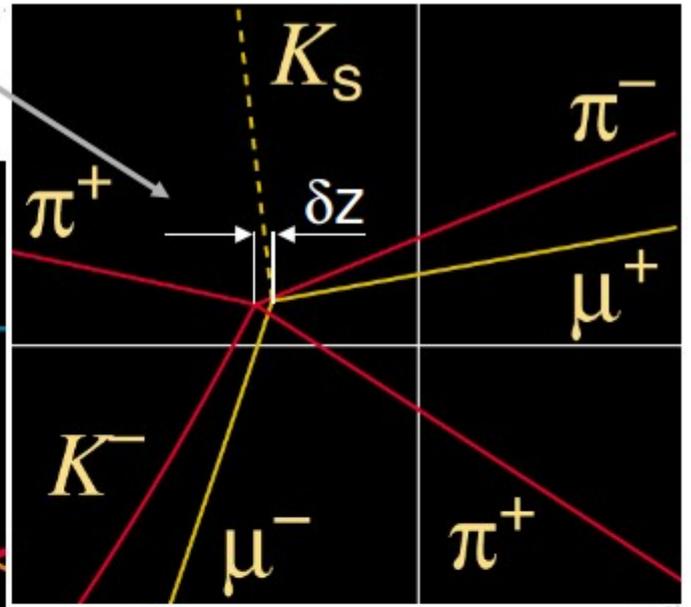
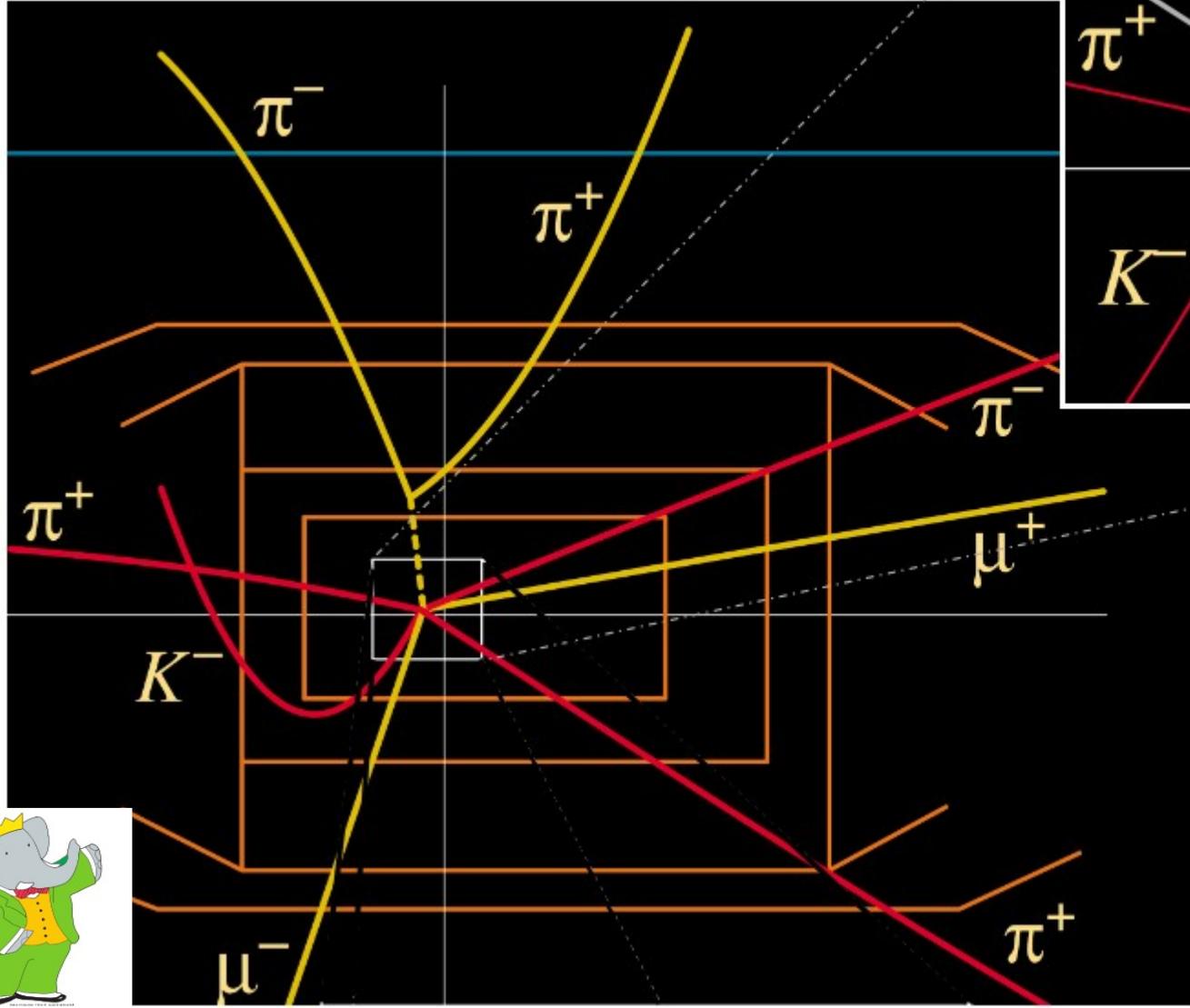
x Dalla distanza tra i due vertici primari si ricava infine: $\delta t = \delta z / \beta\gamma c$

