

Misura della violazione di CP in decadimenti dei mesoni B in due corpi carichi senza charm a LHCb

IFAE 2018 - Milano Bicocca

Davide Fazzini

Università degli Studi di Milano Bicocca & INFN

4 Aprile 2018

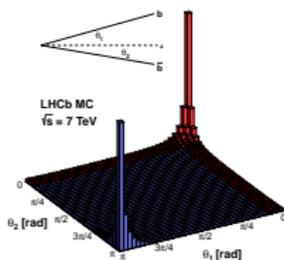
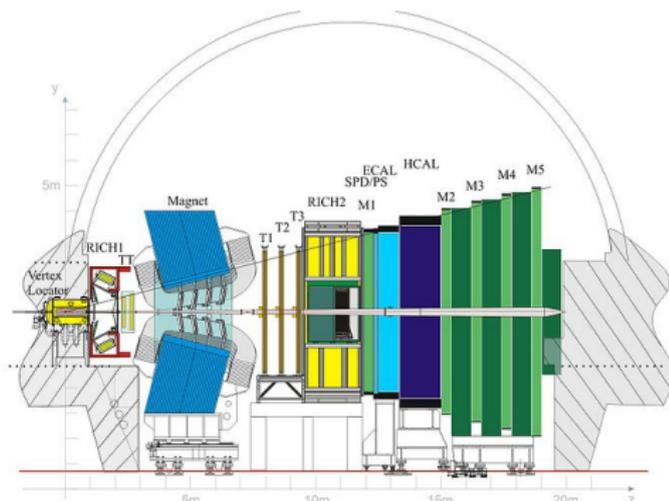


Sommario

- **Introduzione**
- **Stato dell'arte**
- **Principali ingredienti della misura**
- **Risultati finali**
- **Conclusioni**

Il rivelatore LHCb

- **VELO:**
ricostruzione del vertice
misura del tempo proprio
- **Magnete e tracciatore:**
ricostruzione delle tracce
misura del momento
- **RICH:**
identificazione delle
particelle (PID)
- **Calorimetro:**
misura dell'energia
identificazione di e, γ
- **Sistema muoni:**
identificazione dei muoni
- **Trigger**
selezione degli eventi



$L = 2(5) \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,
 3fb^{-1} integrata in 3 anni (Run 1)
 10 MHz interazione visibile
 $10^{12} \text{ } b\bar{b}$ coppie/anno

Motivazioni dell'analisi: determinazione della matrice CKM

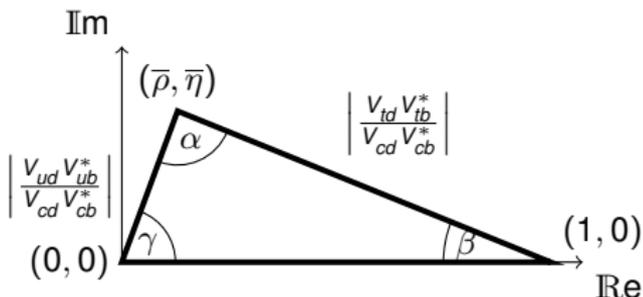
- La matrice CKM descrive il **mescolamento** del sapore dei quark
- La sua origine è dovuta alla differenza tra gli **autostati** di **massa** e **deboli**
- La precisa determinazione degli elementi di matrice è estremamente importante per una completa **comprensione della violazione di CP**
- La richiesta dell'**unitarietà** della matrice impone dei vincoli:

$$V_{CKM} \cdot V_{CKM}^* = \mathbb{1} \quad \implies \quad \sum_i V_{ij} \cdot V_{ik} = \sum_i V_{ji} \cdot V_{ki} = \delta_{jk}$$

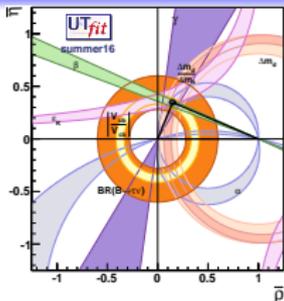
$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{se } j = k \\ 0, & \text{se } j \neq k \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{condizione di unitarietà} \\ \text{condizione di ortogonalità} \end{array}$$

- É possibile così definire dei "triangoli di unitarietà"
- Attualmente l'angolo γ è quello conosciuto **con meno precisione**

