



# Misura della frequenza di oscillazione del sistema $B_s - \bar{B}_s$

S. Giagu  
CDF Roma

# Sommario

- Introduzione
- L'analisi sperimentale
  - Estrazione del segnale
  - Misura del tempo proprio di decadimento
  - Misura del sapore del mesone B alla produzione
  - Amplitude scan e sensitività
- Risultati
  - Distribuzioni
  - Significatività e misura di  $\Delta m_s$
- Interpretazione
  - Analisi preliminare del triangolo di unitarietà



## $B_s$ Mixing group

Konstantin Anikeev <sup>6</sup>, Farrukh Azfar <sup>20</sup>, Gary Barker <sup>8</sup>, Gerry Bauer <sup>14</sup>, Franco Bedeschi <sup>11</sup>, Satyajit Behari <sup>16</sup>, Stefano Belforte <sup>12</sup>, Alberto Belloni <sup>14</sup>, Eli Ben-Haim <sup>13</sup>, Juerg Beringer <sup>5</sup>, Arkadiy Bolshov <sup>14</sup>, Joe Boudreau <sup>23</sup>, Massimo Casarsa <sup>12</sup>, Pierluigi Catastini <sup>11</sup>, Alessandro Cerri <sup>5</sup>, Agnese Ciocci <sup>11</sup>, David Clark <sup>2</sup>, Saverio D'Auria <sup>7</sup>, Christian Dörr <sup>8</sup>, Saverio Da Ronco <sup>21</sup>, Sandro De Cecco <sup>10</sup>, Amanda Deisher <sup>5</sup>, Francesco Delli Paoli <sup>21</sup>, Gianpiero Di Giovanni <sup>13</sup>, Simone Donati <sup>11</sup>, Mauro Donega <sup>17</sup>, Sinead Farrington <sup>19</sup>, Michael Feindt <sup>8</sup>, Armando Fella <sup>11</sup>, Ivan Furic <sup>4</sup>, Stefano Giagu <sup>10</sup>, Karen Gibson <sup>3</sup>, Kim Giolo <sup>15</sup>, Gavril Giurgiu <sup>3</sup>, Guillelmo Gomez-Ceballos <sup>9</sup>, Robert Harr <sup>26</sup>, Aart Heijboer <sup>22</sup>, Matt Herndon <sup>25</sup>, Todd Huffman <sup>20</sup>, Boris Iyutin <sup>14</sup>, Matthew Jones <sup>15</sup>, Ulrich Kerzel <sup>8</sup>, Ilya Kravchenko <sup>14</sup>, Michal Krepes <sup>8</sup>, Joe Kroll <sup>22</sup>, Thomas Kuhr <sup>8</sup>, Tom LeCompte <sup>1</sup>, Claudia Lecci <sup>8</sup>, Nuno Leonardo <sup>14</sup>, Donatella Lucchesi <sup>21</sup>, Johannes Mülmenstädt <sup>5</sup>, Petar Maksimović <sup>16</sup>, Stephanie Menzemer <sup>14</sup>, Jeffrey Miles <sup>14</sup>, Michael Morello <sup>11</sup>, Reid Mumford <sup>16</sup>, Steve Nahn <sup>27</sup>, Rolf Oldeman <sup>19</sup>, Manfred Paulini <sup>3</sup>, Christoph Paus <sup>14</sup>, Jonatan Piedra <sup>13</sup>, Kevin Pitts <sup>18</sup>, Giovanni Punzi <sup>11</sup>, Jonas Rademacker <sup>20</sup>, Azizur Rahman <sup>23</sup>, Marco Rescigno <sup>10</sup>, Alberto Ruiz <sup>9</sup>, Giuseppe Salamanna <sup>10</sup>, Aureore Savoy-Navarro <sup>13</sup>, Fabrizio Scuri <sup>11</sup>, Marjorie Shapiro <sup>5</sup>, Paola Squillacioti <sup>11</sup>, Masa Tanaka <sup>1</sup>, Vivek Tiwari <sup>3</sup>, Fumi Ukegawa <sup>24</sup>, Satoru Uozumi <sup>24</sup>, Denys Usynin <sup>22</sup>, Ivan Vila <sup>9</sup>, Barry Wicklund <sup>1</sup>, Chun Yang <sup>27</sup>

### Institutions:

- (1) Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439
- (2) Brandeis University, Waltham, Massachusetts 02254
- (3) Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213
- (4) Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637
- (5) Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720
- (6) Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510
- (7) Glasgow University, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom
- (8) Institut für Experimentelle Kernphysik, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe, Germany
- (9) Instituto de Fisica de Cantabria, CSIC-University of Cantabria, 39005

Santander, Spain

- (10) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma 1, University di Roma "La Sapienza," I-00185 Roma, Italy
- (11) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, University and Scuola Normale Superiore of Pisa, I-56100 Pisa, University of Siena, I-53100 Siena, Italy
- (12) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, University of Trieste/Udine, Italy
- (13) LPNHE Universite de Paris 6/IN2P3-CNRS, Paris, France
- (14) Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139
- (15) Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907
- (16) The Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland 21218
- (17) University of Geneva, CH-1211 Geneva 4, Switzerland
- (18) University of Illinois, Urbana, Illinois 61801
- (19) University of Liverpool, Liverpool L69 7ZE, United Kingdom
- (20) University of Oxford, Oxford OX1 3RH, United Kingdom
- (21) University of Padova, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova-Trento, I-35131 Padova, Italy
- (22) University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania 19104
- (23) University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania 15260
- (24) University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan
- (25) University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706
- (26) Wayne State University, Detroit, Michigan 48201
- (27) Yale University, New Haven, Connecticut 06520

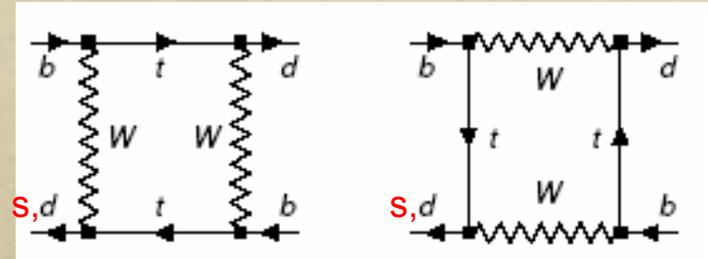
Importanti contributi del gruppo di Roma (TOF, dE/dx, SVT, taggers)

# Oscillazioni di sapore

I mesoni B neutri possono trasformarsi spontaneamente nella propria antiparticella.

L'evoluzione temporale del sistema B- $\bar{B}$  è governata dalla equazione di Schrödinger:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} |B(t)\rangle \\ |\bar{B}(t)\rangle \end{pmatrix} = \left( M - \frac{i}{2} \Gamma \right) \begin{pmatrix} |B(t)\rangle \\ |\bar{B}(t)\rangle \end{pmatrix}$$



Nel MS processi descritti da diagrammi a box dominati da quark top generano elementi non nulli fuori-diagonale, questi rappresentano la sorgente del mixing.

Nuova fisica può “circolare” nei diagrammi a box.

Hamiltoniana non è diagonale  $\rightarrow$  B e  $\bar{B}$  non sono autostati di massa:

Gli autostati di massa sono:

$$\left. \begin{aligned} |B_H\rangle &= p|B\rangle + q|\bar{B}\rangle & M_H &= M_{11} + M_{12} \\ |B_L\rangle &= p|B\rangle - q|\bar{B}\rangle & M_L &= M_{11} - M_{12} \end{aligned} \right\} \quad \Delta m_s = M_H - M_L = 2|M_{12}|$$



# Perché non è stato ancora misurato

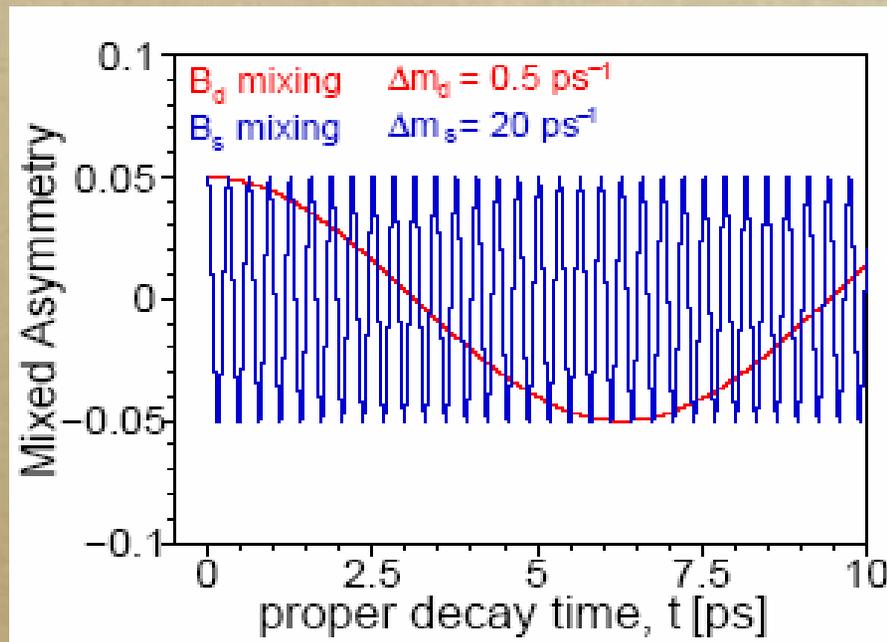
Probabilità di oscillazione in funzione del tempo:

$$P(B \rightarrow B) = \frac{e^{-t/\tau}}{2\tau} (1 + \cos(\Delta m \cdot t)) = P_{nomix}$$

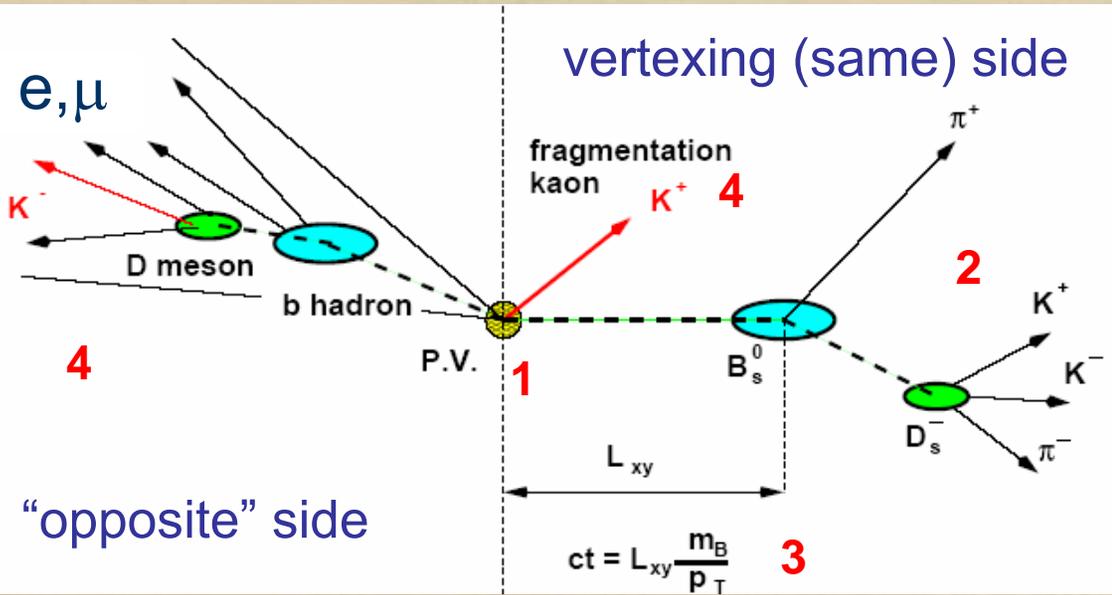
$$P(B \rightarrow \bar{B}) = \frac{e^{-t/\tau}}{2\tau} (1 - \cos(\Delta m \cdot t)) = P_{mix}$$

$$A(t) = \frac{P_{mix} - P_{nomix}}{P_{mix} + P_{nomix}} = \cos(\Delta m \cdot t)$$

