

Problema Cosmologico e Modello Standard

Fernando Palombo

Per queste trasparenze:

[http://idefix.mi.infn.it/~palombo/didattica/CPViolation/
Lezione3-Cosmologia-ModelloStandard.pdf](http://idefix.mi.infn.it/~palombo/didattica/CPViolation/Lezione3-Cosmologia-ModelloStandard.pdf)

Bibliografia

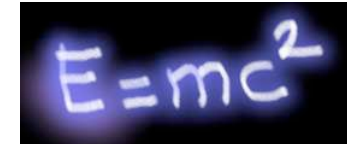
BaBar Physics Book Cap. 1 <http://idefix.mi.infn.it/~palombo/didattica/CPViolation/babar504-001.pdf>

**<http://idefix.mi.infn.it.mi.infn.it/~palombo/didattica/CPViolation/TesiVincenzo.pdf>
(Cap. 1)**

oppure una delle tesi (in italiano) dei miei studenti nel mio ufficio

Materia ed Energia

- Einstein per primo comprese l'equivalenza tra materia ed energia

A small image showing the equation $E=mc^2$ written in blue ink on a black background.

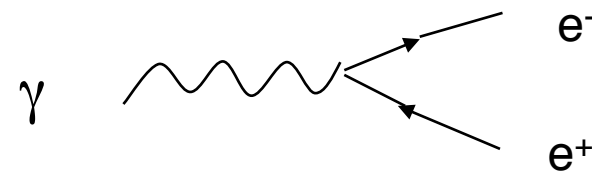
- *Antimateria prevista nella meccanica quantistica relativistica (Dirac 1928) .
Positrone = anti-elettrone:*

Stessa massa e spin

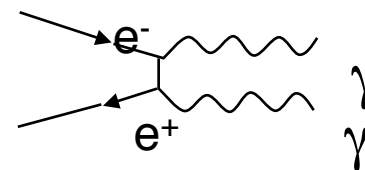
Opposta carica, momento di dipolo magnetico, number leptonico

Nessuna differenza intrinseca per le leggi della fisica

- *Energia puo' materializzarsi come coppia particella-antiparticella,
scoperto nei raggi cosmici (Anderson,1932)*



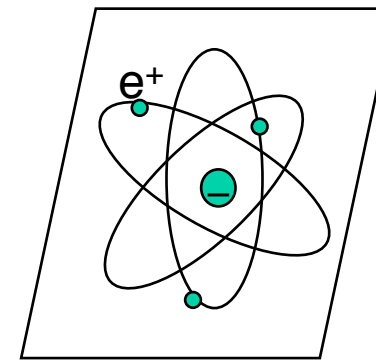
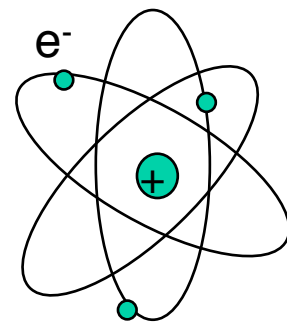
- *Materia ed antimateria, incontrandosi,
si annichilano*



Cosa e' la Violazione di CP ?

Violazione di CP significa che la natura distingue tra materia e antimateria :vi sono reazioni che si realizzano in modo asimmetrico tra materia e antimateria.

Questa asimmetria l'abbiamo gia' osservata nei mesoni K



CP mirror

Un Problema Cosmologico Fondamentale

➤ *L'universo e' ora dominato dalla materia: dove e' andata l'antimateria?*

- Il rapporto anti-protoni/protoni $\sim 10^{-4}$ nei raggi cosmici; nessuna evidenza di fotoni di annichilazione da nuvole intergalattiche
- No antimateria all'interno delle nostre galassie
- Nessuna evidenza ancora di antimateria nei raggi cosmici primordiali

Asimmetria materia-antimateria generata dinamicamente durante la formazione dell'Universo

Condizioni di Sakharov

➤ Generazione Cosmologica di asimmetria: condizioni di Sakharov (1967)