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



Motivazioni dell'analisi: perché $B_{(s)}^0 \rightarrow hh$

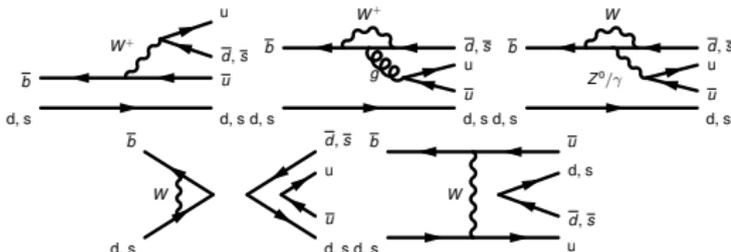


- Nei decadimenti $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ and $B_s \rightarrow K^+ K^-$ partecipano molti processi fisici:
 - decadimenti a digramma albero e pinguino
 - “mescolamento” dei mesoni B neutri
- La misura di CPV dipendente dal tempo permette la determinazione delle fasi γ e β_s della matrice CKM

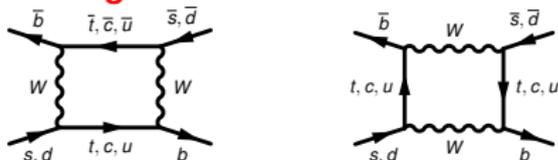
La presenza dei diagrammi a loop:

- introduce **incertezze adroniche** come parametri aggiuntivi nelle ampiezze (legati alla simmetria U-spin)
- rende le osservabili di CPV sensibili a **Nuova Fisica**
- fornisce l'opportunità di confrontare i risultati con le fasi di CKM misurate da decadimenti dominati dal livello albero

Diagrammi di decadimento



Diagrammi di mescolamento



Osservabili di CPV

- Le principali osservabili di CPV sono le asimmetrie dipendenti dal tempo dei decadimenti $B_d \rightarrow \pi^+ \pi^-$ e $B_s \rightarrow K^+ K^-$:

$$A(t) = \frac{\Gamma_{\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f}(t) - \Gamma_{B_{(s)}^0 \rightarrow f}(t)}{\Gamma_{\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f}(t) + \Gamma_{B_{(s)}^0 \rightarrow f}(t)} = \frac{-\mathbf{C}_f \cos(\Delta m_{d(s)} t) + \mathbf{S}_f \sin(\Delta m_{d(s)} t)}{\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right) + A_f^{\Delta\Gamma} \sinh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right)}$$

- Introducendo:

\mathbf{q}/\mathbf{p} : rapporto tra le proporzioni di B e \bar{B} negli autostati di massa

$\bar{\mathbf{A}}_f/\mathbf{A}_f$: rapporto tra le ampiezze dei decadimenti coniugati di CP

$$\implies \lambda_f = \frac{\mathbf{q}}{\mathbf{p}} \frac{\bar{\mathbf{A}}_f}{\mathbf{A}_f}$$

$$\mathbf{C}_f = \frac{1 - |\lambda_f|^2}{1 + |\lambda_f|^2}$$

$$\mathbf{S}_f = \frac{2\text{Im}\lambda_f}{1 + |\lambda_f|^2}$$

$$A_f^{\Delta\Gamma} = \frac{2\text{Re}\lambda_f}{1 + |\lambda_f|^2}$$

CPV diretta

CPV indotta dal mescolamento

- Le asimmetrie di CPV integrate nel tempo per i decadimenti $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ e $B_s \rightarrow \pi^+ K^-$ sono definite come:

$$A_{CP} = \frac{|\bar{\mathbf{A}}_f|^2 - |\mathbf{A}_f|^2}{|\bar{\mathbf{A}}_f|^2 + |\mathbf{A}_f|^2}$$

Risultati precedenti

- Prima misura di $C_{\pi\pi}$ and $S_{\pi\pi}$ effettuata da BaBar & Belle usando il decadimento $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$

BaBar: $C_{\pi\pi} = -0.25 \pm 0.08 \pm 0.02$, $S_{\pi\pi} = -0.68 \pm 0.10 \pm 0.03$

Belle: $C_{\pi\pi} = -0.33 \pm 0.06 \pm 0.03$, $S_{\pi\pi} = -0.64 \pm 0.08 \pm 0.03$