$|V_{ts}| \gg |V_{td}| \Rightarrow \Delta m_s \gg \Delta m_d \Rightarrow$  necessario risolvere oscillazioni O(3THz)



# I punti chiave della misura in una trasparenza



Potenza statistica di un tagger:  $\epsilon D^2$

$\epsilon$ : quanto spesso è possibile applicare un tag

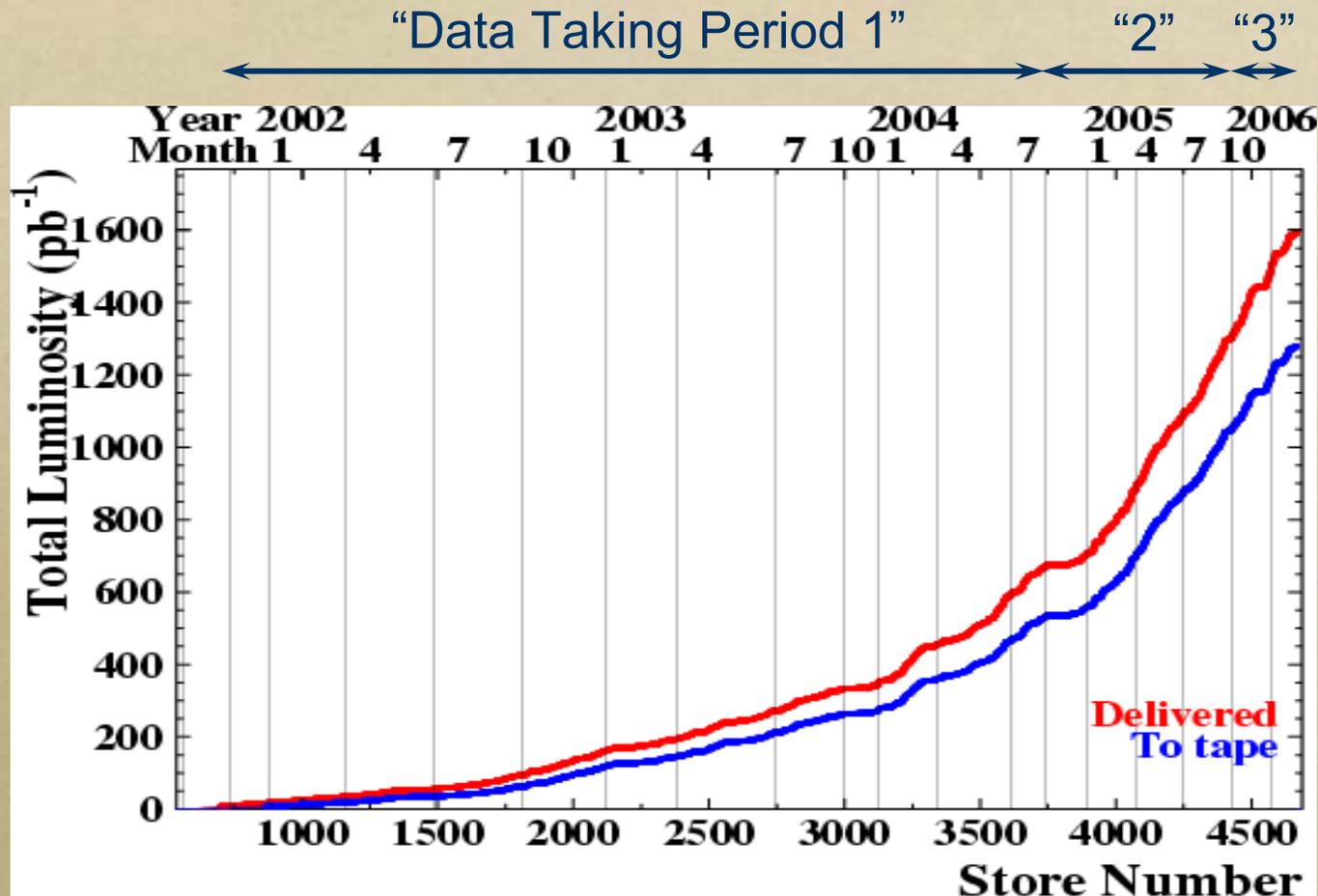
$D = (1-2w)$ : quanto spesso la decisione di tag è incorretta

$$A(t) = D \times \cos(\Delta m t)$$

1. **Collezionare quanti più  $B_s$  possibile**
  - Tevatron, Trigger
2. **Ricostruire il  $B_s$** 
  - massimizzare S/B
  - Sapore del  $B_s$  al tempo del decadimento dai prodotti di decadimento
3. **Misurare il tempo proprio e massimizzare la risoluzione**
  - trigger, rivelatore di vertice, vertice primario evento per evento
4. **Stima del sapore del  $B_s$  alla produzione (flavor tagging)**
  - minimizzare la rate di tag sbagliati: PID (TOF, dE/dx)

$$\frac{1}{\sigma_A} = \sqrt{\frac{\epsilon D^2 S}{2}} e^{-\frac{(\Delta m_s \sigma_t)^2}{2}} \sqrt{\frac{S}{S+B}}$$

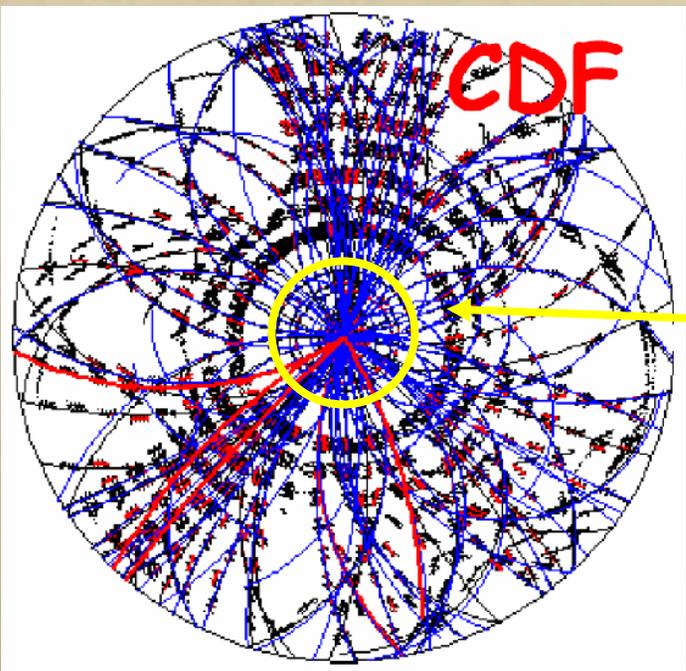
# Luminosità del Tevatron



- Luminosità delivered  $\sim 1.6 \text{ fb}^{-1}$
- Questa analisi (Feb. 02 – Jan. 06):  $1 \text{ fb}^{-1}$

# Silicon Vertex Tracker

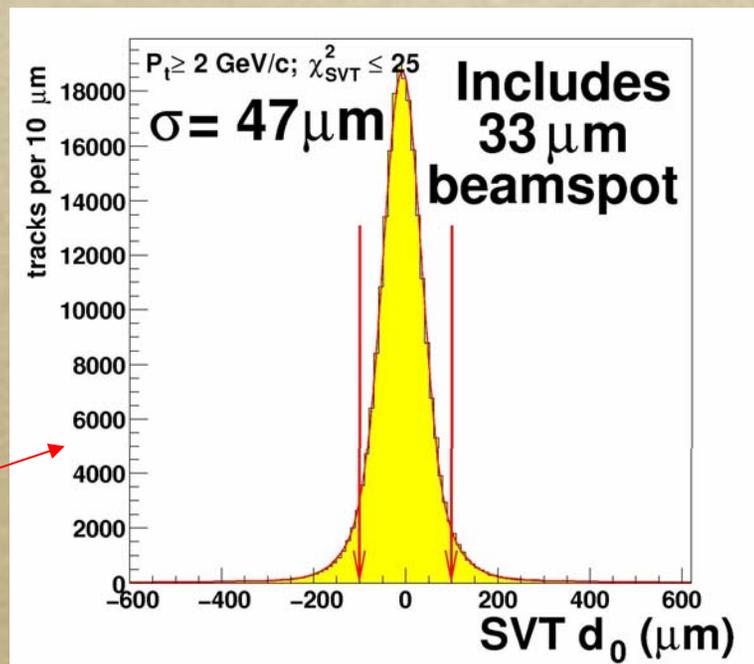
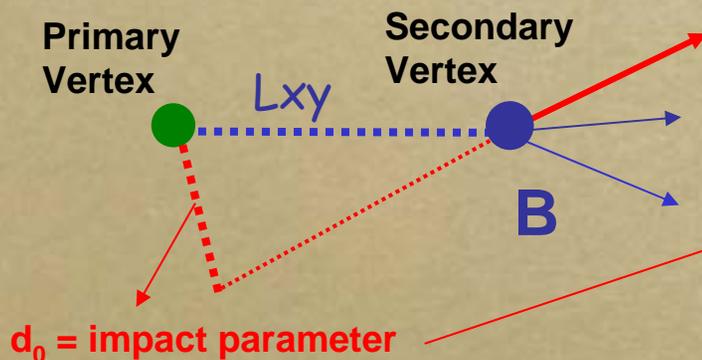
Un tipico evento  $B_s$  in un collider adronico ...



... sembra uguale ad un qualunque altro evento ma con una sezione d'urto  $10^3$  volte più piccola!

Soluzione: usare il rivelatore al silicio come lente di ingrandimento ...

