



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 Δm_s
- Interpretazione
 - Analisi preliminare del triangolo di unitarietà



B_s Mixing group

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

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

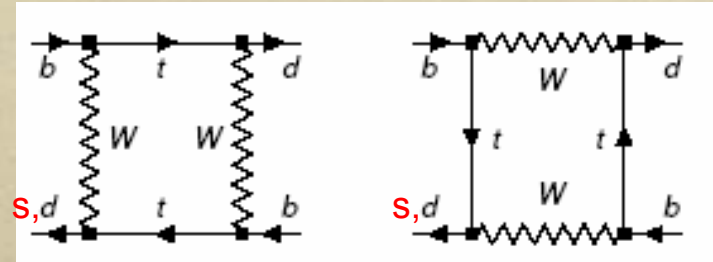
Importanti contributi del gruppo di Roma (TOF, dE/dx, SVT, taggers)

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:

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



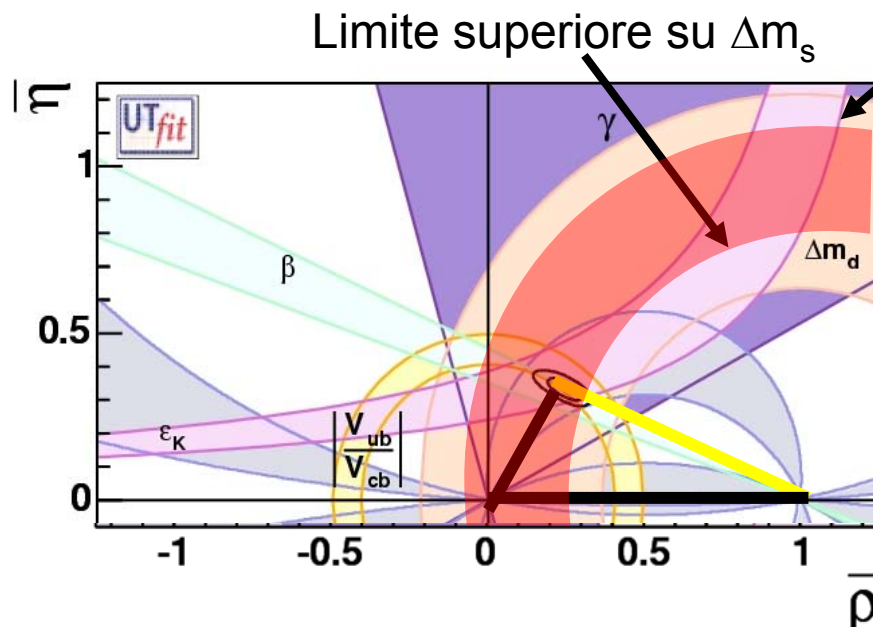
Nel MS processi descritti da diagrammi a box dominati da quark top generano elementi non nulli fuori-diagonale, questi rappresentano la sorgente del mixing.
Nuova fisica può “circolare” nei diagrammi a box.

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

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

Perché è interessante

- misura sperimentale di un fenomeno quantistico interessante
- oggi possibile solo al Tevatron
- migliora la conoscenza del triangolo di unitarietà



Limite inferiore su Δm_s

$$\frac{\Delta m_s}{\Delta m_d} = \frac{m_{B_s}}{m_{B_d}} \frac{f_{B_s}^2 B_{B_s}}{f_{B_d}^2 B_{B_d}} \frac{|V_{ts}|^2}{|V_{td}|^2} = \frac{m_{B_s}}{m_{B_d}} \xi^2 \frac{|V_{ts}|^2}{|V_{td}|^2}$$

- $f_B^2 B_B$ noti al 15%
- Molte incertezze teoriche si cancellano nel rapporto:
 - $\xi = 1.210_{\pm 0.047} \pm 0.035$
 - Si determina $|V_{ts}|/|V_{td}|$ al $\sim 4\%$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

Perché non è stato ancora misurato

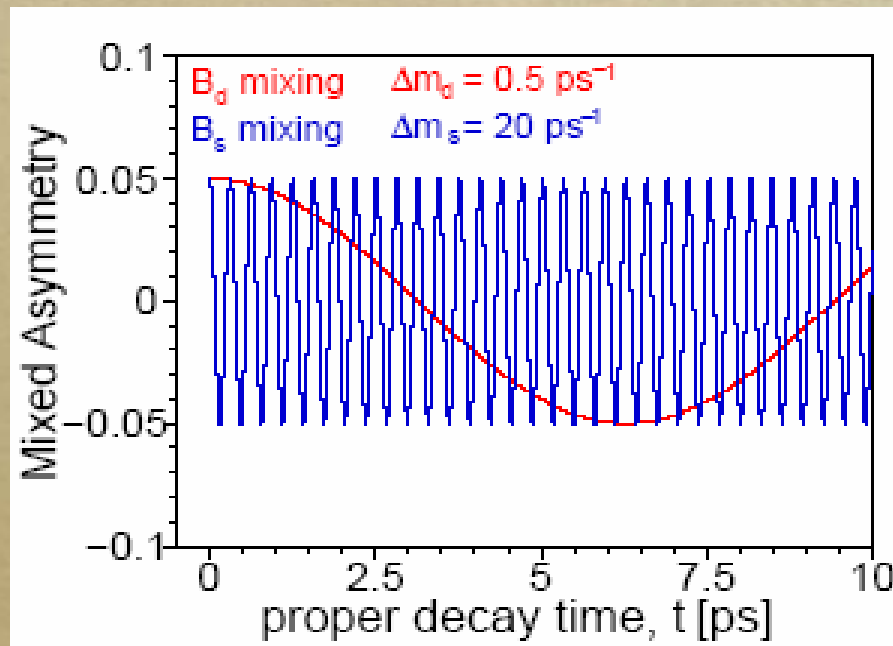
Probabilità di oscillazione in funzione del tempo:

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

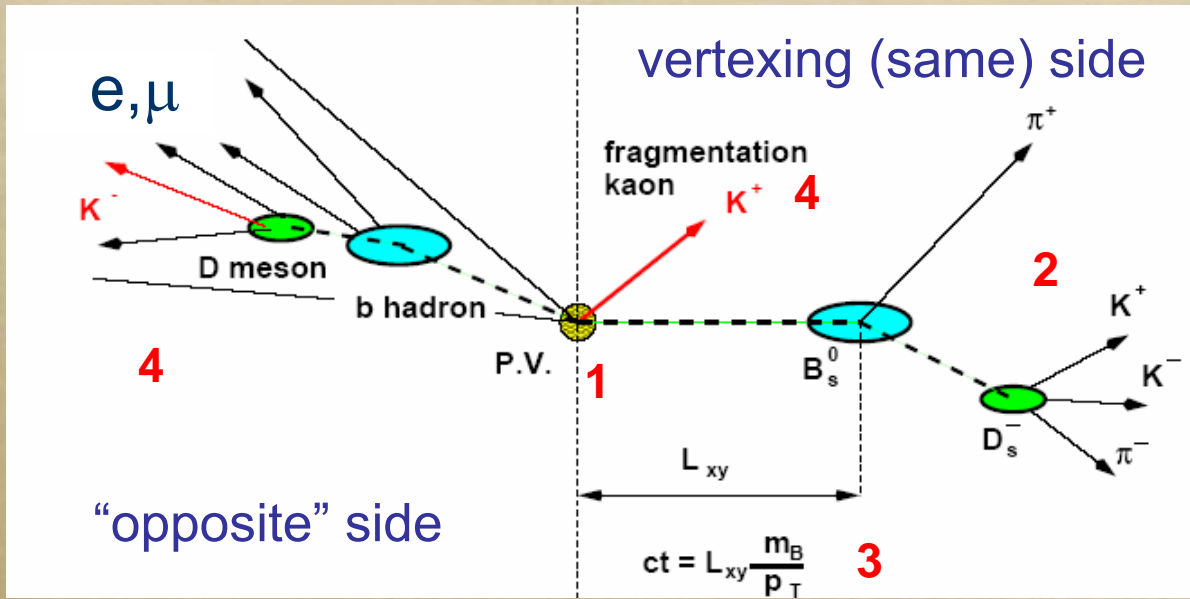
$$P(B \rightarrow \bar{B}) = \frac{e^{-t/\tau}}{2\tau} (1 - \cos(\Delta m \cdot t)) = P_{mix}$$

