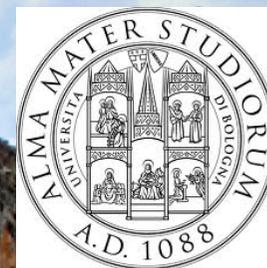


Misure dipendenti dal tempo dei decadimenti dei mesoni B a LHCb



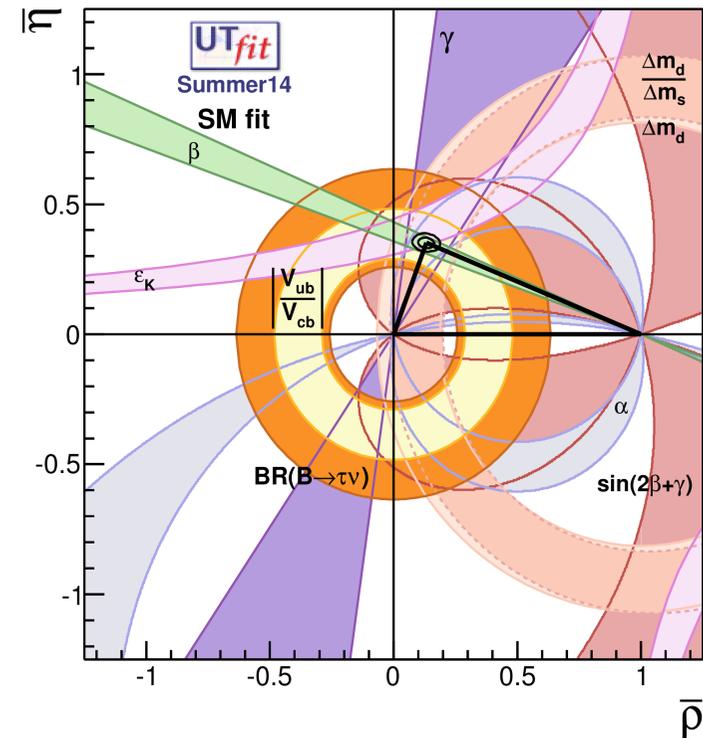
Stefano Perazzini
INFN Sezione di Bologna
Università di Bologna



Incontri di Fisica delle Alte Energie
IFAE 2015, 8-10 Aprile 2015
Università di Roma Tor Vergata

Motivazioni delle misure dipendenti dal tempo dei decadimenti dei mesoni B

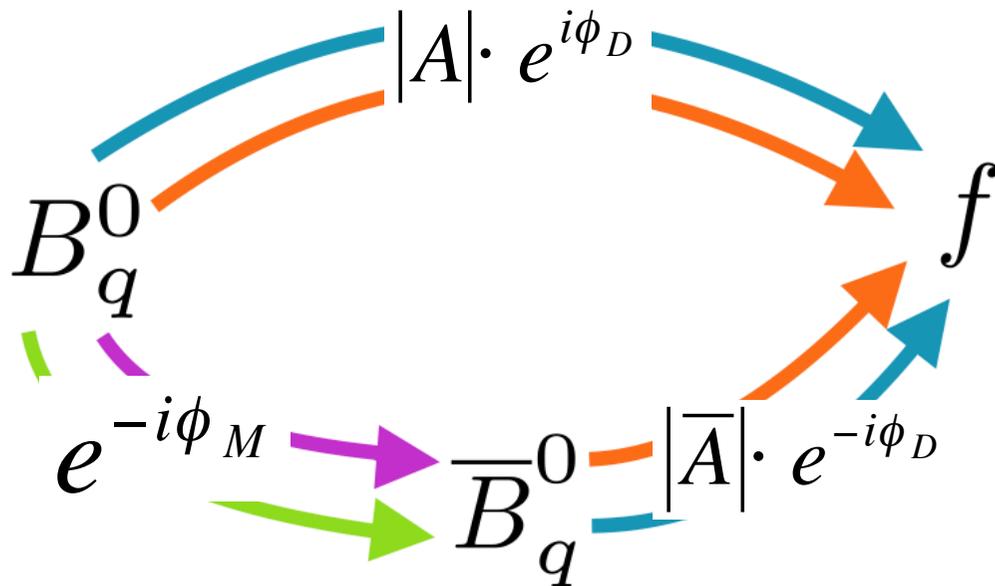
- Determinazione dei parametri della matrice CKM non accessibili tramite misure integrate nel tempo
 - in particolare le fasi di miscelamento dei mesoni B^0 e B_s^0
- L'evoluzione temporale dei mesoni B neutri avviene tramite diagrammi a scatola
 - nuove particelle non previste nel Modello Standard possono comparire come contributi virtuali in tali diagrammi



Formalismo e osservabili

- Asimmetria dipendente dal tempo

$$a_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}(t) \rightarrow f) - \Gamma(B(t) \rightarrow f)}{\Gamma(\bar{B}(t) \rightarrow f) + \Gamma(B(t) \rightarrow f)} = \frac{S_f \sin(\Delta m t) - C_f \cos(\Delta m t)}{\cosh(\Delta\Gamma t/2) + \mathcal{A}_{\Delta\Gamma} \sinh(\Delta\Gamma t/2)}$$



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

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

$$\lambda_f = -\eta_f e^{-i\phi_M} \cdot \frac{|\bar{A}| \cdot e^{-i\phi_D}}{|A| \cdot e^{i\phi_D}}$$

η_f = autovalore di CP dello stato f (± 1)

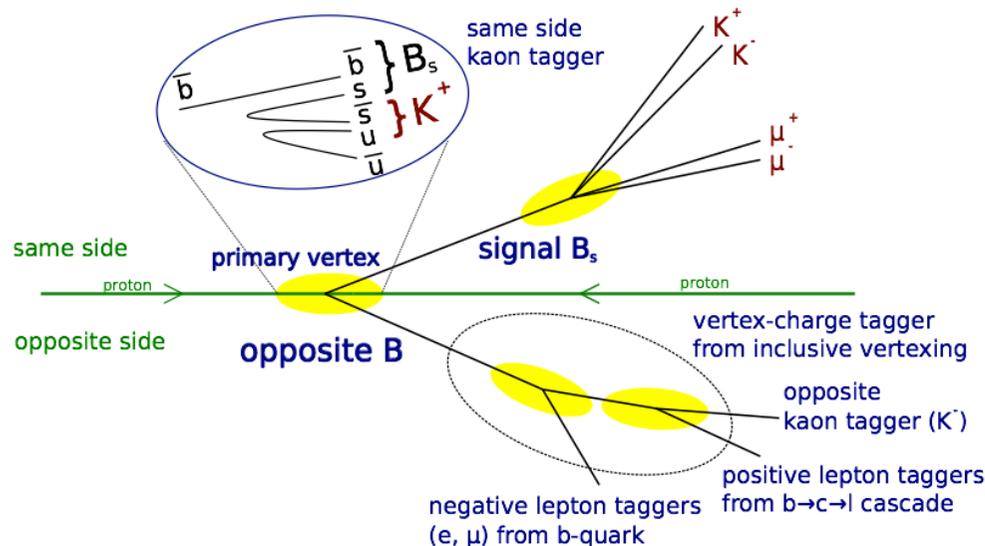
Ingredienti fondamentali delle analisi

- Relazione tra le asimmetrie dipendenti dal tempo sperimentali e teoriche

$$A_{CP} \approx (1 - 2w) e^{-\frac{1}{2} \Delta m_s^2 \sigma_t^2} A_{CP}^{theory}$$

w = probabilità di identificare male il sapore iniziale del B
 σ_t = risoluzione sperimentale sul tempo proprio del B

- Identificazione del sapore iniziale del B



Lo studio del secondo adrone B prodotto nell'evento e dei prodotti di frammentazione del B di segnale permette di ipotizzare il sapore iniziale del B

LHCb utilizza un algoritmo di analisi multivariata dell'evento per determinare il sapore iniziale del B

Ingredienti fondamentali delle analisi

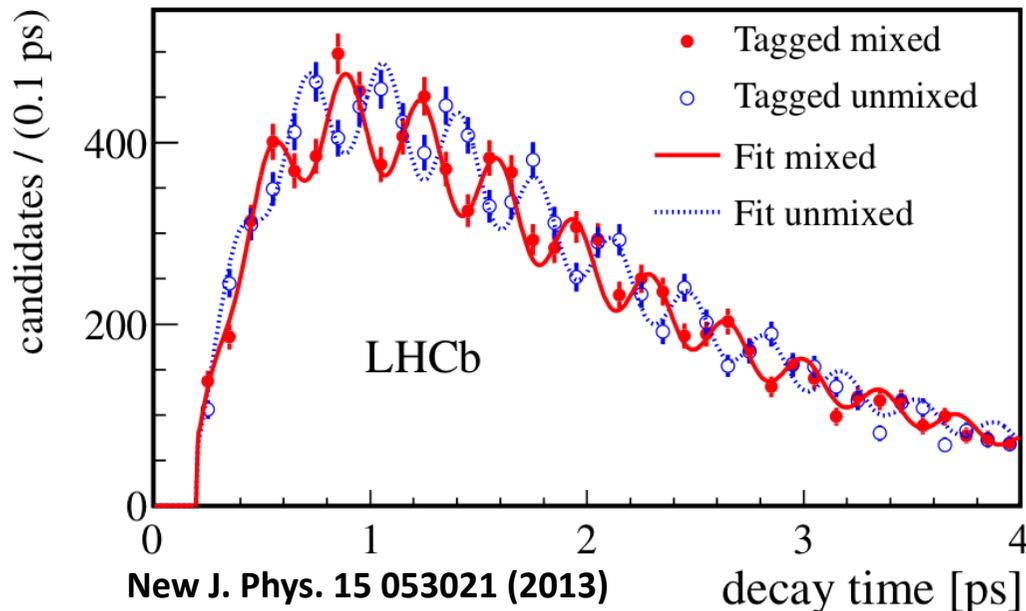
- Relazione tra le asimmetrie dipendenti dal tempo sperimentali e teoriche

$$A_{CP} \approx (1 - 2w) e^{-\frac{1}{2} \Delta m_s^2 \sigma_t^2} A_{CP}^{theory}$$

w = probabilità di identificare male il sapore iniziale del B

σ_t = risoluzione sperimentale sul tempo proprio del B

- Risoluzione in tempo proprio



$$\sigma_t \sim 44 \text{ fs}$$

Fondamentale per seguire l'oscillazione veloce del mesone B_s^0

Misure della fase di miscelamento ϕ_s del mesone B_s^0

- La fase di miscelamento ϕ_s nel Modello standard è piccola e caratterizzata da un piccolo errore teorico