In CDF è possibile farlo in tempo reale (SVT)

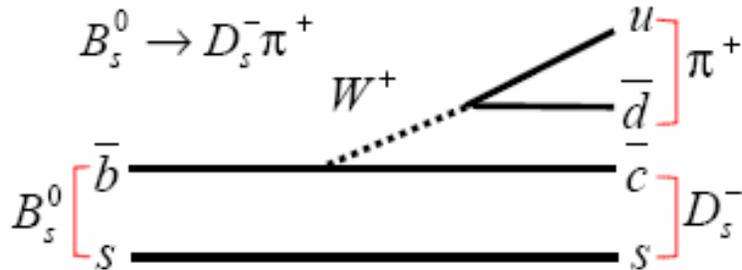


**Accesso ai decadimenti totalmente ricostruiti → cruciale per l'analisi di mixing**

# Ricostruzione dei $B_s$

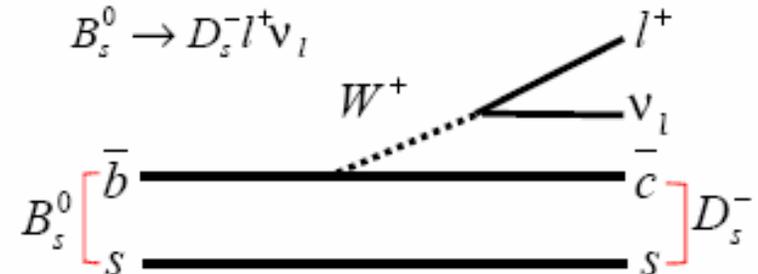
Due differenti topologie sperimentali:

“Hadronic”



$B_s$  Momentum is measured  
 $B_s$  mass used for good S/N  
Small branching ratio: low yield

“Semileptonic”



Missing momentum ( $\nu$ )  
Need to rely on  $D_s$  mass  
Large branching ratio high yield

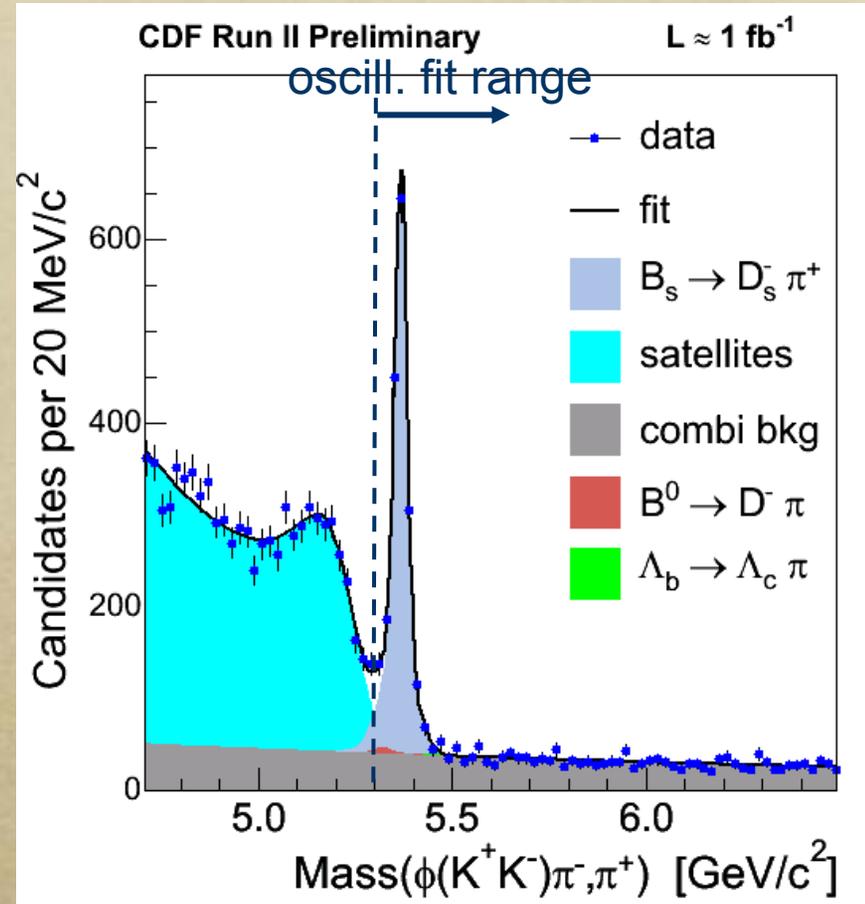
Buona sensibilità ad alto  $\Delta m_s$

Buona sensibilità a basso  $\Delta m_s$

# $B_s$ “Adronici”: data sample

$B_s \rightarrow D_s \pi (\phi \pi)$

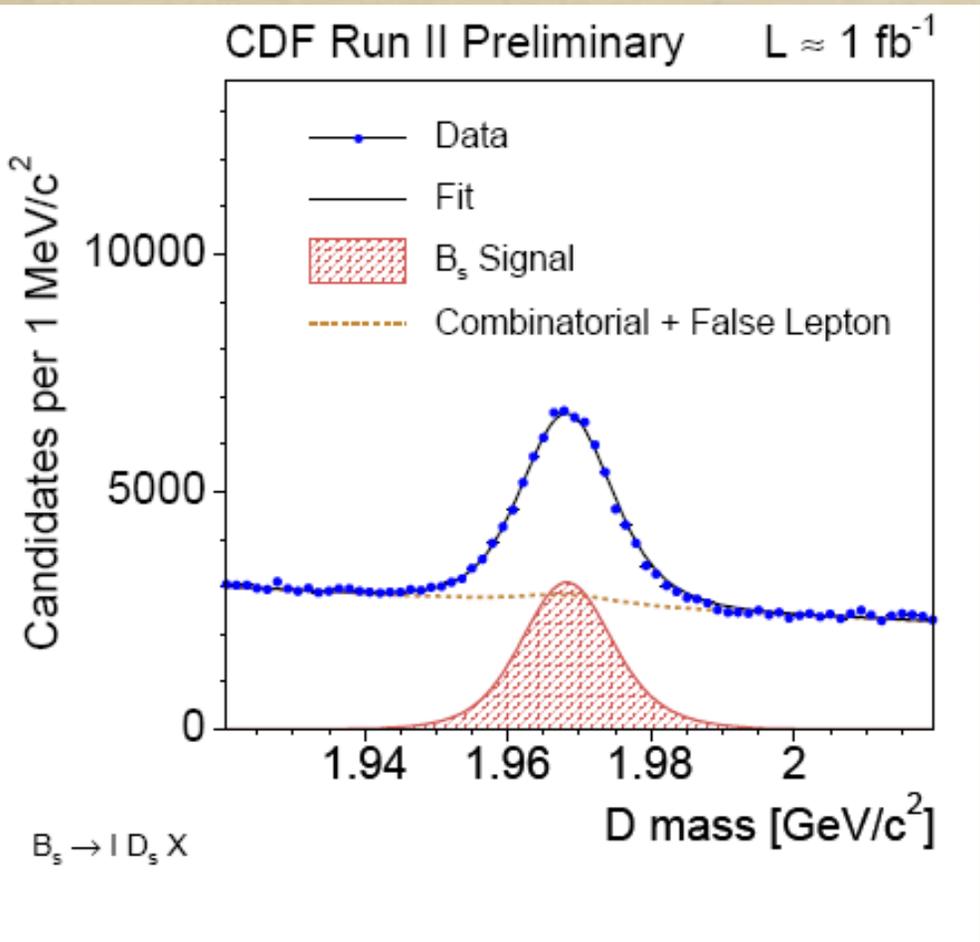
Decadimento	Eventi
$B_s \rightarrow D_s \pi (\phi \pi)$	1600
$B_s \rightarrow D_s \pi (K^* K)$	800
$B_s \rightarrow D_s \pi (3\pi)$	600
$B_s \rightarrow D_s 3\pi (\phi \pi)$	500
$B_s \rightarrow D_s 3\pi (K^* K)$	200
<b>Totale</b>	<b>3700</b>



- Campioni di calibrazione ad alta statistica:
  - $B^+$  ( $J/\psi K^+$ ,  $D^0 \pi$ ,  $D^0 3\pi$ ):  $\sim 50\text{k}$  eventi
  - $B^0$  ( $J/\psi K^*$ ,  $D^- \pi$ ,  $D^{*-} \pi$ ,  $D^- 3\pi$ ,  $D^{*-} 3\pi$ ):  $\sim 60\text{k}$  eventi

# $B_s$ “Semileptonici”: data sample

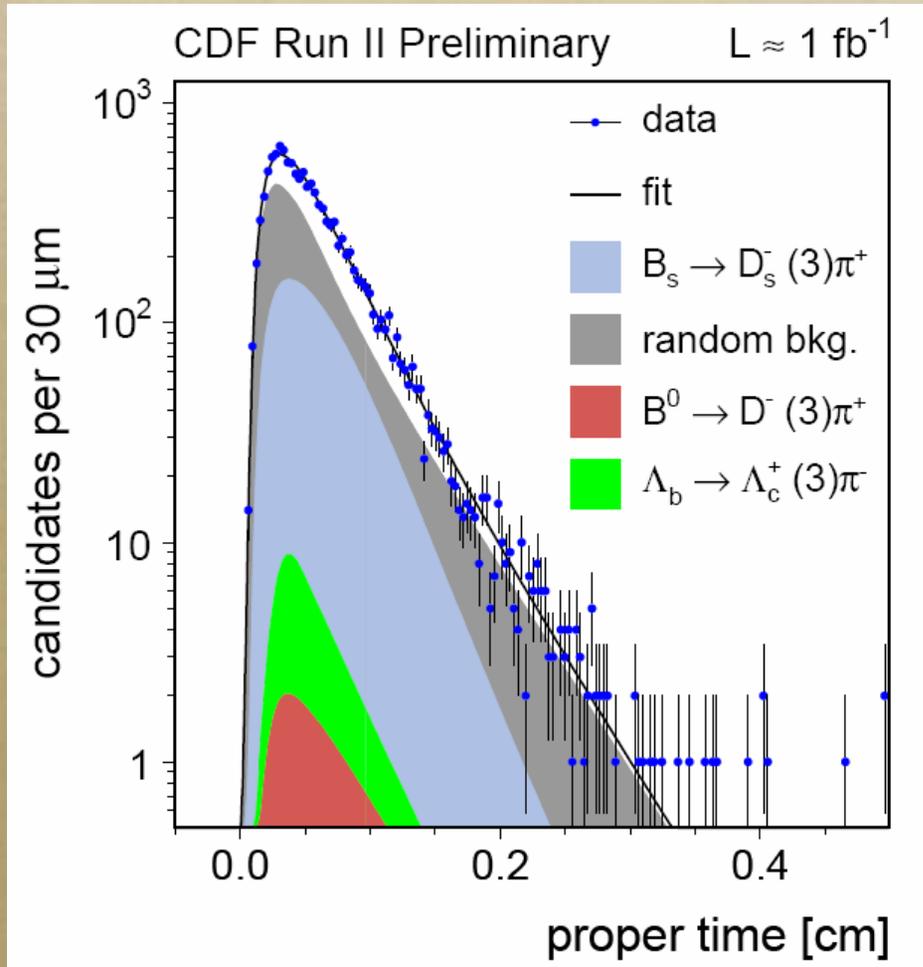
$$B_s \rightarrow D_s l \nu$$



Decadimento	Eventi
$D_s \rightarrow \phi\pi$	32 K
$D_s \rightarrow K^*K$	11 K
$D_s \rightarrow \pi\pi\pi$	10 K
$D^0 \rightarrow K\pi$	540 K
$D^0 \rightarrow K\pi$	75 K
$D^- \rightarrow K\pi\pi$	300 K

Campioni di calibrazione

# Check scala tempo proprio: vite medie B “Adronici”



Decadimento	Lifetime [ps] (stat. only)
$B^0 \rightarrow D^- \pi^+$	$1.508 \pm 0.017$
$B^- \rightarrow D^0 \pi^-$	$1.638 \pm 0.017$
$B_s \rightarrow D_s \pi(\pi\pi)$	$1.538 \pm 0.040$