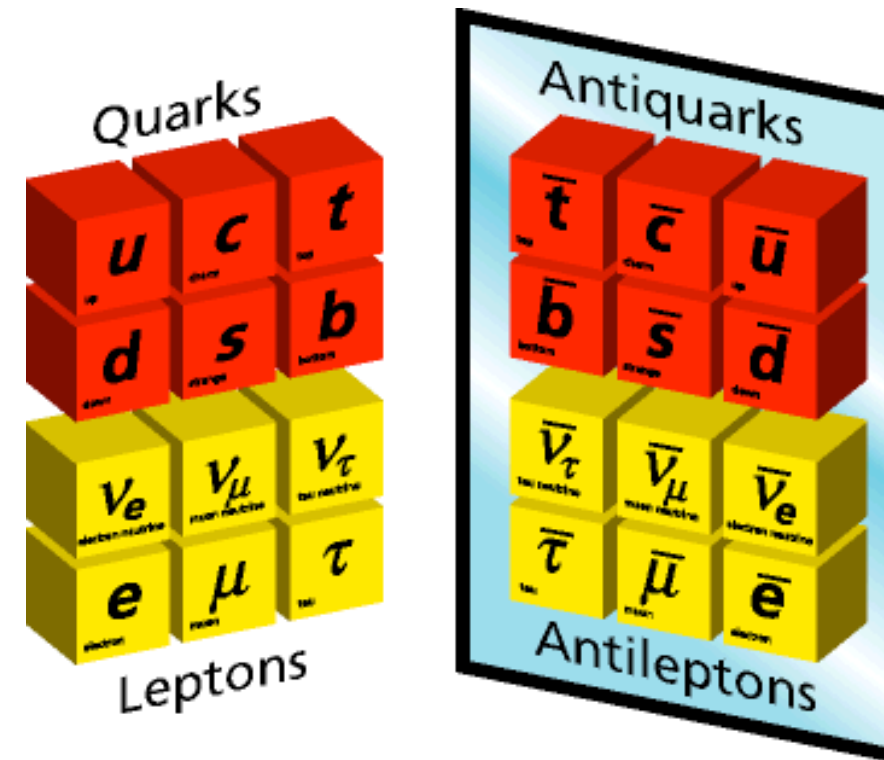
1- Gli anti- barioni devono scomparire quindi e' necessaria la violazione del numero barionico

2- La simmetria generata scomparirebbe se l'Universo fosse in equilibrio. Quindi i barioni sono generati in situazioni di non-equilibrio termodinamico

3- Solo gli anti-barioni devono scomparire quindi violazione di C e di CP

Antimateria nel Modello Standard

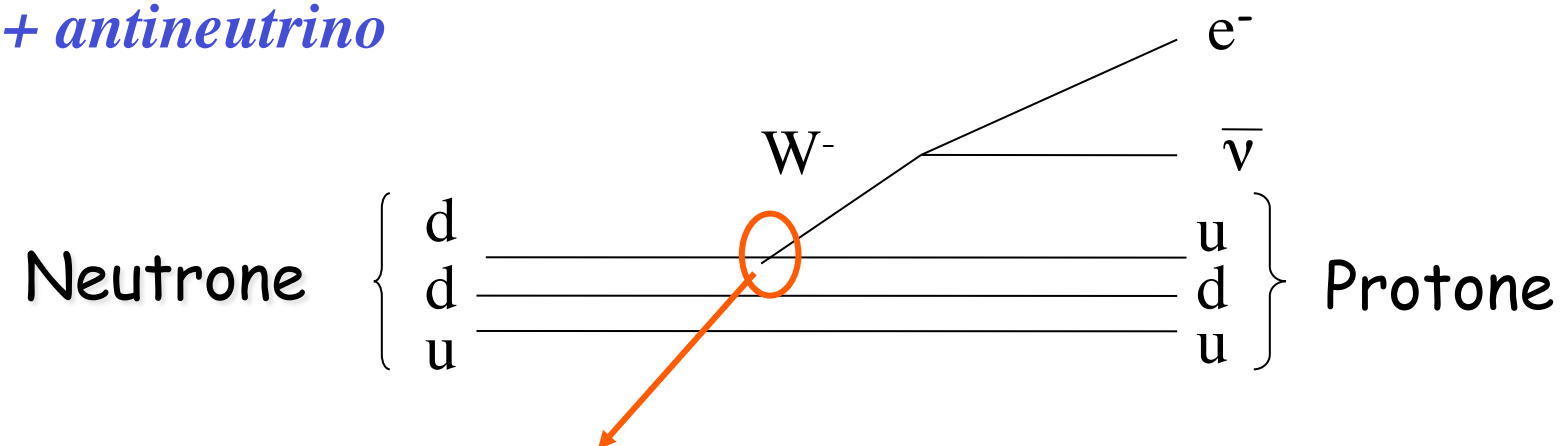
- Tutte le particelle fondamentali hanno i partner antiparticelle
- L'anti-protone e' stato il primo anti-barione osservato (1955)
- Stati legati quark-antiquark sono chiamati mesoni
 $\pi^+ = u\bar{d}$ $K^0 = \bar{d}s$
 $B^0 = \bar{b}d$ $\bar{B}^0 = b\bar{d}$
- *Miliardi di particelle e antiparticelle sono al giorno d'oggi prodotte ogni anno agli acceleratori*