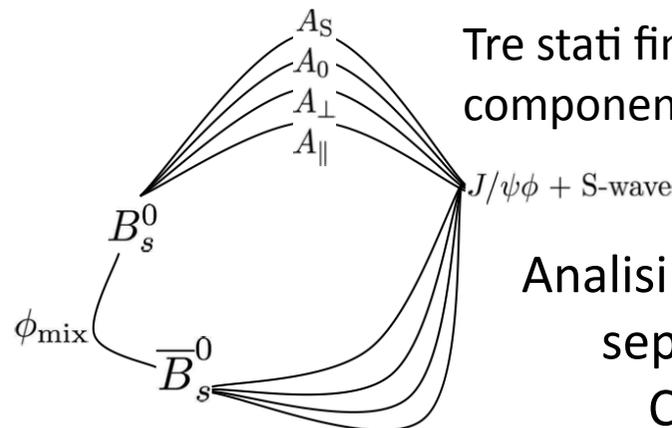
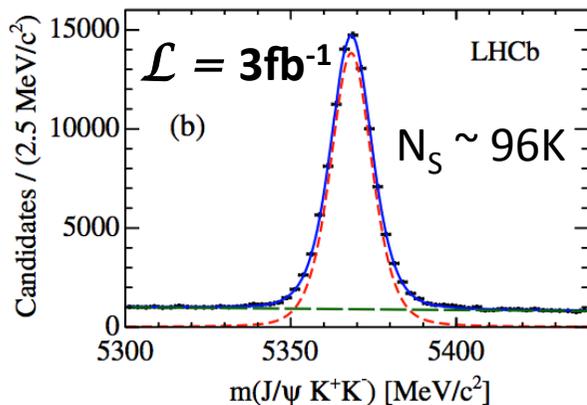
UTFit dopo ICHEP 2014

$$\phi_s = -37.5 \pm 1.5 \text{ mrad}$$

- eccellente verifica del Modello Standard
- sensibile a effetti dovuti a Nuova Fisica
- Le transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$ sono ottimali per studiare la fase di miscelamento
 - Violazione diretta di CP molto piccola
 - decadimenti dominati da diagrammi ad albero
 - $B_s^0 \rightarrow J/\psi(K^+K^-)$, $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\pi^+\pi^-)$, $B_s^0 \rightarrow D_s^+D_s^-$,

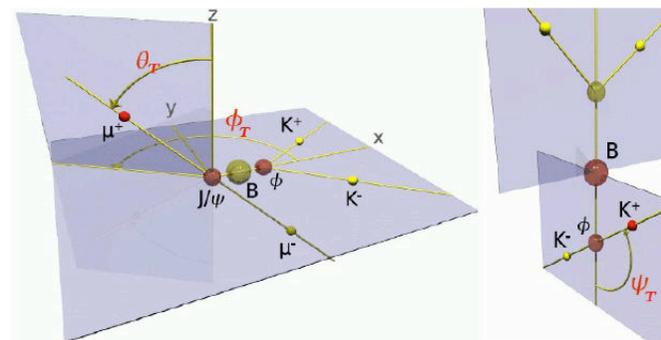
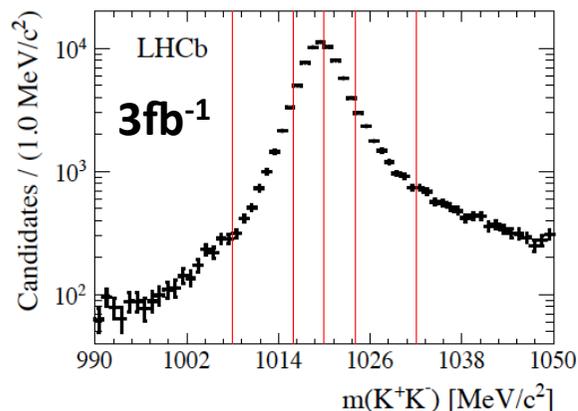
Fase di miscelamento nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

PRL 114 (2015) 041801



Tre stati finali di polarizzazione più una componente di onda S

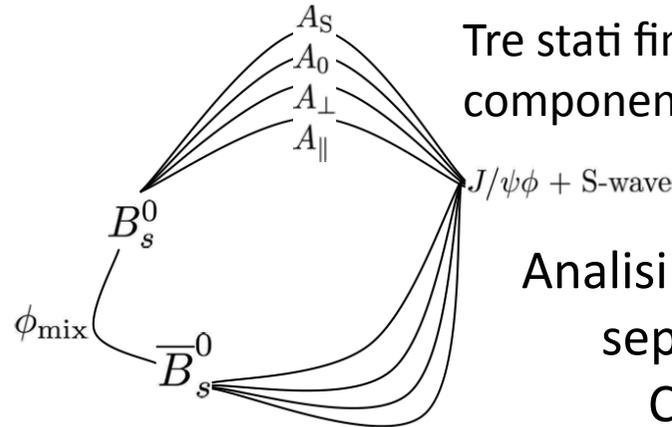
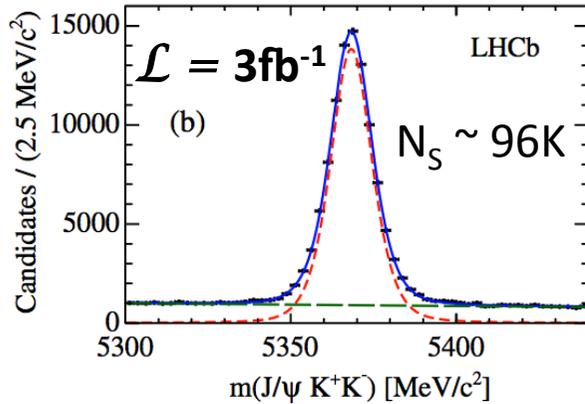
Analisi angolare necessaria per separare le componenti CP-pari e CP-dispari



Analisi effettuata in 6 intervalli di m_{KK} per determinare meglio il contributo dovuto alla componente di onda S

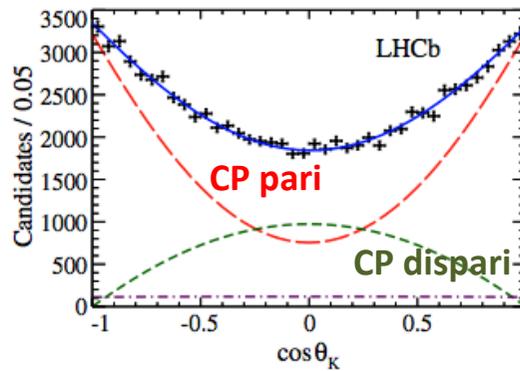
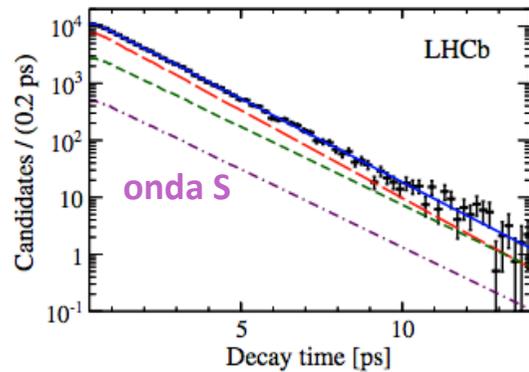
Fase di miscelamento nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