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

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



I punti chiave della misura in una trasparenza



Potenza statistica di un tagger: ϵD^2

ϵ : 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

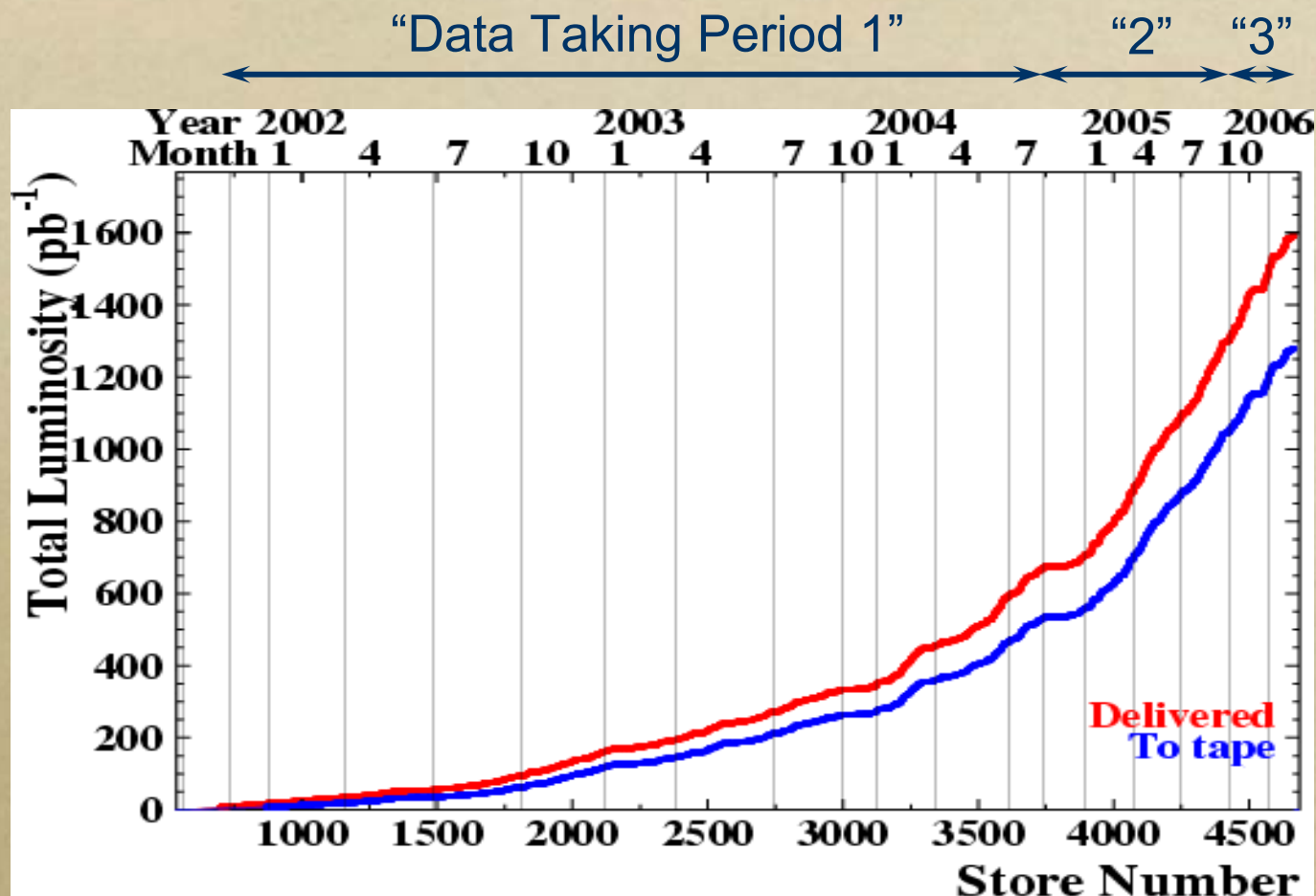
- trigger, rivelatore di vertice, vertice primario evento per evento

4. Stima del sapore del B_s alla produzione (flavor tagging)

- minimizzare la rate di tag sbagliati: PID (TOF, dE/dx)

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

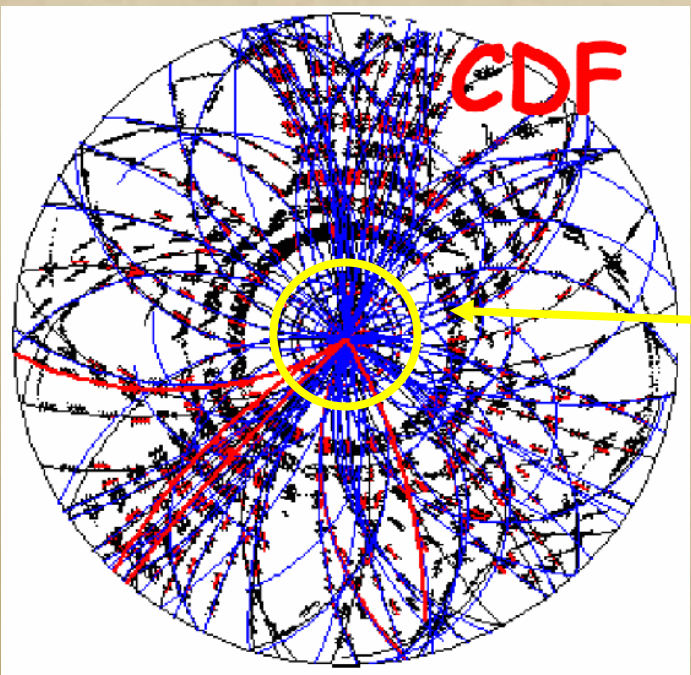
Luminosità del Tevatron



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

Silicon Vertex Tracker

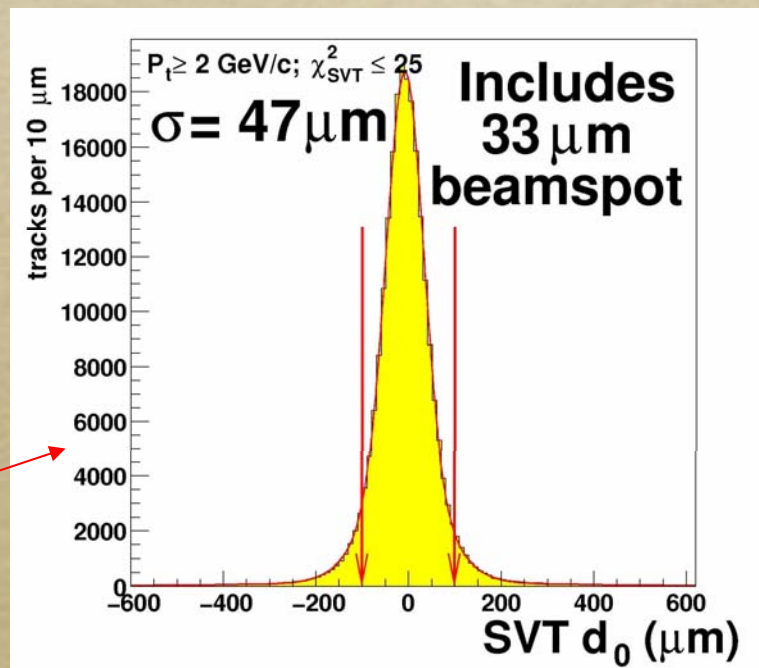
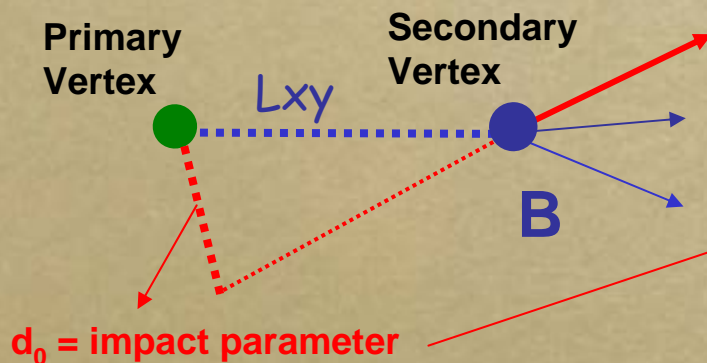
Un tipico evento B_s in un collider adronico ...



... 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)

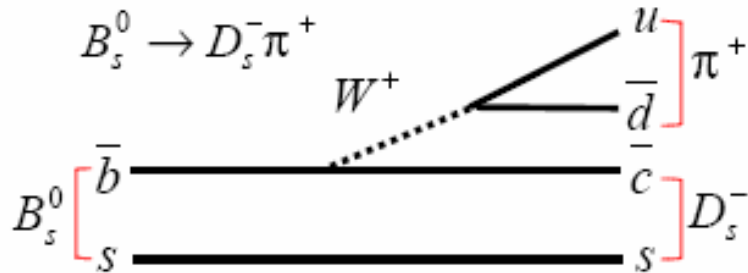


Accesso ai decadimenti totalmente ricostruiti → cruciale per l'analisi di mixing

Ricostruzione dei B_s

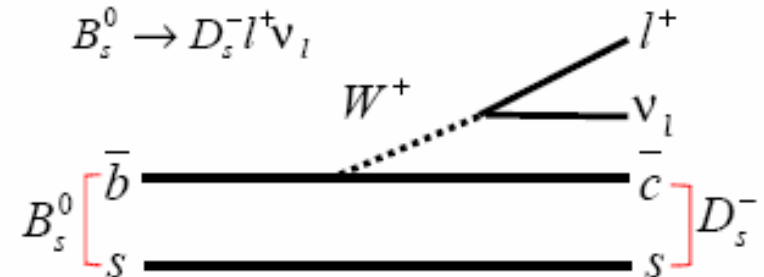
Due differenti topologie sperimentali:

“Hadronic”



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

“Semileptonic”