"Le particelle del Modello Standard"

Le Interazioni Deboli

- *Decadimento beta di un neutrone in un protone + elettrone + antineutrino*



Si possono avere anche accoppiamenti tra generazioni diverse.
Per **2 generazioni** l'accoppiamento è descritto dalla matrice di Cabibbo (1963) :

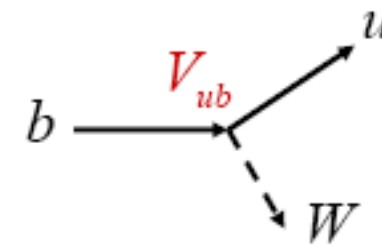
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

Autostati di Massa $\neq$ **Autostati deboli** $\rightarrow$ **Mescolamento dei quark**

La Matrice di Mescolamento dei Quark

Generalizzazione a 3 generazioni di quark (quando ancora la terza generazione non era stata ancora scoperta! Il mesone B e' stato scoperto agli inizi degli anni ottanta) (*Kobayashi-Maskawa, 1973*) → *matrice CKM*

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



Questa e' una matrice unitaria :

$$V^\dagger V = V V^\dagger = I \Rightarrow \sum_j V_{ji}^* V_{jk} = \sum_j V_{ij} V_{kj}^* = \delta_{ik}$$

Una matrice unitaria $N \times N$ ha $N(N-1)/2$ moduli liberi e $N(N+1)/2$ fasi libere. Ma a causa della arbitraria convenzione della scelta delle fasi dei campi dei quark, le fasi libere diminuiscono di $2N-1$. Quindi le fasi libere sono:
 $N(N+1)/2 - (2N-1) N = (N-1)(N-2)/2$

La Fase Debole nella Matrice CKM

Poiche' nel nostro caso $N=3$, la matrice CKM ha quattro parametri liberi: 3 moduli ed una fase. Si noti che il MS non permette di determinare questi parametri che vanno determinati esclusivamente da misure sperimentali.

La fase libera (detta debole o di KM) che appare nella matrice cambia di segno per CP e puo' quindi generare violazione di CP

La matrice CKM ha diverse parametrizzazioni in letteratura. Una delle piu' diffuse e' quella di Wolfenstein (gli elementi di matrice evidenziano la gerarchia sperimentale osservata:

$$\lambda = \sin(\theta_{\text{Cabibbo}}) \approx 0.22$$
$$A \sim 0.85$$

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

Fase complessa
Cambia segno per CP

Triangolo Unitario

Le sei equazioni (dai termini non diagonali) sono qui riportate. Queste relazioni sul piano complesso rappresentano triangoli.

Si noti che usando le misure sperimentali degli elementi di matrice, 4 dei sei triangoli sono degeneri (un lato di lunghezza circa zero e gli altri due circa uguali).