$$B_{CP}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$$

Ricostruzione di un evento

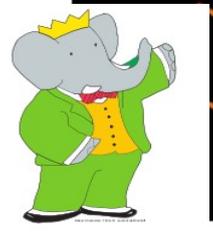
$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$



I: autostato CP
 $Y(4s) \rightarrow B^0 \rightarrow J/\psi K_S$
 $(\rightarrow \pi^+ \pi^-)$
 $\rightarrow B^0 \rightarrow K^- X$

II: etichettatura del sapore



La nostra misura dovrà però tener conto degli effetti sperimentali....

- δt vero, etichettatura perfetta

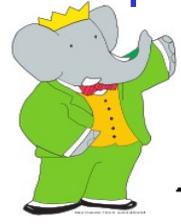
$$F(\delta t) \propto e^{-|\delta t|/\tau} \{1 \pm \sin 2\beta \cdot \sin \Delta m \delta t\}$$

- δt vero, etichettatura imperfetta

$$F(\delta t) \propto e^{-|\delta t|/\tau} \{1 \pm D \cdot \sin 2\beta \cdot \sin \Delta m \delta t\}$$

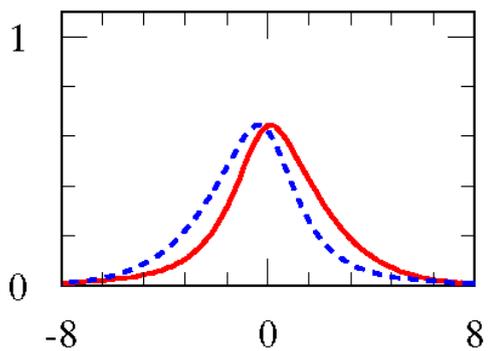
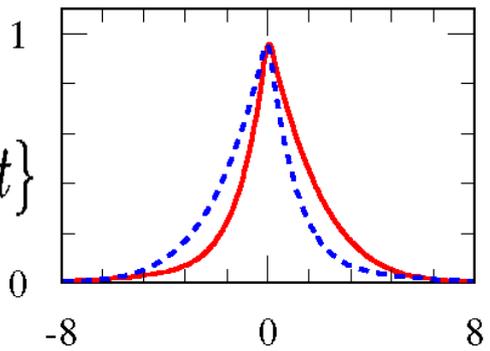
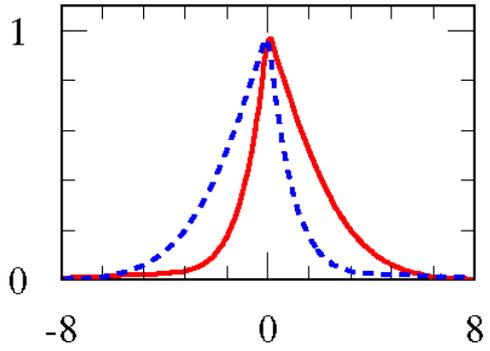
$D = (1-2\omega)$ in cui w è la frazione di etichettature sbagliate (mistag).