Missing momentum (ν)
Need to rely on D_s mass
Large branching ratio high yield

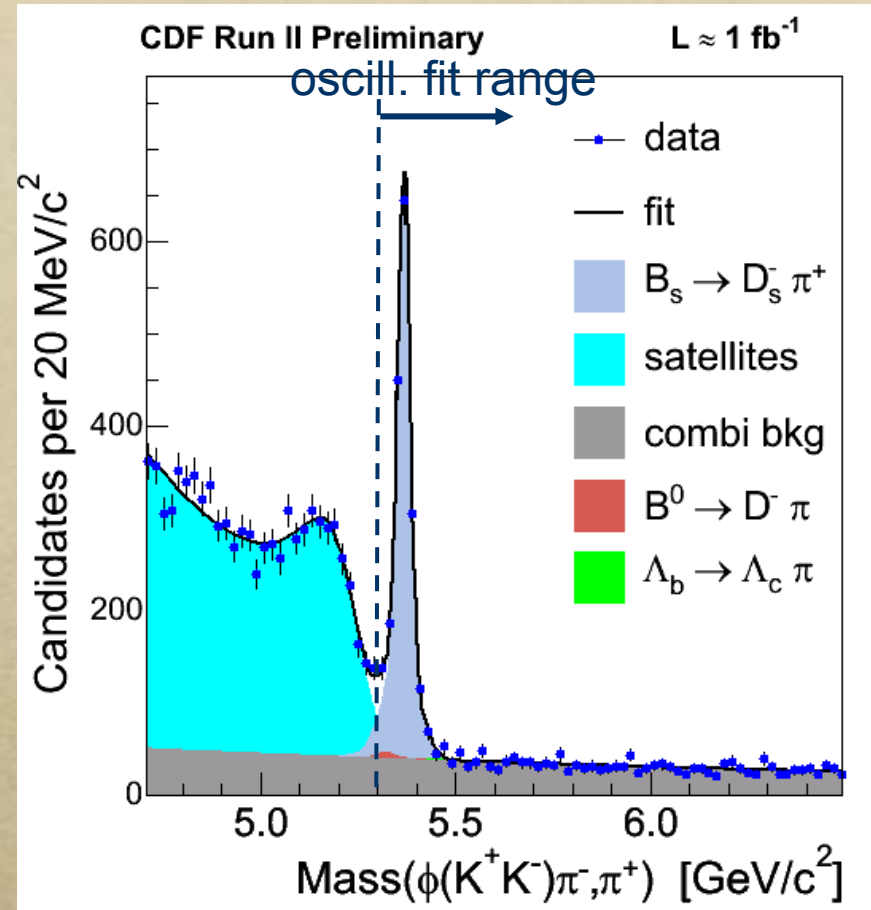
Buona sensibilità ad alto Δm_s

Buona sensibilità a basso Δm_s

B_s “Adronici”: data sample

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

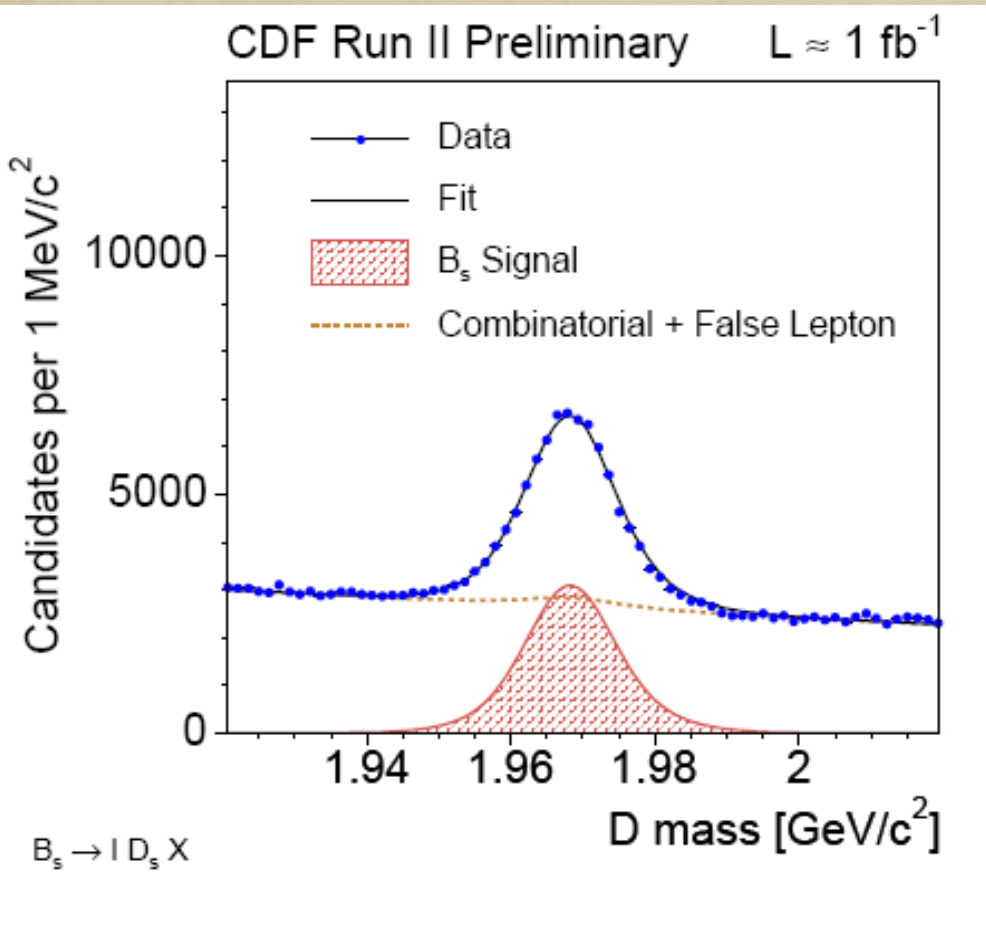
Decadimento	Eventi
$B_s \rightarrow D_s \pi (\phi \pi)$	1600
$B_s \rightarrow D_s \pi (K^* K)$	800
$B_s \rightarrow D_s \pi (3\pi)$	600
$B_s \rightarrow D_s 3\pi (\phi \pi)$	500
$B_s \rightarrow D_s 3\pi (K^* K)$	200
Totale	3700



- 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

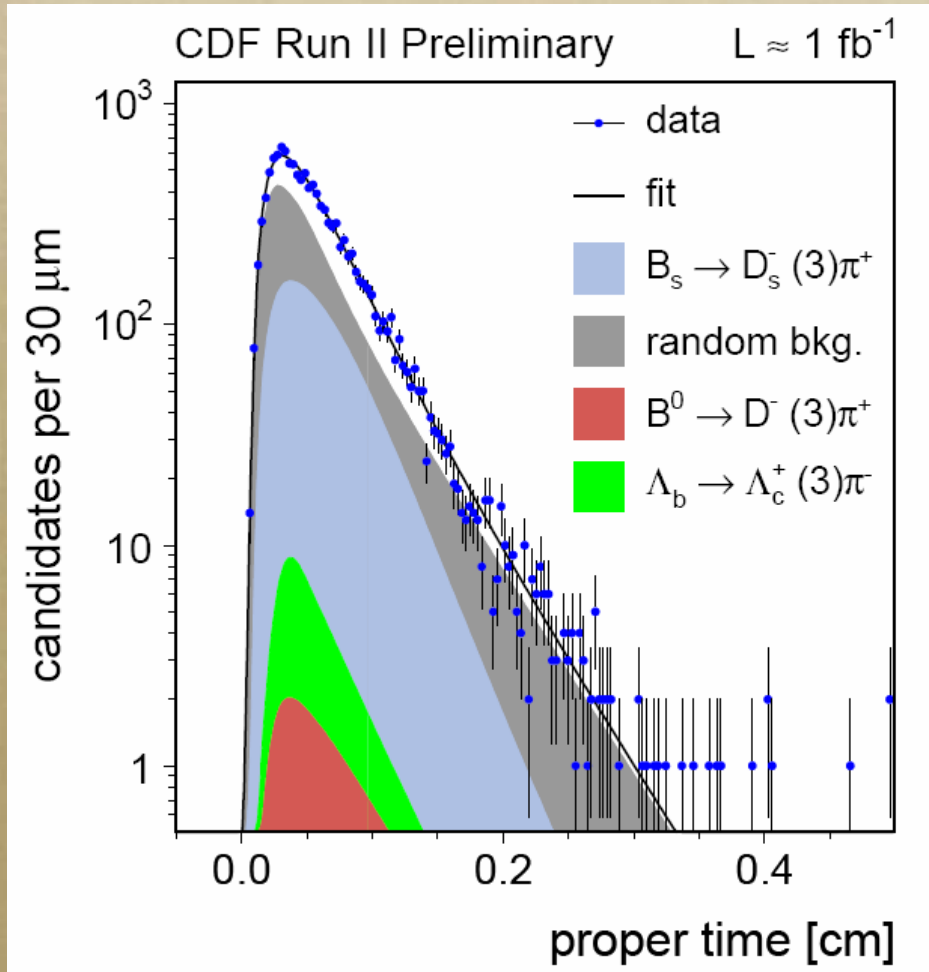
$$B_s \rightarrow D_s l \nu$$



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 ± 0.017
$B^- \rightarrow D^0 \pi^-$	1.638 ± 0.017
$B_s \rightarrow D_s \pi(\pi\pi)$	1.538 ± 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”

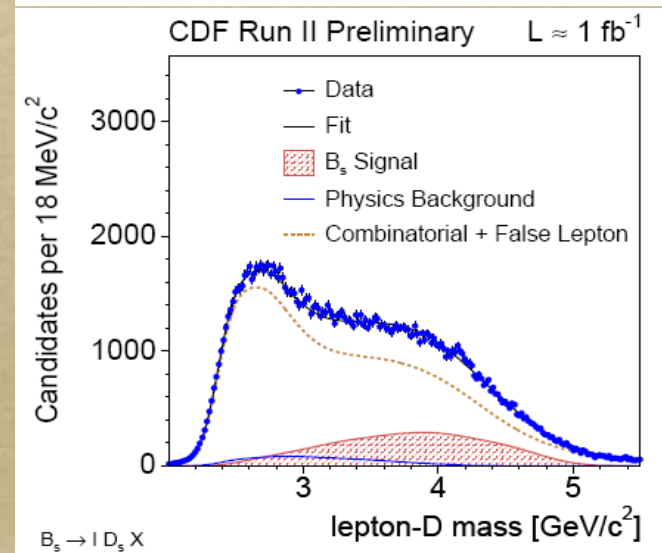
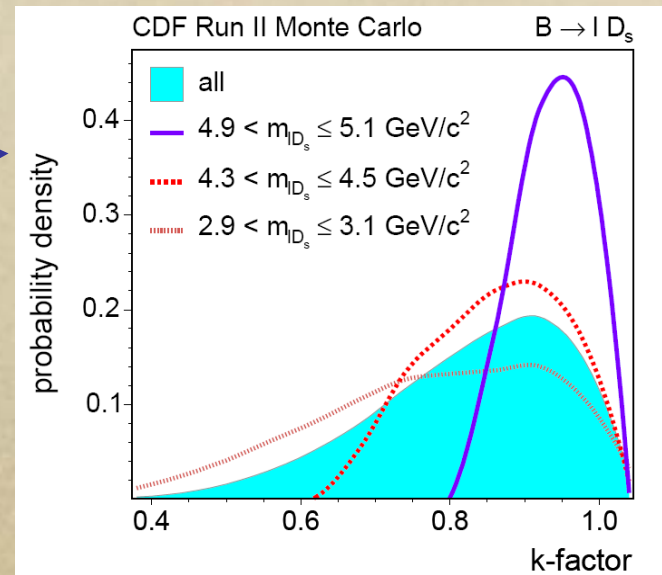
Ulteriore complicazione: l'impulso del neutrino non è ricostruito
 Si introduce un “K” factor per correggere in media l'effetto:

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

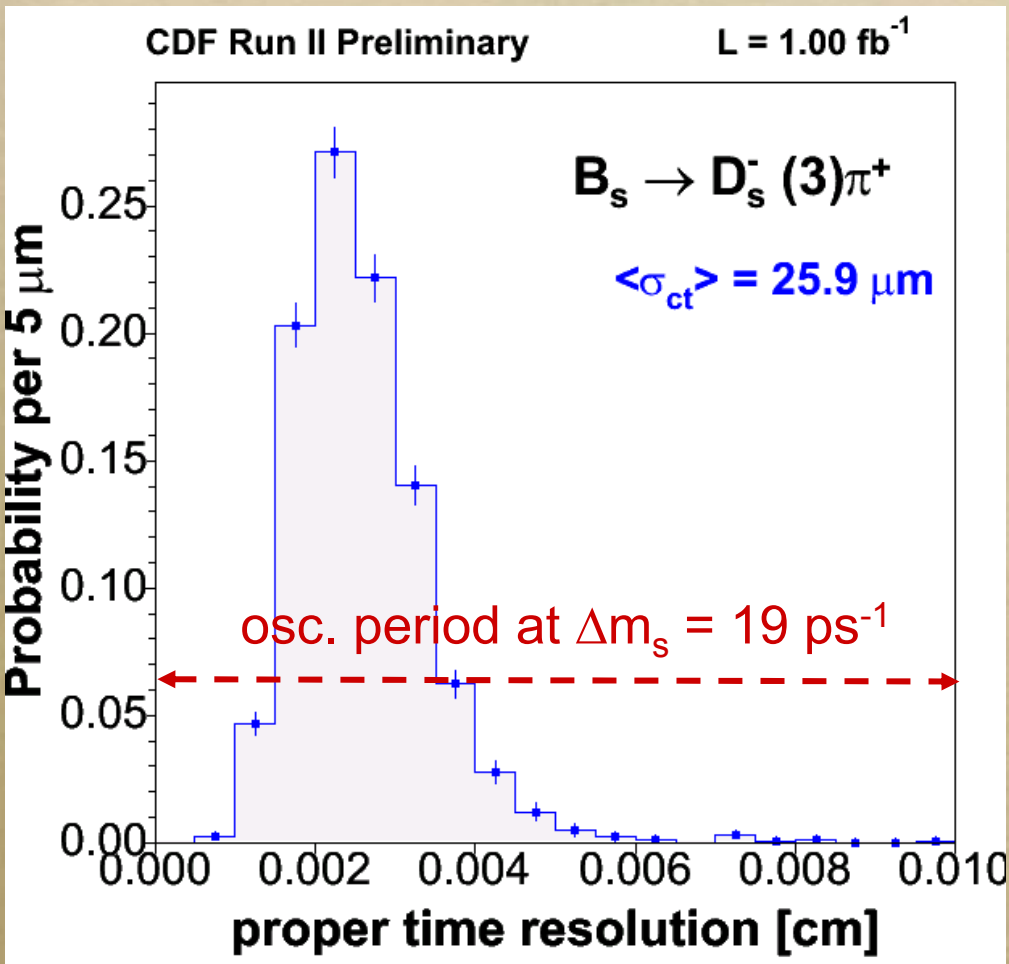
CDF Preliminary 360 pb⁻¹

B _s → D _s l ν	Lifetime (ps) (stat.)
D _s → φπ	1.51±0.04
D _s → K*K	1.38±0.07
D _s → πππ	1.40±0.09
Combinato	1.48±0.03

Media Mondiale B_s: (1.469±0.059) ps

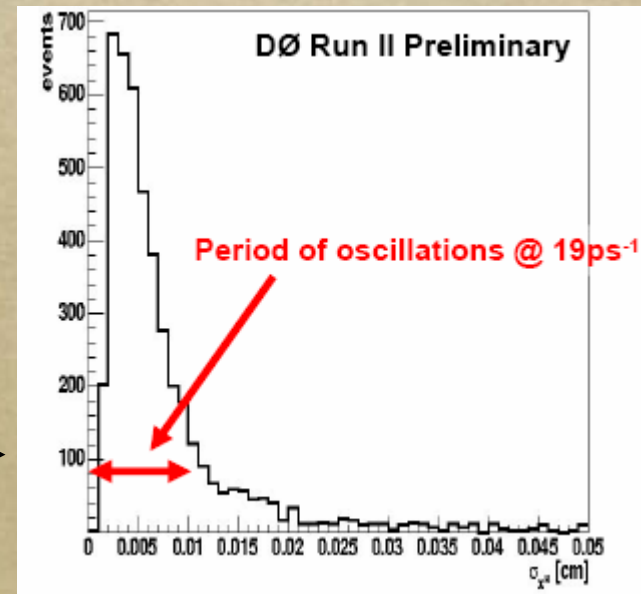


B_s : Risoluzione in tempo proprio



- 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

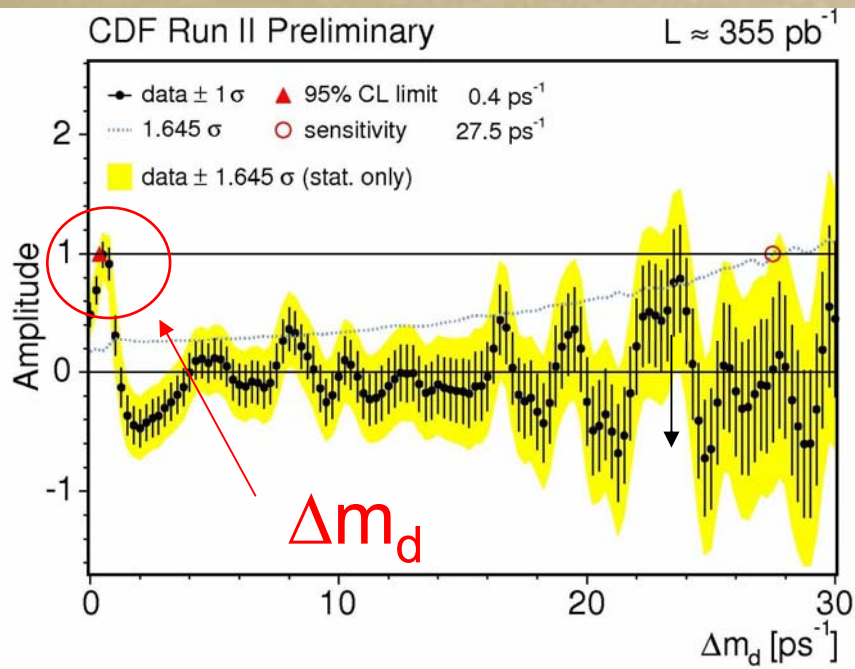


Prestazione combinata dei taggers

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

Amplitude scan

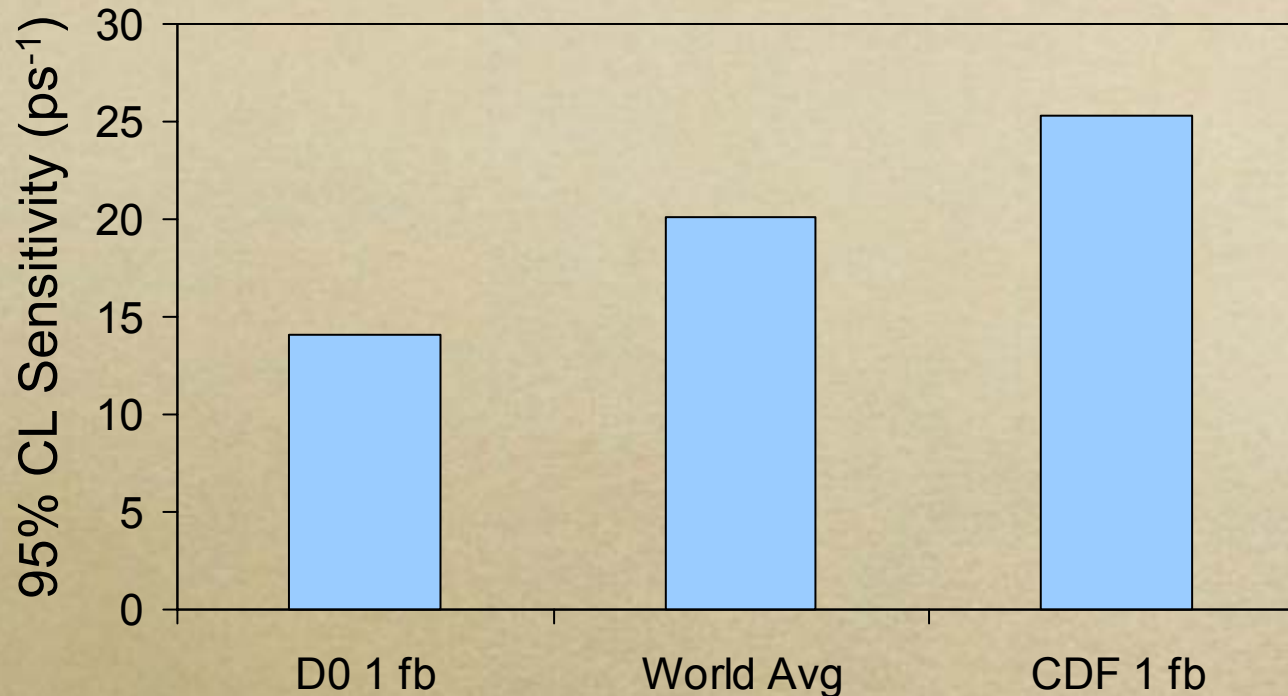
- Metodo classico per il fit di mixing:
 - si introduce l'ampiezza A : $p(t) \sim (1 \pm A D \cos \Delta m_s t)$
 - $A=1$ ($\pm \text{stat}$) per $v=\Delta m_s$
 - $A=0$ per $|v-\Delta m_s| \gg \Gamma \oplus \sigma_p/p \cdot \Delta m_s$
 - “scan” attraverso differenti valori di Δm_s fittando A
 - segnale: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



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

Δm : $A + 1.645 \sigma(A) < 1$ 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%?