PRL 114 (2015) 041801



Tre stati finali di polarizzazione più una componente di onda S

Analisi angolare necessaria per separare le componenti CP-pari e CP-dispari

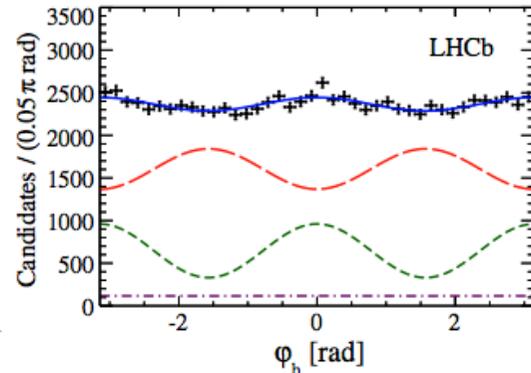
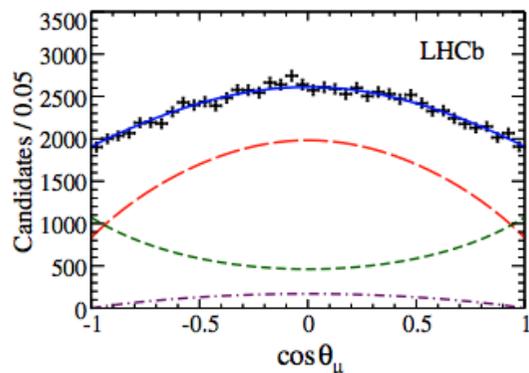


$$\phi_s = -58 \pm 49 \pm 6 \text{ mrad}$$

$$|\lambda_{J/\psi\phi}| = 0.964 \pm 0.019 \pm 0.007$$

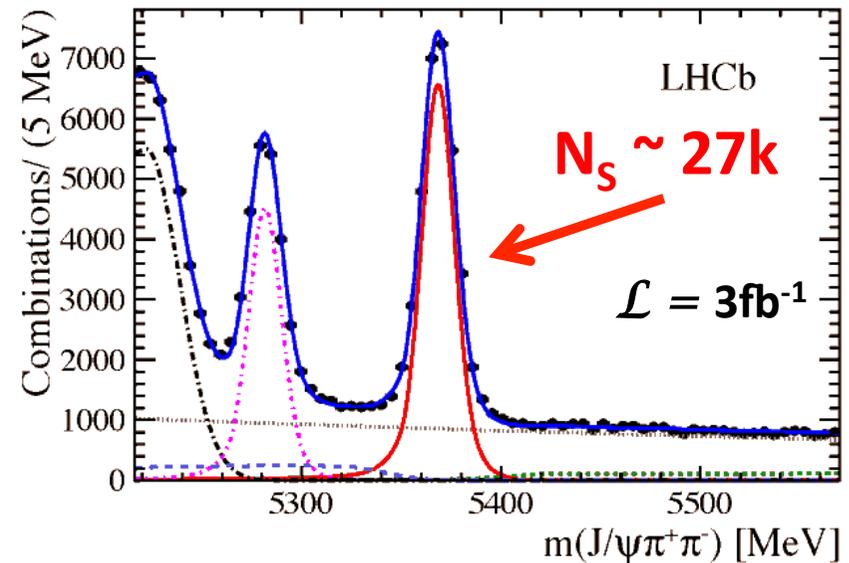
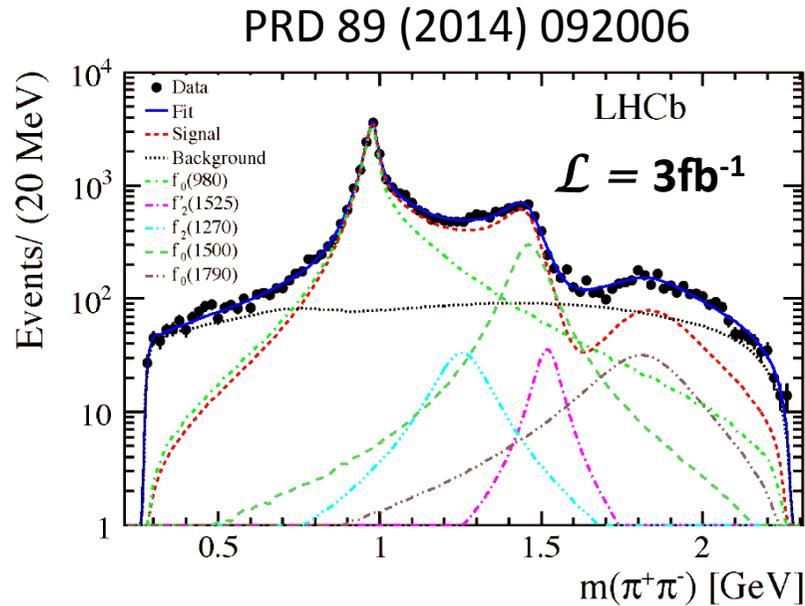
$$\Gamma_s = 0.6603 \pm 0.0027 \pm 0.0015 \text{ ps}^{-1}$$

$$\Delta\Gamma_s = 0.0805 \pm 0.0091 \pm 0.0032 \text{ ps}^{-1}$$



**Migliore misura al mondo
ancora dominata dall'errore statistico**

Fase di miscelamento nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$



- Analisi delle componenti nello spettro $\pi^+ \pi^-$ per determinare la composizione in autostati di CP dello stato finale
 - Misura basata su 3 fb^{-1}
 - 5 contributi: $f_0(980)$, $f_0(1500)$, $f_0(1790)$, $f_2(1270)$, $f_2(1525)$
 - Contributo della componente CP dispari $> 97.7\%$

Fase di miscelamento nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$

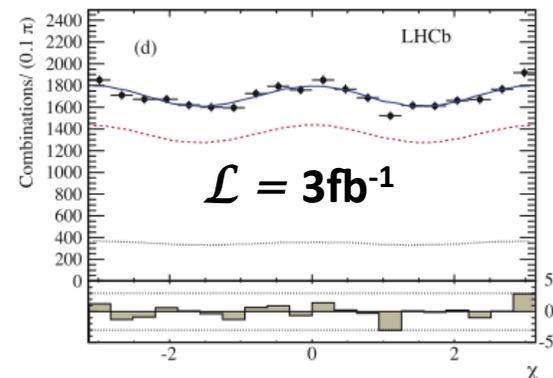
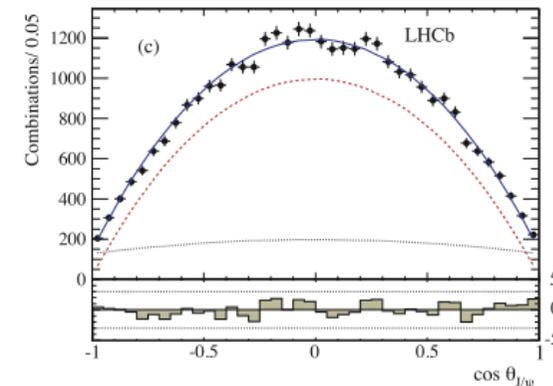
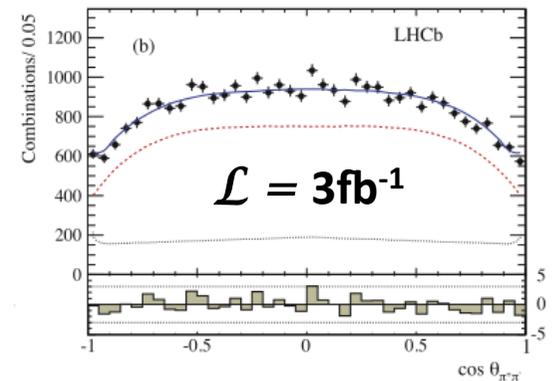
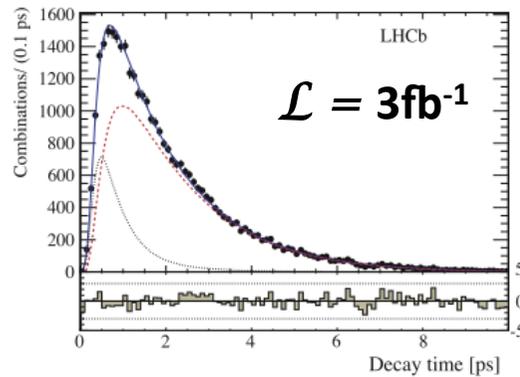
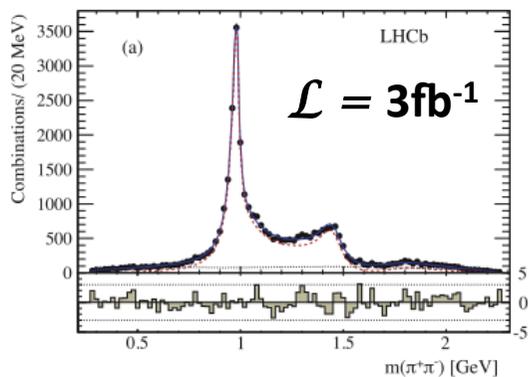
- La fase di miscelamento è determinata tramite un adattamento di massima verossimiglianza in 6 dimensioni:

- massa $J/\psi \pi^+ \pi^-$, massa $\pi^+ \pi^-$,
3 angoli di elicità e tempo proprio

