

Flavour mixing del mesone D^0

Pietro Coletti

Università degli studi di Roma "La Sapienza"
Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

23 Giugno 2008

Tutor:

Dott. Gianluca Cavoto

Introduzione teorica

- Richiami
- Definizione dei parametri di Mixing
- Processo per studiare il mixing

Realizzazione sperimentale

- Apparato sperimentale
- Segnatura sperimentale
- Procedura di presa dati
- Analisi dati
- Risultati ottenuti

- D^0 e \bar{D}^0 autostati dell'interazione forte
- L'introduzione delle interazioni deboli rende i due stati instabili
- L'evoluzione è governata da

$$i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} |D^0(t)\rangle \\ |\bar{D}^0(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} & M_{21} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^* & M_{22} - \frac{i}{2}\Gamma_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |D^0(t)\rangle \\ |\bar{D}^0(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Diagonalizzando otteniamo gli autostati di massa
 $|D_L\rangle = p|D^0\rangle + q|\bar{D}^0\rangle$ e $|D_H\rangle = p|D^0\rangle - q|\bar{D}^0\rangle$
 nell'ipotesi di simmetria CP $\rightarrow p = q = \frac{1}{\sqrt{2}}$
- L'evoluzione temporale è differente per $|D_{H,L}\rangle$
 $|D_{H,L}(T)\rangle = e^{-\frac{1}{2}\Gamma_{H,L}t} e^{-iM_{H,L}t} |D_{H,L}\rangle$

Riesprimendo $|D^0\rangle$ e $|\bar{D}^0\rangle$ in funzione di $|D_{H,L}\rangle$ possiamo calcolare la probabilità di trovare un $|\bar{D}^0\rangle$ in funzione del tempo :

$$|\langle \bar{D}^0 | D^0(t) \rangle|^2 = \frac{1}{4} e^{-\Gamma_H t} (1 + e^{-\Delta\Gamma t} - 2e^{-\frac{1}{2}\Delta\Gamma t} \cos \Delta M t)$$

La probabilità di transizione $|D^0\rangle \leftrightarrow |\bar{D}^0\rangle$ è diversa da zero (mixing)

Parametri di Mixing

Per "quantificare" il mixing introduciamo delle variabili

adimensionali $x = \frac{\Delta M}{\Gamma}$ $y = \frac{\Delta\Gamma}{\Gamma}$

con $\Delta M \equiv M_H - M_L$; $\Delta\Gamma \equiv \Gamma_L - \Gamma_H$; $\Gamma \equiv \frac{\Gamma_H + \Gamma_L}{2}$

Per studiare il processo di mixing studiamo il decadimento del D^0 , che presenta i due canali:

- Right Sign Decay (RS) : $D^0 \longrightarrow K^- \pi^+$
- Wrong Sign Decay (WS): $D^0 \longrightarrow K^+ \pi^-$

Right Sign Decay: eventi attesi

L'ampiezza di transizione è $\propto \cos^2 \theta_c$ (Cabibbo Favoured)

Luminosità del collider $e^+ e^- \approx 300 \text{ fb}^{-1}$

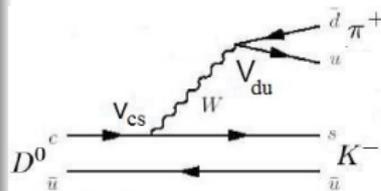
Sezione d'urto $\sigma(e^+ e^- \longrightarrow c \bar{c} \longrightarrow D^{0*+}) = 0.7 \text{ nb}$

$\text{BR}(D^{*+} \longrightarrow D^0 \pi^+) = (67.7 \pm 0.5)\%$

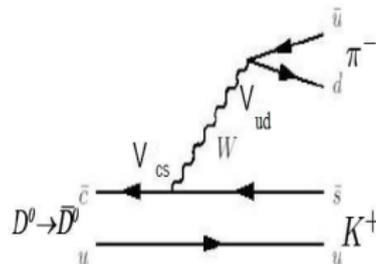
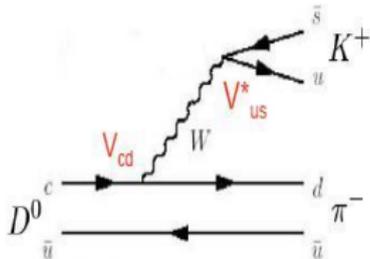
$\text{BR}(D^0 \longrightarrow K^- \pi^+) = (3.80 \pm 0.07)\%$