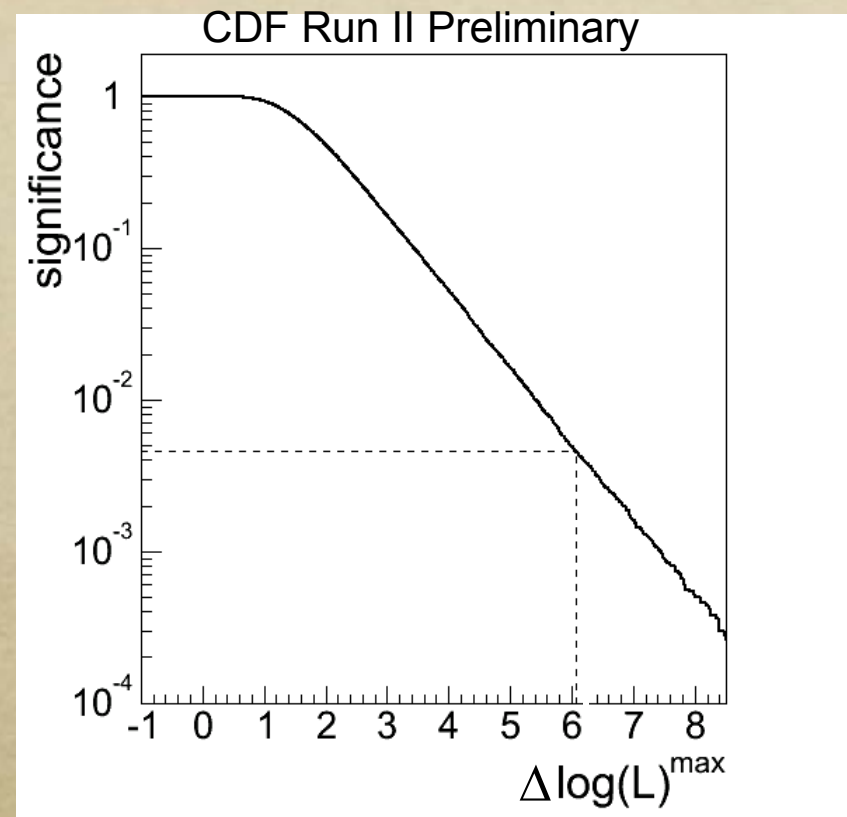
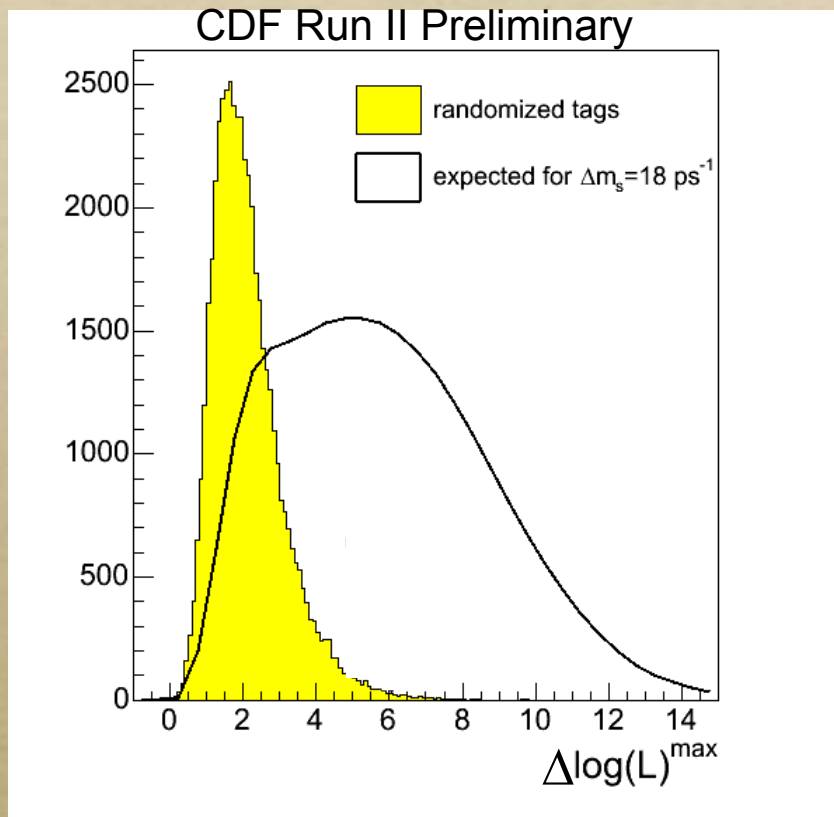
SI

NO

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

95% CL limit
utilizzando l'amplitude scan

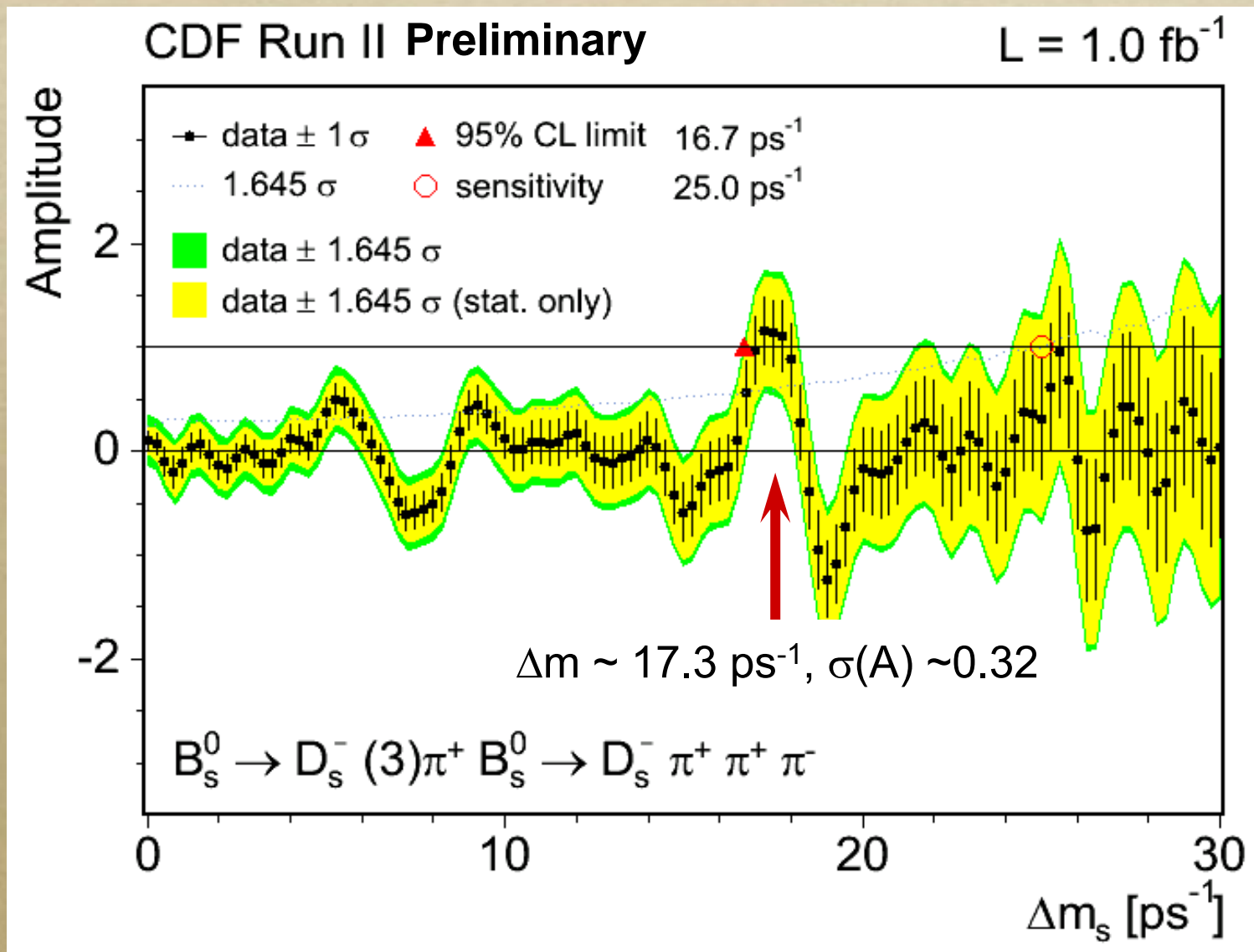
Stima del p-value



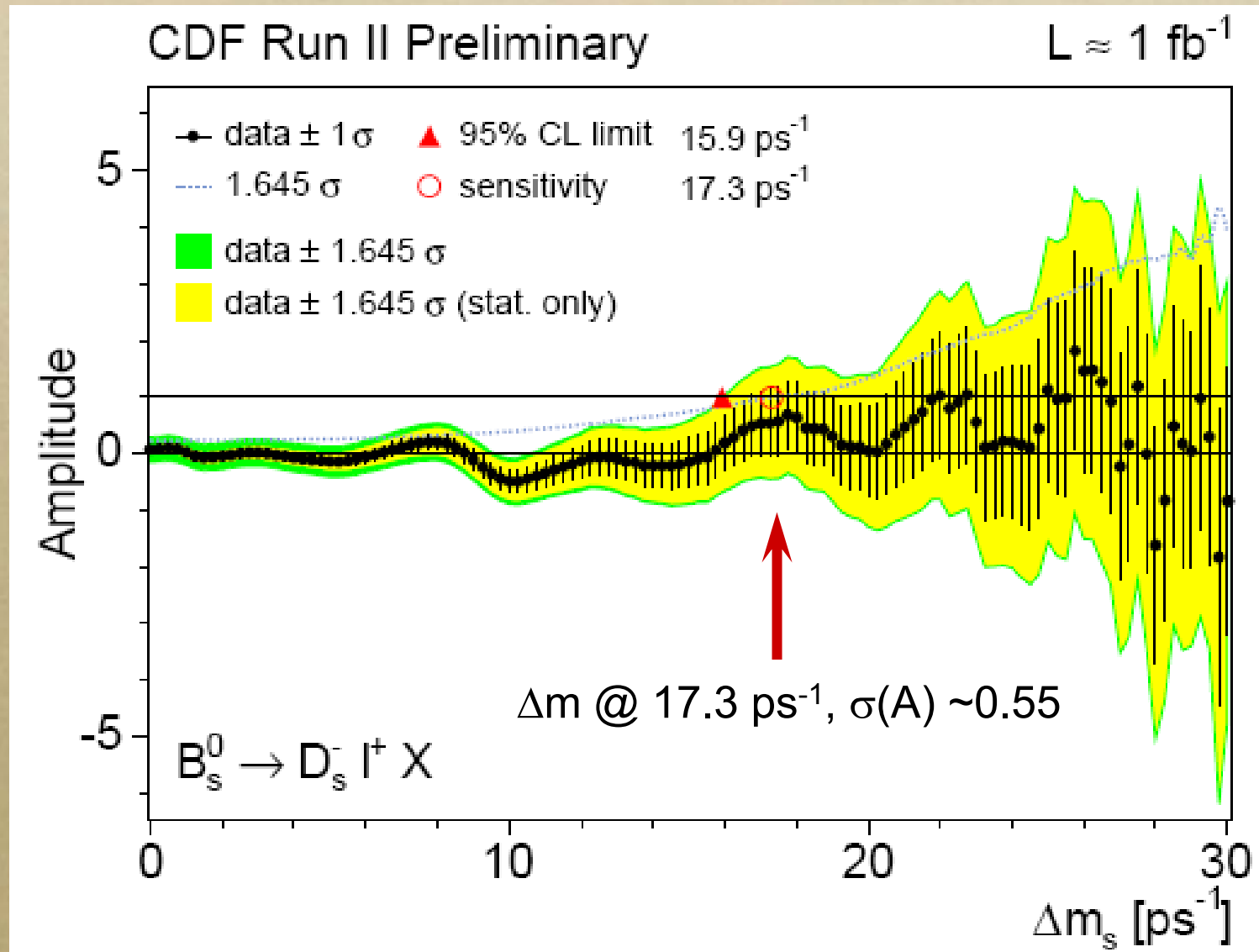
- $\Delta \log(L) = \log[L(\Delta m_s) / L(\Delta m_s = \infty)] \rightarrow$ massimo in caso di segnale
- probabilità di fluttuazione casuale stimata su dati reali (con tag randomizzati) e controllata con toy Monte Carlo