$$\phi_s = 70 \pm 68 \pm 8 \text{ mrad}$$

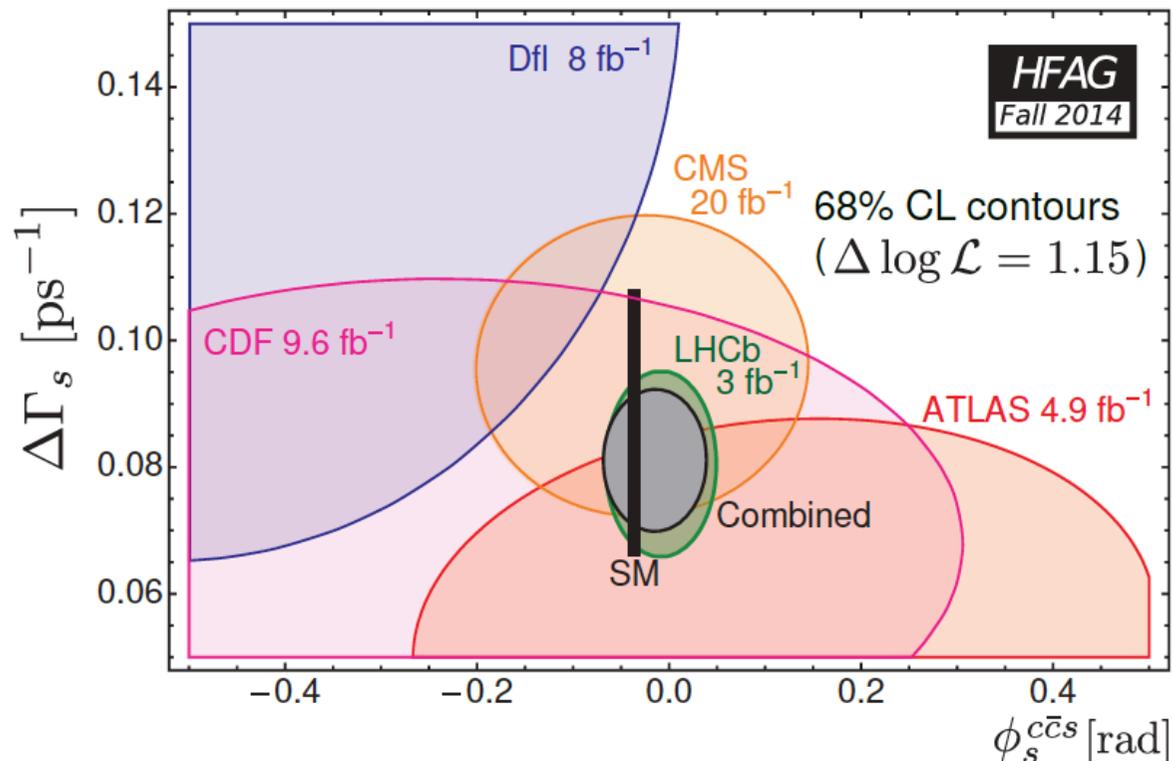
$$|\lambda| = 0.89 \pm 0.05 \pm 0.01$$

Compatibile con la misura da $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$



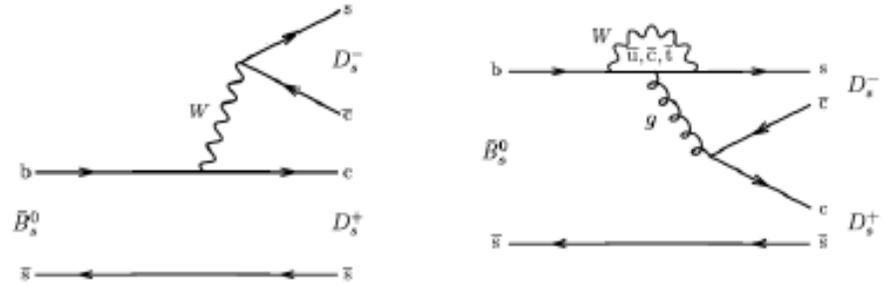
Fase di miscelamento del mesone B_s^0

- Combinazione delle analisi $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ e $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$:
 - Solo LHCb: $\phi_s = -10 \pm 39$ mrad, $|\lambda| = 0.957 \pm 0.017$
 - Media mondiale: $\phi_s = -15 \pm 35$ mrad, $\Delta\Gamma_s = 0.081 \pm 0.007$ ps⁻¹
 - Media mondiale dominata da LHCb ma contributi anche dagli altri esperimenti LHC



Fase di miscelamento nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$

- Interessante per misurare ϕ_s in transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$ ma con un diverso contributo dai diagrammi “a pinguino”
- Lo stato finale $D_s^+ D_s^-$ è uno stato completamente CP-pari
 - non c'è necessità di analisi angolare

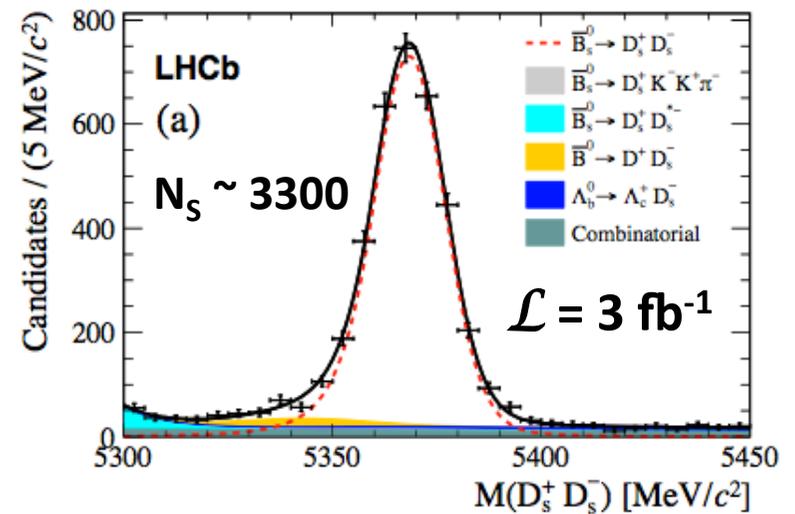


- Mesoni D_s^+ ricostruiti in 3 stati finali:
 - $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$, $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$, $D_s^+ \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+$

$$\phi_s = 20 \pm 170 \pm 0.02 \text{ mrad}$$

$$|\lambda| = 0.91_{-0.15}^{+0.18} \pm 0.02$$

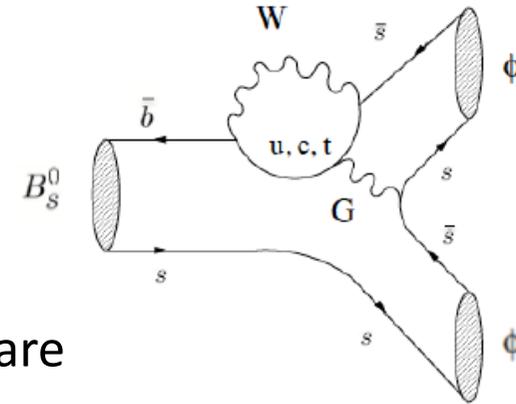
Phys. Rev. Lett. 113, 211801 (2014)



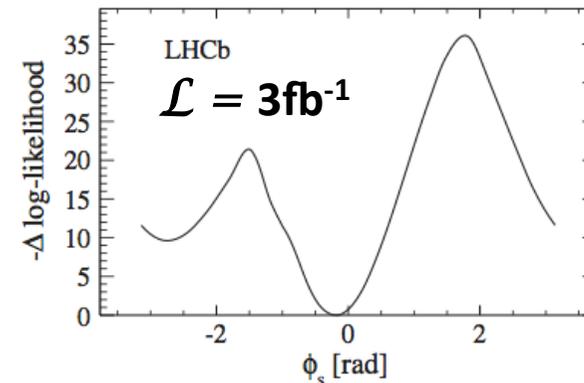
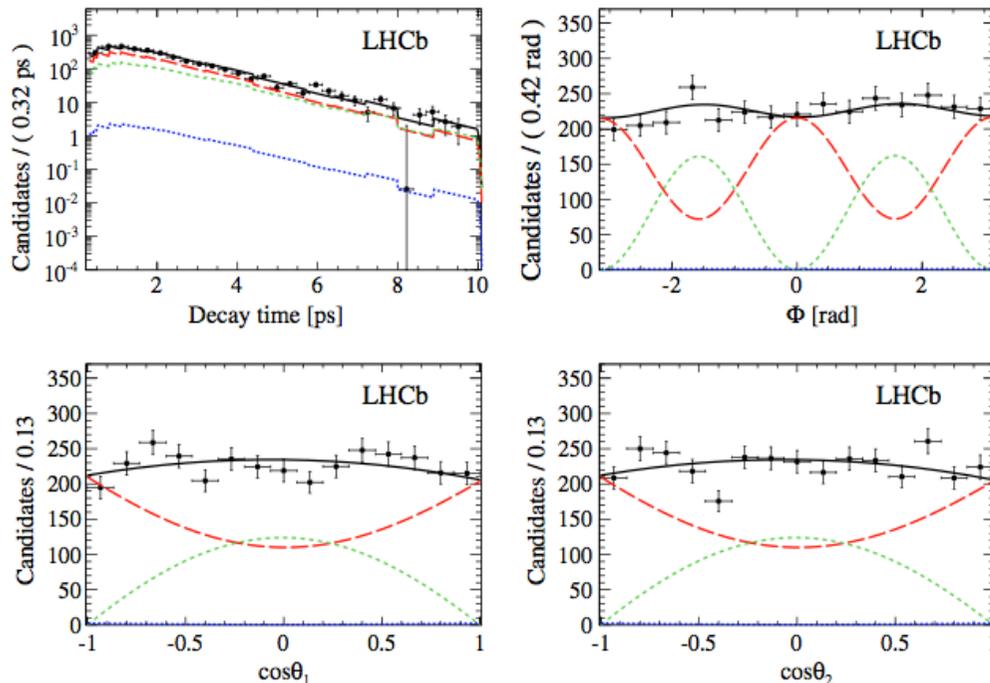
In accordo con il Modello Standard

Fase di miscelamento nel decadimento $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$

- Le transizioni $b \rightarrow s\bar{s}s$ avvengono solo tramite diagrammi “a pinguino”
 - sensibili a Nuova Fisica
- Analisi sperimentalmente analoga a $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$:
 - Decadimento $P \rightarrow VV$ che richiede analisi angolare
 - 4000 decadimenti $B_s^0 \rightarrow \phi(K^+ K^-)\phi(K^+ K^-)$ in 3 fb^{-1}