Stimando una overall efficiency $\approx 25\%$

\implies Aspetto un numero di eventi $\approx 10^7$



Per gli eventi WS dobbiamo tenere conto di due diversi contributi



WS: Doubly Cabibbo Suppressed

L'ampiezza per il processo contiene i termini V_{cd} e V_{us} ed è $\propto \sin^2 \theta_c$ ("sfavorito")

$$\frac{N(WS_{DCS})}{N(RS)} \propto \tan^4 \theta_c \approx 10^{-3}$$

WS: Mixing seguito da CF decay

Il processo è costituito da una oscillazione $D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0$ seguita da un decadimento "Cabibbo Favoured"

$$\text{Per } x = 0.01 \implies \frac{N(WS_{CF})}{N(RS)} \approx 10^{-5}$$

Andamento temporale dei WS

L'andamento temporale del decadimento della componente WS si diversifica per il canale DCS e di mixing

Nell'ipotesi $|x|, |y| \ll 1$:

$$\frac{T(t)}{e^{-\Gamma t}} \propto |R| + \sqrt{|R|} y' \Gamma t + \frac{x' + y'}{2} (\Gamma t)^2 \quad (1)$$

- Termine relativo al canale DCS
- Termine relativo al mixing
- Termine di interferenza

Dove abbiamo inserito $\frac{A(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{A(D^0 \rightarrow K^- \pi^+)} = \frac{T(WS)}{T(RS)} = |R| e^{i\delta}$

con conseguente ridefinizione di x e y :

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

$$y' = -x \sin \delta + y \cos \delta$$

Andamento temporale dei WS

L'andamento temporale del decadimento della componente WS si diversifica per il canale DCS e di mixing

Nell'ipotesi $|x|, |y| \ll 1$:

$$\frac{T(t)}{e^{-\Gamma t}} \propto |R| + \sqrt{|R|} y' \Gamma t + \frac{x' + y'}{2} (\Gamma t)^2 \quad (1)$$

- Termine relativo al canale DCS
- Termine relativo al mixing
- Termine di interferenza

Dove abbiamo inserito $\frac{A(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{A(D^0 \rightarrow K^- \pi^+)} = \frac{T(WS)}{T(RS)} = |R| e^{i\delta}$

con conseguente ridefinizione di x e y :

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

$$y' = -x \sin \delta + y \cos \delta$$

Andamento temporale dei WS

L'andamento temporale del decadimento della componente WS si diversifica per il canale DCS e di mixing

Nell'ipotesi $|x|, |y| \ll 1$:

$$\frac{T(t)}{e^{-\Gamma t}} \propto |R| + \sqrt{|R|} y' \Gamma t + \frac{x' + y'}{2} (\Gamma t)^2 \quad (1)$$

- Termine relativo al canale DCS
- Termine relativo al mixing
- Termine di interferenza

Dove abbiamo inserito $\frac{A(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{A(D^0 \rightarrow K^- \pi^+)} = \frac{T(WS)}{T(RS)} = |R| e^{i\delta}$

con conseguente ridefinizione di x e y :

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

$$y' = -x \sin \delta + y \cos \delta$$

L'andamento temporale del decadimento della componente WS si diversifica per il canale DCS e di mixing

Nell'ipotesi $|x|, |y| \ll 1$:

$$\frac{T(t)}{e^{-\Gamma t}} \propto |R| + \sqrt{|R|} y' \Gamma t + \frac{x' + y'}{2} (\Gamma t)^2 \quad (1)$$

- Termine relativo al canale DCS
- Termine relativo al mixing
- **Termine di interferenza**

Dove abbiamo inserito $\frac{A(D^0 \rightarrow K^+ \pi^-)}{A(D^0 \rightarrow K^- \pi^+)} = \frac{T(WS)}{T(RS)} = |R| e^{i\delta}$