La terza e sesta relazione dall'alto rappresentano triangoli non degeneri (ma identici nella approssimazione di Wolfstein considerata).

In genere si utilizza la sesta relazione. Il triangolo corrispondente e' detto **Triangolo Unitario**.

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

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

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

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

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

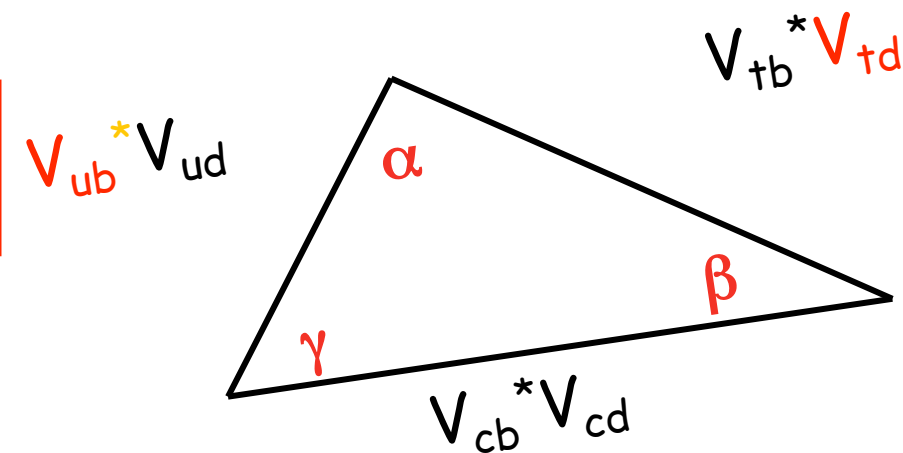
$$V_{ub}^*V_{ud} + V_{cb}^*V_{cd} + V_{tb}^*V_{td} = 0$$

Triangolo Unitario

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

Molti modi per misurare
 α, β, γ ed i lati

Triangolo Unitario
(UT) riassume la
fisica del B nel
Modello Standard



Misure di violazione di CP
determinano gli angoli α, β, γ

K mesons:

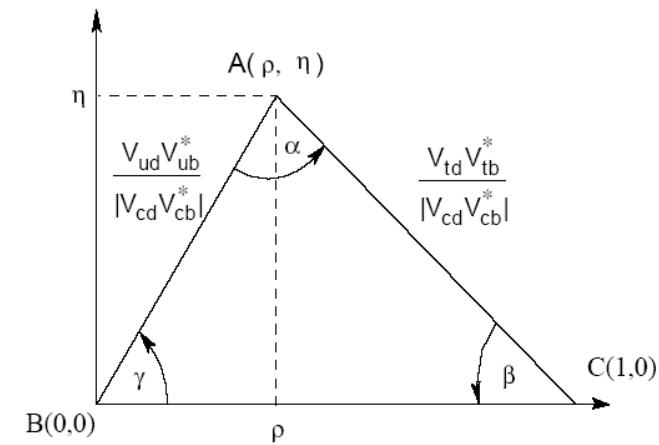
$$V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* = 0$$

Il Triangolo Unitario "Normalizzato"

E' preferibile normalizzare ad 1 il lato $V_{cd}V_{cb}^*$ disporlo lungo un asse. Il nuovo triangolo unitario diventa quello in figura con i due lati uguali ad

$$R_u \equiv AB \equiv \sqrt{\rho^2 + \eta^2} = \frac{1}{\lambda} \left| \frac{V_{ub}}{V_{cb}} \right|$$

$$R_t \equiv AC \equiv \sqrt{(1-\rho)^2 + \eta^2} = \frac{1}{\lambda} \left| \frac{V_{td}}{V_{cb}} \right|$$



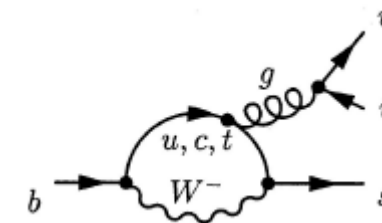
e i tre angoli uguali a :