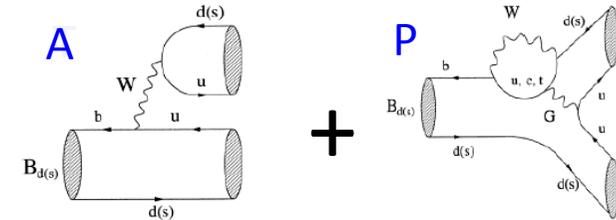
Phys. Rev. D90 (2014) 052011



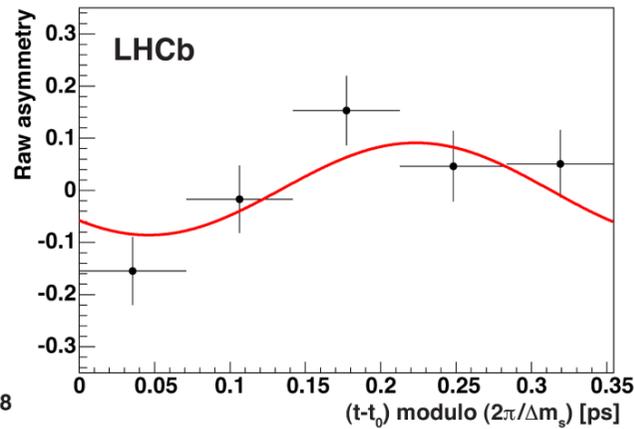
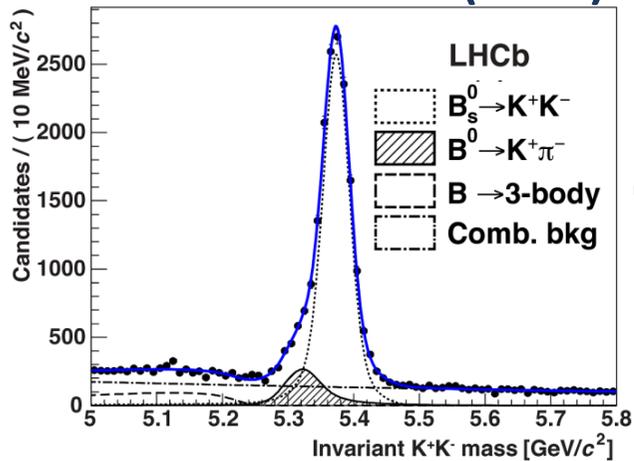
$$\phi_s = -170 \pm 150 \pm 30 \text{ mrad}$$

In accordo con il Modello Standard
e con le misure $b \rightarrow c\bar{c}s$

Fase di miscelamento ϕ_s dai decadimenti $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ e $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$

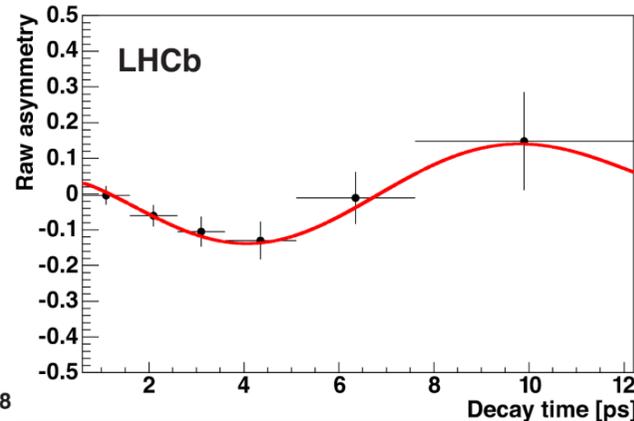
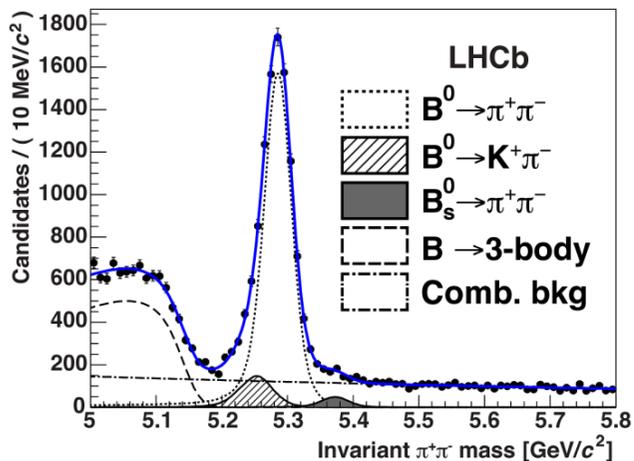


1 fb⁻¹ – JHEP 10 (2013) 183



$$C_{KK} = 0.14 \pm 0.11 \pm 0.03$$

$$S_{KK} = 0.30 \pm 0.12 \pm 0.04$$



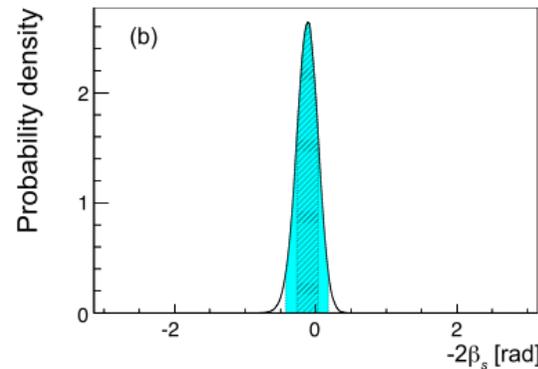
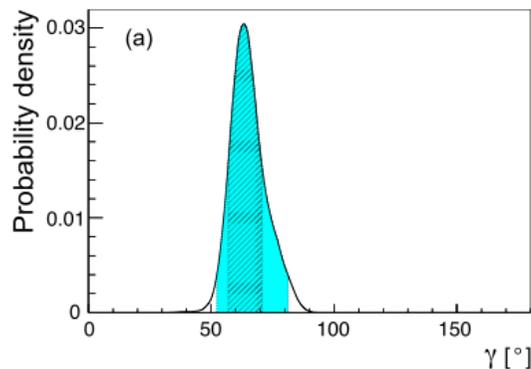
$$C_{\pi\pi} = -0.38 \pm 0.15 \pm 0.02$$

$$S_{\pi\pi} = -0.71 \pm 0.13 \pm 0.02$$

Fase di miscelamento ϕ_s dai decadimenti



- Combinando le misure di $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$, $B^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$ e $B_s^0 \rightarrow K^+K^-$ è possibile determinare γ e ϕ_s in funzione di CP e i rapporti di diramazione
 - metodo descritto in Phys. Lett. B459 (1999) 305 e JHEP 10 (2012) 029
 - utilizzo delle simmetrie di isospin e U-spin
 - tiene in considerazione effetti di rottura di U-spin non fattorizzabili
- Risultati pubblicati in Phys. Lett. B741 (2015) 1



Effetti non fattorizzabili dovuti alla rottura della simmetria di fino al 50% sono inclusi

$$\gamma = (63.5^{+7.2}_{-6.7})^\circ$$

$$\phi_s = -0.12^{+0.14}_{-0.16} \text{ rad}$$

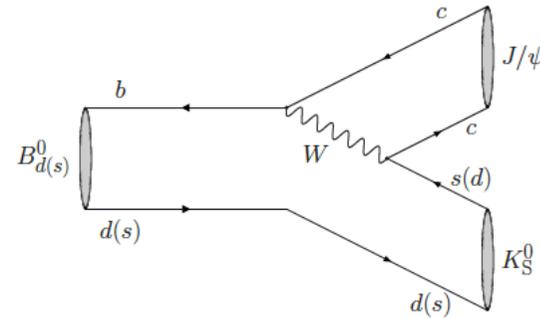
Misure da aggiornare al campione completo del Run1:

- x3 luminosità ($1 \rightarrow 3 \text{ fb}^{-1}$)
- x1.5 grazie a nuovi algoritmi di identificazione del sapore del B

Fase di miscelamento ϕ_d del mesone B^0

- Come per ϕ_s anche per ϕ_d le transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$ permettono una misura precisa

- $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$: non è necessaria l'analisi angolare

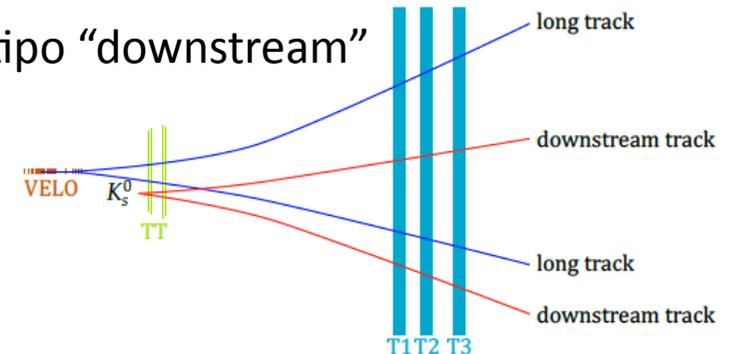


- Ricostruzione del decadimento $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ di due tipi:

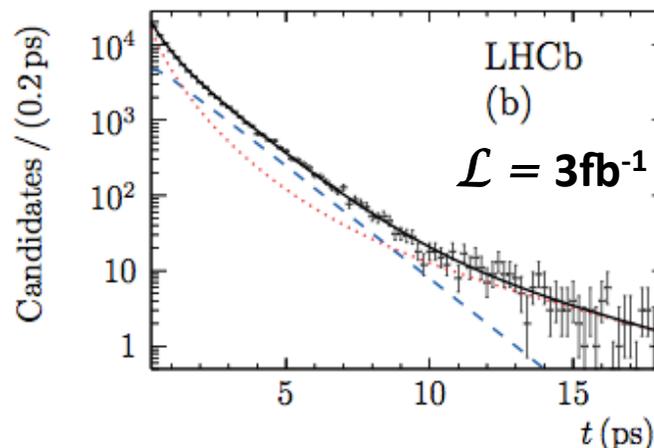
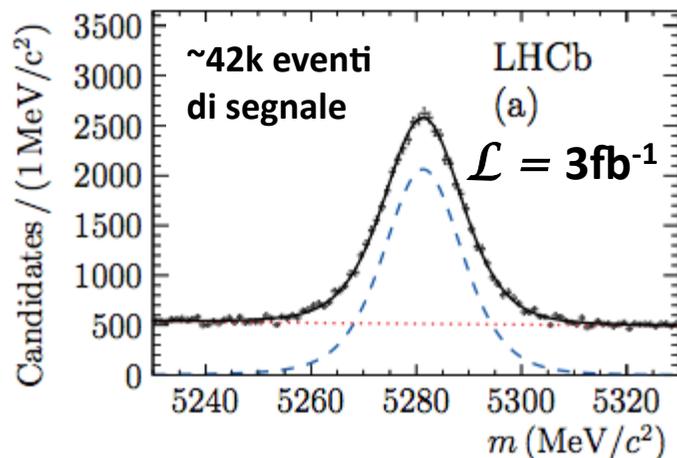
- coppie di pioni di tipo “long” e coppie di pioni di tipo “downstream”