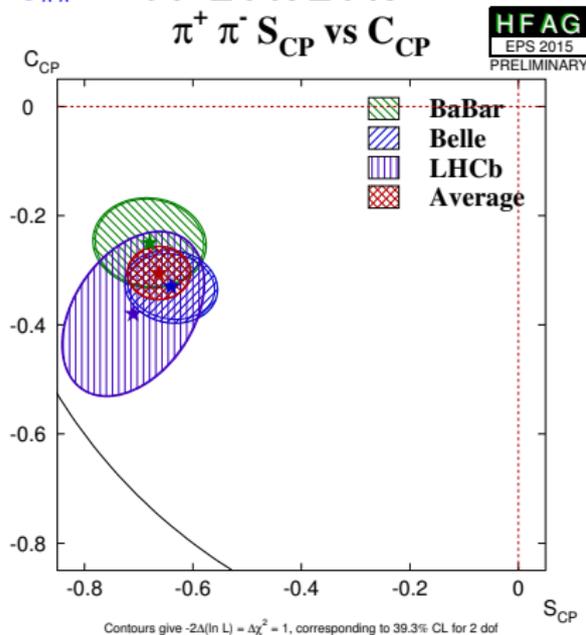
- LHCb ha già effettuato una misura sui decadimenti $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ e $B_s \rightarrow K^+K^-$ usando i dati raccolti nel 2011 (1 fb^{-1})

JHEP 10 (2013) 183

$B^0 \rightarrow K^+\pi^-$	$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$
$A_{CP} = -0.080 \pm 0.007 \pm 0.003$	$C_{\pi\pi} = -0.38 \pm 0.15 \pm 0.02$ $S_{\pi\pi} = -0.71 \pm 0.13 \pm 0.02$
$B_s \rightarrow K^+\pi^-$	$B_s \rightarrow K^+K^-$
$A_{CP} = 0.27 \pm 0.04 \pm 0.01$	$C_{KK} = 0.14 \pm 0.11 \pm 0.03$ $S_{KK} = 0.30 \pm 0.12 \pm 0.04$ $A_{KK}^{\Delta F} = -0.75 \pm 0.07 \pm 0.11$

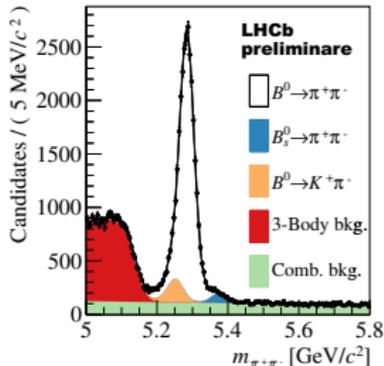
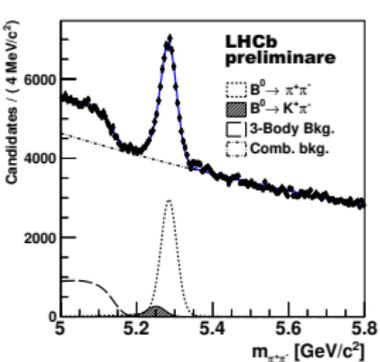
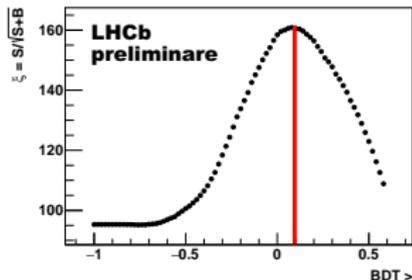
- Valori di γ e β_s finali:

$$\gamma = (63.5^{+7.2}_{-6.7})^\circ - 2\beta_s = -0.12^{+0.14}_{-0.16}$$



Selezione degli eventi

- I parametri C_f , S_f e $A^{\Delta\Gamma}$ sono determinati con un fit multidimensionale effettuato simultaneamente agli spettri $K\pi$, $\pi\pi$ e KK
- Tagli in PID sono applicati per ridurre i fondi incrociati a $\sim 10\%$ del segnale
- Un albero di decisione potenziato (BDT), comune a tutti i modi di decadimento, è utilizzato per rimuovere il fondo
- F.O.M = $S/\sqrt{S+B}$