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

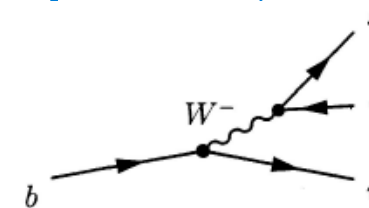
Ampiezze Albero e Pinguino

❑ Trascurando effetti dell'interazione forte (a lunga distanza, interazione negli stati finali, ecc) le ampiezze deboli si possono dividere in due classi :
ad albero (tree) e a pinguino (penguin)

❑ Nel diagramma a pinguino un bosone W e' emesso e riassorbito nella stessa linea del quark emettitore (loop) . Si possono avere pinguini di tipi e.m. e gluonico (come quello in figura)



❑ Nel diagramma ad albero non ci sono questi loop.
I diagrammi ad albero possono essere di tipo spettatore, scambio e annichilazione



B^0 decav: tree

$A \propto V_{ub}^* V_{ud} \propto \lambda^3$

❑ In generale le ampiezze ad albero e pinguino hanno fasi deboli diverse. Ci sono decadimenti dominati da diagrammi ad albero e decadimenti (Cabibbo soppressi) dominati da diagrammi a pinguino

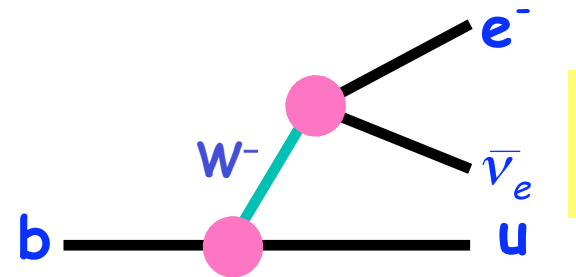
B^0 decav: penguin

$A \propto V_{td}^* V_{tb} \propto \lambda^3$

Decadimenti Deboli dei Mesoni B

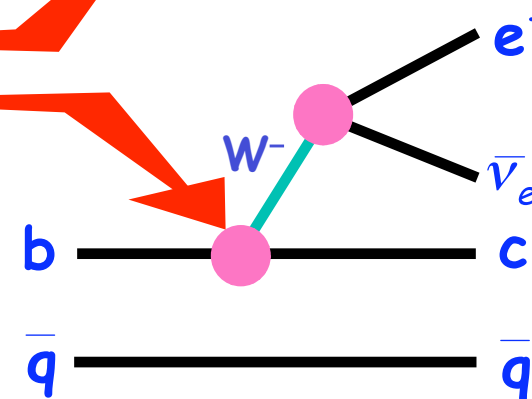
Mesone B =
bu oppure bd

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



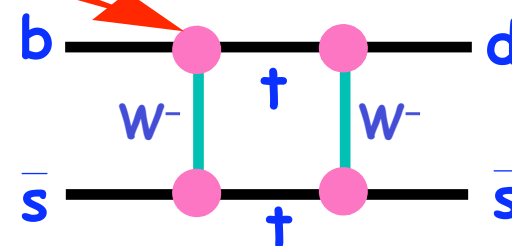
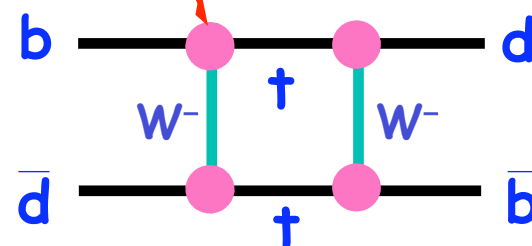
Raro: Decadimenti B
in stati senza charm