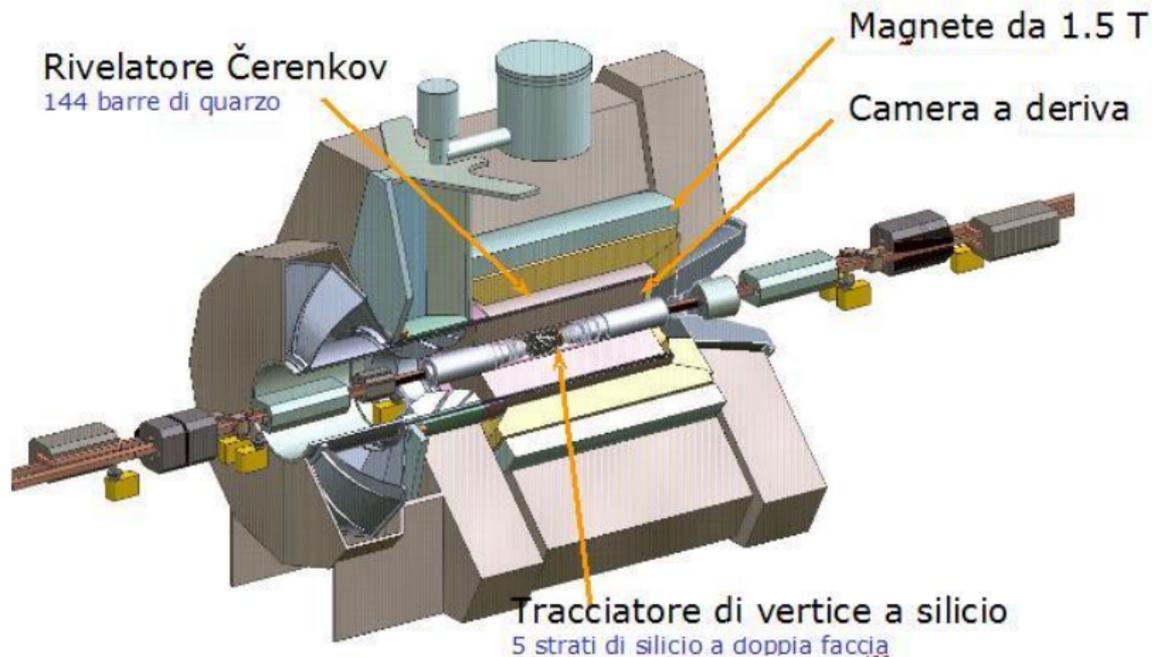
con conseguente ridefinizione di x e y :

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

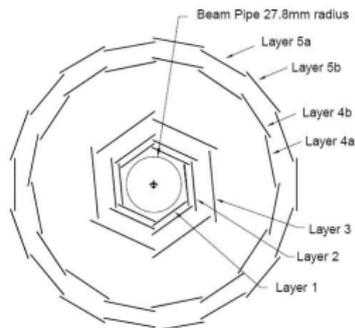
$$y' = -x \sin \delta + y \cos \delta$$

Rivelatore Babar: sottosistemi coinvolti nella misura

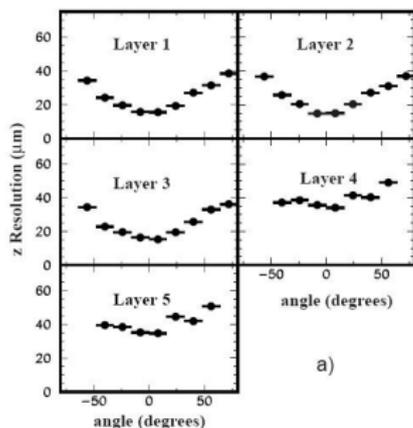
Per la nostra misura è fondamentale una corretta Particle Identification e la ricostruzione dei vertici di interazione/decadimento



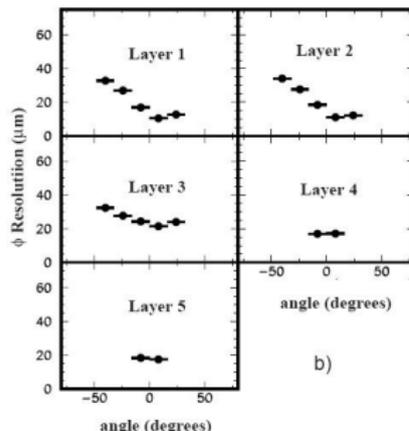
Il rivelatore Babar: SVT



Il SVT deve permettere di ricostruire la traccia con una precisione $< 100 \mu\text{m}$ e misurare il $\frac{dE}{dx}$. La risoluzione è ricavata dalla distanza tra la traiettoria della particella e il punto di hit.



a)



b)