- δt misurato, etichettatura imperfetta



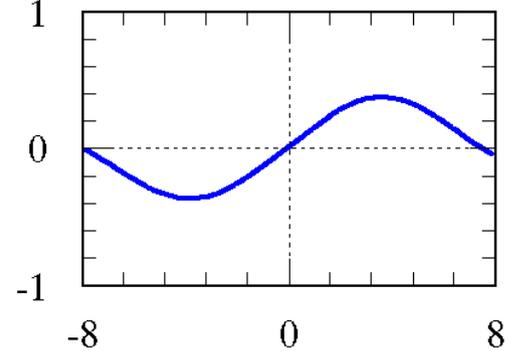
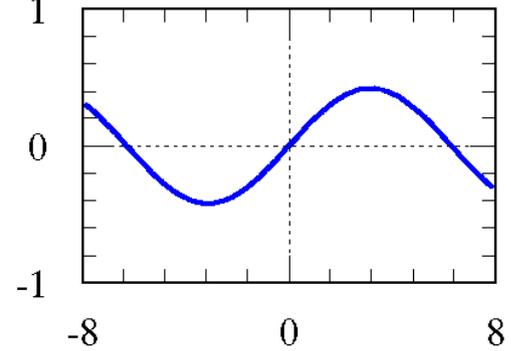
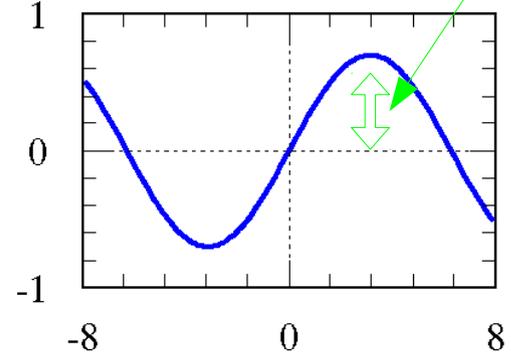
$$F(\delta t) \propto e^{-|\delta t|/\tau} \{1 \pm D \cdot \sin 2\beta \cdot \sin \Delta m \delta t\} \otimes R(\delta t)$$