$$V_{ub} \sim A\lambda^3$$



Dominante: B in
charm

$$V_{cb} \sim A\lambda^2$$

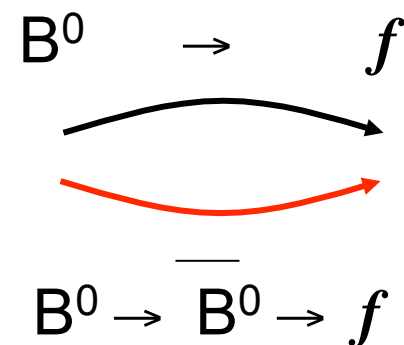


Oscillazioni B^0 - $\bar{B}^0$

$$V_{tb}V_{td}^* \sim A\lambda^3$$

Violazione di CP nell'Interferenza tra Mescolamento e Decadimento

- Se la differenza delle “fasi forti” ($\delta_1 - \delta_2$) non e’ conosciuta, la fase debole non puo’ essere determinata
- Prendiamo il processo giusto per l’interferenza!
- Le oscillazioni materia-antimateria nei mesoni B^0 forniscono l’ingrediente cruciale, con $(\delta_1 - \delta_2) = \pi/2$ e una fase debole $2\phi_1$ (con ϕ_1 uno degli angoli del TU)

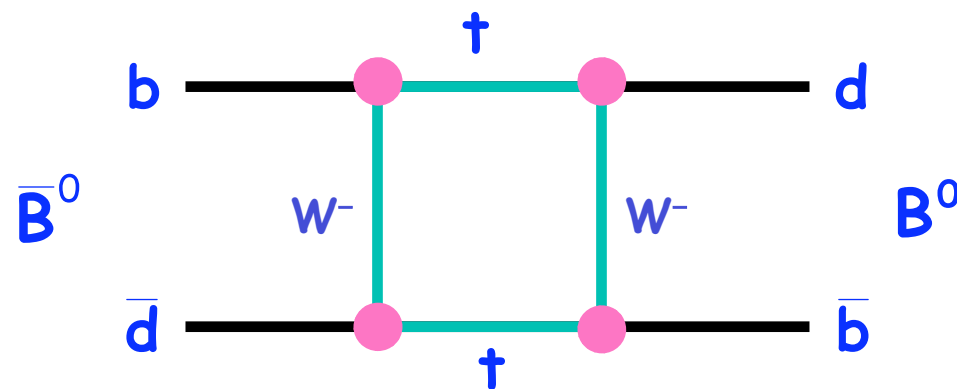


f e’ uno stato finale speciale in cui possono decadere sia B^0 che $\overline{B^0}$: autostato di CP

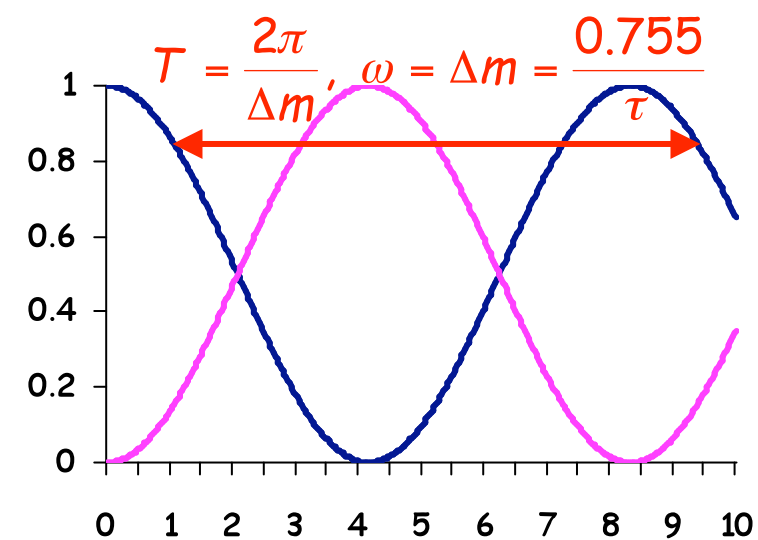
Oscillazioni $B^0 - \bar{B}^0$

L'oscillazione materia-antimateria osservata nei mesoni neutri K e B

Perfettamente permessa nel Modello Standard !