La risoluzione sul $\frac{dE}{dx}$ per le MIP è del 14 %

Per avere una sorgente pura di D^0 si sfrutta il canale

$$D^{0*+} \longrightarrow D^0 \pi_s^+$$

$$D^{0*-} \longrightarrow \bar{D}^0 \pi_s^-$$

Il segno del π_s definisce il flavour del mesone D in produzione

Struttura di un evento

Un evento corretto è caratterizzato da:

- Rilevamento di un π_s^+ riconducibile a un vertice di interazione "vicino" al beam spot
- Rilevamento di due traccie cariche di segno opposto ($K^\pm \pi^\mp$) riconducibili allo stesso vertice di decadimento
- Consistenza tra il vertice di decadimento e il vertice di interazione

Per avere una sorgente pura di D^0 si sfrutta il canale

$$D^{0*+} \longrightarrow D^0 \pi_s^+$$

$$D^{0*-} \longrightarrow \bar{D}^0 \pi_s^-$$

Il segno del π_s definisce il flavour del mesone D in produzione

Struttura di un evento

Un evento corretto è caratterizzato da:

- Rilevamento di un π_s^+ riconducibile a un vertice di interazione "vicino" al beam spot
- Rilevamento di due tracce cariche di segno opposto ($K^\pm \pi^\mp$) riconducibili allo stesso vertice di decadimento
- Consistenza tra il vertice di decadimento e il vertice di interazione

Riduzione del BG e presa dati

Per aumentare la reiezione sul background si utilizzano alcuni accorgimenti

Selezione del π_s

- $p^{lab}(\pi_s) > 0.1 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $p^*(\pi_s) < 0.45 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $0.14 < \Delta m < 0.16 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

dove $\Delta m = m_{D^{*+}} - m_{K\pi}$

Selezione del D^0

- $p^*(D^0) > 2.5 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $1.81 \frac{\text{Gev}}{c^2} < m(K\pi) < 1.92 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

NB: $m(D^0) = 1.864 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

Selezione stati finali

La procedura di particle identification avviene tramite la misura di $\frac{dE}{dx}$ e rivelatori Cherenkov.

- I K vengono identificati con un'efficienza del 85% (MisRate=2%)
- I π vengono identificati con un'efficienza del 95% (MisRate=6%)

Riduzione del BG e presa dati

Per aumentare la reiezione sul background si utilizzano alcuni accorgimenti

Selezione del π_s

- $p^{lab}(\pi_s) > 0.1 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $p^*(\pi_s) < 0.45 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $0.14 < \Delta m < 0.16 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

dove $\Delta m = m_{D^{*+}} - m_{K\pi}$

Selezione del D^0

- $p^*(D^0) > 2.5 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $1.81 \frac{\text{Gev}}{c^2} < m(K\pi) < 1.92 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

NB: $m(D^0) = 1.864 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

Selezione stati finali

La procedura di particle identification avviene tramite la misura di $\frac{dE}{dx}$ e rivelatori Cherenkov.

- I K vengono identificati con un'efficienza del 85% (MisRate=2%)
- I π vengono identificati con un'efficienza del 95% (MisRate=6%)

Riduzione del BG e presa dati

Per aumentare la reiezione sul background si utilizzano alcuni accorgimenti

Selezione del π_s

- $p^{lab}(\pi_s) > 0.1 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $p^*(\pi_s) < 0.45 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $0.14 < \Delta m < 0.16 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

dove $\Delta m = m_{D^{*+}} - m_{K\pi}$

Selezione del D^0

- $p^*(D^0) > 2.5 \frac{\text{Gev}}{c}$
- $1.81 \frac{\text{Gev}}{c^2} < m(K\pi) < 1.92 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

NB: $m(D^0) = 1.864 \frac{\text{Gev}}{c^2}$

Selezione stati finali

La procedura di particle identification avviene tramite la misura di $\frac{dE}{dx}$ e rivelatori Cherenkov.