$F(\delta t)$ $F(\delta t)$



$A_{CP}(\delta t)$

$\sin 2\beta$

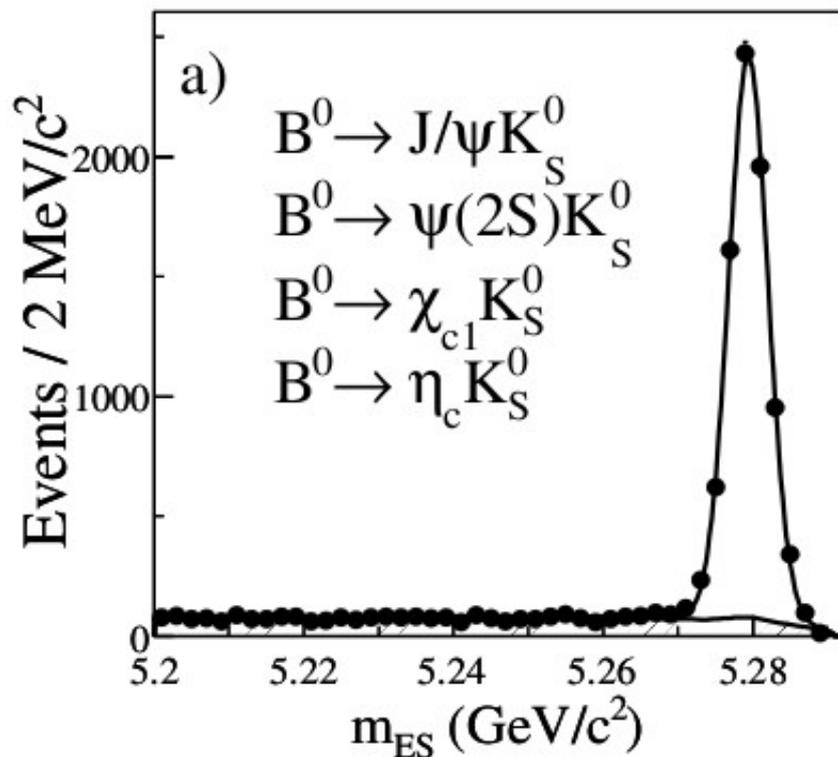


$\otimes R(\delta t)$ → Risoluzione temporale

- × Viene considerata anche l'ipotesi di **CPV diretta**;
- × I processi di CP e quelli di flavor sono analizzati tramite un **“simultaneous maximum likelihood fit”**;

$$S_f = \frac{2\text{Im } \lambda_f}{1 + |\lambda_f|^2},$$

$$C_f = \frac{1 - |\lambda_f|^2}{1 + |\lambda_f|^2},$$