• Media mondiale:

$$B^0 : 1.534 \pm 0.013 \text{ ps}^{-1}$$

$$B^+ : 1.653 \pm 0.014 \text{ ps}^{-1}$$

$$B_s : 1.469 \pm 0.059 \text{ ps}^{-1}$$

# Vite medie B “semileptonici”

Ulteriore complicazione: l'impulso del neutrino non è ricostruito

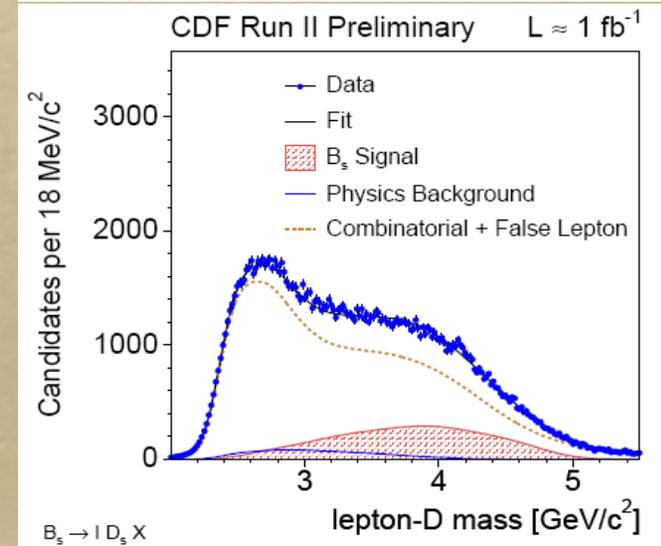
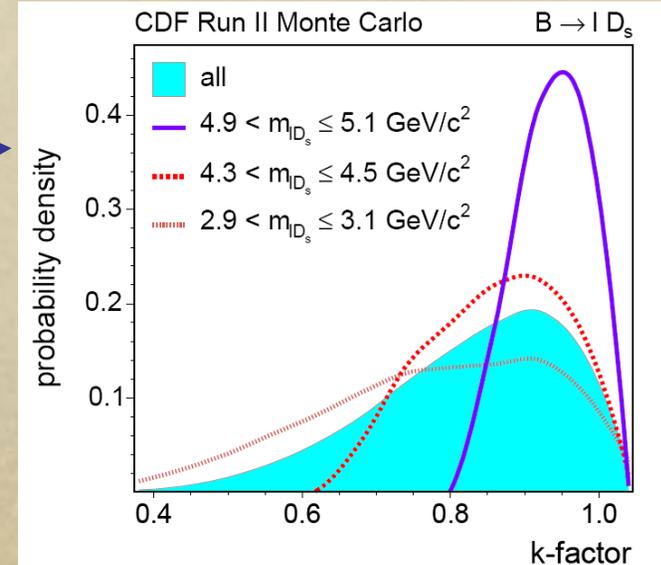
Si introduce un “K” factor per correggere in media l'effetto:

$$ct = L_{xy} \times \frac{m(B)}{p_T(\ell D_s)} \otimes K \quad \text{Stimato dal MC}$$

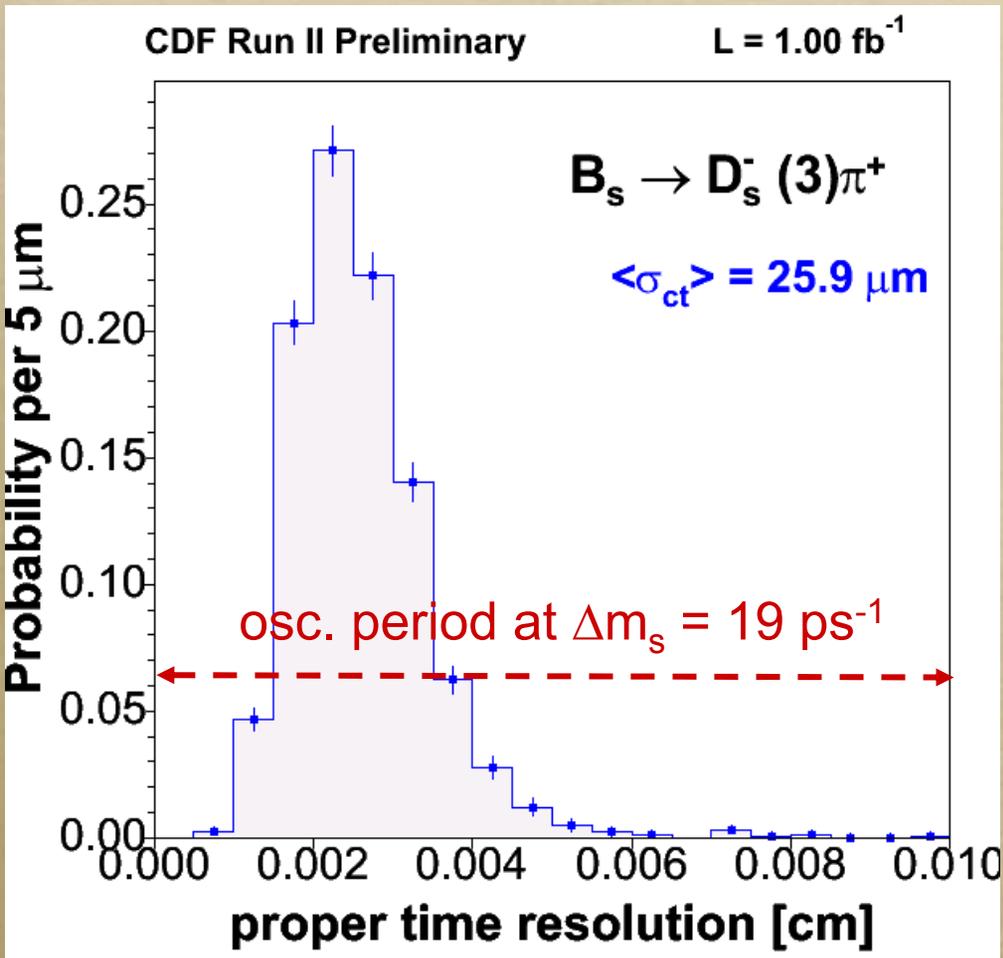
CDF Preliminary 360 pb<sup>-1</sup>

$B_s \rightarrow D_s \ell \nu$	Lifetime (ps) (stat.)
$D_s \rightarrow \phi\pi$	$1.51 \pm 0.04$
$D_s \rightarrow K^*K$	$1.38 \pm 0.07$
$D_s \rightarrow \pi\pi\pi$	$1.40 \pm 0.09$
Combinato	$1.48 \pm 0.03$

Media Mondiale B<sub>s</sub>:  $(1.469 \pm 0.059)$  ps

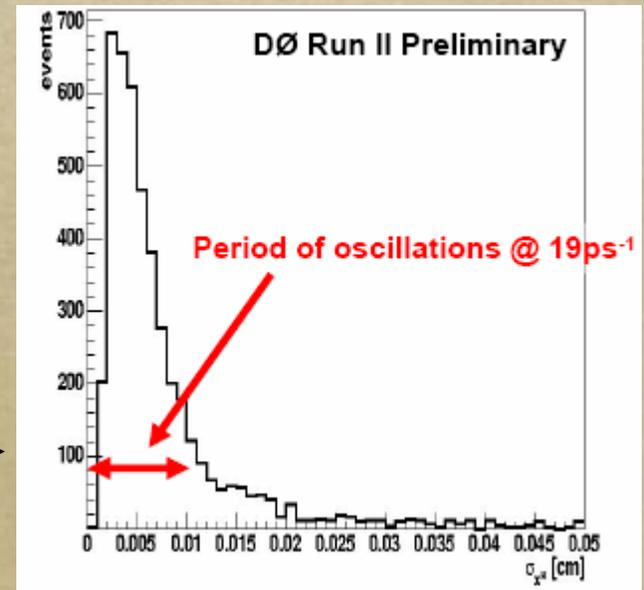


# $B_s$ : Risoluzione in tempo proprio



- Vertice primario dell'evento determinato evento per evento
- Risoluzione media  $\sim 26 \mu\text{m}$
- Possibile risolvere le oscillazioni evento per evento

D0 in confronto:  $\longrightarrow$

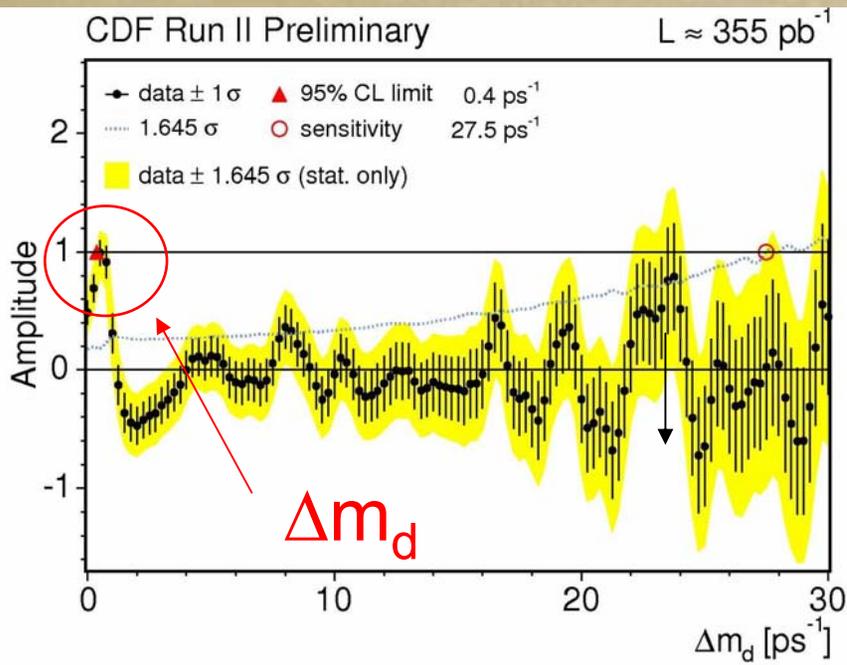


# Prestazione combinata dei taggers

	$\epsilon D^2$ Hadronic (%)	$\epsilon D^2$ Semileptonic (%)
Muon	$0.48 \pm 0.06$ (stat)	$0.62 \pm 0.03$ (stat)
Electron	$0.09 \pm 0.03$ (stat)	$0.10 \pm 0.01$ (stat)
JQ/Vertex	$0.30 \pm 0.04$ (stat)	$0.27 \pm 0.02$ (stat)
JQ/Prob.	$0.46 \pm 0.05$ (stat)	$0.34 \pm 0.02$ (stat)
JQ/High $p_T$	$0.14 \pm 0.03$ (stat)	$0.11 \pm 0.01$ (stat)
<b>Totale OST</b>	$1.47 \pm 0.10$ (stat)	$1.44 \pm 0.04$ (stat)
<b>SSKT</b>	$3.42 \pm 0.49$ (syst)	$4.00 \pm 0.56$ (syst)