- I K vengono identificati con un'efficienza del 85% (MisRate=2%)
- I π vengono identificati con un'efficienza del 95% (MisRate=6%)

Riduzione del fondo

L'espressione della PDF del fondo viene ricavata da simulazioni MC
Viene poi eseguito un fit sui dati che rispettano i criteri di massa
per ricavare i parametri
Sovrapponendo gli andamenti del fondo ai dati otteniamo per gli
eventi WS il seguente risultato:

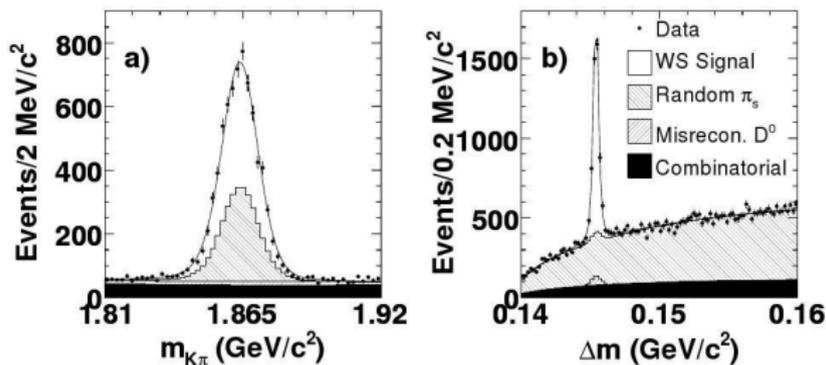
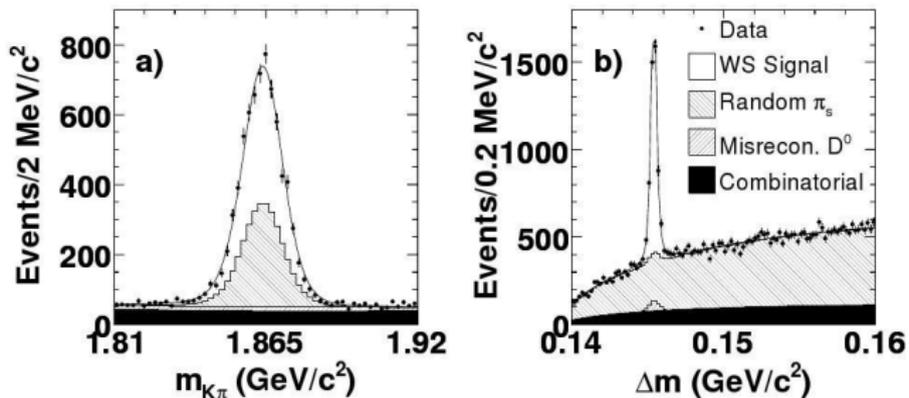


Figura: Dati ottenuti nell'intervallo $0.1445 < \Delta m < 0.1465 \frac{\text{GeV}}{c^2}$,
 $1.843 < m_{K\pi} < 1.883 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

Da 64000 candidati scendiamo a 4030 ± 90 eventi

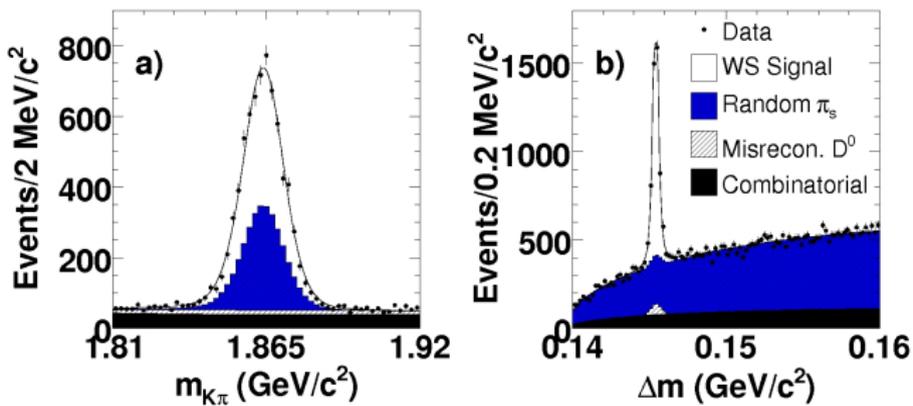
Classificazione e analisi del fondo



Classificazione eventi di fondo

- Uno stato finale corretto viene associato a un π casuale
→ distribuzione piccata in $m_{K\pi}$ ma non in Δm
- Erronea ricostruzione dello stato finale
→ distribuzione piccata in Δm ma non in $m_{K\pi}$
- Fondo combinatorio
→ non presenta picchi nè in $m_{K\pi}$ nè Δm