- Adattamento simultaneo in massa invariante, tempo proprio, risoluzione in tempo proprio

- Correzione dovuta alla violazione di CP nel miscelamento del K_S

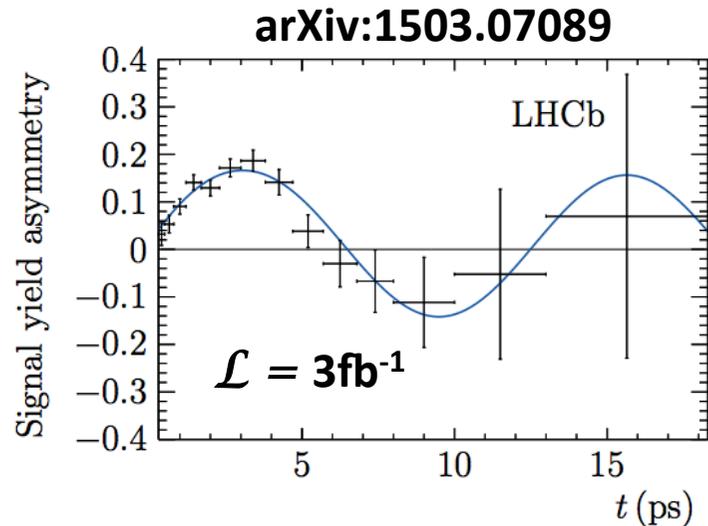


arXiv:1503.07089 (in fase di sottomissione a PRL)



Eventi per i quali è stato possibile stabilire il sapore iniziale del B^0

Fase di miscelamento ϕ_d del mesone B^0



$$S = 0.731 \pm 0.035 \text{ (stat)} \pm 0.020 \text{ (syst)}$$

$$C = -0.038 \pm 0.032 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}$$

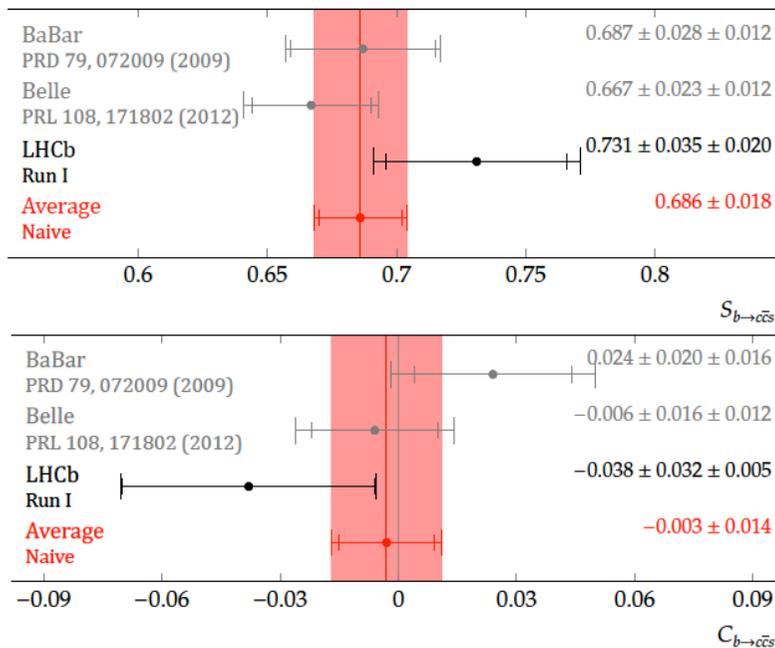
$$\rho(S, C) = 0.483$$

Fissando

$C=0$

$$S = \sin(2\beta) = 0.746 \pm 0.030 \text{ (stat)}$$

Compatibile con i risultati di
BaBar e Belle



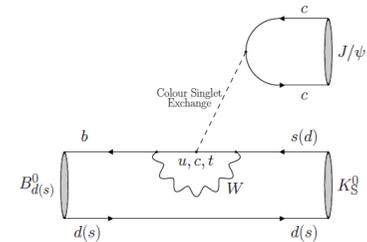
Diagrammi all'ordine successivo nelle transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$

- Il contributo dei diagrammi "a pinguino" nelle transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$ è piccolo

$$|A(b \rightarrow c\bar{c}s)|^2 = \left| \text{tree} + \epsilon \text{ penguin} + \dots \right|^2$$

- aumentando la precisione delle misure diventa necessario stimarne l'entità

$$\phi_{d,s}^{eff} = \phi_{d,s} + \Delta\phi_{d,s}$$



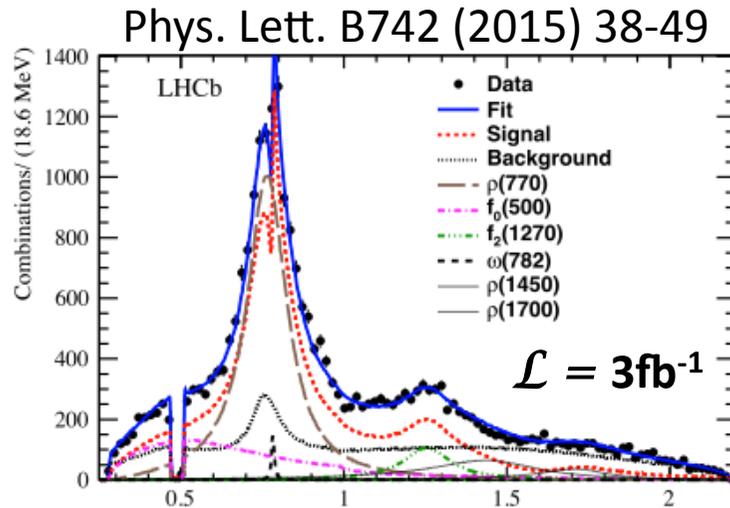
- Utilizzare la simmetria SU(3) per vincolare l'effetto dovuto ai diagrammi "a pinguino"

- R. Fleischer, Eur. Phys. J. C 10, 299 (1999),
De Bruyn and Fleischer JHEP 1503 (2015) 145

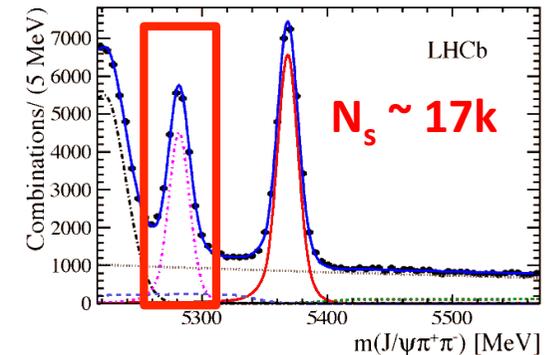
$$\underline{B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S}, \underline{B_s^0 \rightarrow J/\psi K^*}, \underline{B^0 \rightarrow J/\psi \rho}, \underline{B^0 \rightarrow J/\psi \pi^0}$$

Analisi $B^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$

- Analisi del tutto analoga a $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$
 - studio dello spettro $\pi^+ \pi^-$ per distinguere i contributi delle varie risonanze
 - analisi angolare dipendente dal tempo



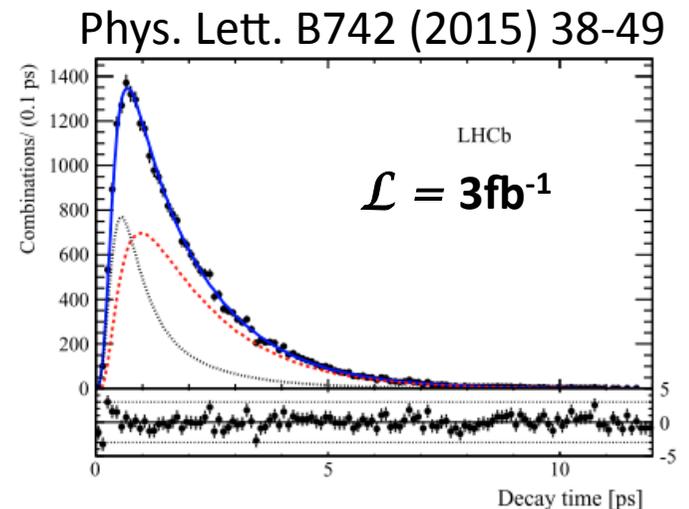
Component	Fraction [%]
$B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$	65.6 ± 1.9
$B^0 \rightarrow J/\psi f_0(500)$	20.1 ± 0.7
$B^0 \rightarrow J/\psi f_2(1270)$	7.8 ± 0.6
$B^0 \rightarrow J/\psi \omega(782)$	$0.64^{+0.19}_{-0.13}$
$B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0(1450)$	9.0 ± 1.8
$B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0(1700)$	3.1 ± 0.7



$$C_{J/\psi \rho^0} = -0.063 \pm 0.056 \text{ (stat)}^{+0.019}_{-0.014} \text{ (syst)}$$

$$S_{J/\psi \rho^0} = -0.66^{+0.13}_{-0.12} \text{ (stat)}^{+0.09}_{-0.03} \text{ (syst)}$$

$$\phi_d^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0) = (41.7 \pm 9.6 \text{ (stat)}^{+2.8}_{-6.3} \text{ (syst)})^\circ$$