RISULTATI

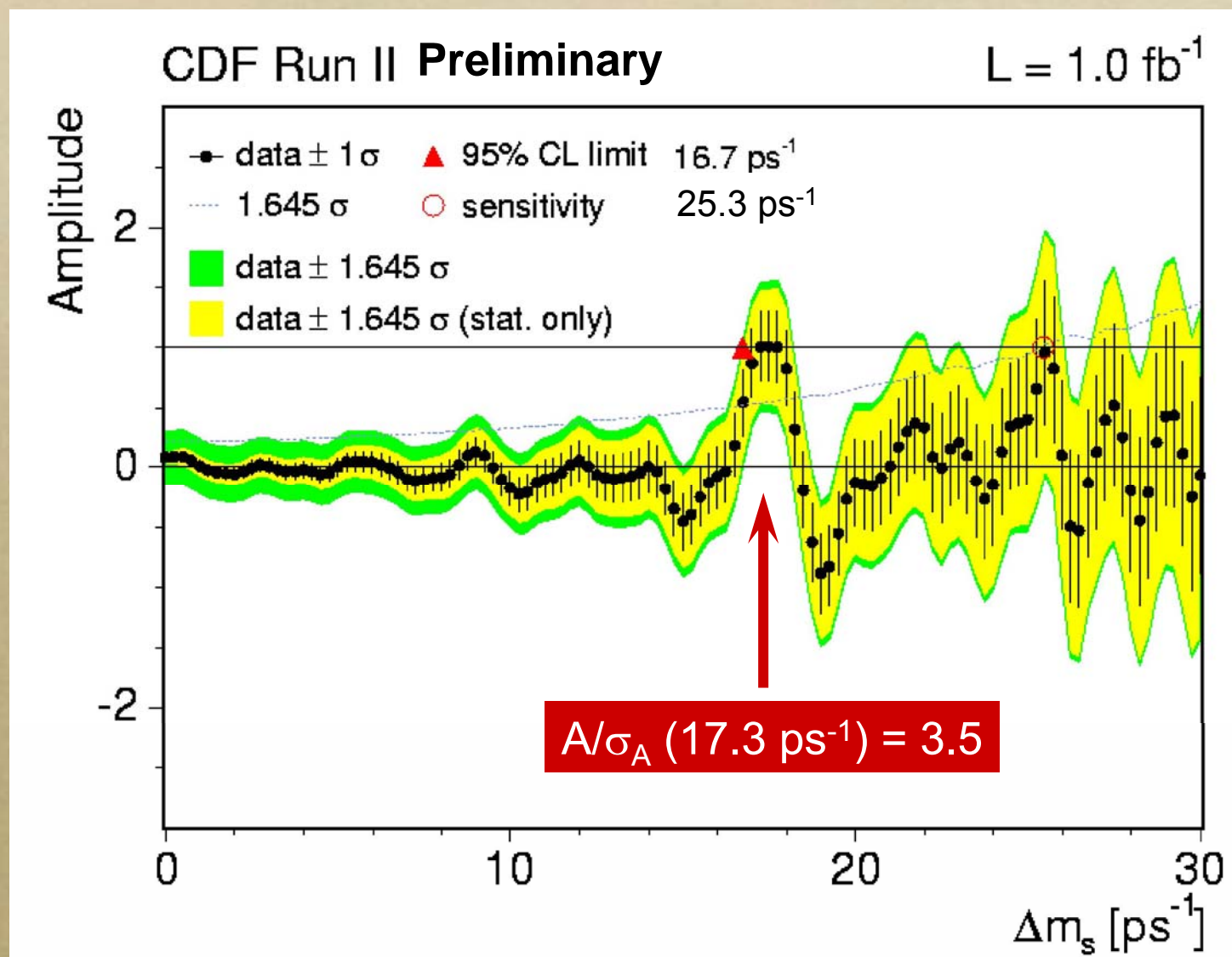
Amplitude Scan: Decadimenti Adronici²²



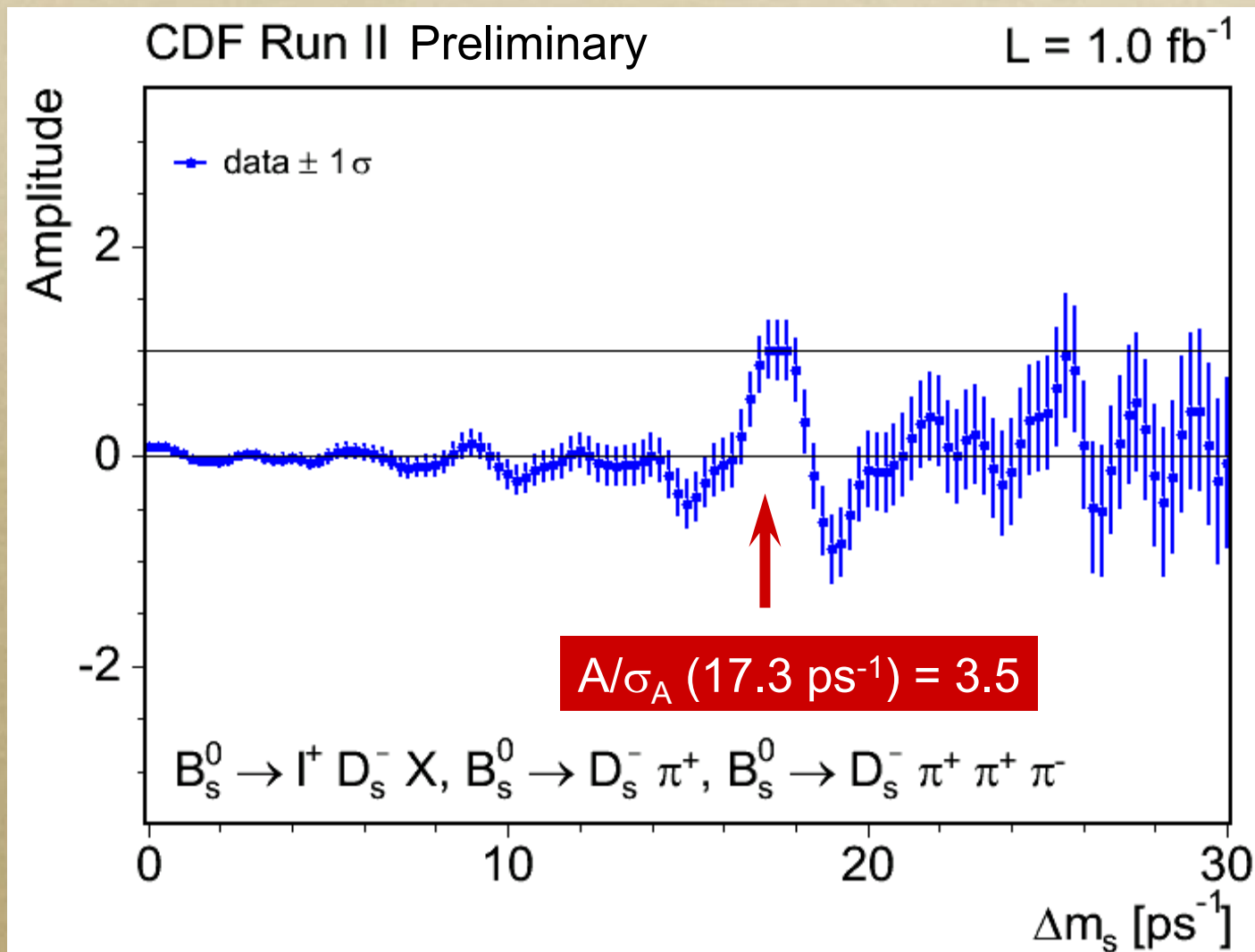
Amplitude Scan: Semileptonic



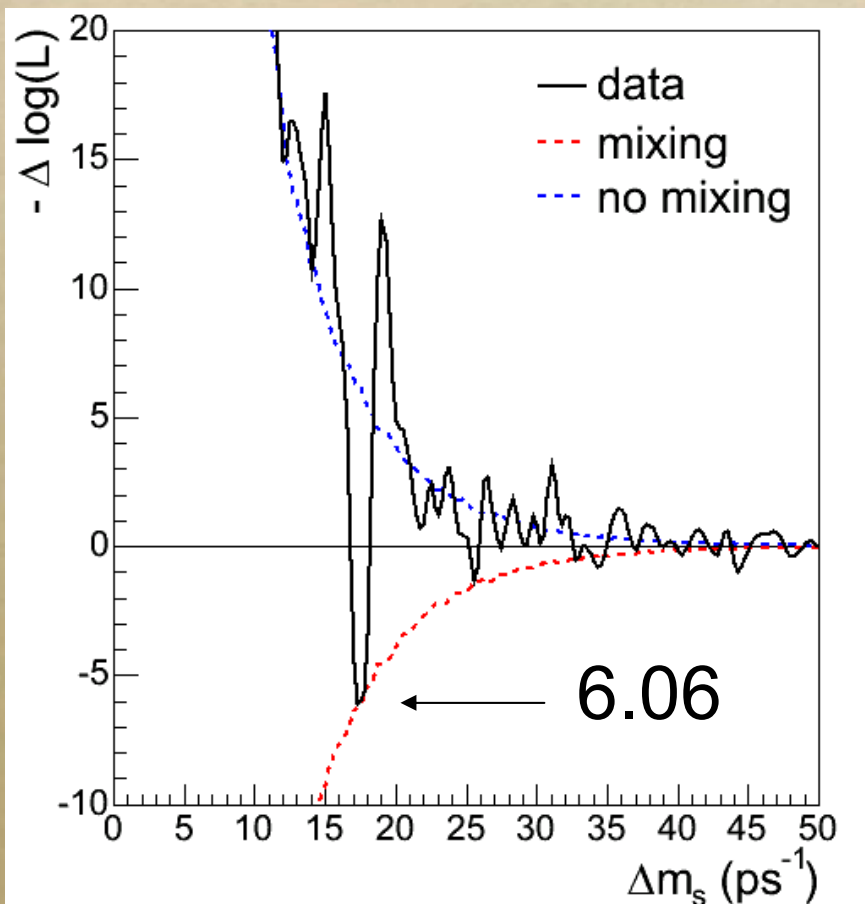
Amplitude Scan Globale



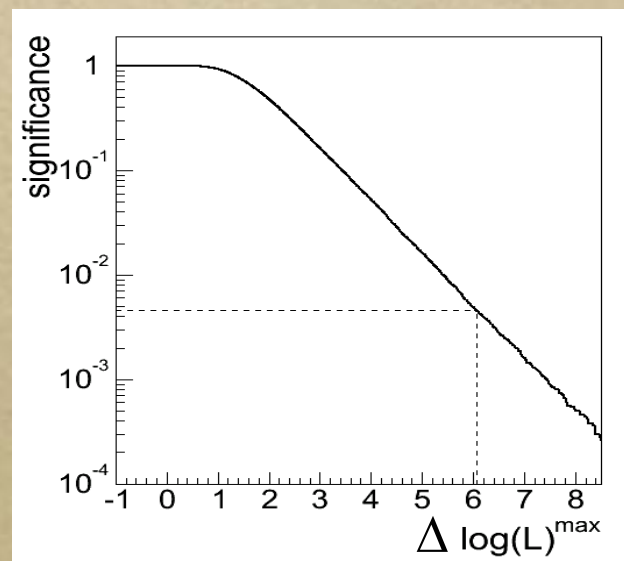
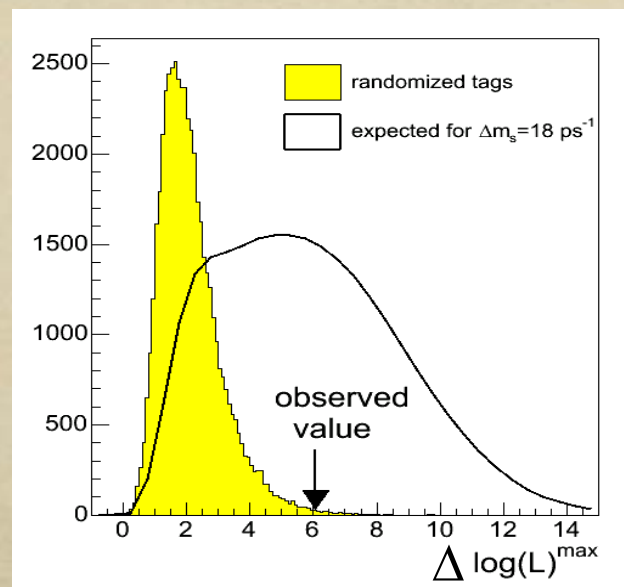
Amplitude Scan Globale



Profilo likelihood e significatività



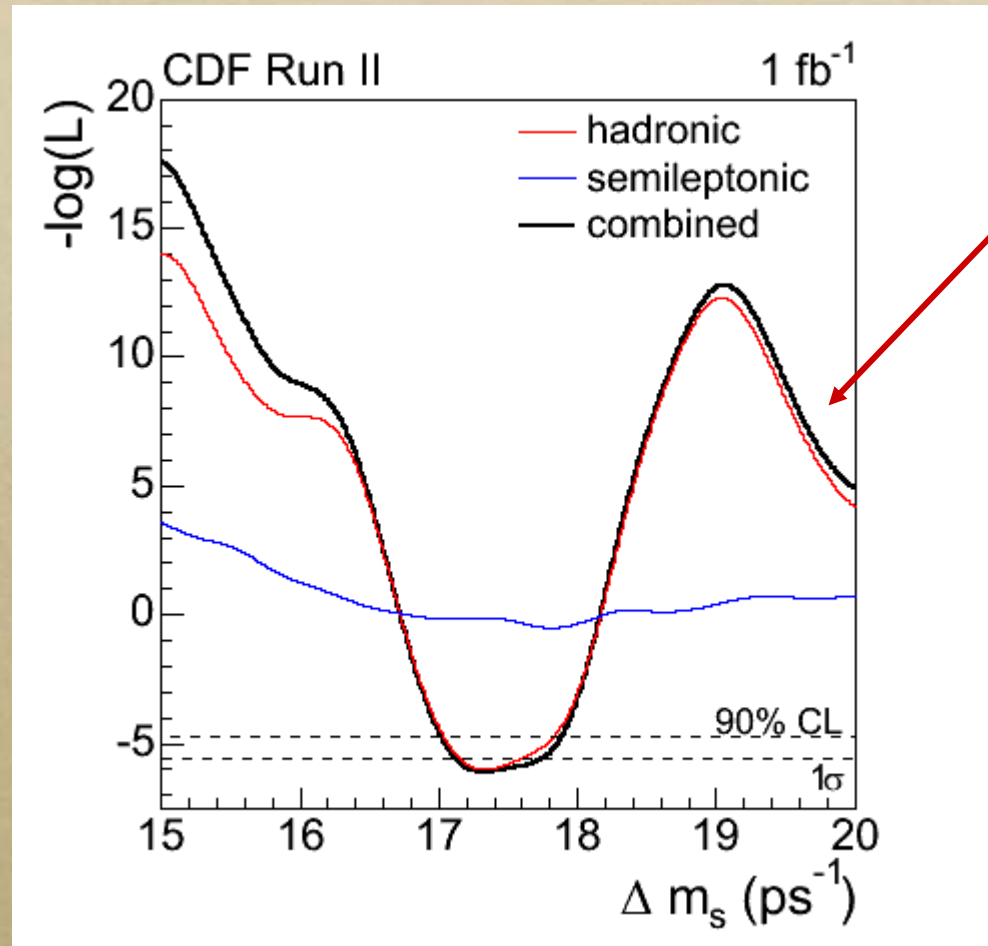
- In 228 su 50000 esperimenti $\Delta \log(LR) \geq 6.06$
- P-value = 0.5% \rightarrow misura Δm_s !



Misura di Δm_s

Likelihood combinate dei canali