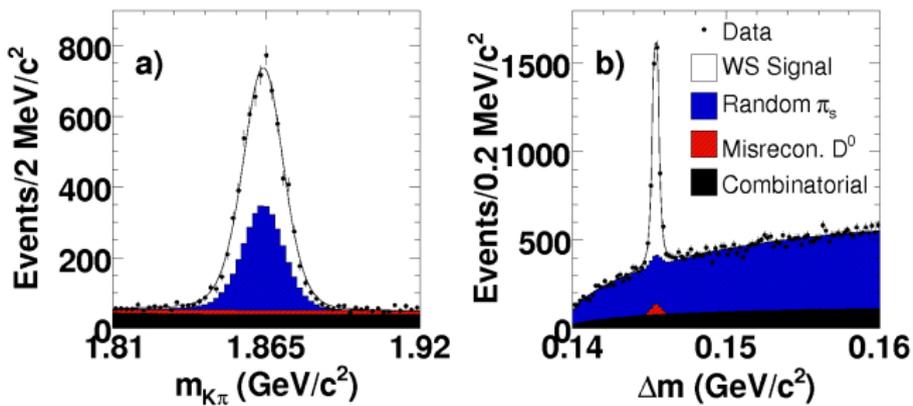
Classificazione e analisi del fondo



Classificazione eventi di fondo

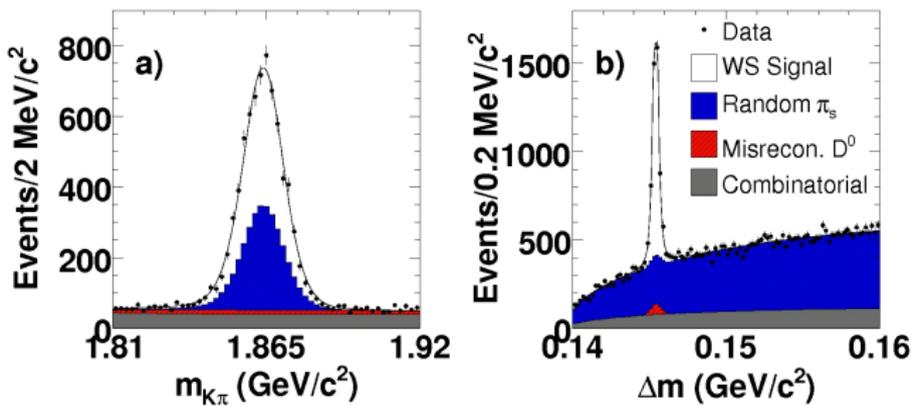
- Uno stato finale corretto viene associato a un π casuale
→ distribuzione piccata in $m_{K\pi}$ ma non in Δm
- Erronea ricostruzione dello stato finale
→ distribuzione piccata in Δm ma non in $m_{K\pi}$
- Fondo combinatorio
→ non presenta picchi nè in $m_{K\pi}$ nè Δm

Classificazione e analisi del fondo



Classificazione eventi di fondo

- Uno stato finale corretto viene associato a un π casuale
→ distribuzione piccata in $m_{K\pi}$ ma non in Δm
- Erronea ricostruzione dello stato finale
→ distribuzione piccata in Δm ma non in $m_{K\pi}$
- Fondo combinatorio
→ non presenta picchi nè in $m_{K\pi}$ nè Δm



Classificazione eventi di fondo

- Uno stato finale corretto viene associato a un π casuale
→ distribuzione piccata in $m_{K\pi}$ ma non in Δm
- Erronea ricostruzione dello stato finale
→ distribuzione piccata in Δm ma non in $m_{K\pi}$
- Fondo combinatorio
→ non presenta picchi nè in $m_{K\pi}$ nè Δm

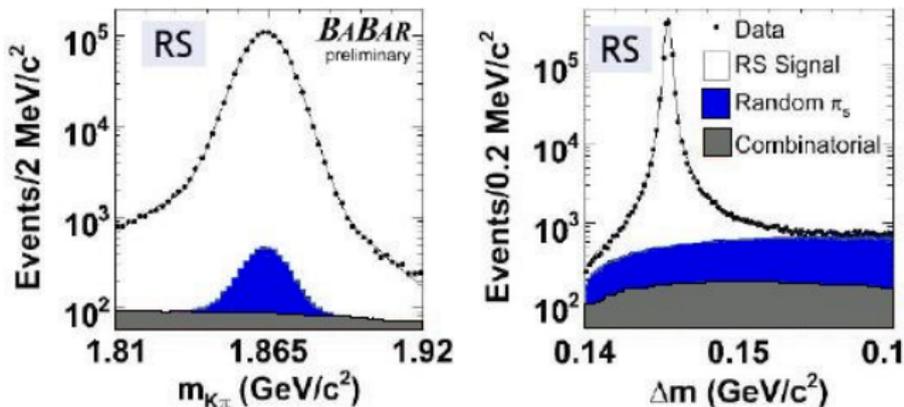


Figura: Dati ottenuti nell'intervallo $0.1445 < \Delta m < 0.1465 \frac{\text{GeV}}{c^2}$, $1.843 < m_{K\pi} < 1.883 \frac{\text{GeV}}{c^2}$