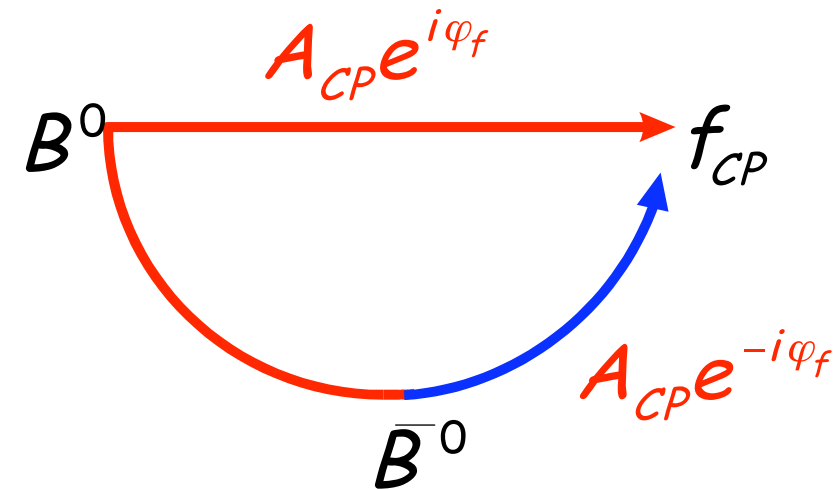
Processo di loop: rate dipende dalla massa dei quark virtuali e dal bosone W che circolano nel loop e dalle costanti di accoppiamento dei quark.



Δm = differenza di massa tra gli autostati deboli di B^0 (frequenza di oscillazione)

Violazione di CP con i Mesoni B

Collegata direttamente agli angoli CKM con una singola ampiezza di decadimento



Asimmetria dipendente dal tempo

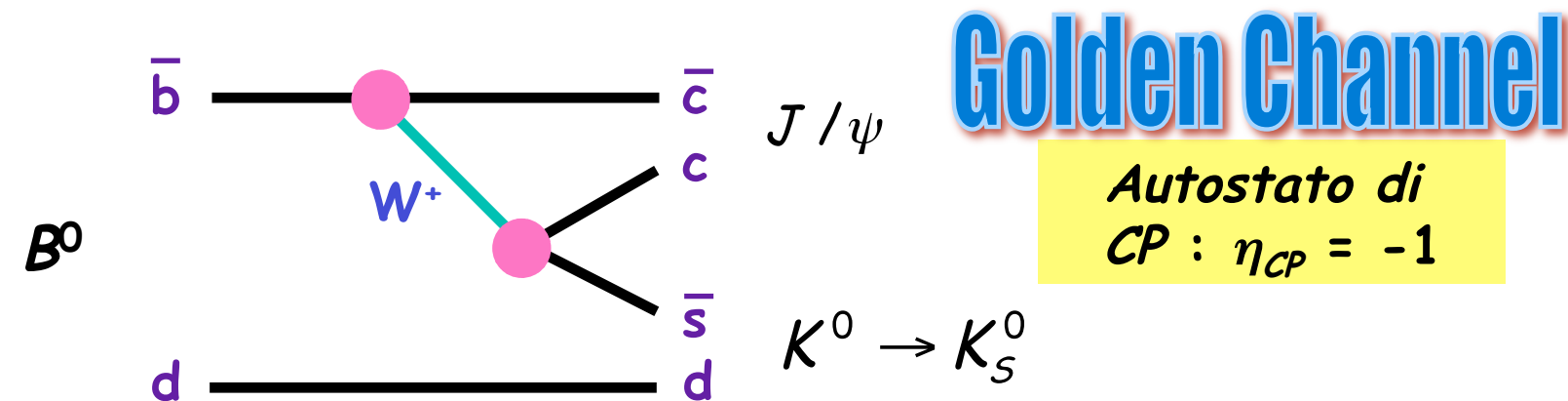
$$A_{f_{CP}}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})} = S_{f_{CP}} \sin \Delta m_d t - C_{f_{CP}} \cos \Delta m_d t$$

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

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

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

Ma come sono grandi le asimmetrie di CP ?