adronici e semileptonici

27



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

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

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

Incertezze sistematiche su Δm_s

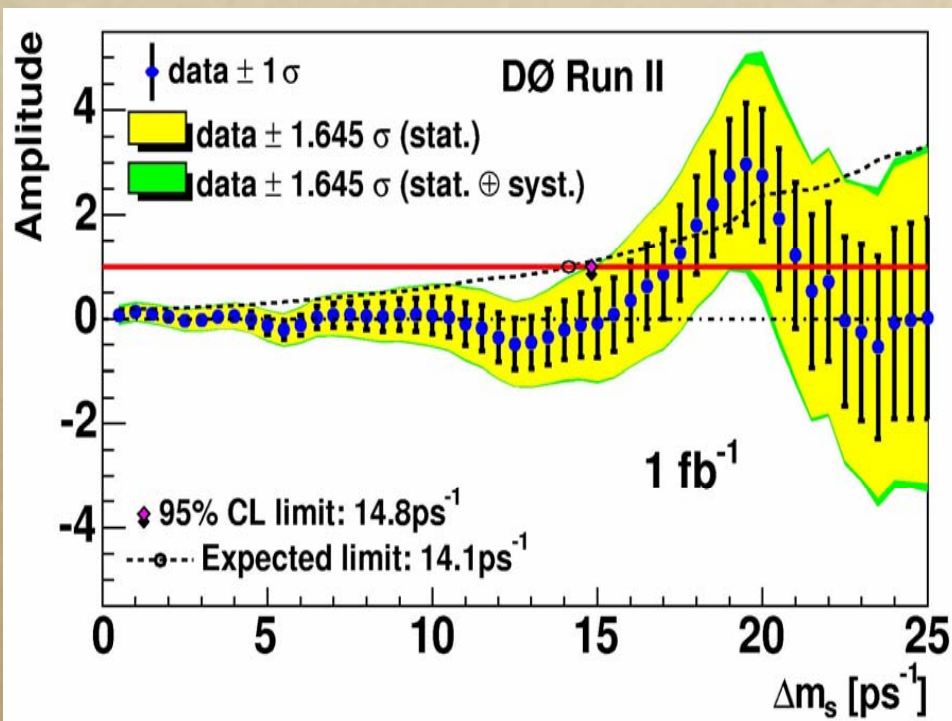
- Systematiche legate al modello di fit valutate su toy Monte Carlo
 - Impatto trascurabile
- Unica sorgente di sistematica non trascurabile: scala assoluta di tempo proprio

	Syst. Unc
Fitting Model	< 0.01 ps ⁻¹
SVX Alignment	0.04 ps ⁻¹
Track Fit Bias	0.05 ps ⁻¹
PV bias from tagging	0.02 ps ⁻¹
Total	0.07 ps⁻¹