# Amplitude scan

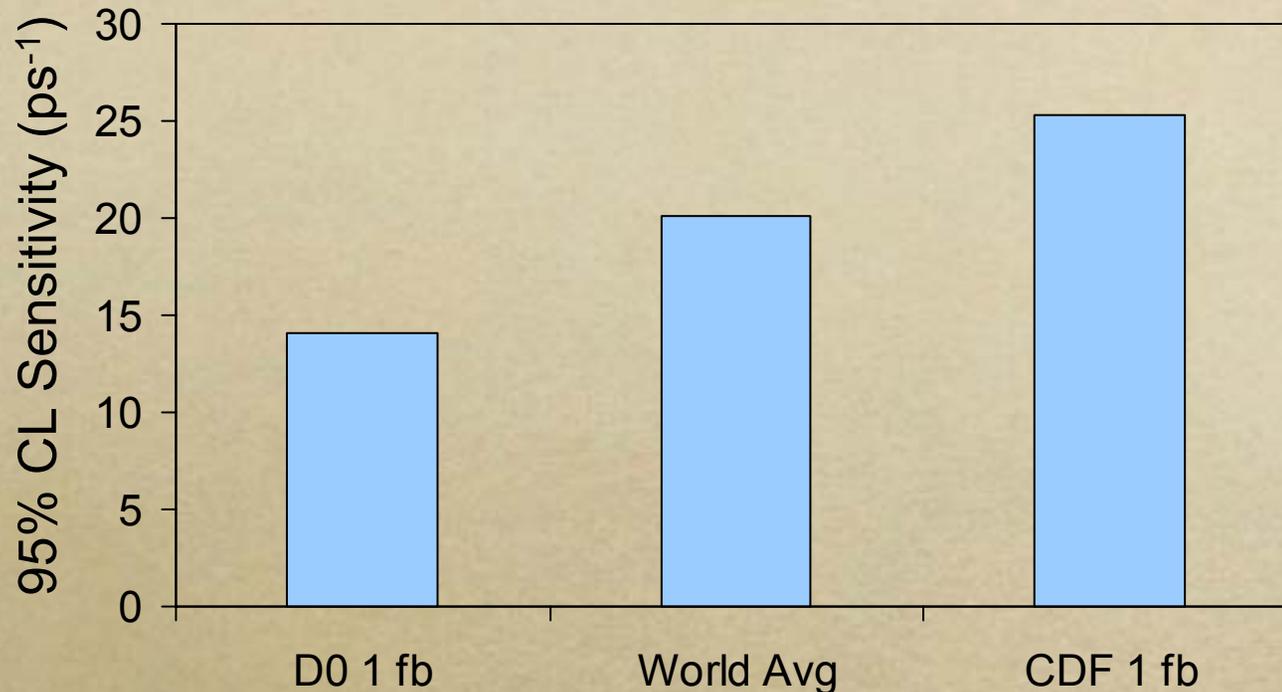
- Metodo classico per il fit di mixing:
  - si introduce l'ampiezza  $A$ :  $p(t) \sim (1 \pm A D \cos \Delta m_s t)$
  - $A=1$  ( $\pm$ stat) per  $v=\Delta m_s$
  - $A=0$  per  $|v-\Delta m_s| \gg \Gamma \oplus \sigma_p/p \cdot \Delta m_s$
  - “scan” attraverso differenti valori di  $\Delta m_s$  fittando  $A$
  - segnale:  $\Delta m_s$  per il quale  $A = 1$
- Esempio:  $B^0$  mixing in decadimenti adronici



punti:  $A \pm \sigma(A)$  dal fit di likelihood per ogni  $\Delta m$   
banda gialla:  $A \pm 1.645 \sigma(A)$  (95% CL)  
linea tratteggiata:  $1.645 \sigma(A)$  vs  $\Delta m$

$\Delta m$ :  $A + 1.645 \sigma(A) < 1$  escluso al 95% C.L.  
Sensibilità della misura:  $1.645 \sigma(A) = 1$

# Sensibilità del campione $B_s$



- Stimata utilizzando il campione “blindato” dei dati e randomizzando le decisioni dei tag
- Situazione inusuale: singola misura con maggiore sensibilità di tutta la conoscenza mondiale precedente

# Procedura a priori

- decisa prima di guardare il campione completo dei dati “sblindati”
- p-value: misura di quanta evidenza abbiamo contro l'ipotesi di effetto nullo
- nessuna finestra di ricerca a priori

p-value < 1%?

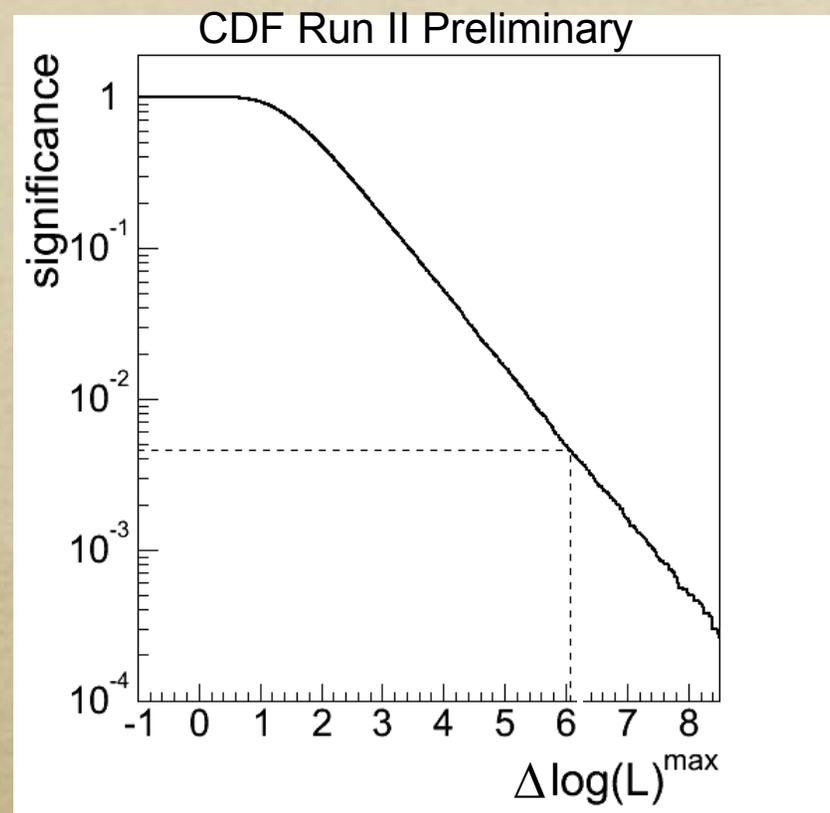
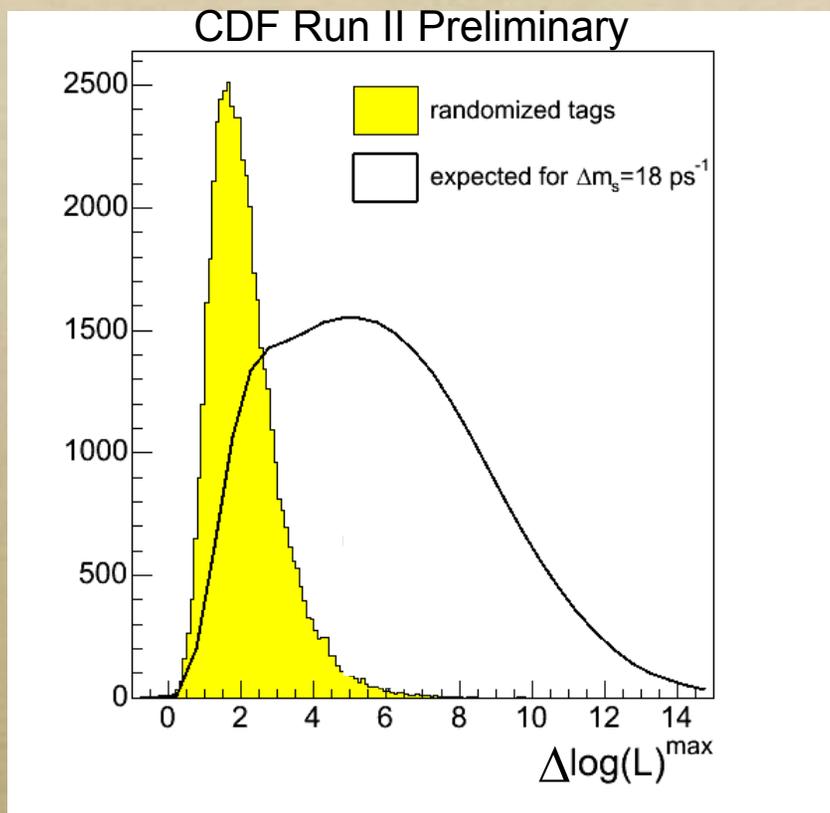
SI

NO

Intervallo di confidenza  
dall'analisi del  $\Delta \log(L)$ ,  
Misura di  $\Delta m_s$