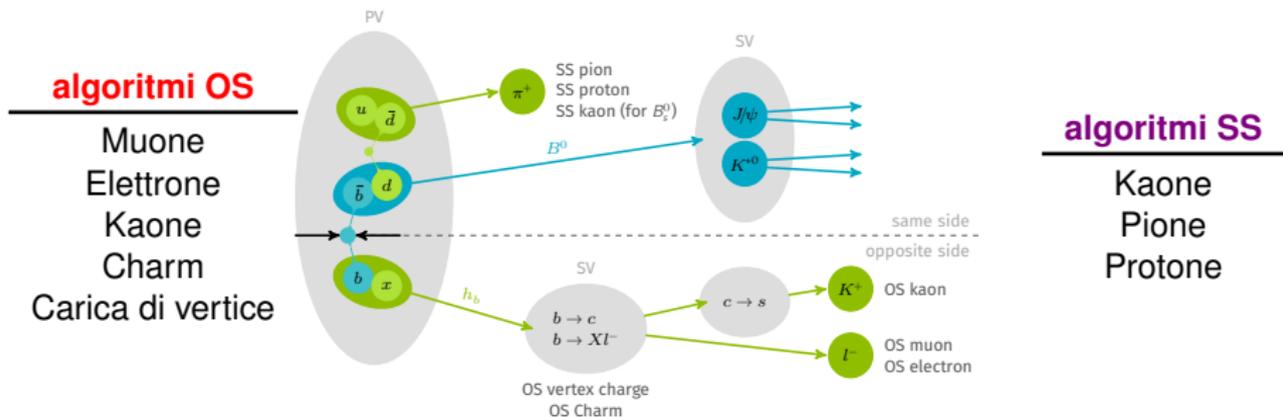


- Eventi di segnale:

$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$B_s \rightarrow K^+ K^-$
$\sim 28\,600$	$\sim 36\,800$
$B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	$B_s \rightarrow \pi^+ K^-$
$\sim 94\,200$	$\sim 7\,000$

Identificazione del sapore (I)

- Per determinare il sapore alla produzione dei mesoni $B_{(s)}^0$ vengono utilizzati gli algoritmi di identificazione del sapore
- L'identificazione viene effettuata sfruttando le particelle create nell'evento
- Queste particelle possono essere classificate come:
 - della **“stessa parte” (SS)** se provengono dalla frammentazione del **B di segnale**
 - della **“parte opposta” (OS)** se provengono dal decadimento del **B opposto**



Identificazione del sapore (II)

- **Efficienza di identificazione:** frazione di eventi identificati

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{errati}} + N_{\text{corretti}}}{N_{\text{errati}} + N_{\text{corretti}} + N_{\text{non identificati}}}$$

- **Probabilità di errore:** frazione di eventi mal identificati.

$$\omega = \frac{N_{\text{errati}}}{N_{\text{corretti}} + N_{\text{errati}}}$$

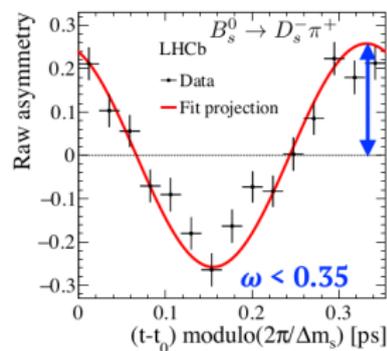
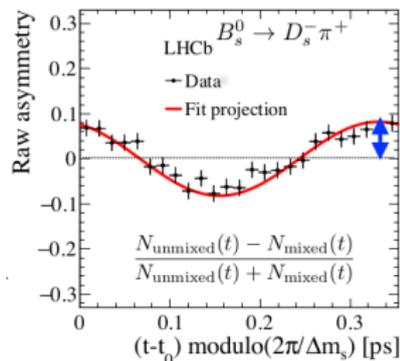
- **Diluizione:** $D = (1 - 2\omega)$
(ω calibrata sui dati)

- **Potere di identificazione:** degradazione statistica delle asimmetrie di CP proporzionale alla sensibilità delle misure di C_f e S_f