Gli eventi RS beneficiano di un rapporto segnale-rumore maggiore degli eventi WS e di una statistica maggiore
 Le condizioni richieste sulle masse delle particelle riducono 1229000 candidati in 1141500 ± 1200 eventi

Distribuzione temporale del segnale

La distribuzione temporale della componente RS è un esponenziale convoluto con una funzione di risoluzione, supposta essere la somma di tre gaussiane

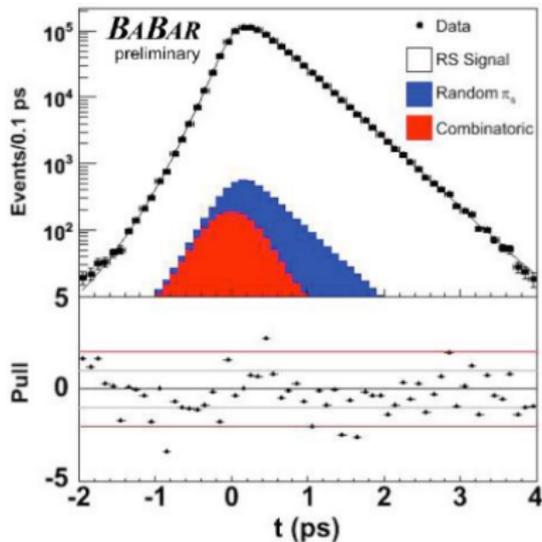
Da un fit sui dati ricaviamo i parametri della funzione di risoluzione
Per la componente WS la distribuzione temporale è data dalla (1) convoluta con la funzione di risoluzione trovata nel caso RS

Distribuzione temporale del fondo

Per il fondo costituito da eventi random π_s o da misreconstructed D^0 , la funzione di risoluzione è la stessa del caso RS, in quanto sono reali eventi di decadimento

Per il fondo combinatorio invece la funzione di risoluzione è differente

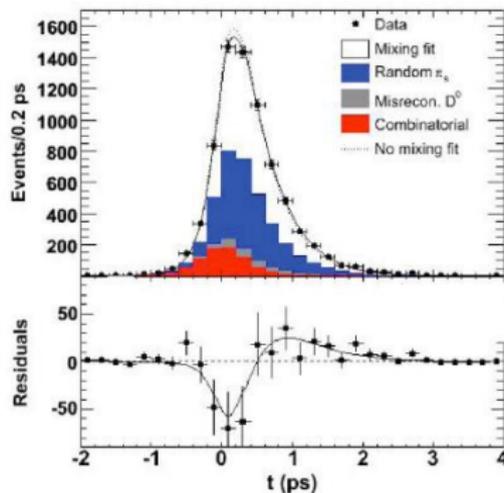
Distribuzione temporale ottenuta



Risultati componente RS

Il risultato ottenuto per il lifetime è $\tau = (410.3 \pm 0.6(stat))$ fs
Consistente con il valore del PDG $\tau = (410.1 \pm 0.6)fs$

Distribuzione temporale ottenuta



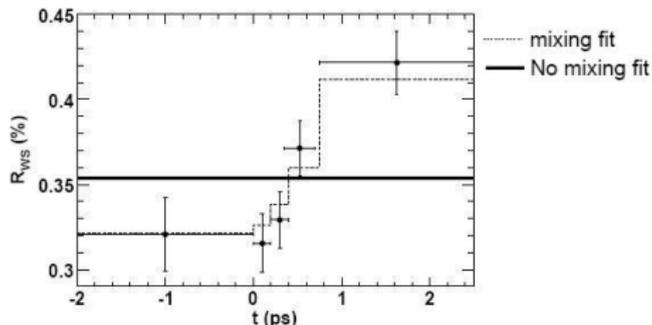
Risultati componente WS

In fig a) sono riportati i risultati dell'andamento temporale
La linea tratteggiata è l'andamento atteso nell'ipotesi di mixing
La linea continua è l'andamento atteso in assenza di mixing
In fig b) sono riportati i residui calcolati per ogni punto
La curva continua risulta descrivere meglio i dati