95% CL limit  
utilizzando l'amplitude scan

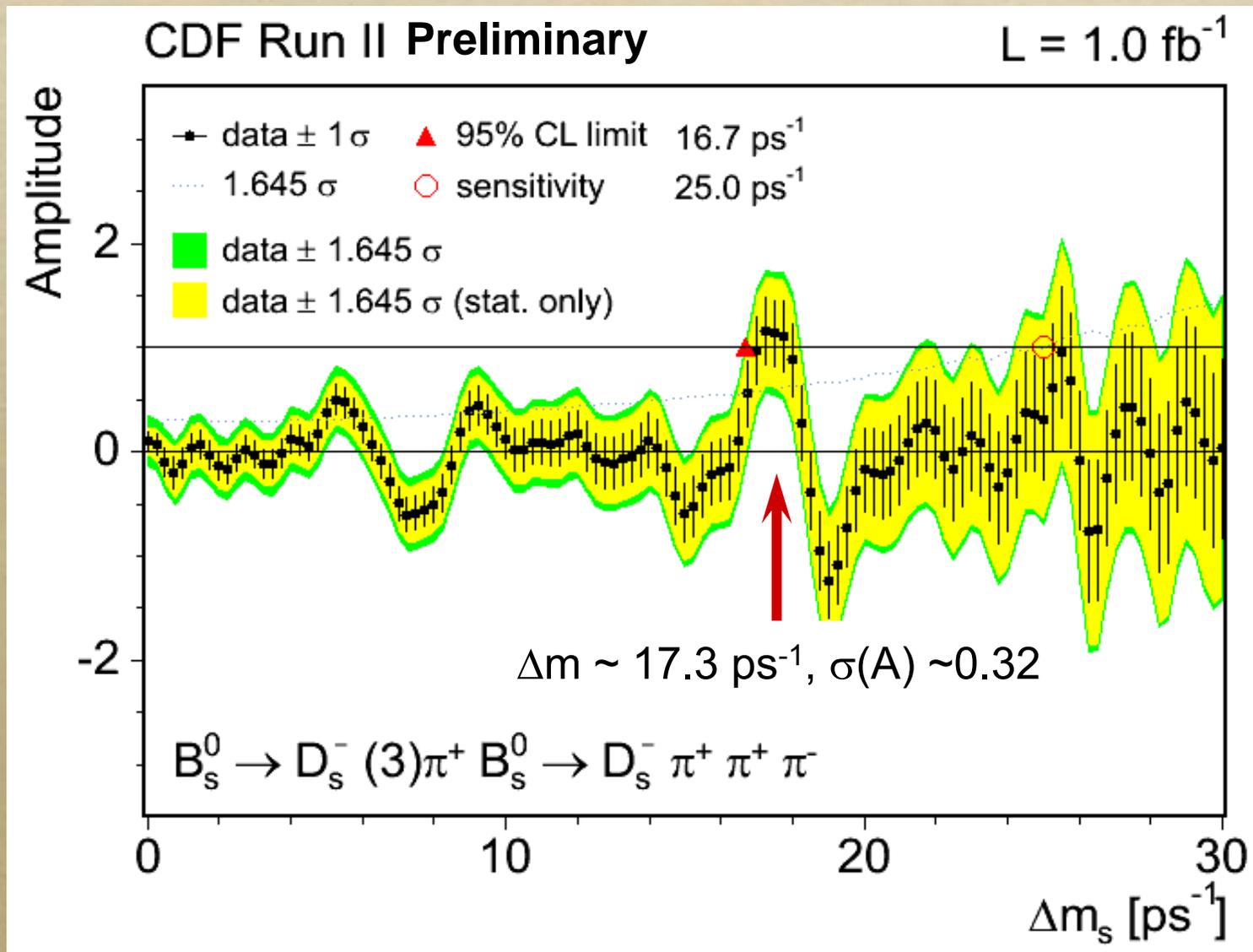
# Stima del p-value



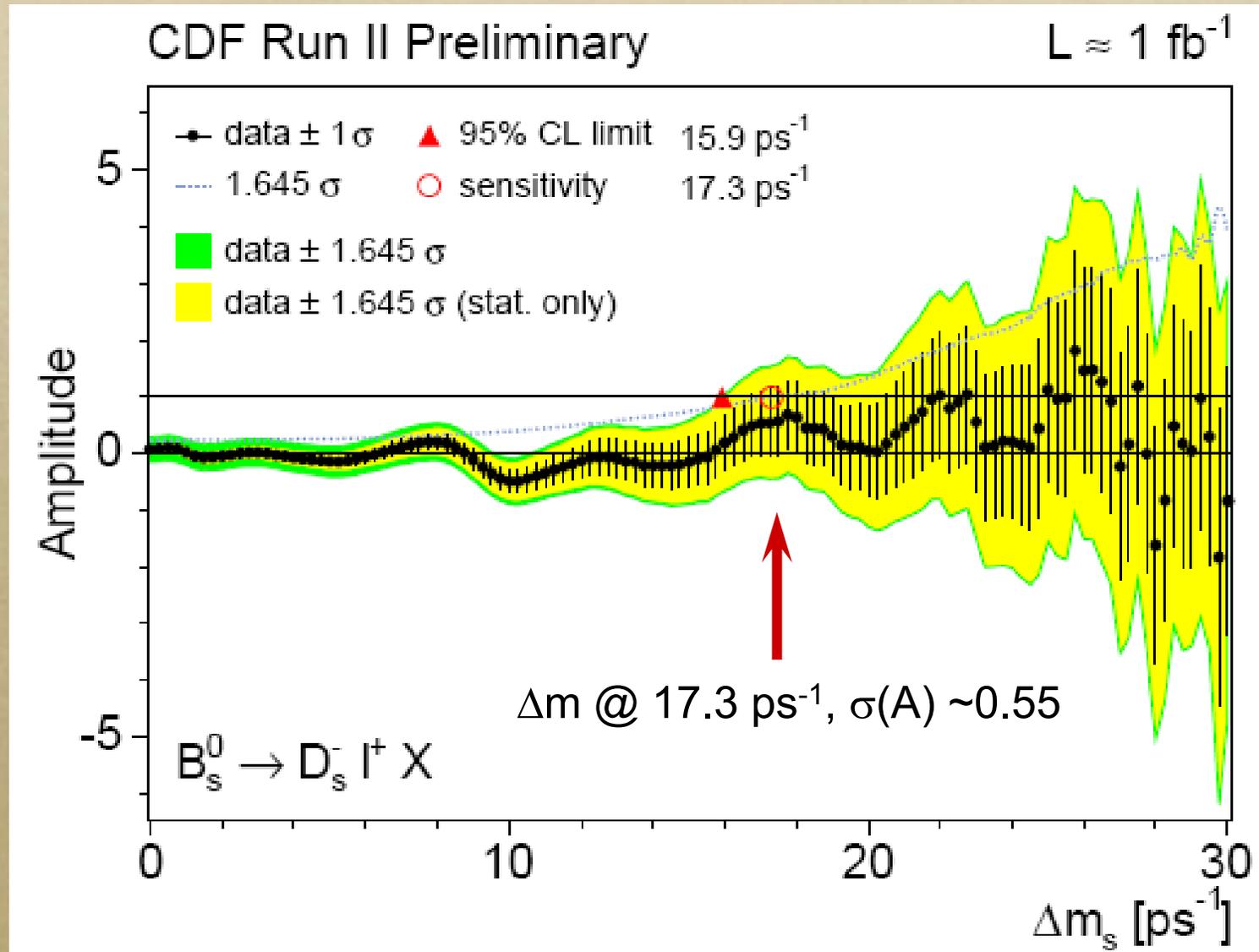
- $\Delta \log(L) = \log[ L(\Delta m_s) / L(\Delta m_s = \infty) ] \rightarrow$  massimo in caso di segnale
- probabilità di fluttuazione casuale stimata su dati reali (con tag randomizzati) e controllata con toy Monte Carlo

# RISULTATI

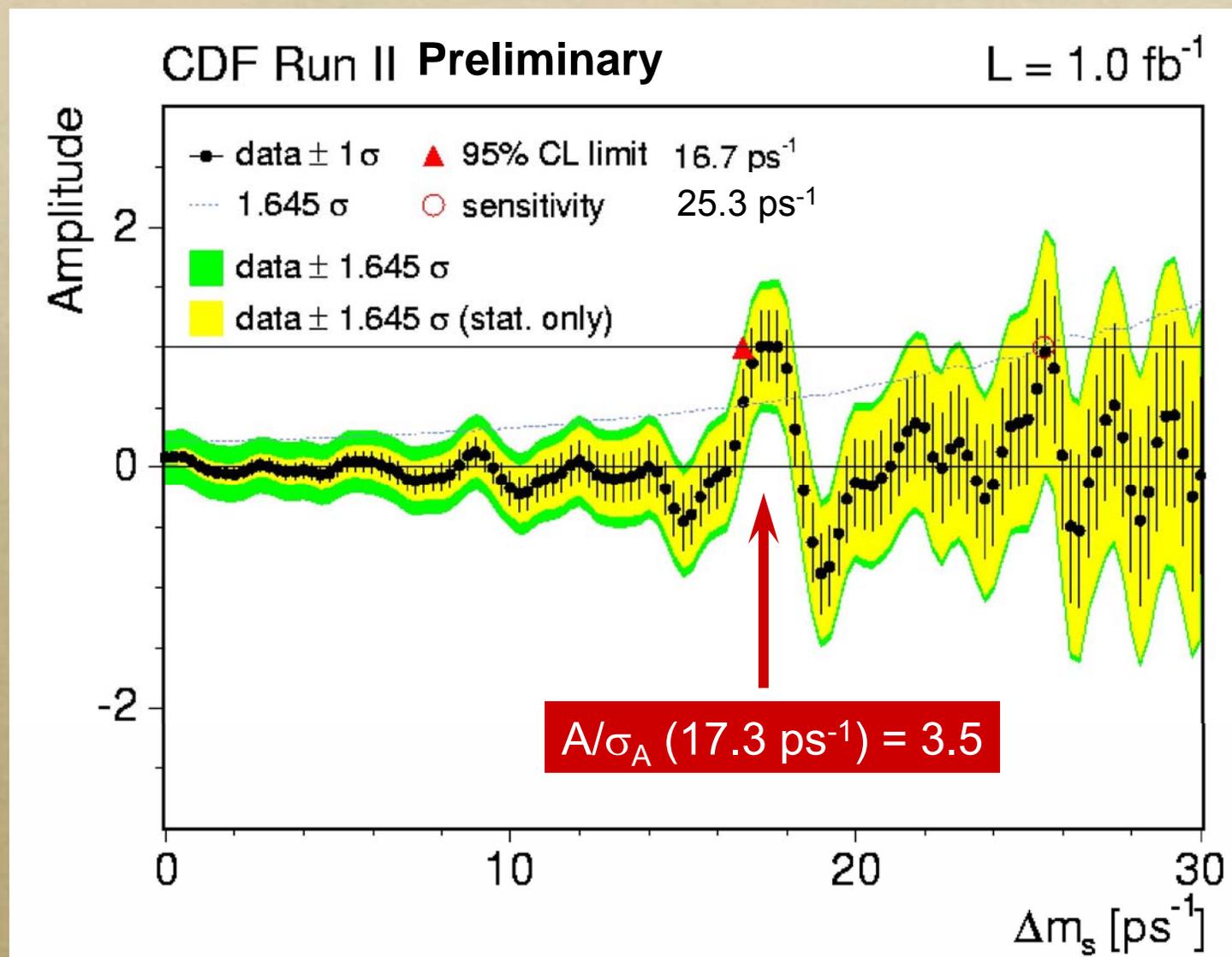
# Amplitude Scan: Decadimenti Adronici<sup>22</sup>