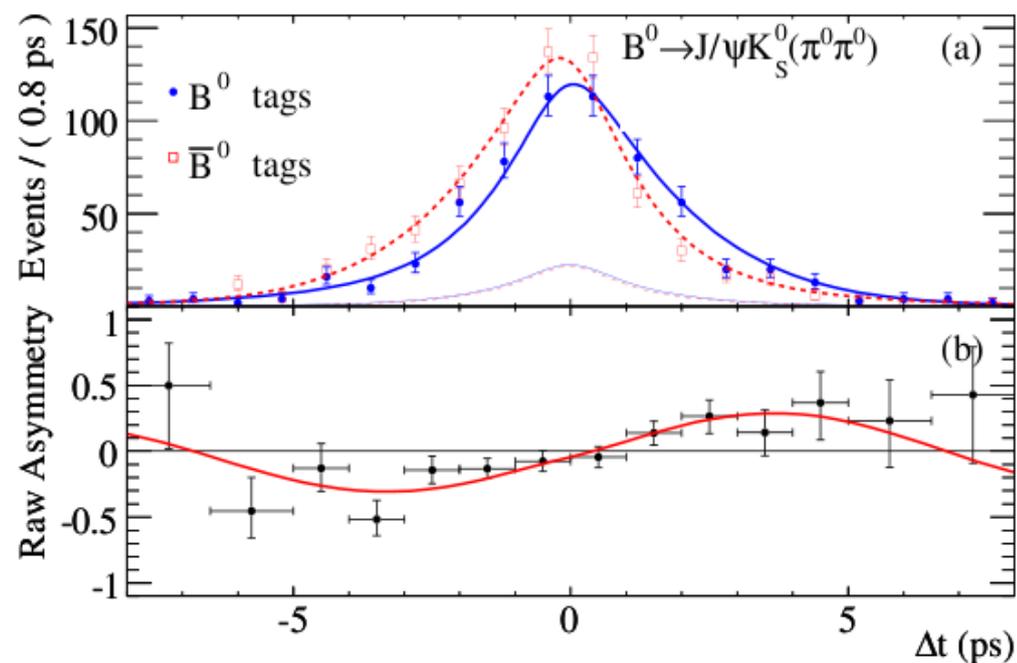
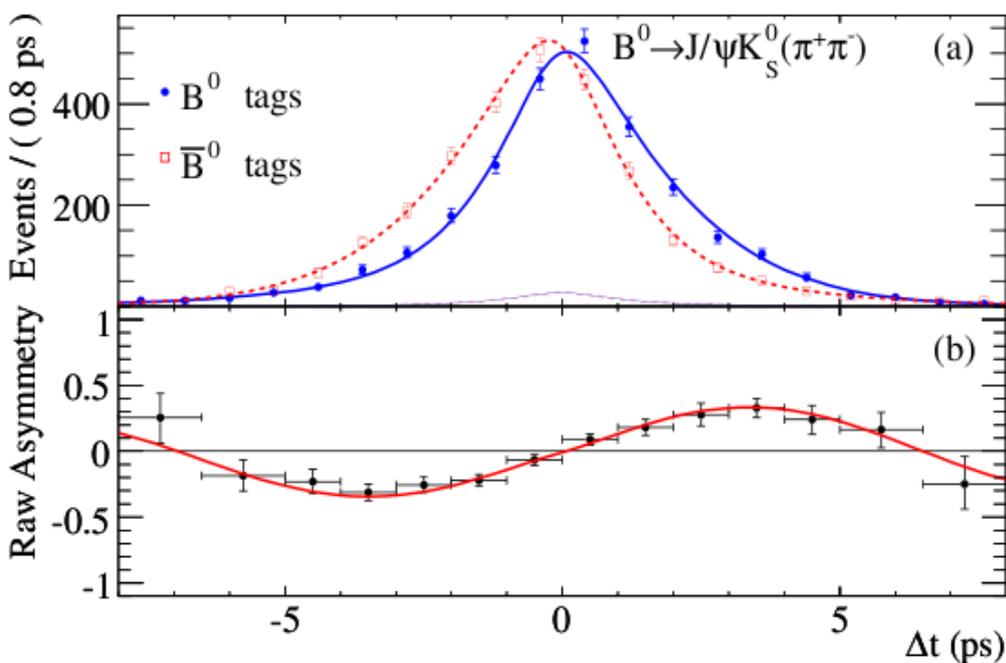
- × Simulazioni MC riportano per il golden channel, valori del background inferiori al 1%
- × Il **likelihood fit** viene eseguito tenendo conto di 69 parametri oltre i due citati sopra:
 - 7 parametri per la risoluzione temporale;
 - 12 parametri per il mistagging;
 - 7 parametri per le piccole differenze di efficienza tra B^0 e \bar{B}^0 ;
 - 43 parametri per il fondo;