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

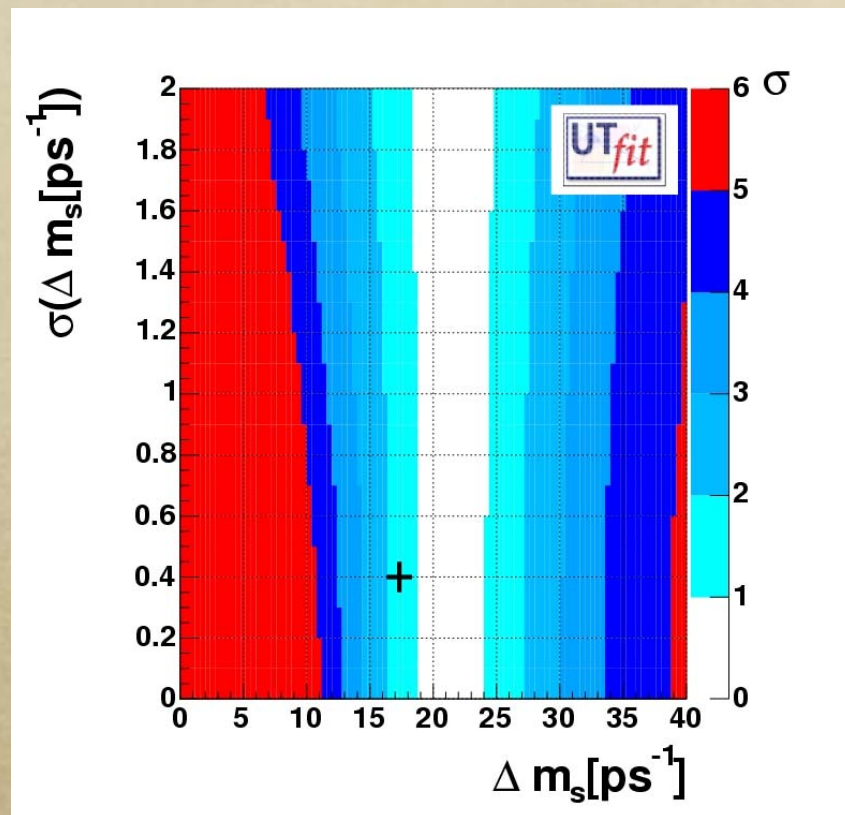
Confronto con i risultati precedenti

Recente risultato di D0



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

Plot di compatibilità con SM

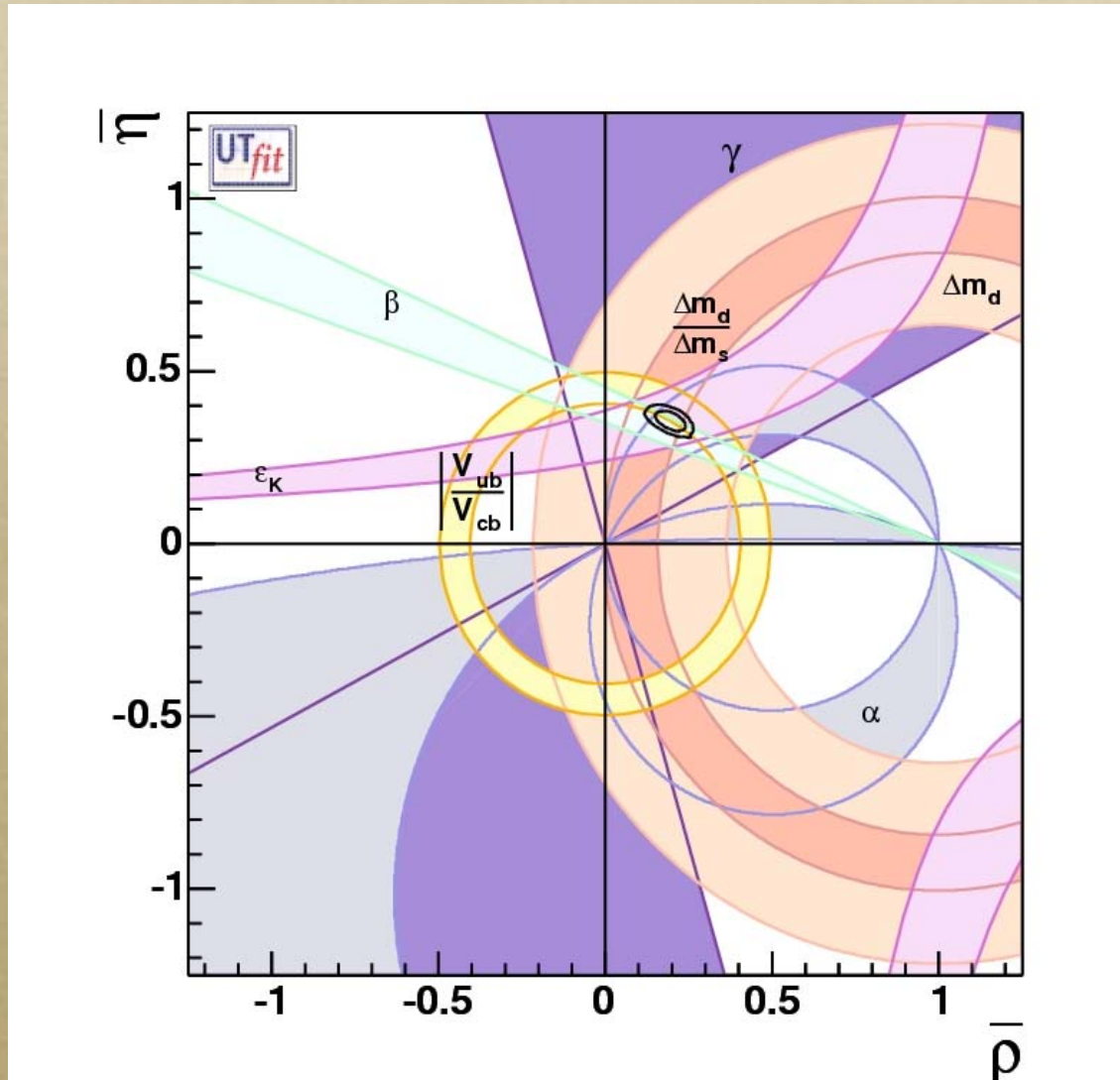


Fit nello SM: $\Delta m_s = 21.5 \pm 2.6 \text{ps}^{-1}$

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

Compatibile a 1.6σ

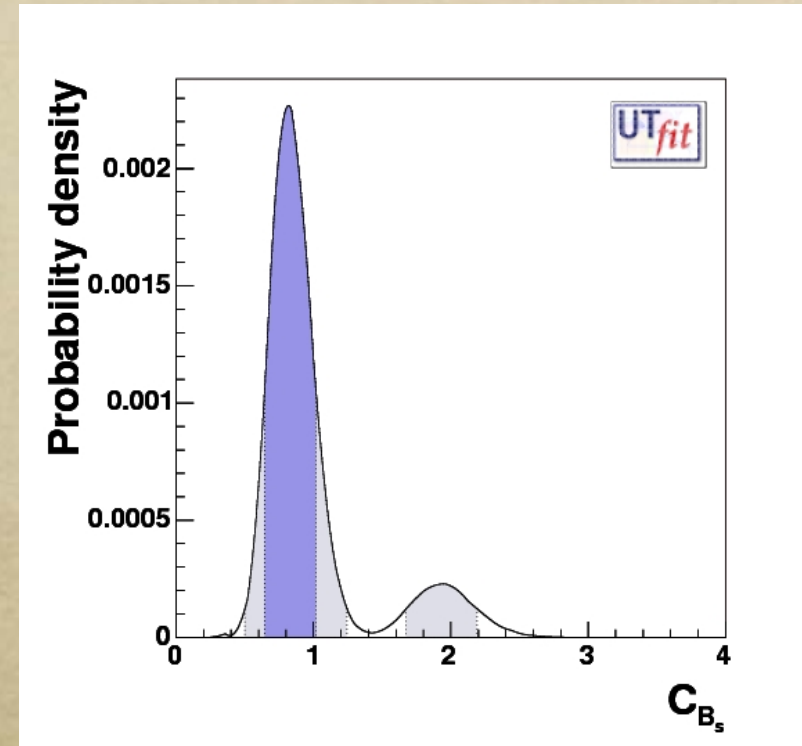
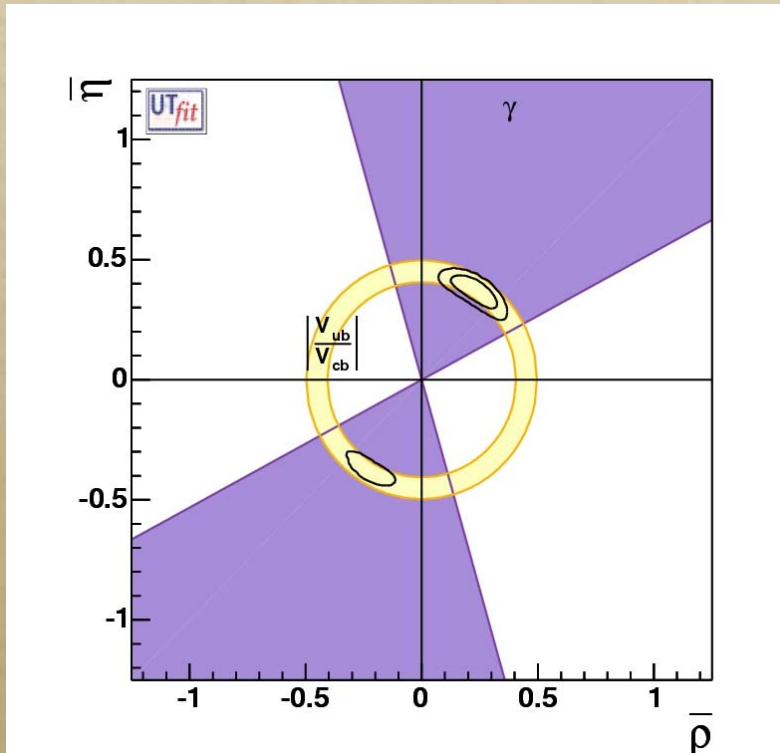
Fit triangolo di unitarietà nello SM



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

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

Preliminary



Primo bound sul contributo di nuova fisica a Δm_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 :

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