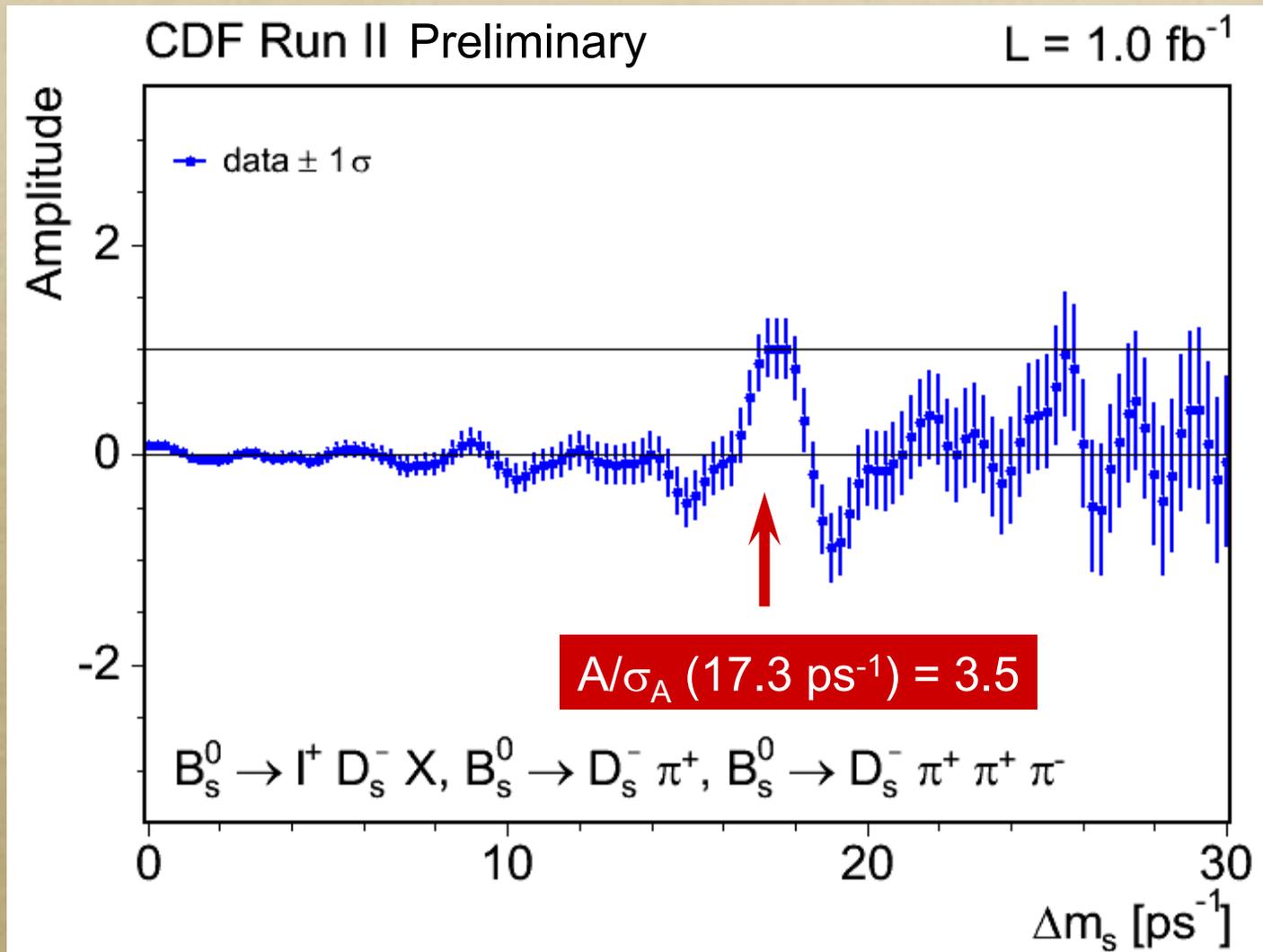
# Amplitude Scan: Semileptonic



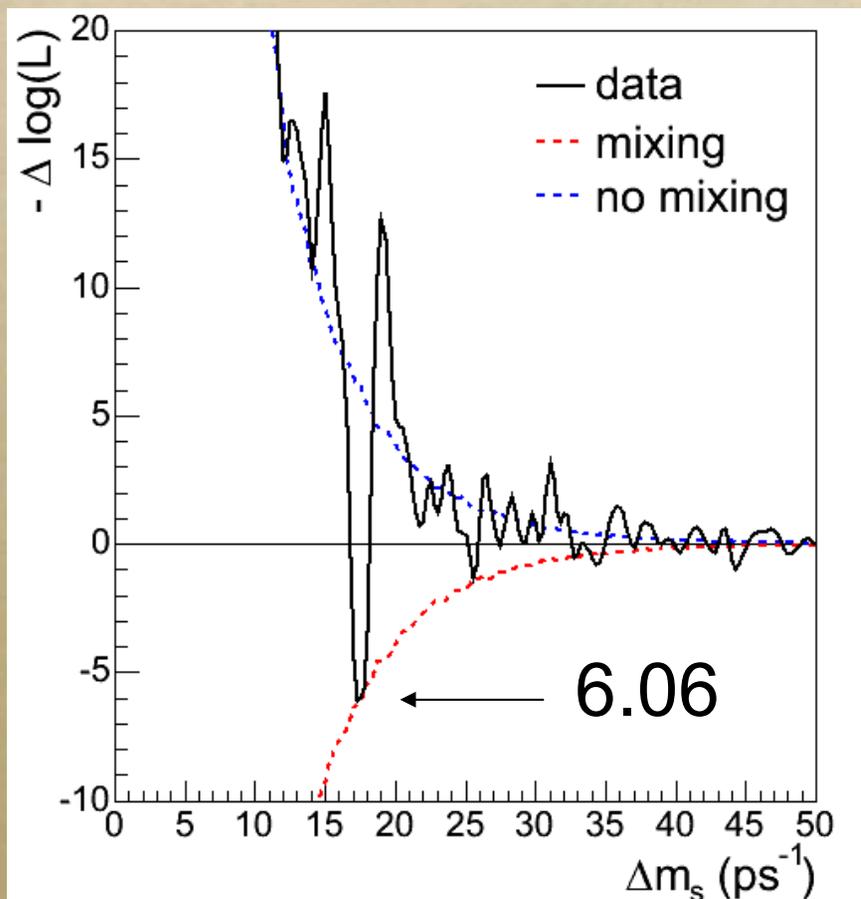
# Amplitude Scan Globale



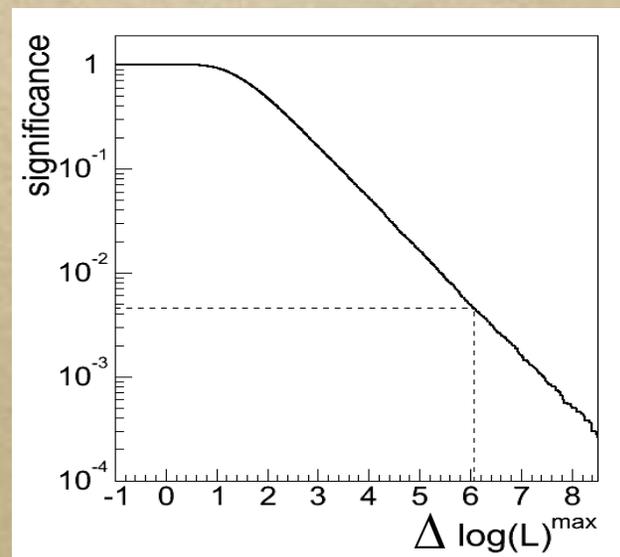
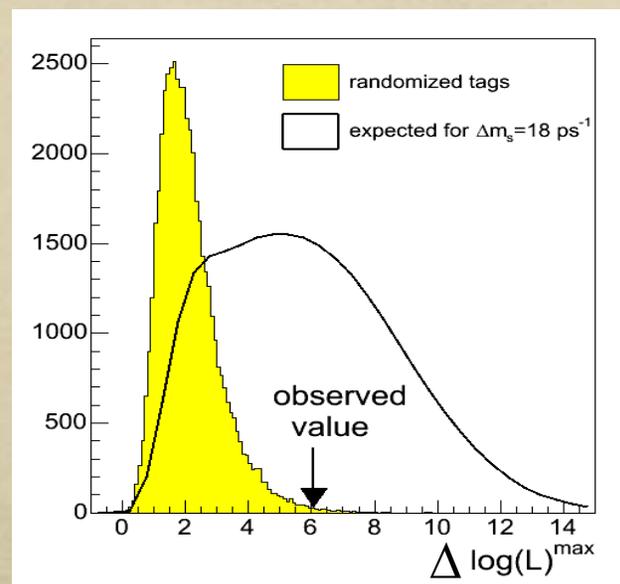
# Amplitude Scan Globale



# Profilo likelihood e significatività



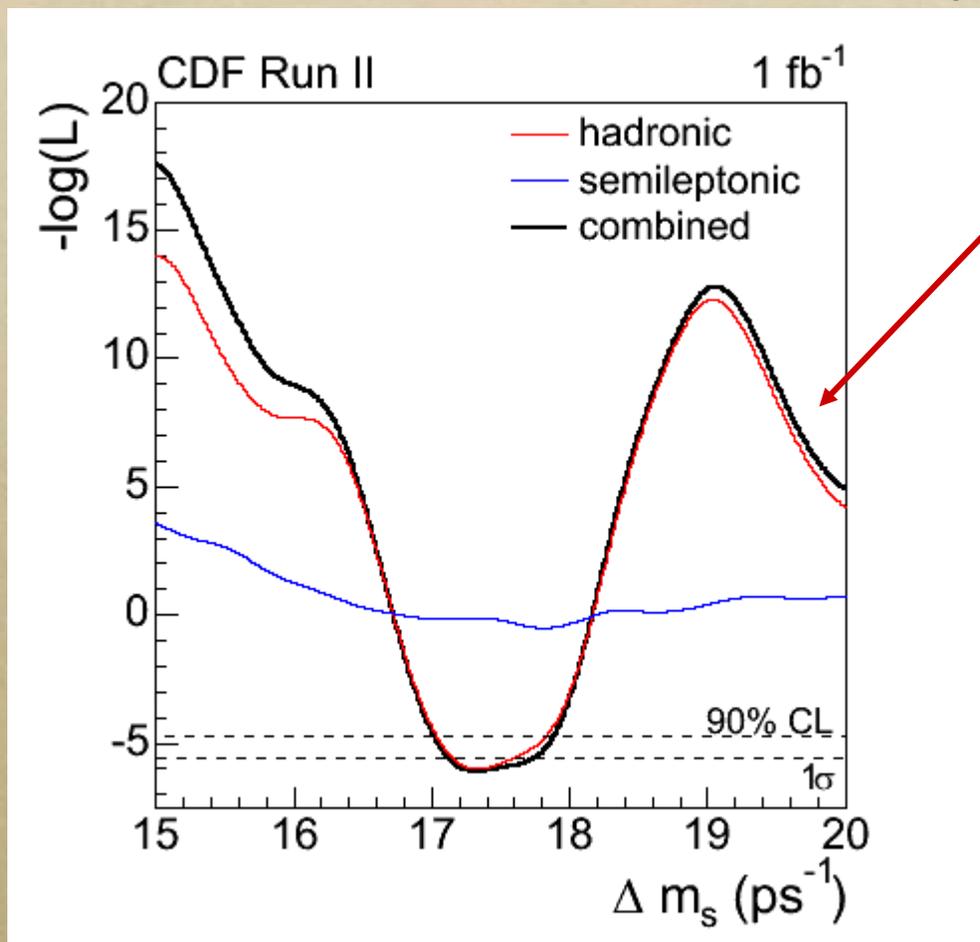
- In 228 su 50000 esperimenti  $\Delta \log(LR) \geq 6.06$
- P-value = 0.5%  $\rightarrow$  misura  $\Delta m_s$ !



# Misura di $\Delta m_s$

Likelihood combinate dei canali  
adronici e semileptonici

27



$$\Delta m_s = 17.33^{+0.42}_{-0.21} (\text{stat.}) \pm 0.07 (\text{syst.}) \text{ ps}^{-1}$$

$\Delta m_s$  in  $[17.00, 17.91] \text{ ps}^{-1}$  at 90% CL

$\Delta m_s$  in  $[16.94, 17.97] \text{ ps}^{-1}$  at 95% CL

# Incertezze sistematiche su $\Delta m_s$

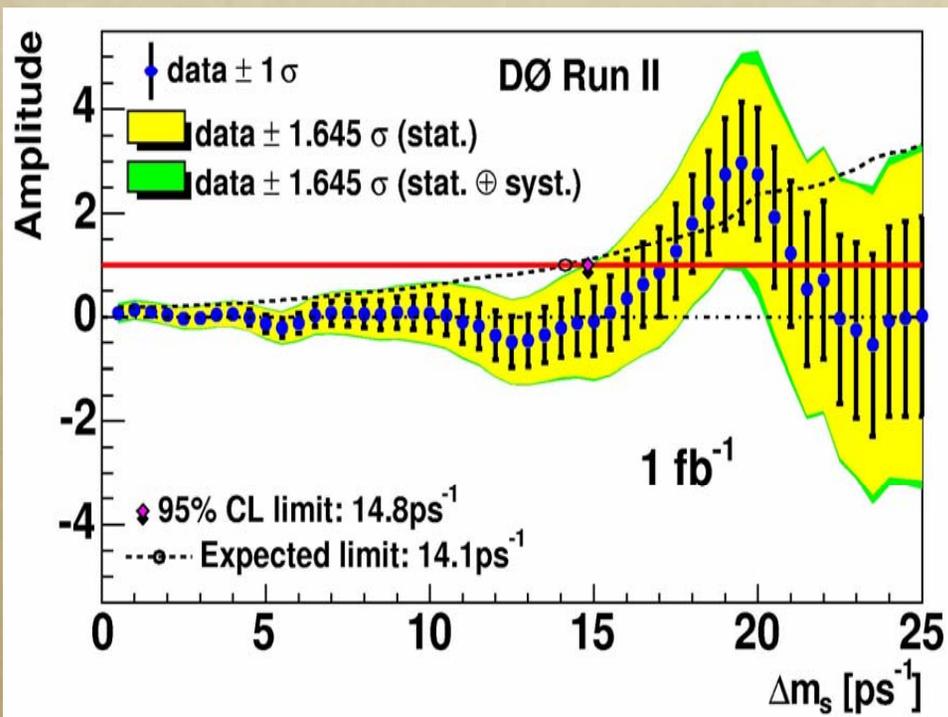
- Systematiche legate al modello di fit valutate su toy Monte Carlo
  - Impatto trascurabile
- Unica sorgente di sistematica non trascurabile: scala assoluta di tempo proprio