Fit indipendente del rapporto RS/WR

Come verifica eseguiamo un fit sul rapporto tra eventi RS e WS dividendo i dati in bin e senza ipotizzare alcuna correlazione tra i parametri del segnale e BG

In assenza di mixing il rapporto si dovrebbe mantenere costante $\approx 3.53\%$

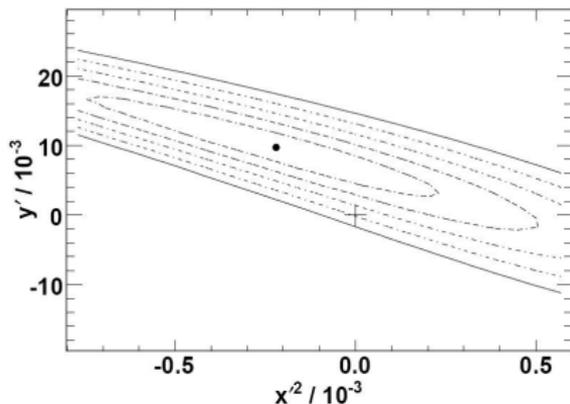


Il fit ai dati da un χ^2 di 1.5 nell'ipotesi di mixing e di 24 nell'ipotesi di assenza di mixing, confermando la presenza di un flavour mixing $D^0 \leftrightarrow \bar{D}^0$

Risultati e conclusioni

Dai dati ottenuti ricaviamo i valori di x' e y'

Parametro	Risultato (\pm Err Stat	\pm Err Sist) (10^{-3})
x'^2	-0.22	± 0.30	± 0.21
y'^2	9.7	± 4.4	± 4.1

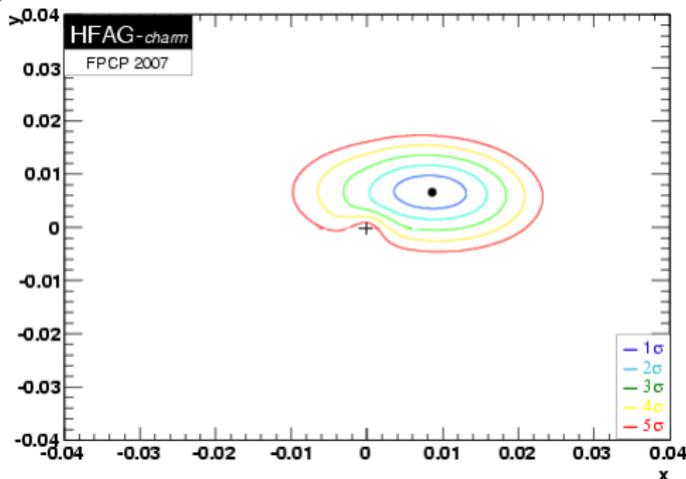


Sul grafico è riportato il risultato e le curve di CL da 1 σ a 5 σ . Come si può notare dalla figura, x' e y' presentano una forte anticorrelazione (-94%).

I risultati indicano un valore di y' diverso da zero entro 3.9 σ

Evidenza sperimentale del mixing

I risultati ottenuti anche da altri esperimenti combinati assieme, massimizzando la funzione di massima verosimiglianza, sono riportati nel grafico



L'ipotesi di flavour mixing è confermata anche da altri esperimenti

- 1 S. Bianco, L. Fabbri
A Cicerone for the Physics of Charm,
http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/0309/0309021v1.pdf;
- 2 BABAR Collaboration
Evidence for D^0 - \bar{D}^0 Mixing,
http://arxiv.org/PS_cache/hep-ex/pdf/0703/0703020v1.pdf;
- 3 BABAR Collaboration
Measurement of D^0 - \bar{D}^0 mixing using the ratio of lifetimes for the decays $D^0 \rightarrow K^- \pi^+, K^- K^+,$ and $\pi^- \pi^+,$
http://arxiv.org/PS_cache/arxiv/pdf/0712/0712.2249v1.pdf;
- 4 BABAR Collaboration
The BaBar Detector,
<http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-8569.pdf>;