NB Il valore della vita media del B^0 e la differenza di massa tra i due vengono tenuti come parametri fissi in questa analisi.

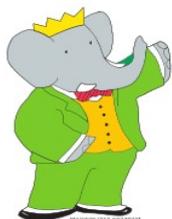
$$\tau_{B^0} = 1.530 \text{ ps} \quad \Delta m_d = 0.507 \text{ ps}^{-1}$$



Results



Sample	$-\eta_f S_f$	C_f
Full CP sample	0.687 ± 0.028	0.024 ± 0.020
$J/\psi K_S^0 (\pi^+ \pi^-)$	0.662 ± 0.039	0.017 ± 0.028
$J/\psi K_S^0 (\pi^0 \pi^0)$	0.625 ± 0.091	0.091 ± 0.063



Inoltre è stato fatto anche il fit usando come parametri $\sin 2\beta$ e $|\lambda_f|$ e si è trovato:

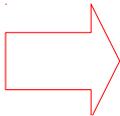
$$\sin 2\beta \Rightarrow 0.687 \pm 0.028$$

$$|\lambda_f| \Rightarrow 0.977 \pm 0.020$$

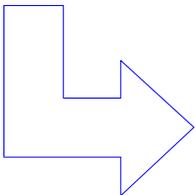
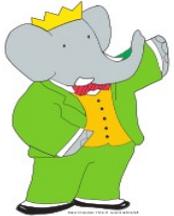
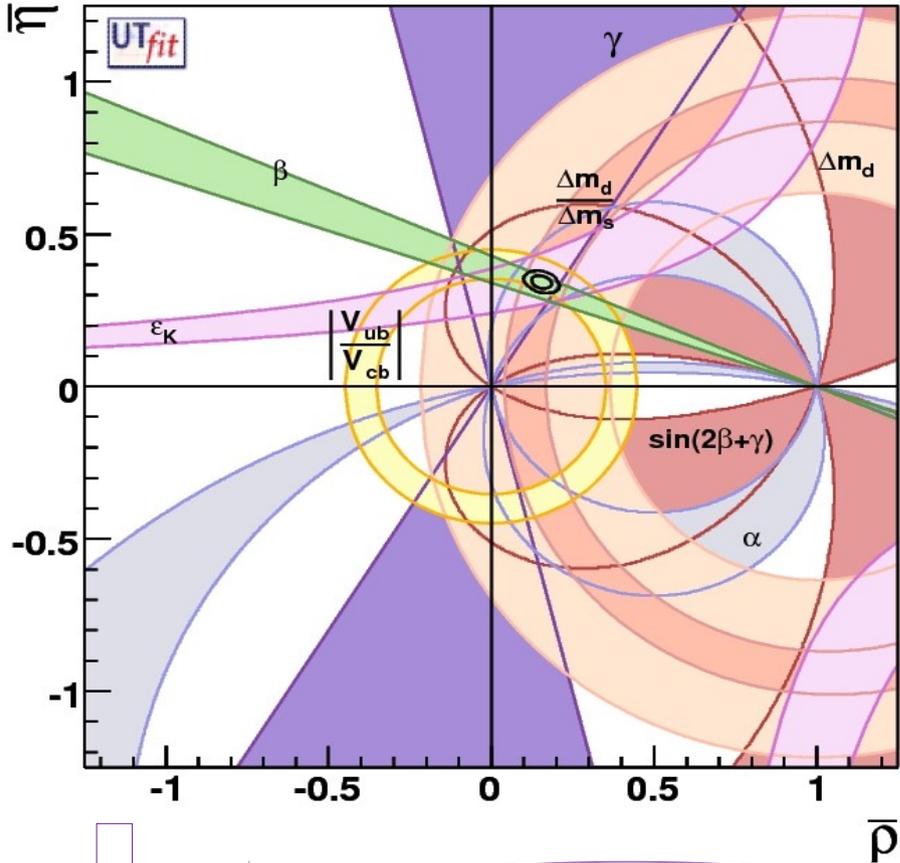
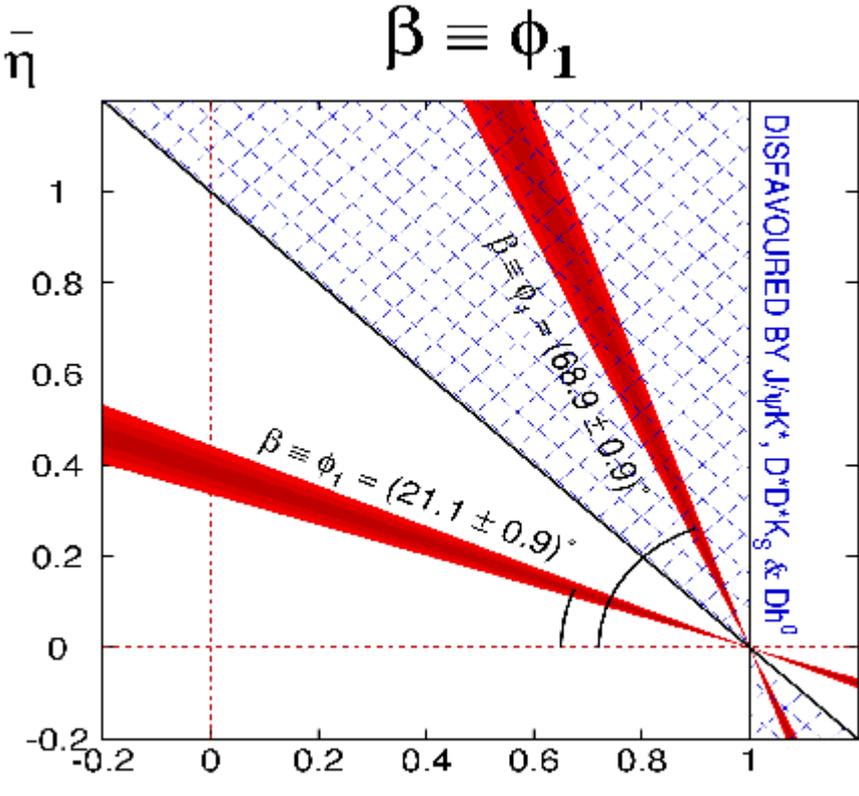
Results