	Syst. Unc
Fitting Model	< 0.01 ps <sup>-1</sup>
SVX Alignment	0.04 ps <sup>-1</sup>
Track Fit Bias	0.05 ps <sup>-1</sup>
PV bias from tagging	0.02 ps <sup>-1</sup>
Total	<b>0.07 ps<sup>-1</sup></b>

Tutte le sorgenti di incertezza sistematica rilevanti comuni tra I campioni adronico e semilpetonico

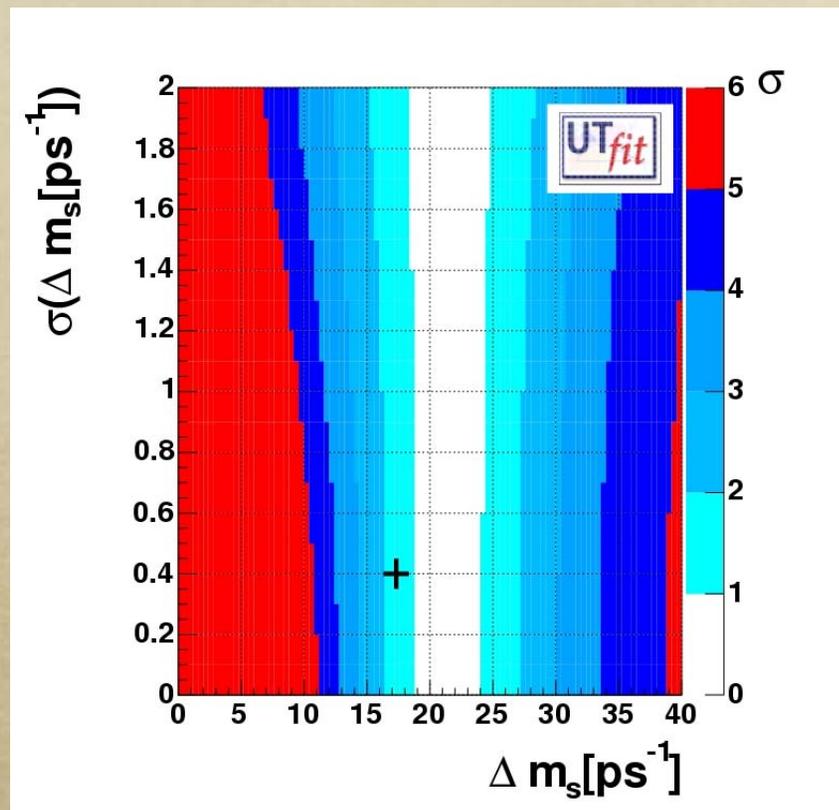
# Confronto con i risultati precedenti

## Recente risultato di D0



$\Delta m_s$  in  $[17,21]\text{ps}^{-1}$  al 90% CL

## Plot di compatibilità con SM

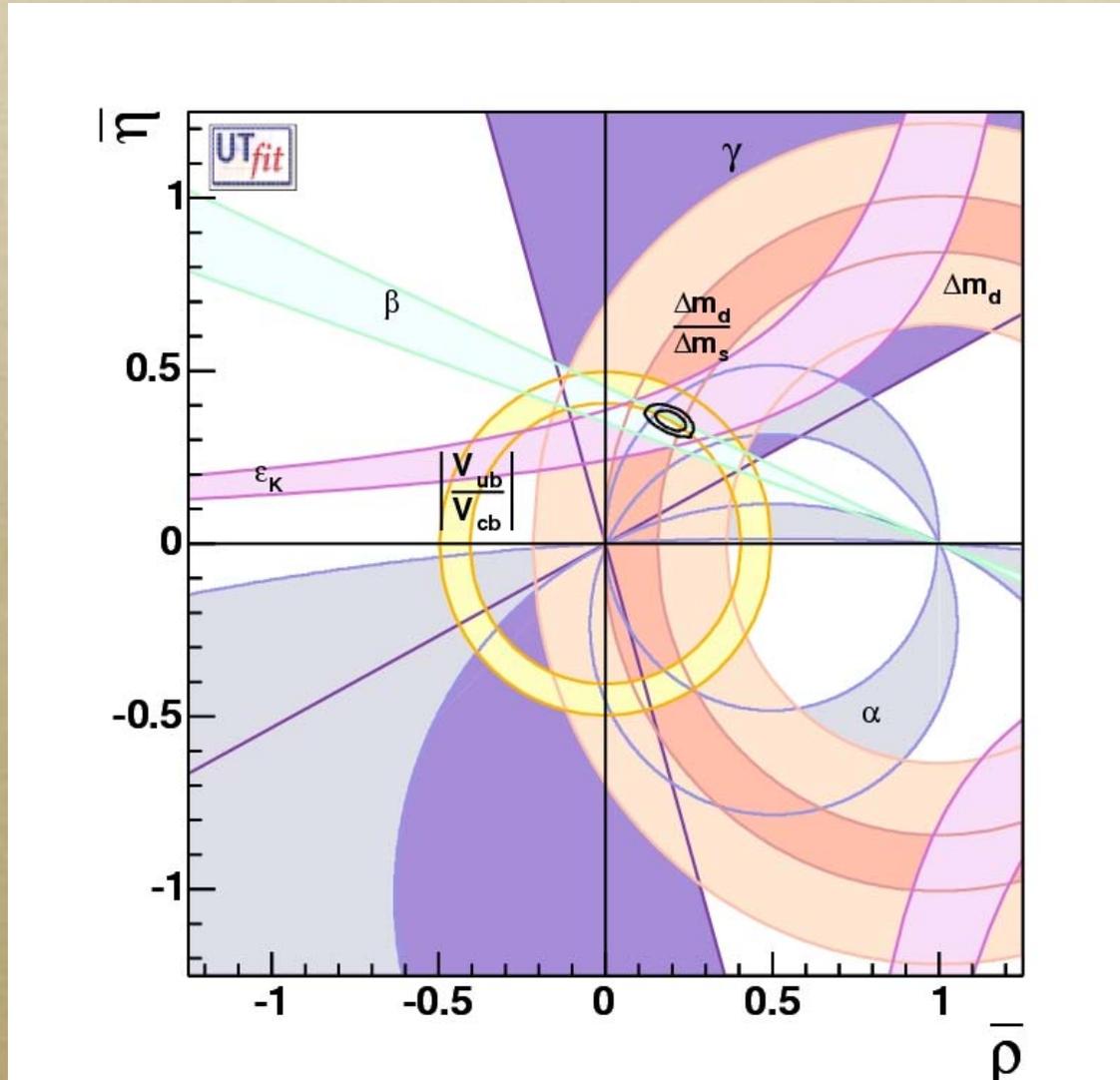


Fit nello SM:  $\Delta m_s = 21.5 \pm 2.6 \text{ps}^{-1}$

CDF:  $\Delta m_s = 17.3 \pm 0.3 \text{ps}^{-1}$

Compatibile a  $1.6\sigma$

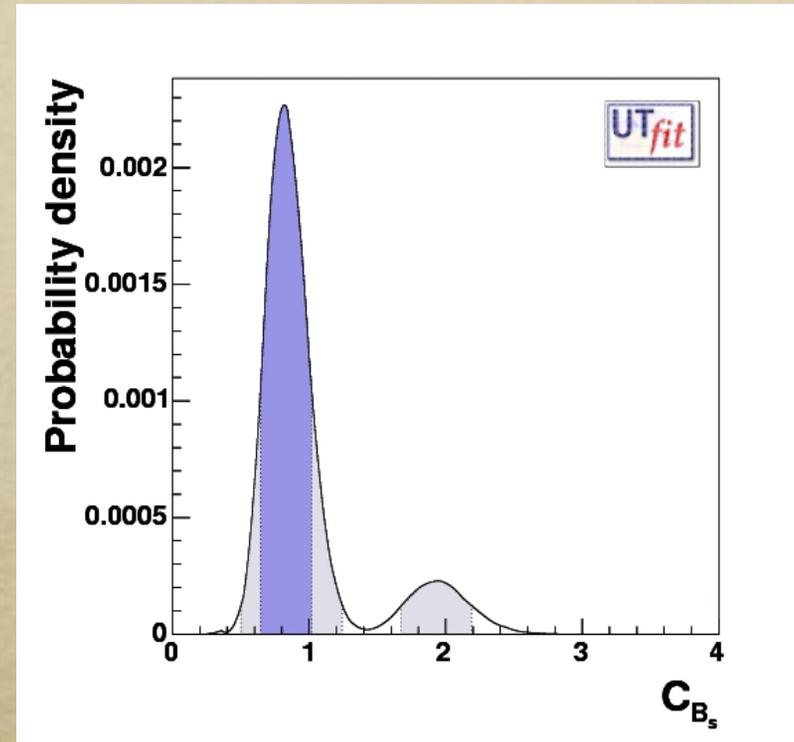
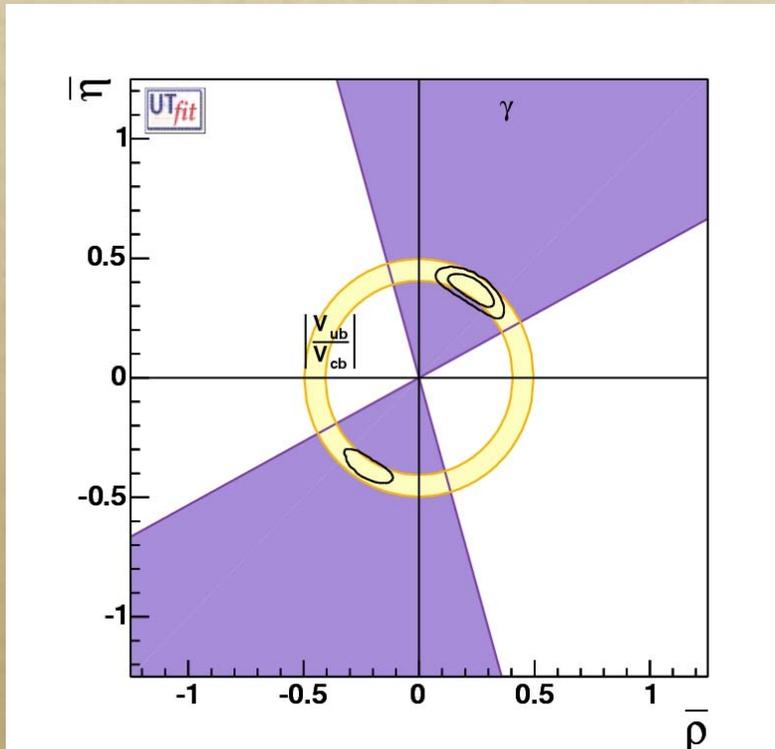
# Fit triangolo di unitarietà nello SM



$$\bar{\rho} = 0.193 \pm 0.029$$

$$\bar{\eta} = 0.355 \pm 0.019$$

Preliminary



Primo bound sul contributo di nuova fisica a  $\Delta m_s$

$$C_{B_s} = \Delta m_s^{\text{SM+NP}} / \Delta m_s^{\text{SM}} = 0.8315 \pm 0.1885$$
$$[0.501, 1.244] \cup [1.675, 2.19] @ 95\%$$

# Conclusioni

- Osservata segnatura sperimentale consistente con oscillazioni di sapore del sistema  $B_s - \bar{B}_s$
- Probabilità di fluttuazione casuale del fondo: 0.5%
- Prima misura diretta della frequenza di oscillazione del mesone  $B_s$ :

$$17.33^{+0.42}_{-0.21}(\text{stat}) \pm 0.07 (\text{syst}) \text{ ps}^{-1}$$