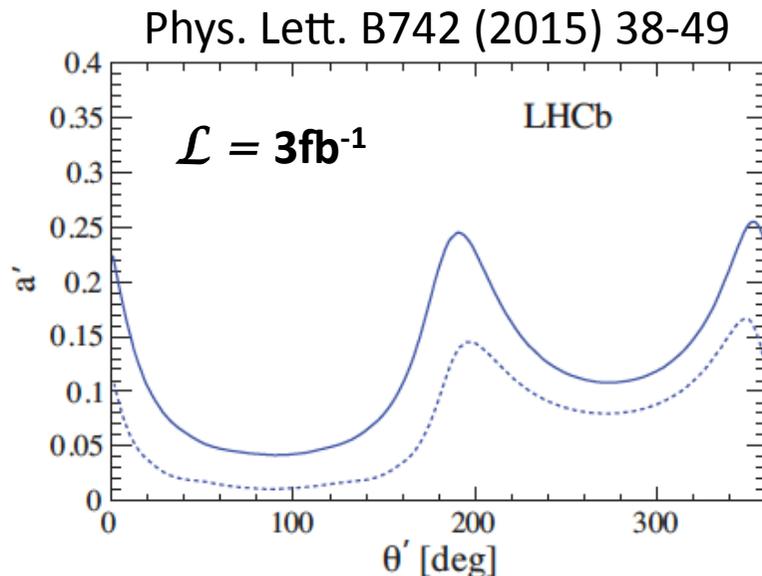


Vincolo sull'effetto dei pinguini

- Le ampiezze dei decadimenti $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ e $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ possono essere parametrizzate come

$$A(B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0) = \mathcal{N} [1 - a e^{i\theta} e^{i\gamma}] , \quad A(B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi) = \mathcal{N}' [1 + \epsilon a' e^{i\theta'} e^{i\gamma}]$$

- assumendo la simmetria di U-spin: $a=a'$ e $\theta=\theta'$



$$a' = 0.035_{-0.035}^{+0.082}$$

$$\theta' = (285_{-95}^{+69})^\circ$$

Correzione su ϕ_s dovuta ai contributi dei diagrammi a pinguino

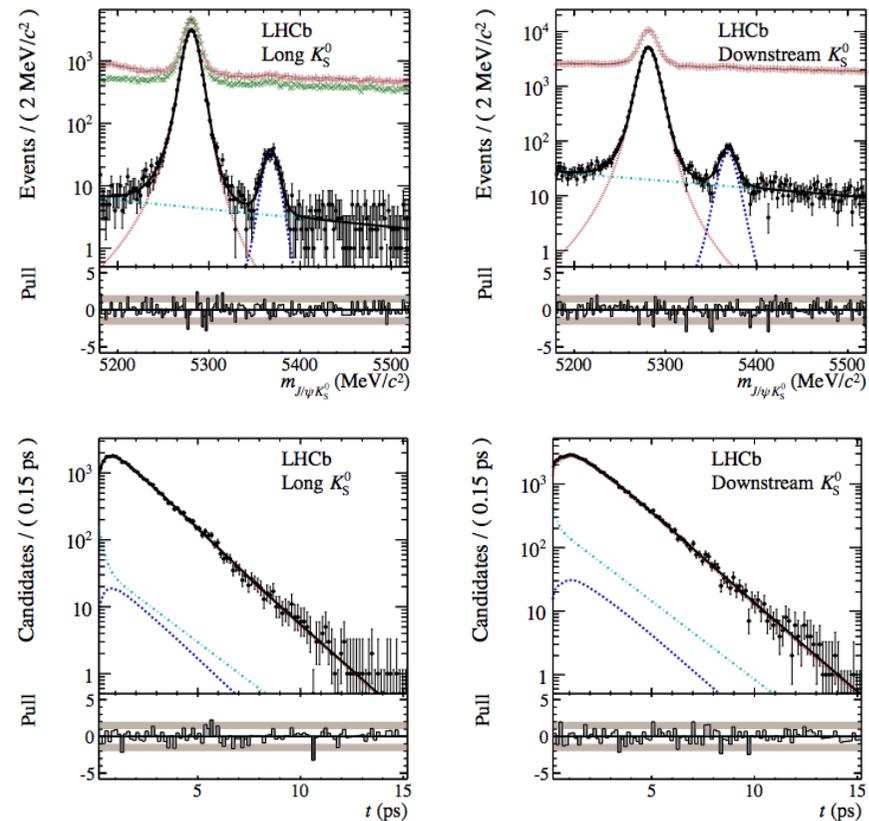
$$\Delta\phi_s = (0.05 \pm 0.56)^\circ = [-1.05^\circ, +1.18^\circ] \text{ at } 95\% \text{ C.L.}$$

Analisi $B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S$

arXiv:1503.07055 (in fase di sottomissione a JHEP)

- Collegato a $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ tramite simmetria di U-spin
 - possibile vincolare l'effetto dei diagrammi “a pinguino” nella misura di ϕ_d
- $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ricostruiti utilizzando coppie di pioni “long” e come coppie di pioni “downstream”
 - ~ 100 volte meno eventi del decadimento $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$

$\mathcal{L} = 3\text{fb}^{-1}$



$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\Delta\Gamma} (B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) &= 0.49 \pm_{0.65}^{0.77} \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}, \\ C_{\text{dir}} (B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) &= -0.28 \pm 0.41 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (syst)}, \\ S_{\text{mix}} (B_s^0 \rightarrow J/\psi K_S^0) &= -0.08 \pm 0.40 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (syst)}. \end{aligned}$$

L'errore sulle osservabili di violazione di CP non permette di determinare vincoli su $\Delta\phi_d$

Asimmetria semileptonica a_{sl}^d

- La violazione di CP nel miscelamento $B^0-\bar{B}^0$ può essere osservata misurando l'asimmetria semileptonica

$$a_{sl}^d \equiv \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) - \Gamma(B^0 \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f) + \Gamma(B^0 \rightarrow \bar{f})} \approx \frac{\Delta\Gamma_d}{\Delta m_d} \tan \phi_d^{12} \quad \begin{array}{l} f = D^{(*)-} l^- \bar{\nu} X \\ \bar{f} = D^{(*)+} l^+ \nu X \end{array}$$

- Attesa piccola nel MS
[Lenz & Nierste, arXiv:1102.4274] $a_{sl}^s = (1.9 \pm 0.3) \times 10^{-5}$
 $a_{sl}^d = (-4.1 \pm 0.6) \times 10^{-4}$

- Sperimentalmente LHCb ha misurato l'asimmetria dipendente dal tempo tra i conteggi dei due stati finali

$$N(t) \propto e^{-\Gamma_d t} \left[1 + \zeta A_D + \zeta \frac{a_{sl}^d}{2} - \zeta \left(A_P + \frac{a_{sl}^d}{2} \right) \cos \Delta m_d t \right] \quad \begin{array}{l} \zeta = 1 (f) \\ \zeta = -1 (\bar{f}) \end{array}$$

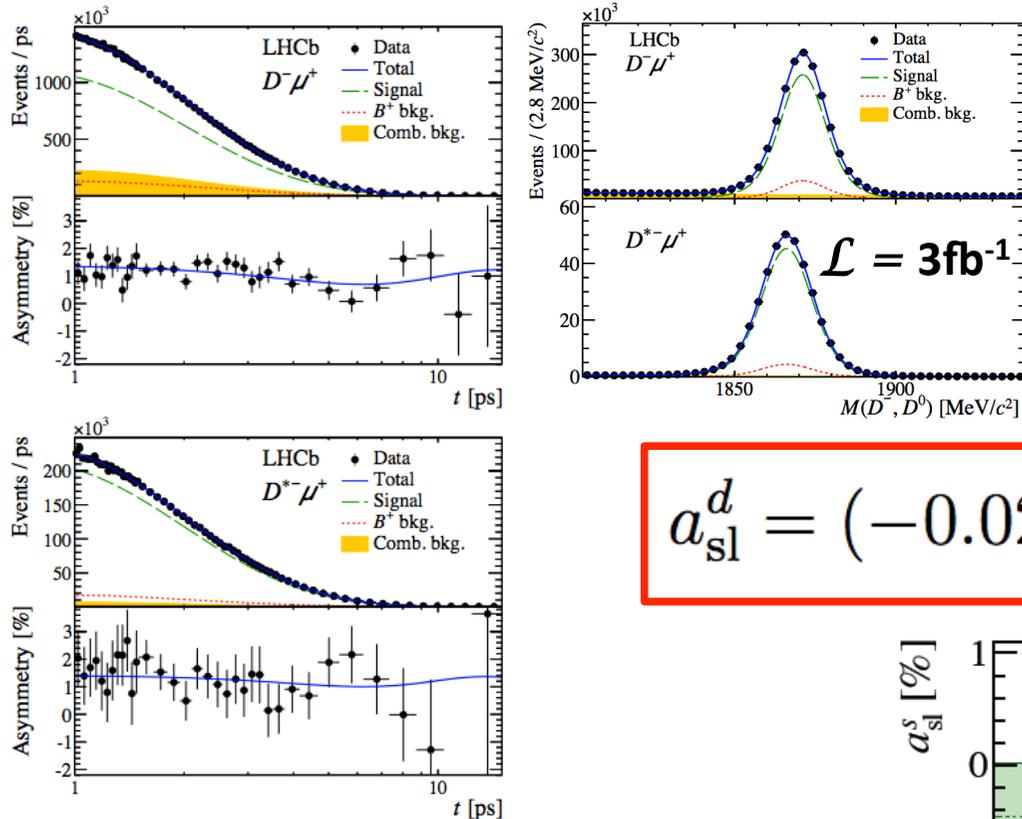
asimmetria di rivelazione degli stati finali coniugati di carica (determinata da canali di controllo)

asimmetria di produzione tra mesoni B^0 e \bar{B}^0 (determinata simultaneamente con a_{sl})