$$A_{f_{CP}}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B_{phys}^0(t) \rightarrow f_{CP})} = S_{J/\psi K_S^0} \sin \Delta m_d t$$

Ampiezza della asimmetria di CP

$$\text{Im} \lambda_{J/\psi K_S^0} = -\eta_{f_{CP}} \text{Im} \left\{ \frac{V_{cs} V_{cb}^*}{V_{cs}^* V_{cb}} \times \frac{V_{tb} V_{td}^*}{V_{tb}^* V_{td}} \times \frac{V_{cs} V_{cd}^*}{V_{cs}^* V_{cd}} \right\} = \text{Im} \frac{V_{td}^*}{V_{td}} = \sin 2\beta$$

$$|\lambda| = 1$$

Sottoprocesso a quark B^0 K^0
Mescolamenti

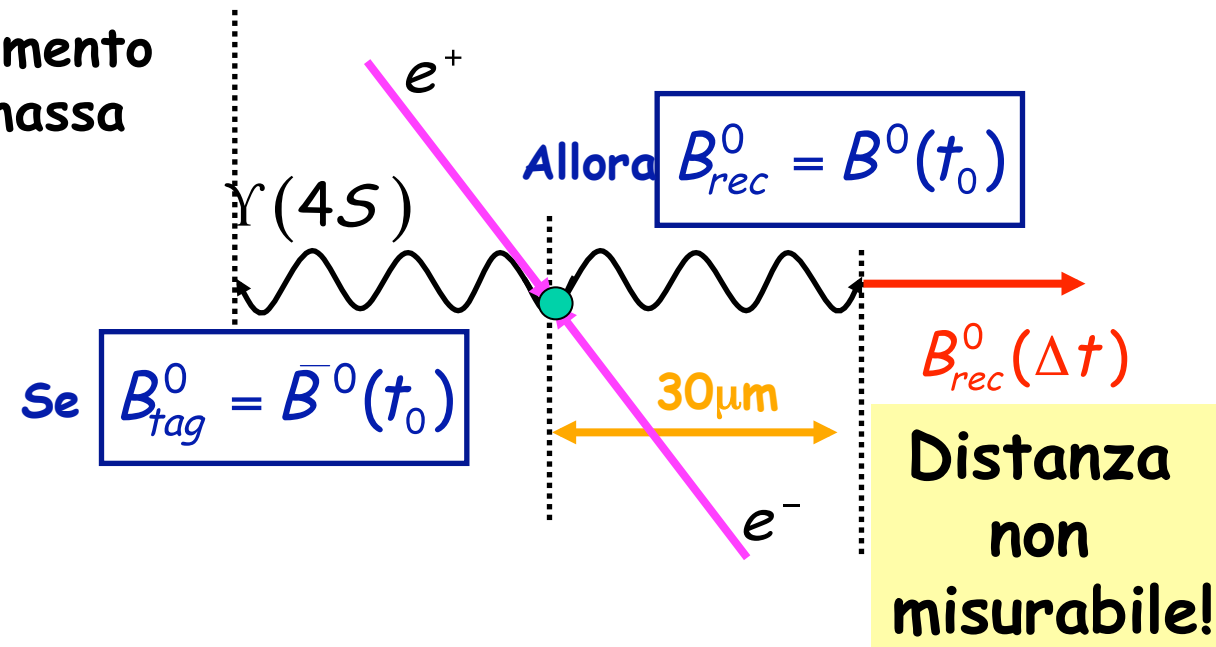
~0.7 invece di 2×10^{-3} con i K^0
Effetti vistosi con i mesoni B

Complicazioni dalla Meccanica Quantistica

$$\begin{aligned}\Upsilon(4S) &\rightarrow B^0 \bar{B}^0 \\ 1^- &\rightarrow 0^- + 0^-\end{aligned}$$

Stato iniziale: funzione
d'onda antisimmetrica

Vista nel riferimento
del centro di massa
 e^+e^-



Non si possono fare misure dipendenti dal tempo
in queste condizioni

Collisioni con Energie Asimmetriche