x Le misure tra diverse b-factory sono consistenti tra loro!!

BABAR



$S = -0.687 \pm 0.028 \pm 0.012$
 $C = 0.024 \pm 0.020 \pm 0.016$



$S_{WA} = -0.672 \pm 0.023$
 $C_{WA} = 0.004 \pm 0.019$



$\sin 2\beta = 0.695 \pm 0.020$

Conclusioni

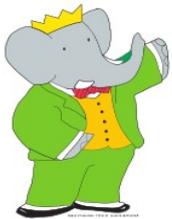
x Abbiamo visto che la CPV è alla base dello squilibrio materia-antimateria nell'universo;

x Nel quadro del modello standard la CPV impone determinati vincoli sui parametri della CKM;

x Abbiamo studiato la CPV dovuta all'interferenza nel canale $B_{CP}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ per il sistema dei mesoni B neutri;

x Dall'analisi completa abbiamo ricavato:

$$\begin{aligned} C_f &= 0.024 \pm 0.020 \text{ (stat)} \pm 0.016 \text{ (syst)} \\ -\eta_f S_f &= 0.687 \pm 0.028 \text{ (stat)} \pm 0.012 \text{ (syst)} \end{aligned}$$



$$\sin 2\beta \Rightarrow 0.687 \pm 0.028$$

Appendice1: La violazione di CP nel Modello Standard

x Affinchè la nostra teoria sia invariante sotto CP, le costanti di accoppiamento che compaiono nella lagrangiana di interazione devono essere **TUTTE REALI!**

$$\mathcal{L} = a V_{\mu}^{+}(t, \vec{x}) V^{\mu-}(t, \vec{x}) + b A_{\mu}^{+}(t, \vec{x}) A^{\mu-}(t, \vec{x}) +$$

$$c V_{\mu}^{+}(t, \vec{x}) A^{\mu-}(t, \vec{x}) + c^{*} A_{\mu}^{+}(t, \vec{x}) V^{\mu-}(t, \vec{x})$$

Hp: a, b
reali e c
complesso!

$$\text{CP} \mathcal{L} \text{CP}^{\dagger} = a V_{\mu}^{-}(t, -\vec{x}) V^{\mu+}(t, -\vec{x}) + b A_{\mu}^{-}(t, -\vec{x}) A^{\mu+}(t, -\vec{x}) +$$

$$c V_{\mu}^{-}(t, -\vec{x}) A^{\mu+}(t, -\vec{x}) + c^{*} A_{\mu}^{-}(t, -\vec{x}) V^{\mu+}(t, -\vec{x}) .$$

x Se c è complesso la lagrangiana di interazione non è invariante sotto CP!

x Pertanto, dato che le interazioni deboli violano CP, nella L che le descrive non tutte le costanti di accoppiamento, ossia i termini della matrice CKM, possono essere reali.

1972 Kobayashi-Maskawa

L'unica possibilità di avere violazione di CP si ha se nella matrice CKM compare una fase complessa.

Il numero minimo di famiglie di quark necessario è 3!!

Quark families	# Angles	# Phases	# Irreducible Phases
n	$n(n-1)/2$	$n(n+1)/2$	$n(n-1)/2 - (2n-1) = (n-1)(n-2)/2$
2	1	3	0
3	3	6	1
4	6	10	3