N.B.: $N(t)$ non necessita la determinazione del sapore iniziale del mesone B^0 che è molto inefficiente ai collisionatori adronici

Asimmetria semileptonica a_{sl}^d

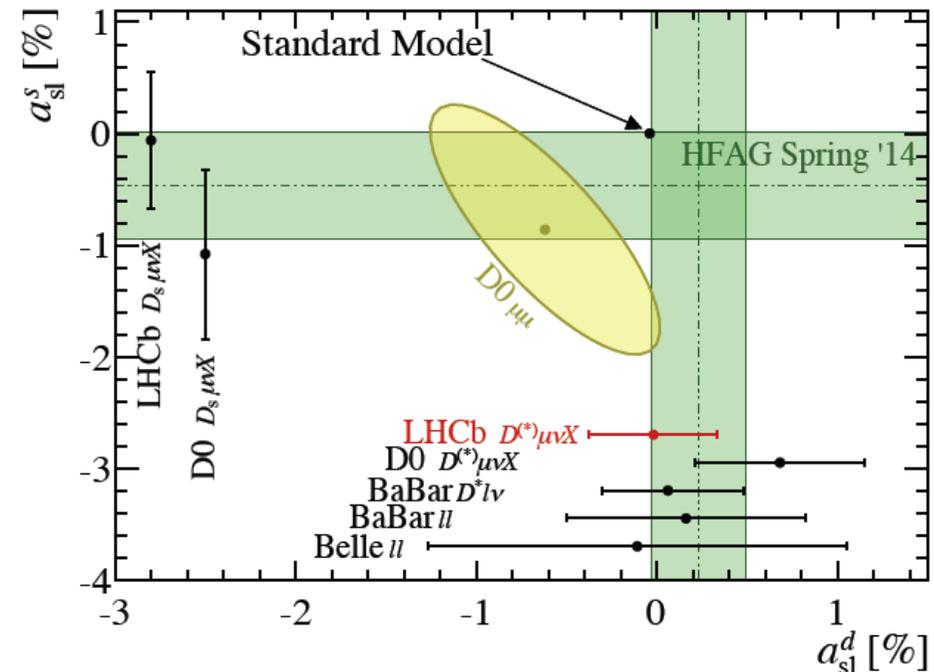
Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 041601



Source of uncertainty	a_{sl}^d
Detection asymmetry	0.26
B^+ background	0.13
A_b^0 background	0.07
B_s^0 background	0.03
Combinatorial D background	0.03
k -factor distribution	0.03
Decay-time acceptance	0.03
Knowledge of Δm_d	0.02
Quadratic sum	0.30

$$a_{sl}^d = (-0.02 \pm 0.19 \pm 0.30)\%$$

- a_{sl}^d e A_p sono determinate simultaneamente tramite degli adattamenti di massima verossimiglianza agli spettri di massa invariante e tempo proprio
 - $2.1 \times 10^6 B^0 \rightarrow D^{(*)} l^+ \nu X$ ricostruiti nel campione completo del Run 1 (3 fb^{-1})



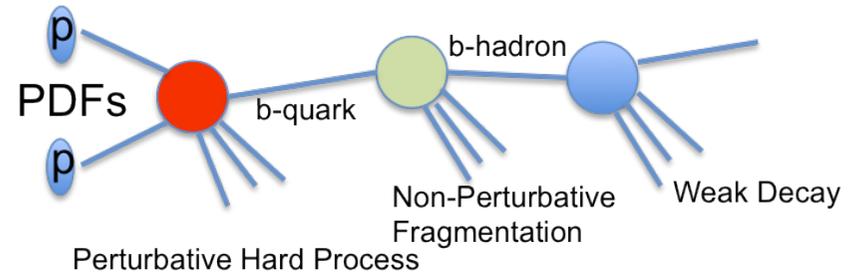
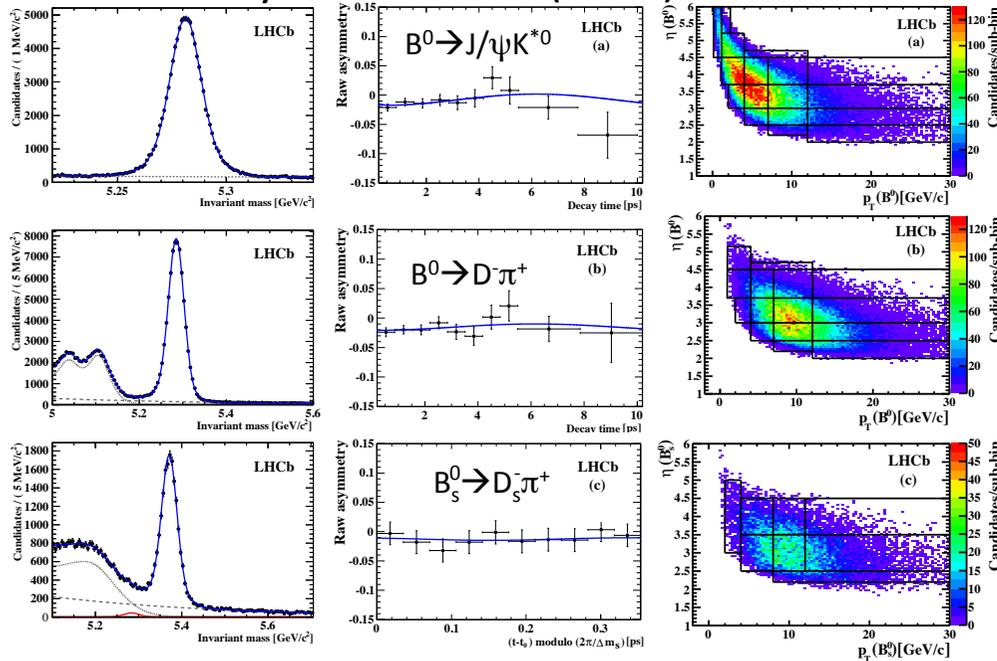
Asimmetria di produzione dei mesoni B^0 e B_S^0

- Ingrediente fondamentale per le misure di violazione di CP

$$f(t, \psi) = K (1 - \psi A_{CP}) (1 - \psi A_f) \left\{ e^{-\Gamma t} \left[\Lambda_+ \cosh\left(\frac{\Delta\Gamma t}{2}\right) + \psi \Lambda_- \cos(\Delta m t) \right] \right\}$$

$$\Lambda_{\pm} = (1 - A_P) \left| \frac{q}{p} \right|^{1-\psi} \pm (1 + A_P) \left| \frac{q}{p} \right|^{-1-\psi}$$

Phys. Lett. B 739 (2014) 218



- $\psi \rightarrow$ stato finale
- $\psi = 1 \Rightarrow f$
- $\psi = -1 \Rightarrow \bar{f}$

- Misura effettuata su 1 fb^{-1} @ 7 TeV
 - adattamento simultaneo agli spettri di massa invariante e tempo proprio
 - analisi effettuata in intervalli di p_T e η

$$A_P(B^0) = (-0.35 \pm 0.76 \pm 0.28)\%$$

$$A_P(B_S^0) = (1.09 \pm 2.61 \pm 0.66)\%$$

Valori integrati negli intervalli $4 < p_T < 30 \text{ GeV/c}$ e $2.5 < \eta < 4.5$

Conclusioni

- Le misure dipendenti dal tempo nei decadimenti dei B sono un argomento di grande interesse per
 - fare misure di precisione del Modello Standard e controllarne la consistenza
 - ricercare effetti di nuova fisica non previsti nel Modello Standard
- LHCb e gli altri esperimenti LHC hanno contribuito a ridurre le incertezze su una vasta gamma di misure chiave per comprendere il MS
- Misure delle fasi di miscelamento dei mesoni B^0 e B_s^0 nelle transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$
 - la precisione sperimentale su ϕ_s è ancora 20 volte l'errore teorico
 - LHCb ha misurato la fase ϕ_d con una precisione competitiva rispetto a BaBar e Belle
 - gli effetti dei diagrammi “a pinguino” nella misura di ϕ_s sono stati vincolati tramite il decadimento $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$: contributo ancora trascurabile

Conclusioni

- Misure della fase di miscelamento ϕ_s in altri decadimenti dominati da diagrammi a pinguino
 - nessuna discrepanza rispetto a ϕ_s , ma gli errori sono ancora grandi
- Misura dell'asimmetria semileptonica del B^0
 - in accordo con le previsioni MS
- Misura delle asimmetrie di produzione del B^0 e B_s^0
 - importante per effettuare misure precise di violazione di CP
- Nessuna discrepanza rispetto alle previsioni del Modello Standard
- Le misure sono ancora dominate dagli errori statistici e potranno migliorare con l'utilizzo dei dati del Run2 di LHC

Diapositive di riserva

Il rivelatore LHCb