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon D^2 = \varepsilon \langle (1 - 2\omega)^2 \rangle$$

$$C_f^{\text{mis}} = (1 - 2\omega) C_f \quad \sigma^{\text{stat}}(C_f) \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} N}}$$

$$S_f^{\text{mis}} = (1 - 2\omega) S_f \quad \sigma^{\text{stat}}(S_f) \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}} N}}$$



Altre fonti di asimmetria

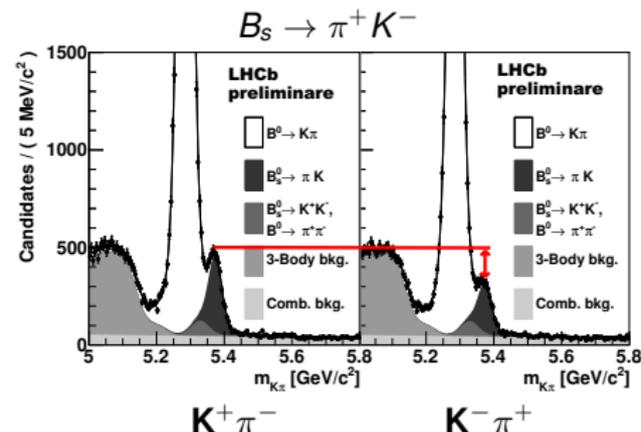
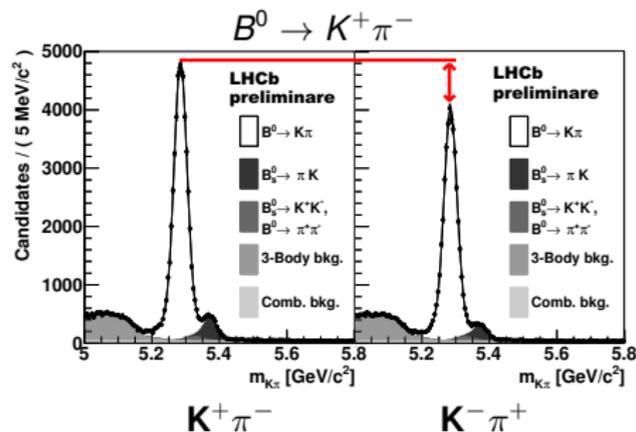
- Dal fit dipendente dal tempo è possibile estrarre le asimmetrie di CP dei decadimenti $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ e $B_s \rightarrow \pi^+ K^-$ dalla simmetria di produzione
- L'asimmetria TD misurata è:

$$A_{mis}(t) \approx A_{CP} + A_D + A_{PID} + A_P \cos(\Delta m_{d(s)} t)$$

- É necessario applicare una correzione tenendo in considerazione:
 - asimmetria introdotta dalle richieste di PID, A_{PID}
 - asimmetria di rivelazione del rivelatore, A_D
- Le asimmetrie sono determinate usando campioni di calibrazione e convolvendo i risultati con lo spazio fase del decadimento $B \rightarrow hh$

$A_{PID}^{K\pi}(B_{(s)}^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp)$	=	$(-0.04 \pm 0.25)\%$
$A_D^{K\pi}(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-)$	=	$(-0.900 \pm 0.141)\%$
$A_D^{K\pi}(B_s \rightarrow \pi^+ K^-)$	=	$(-0.924 \pm 0.142)\%$

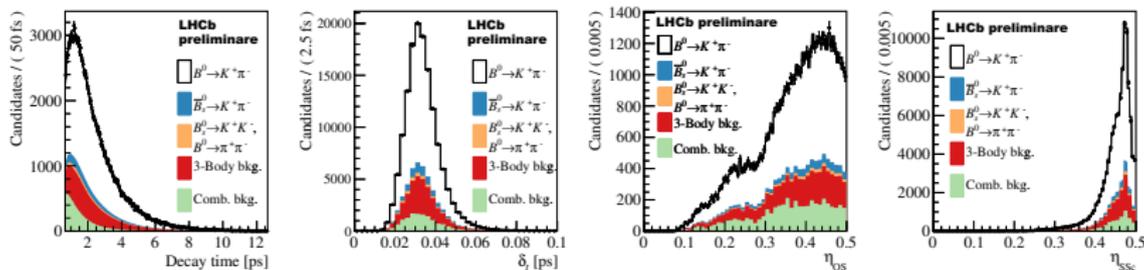
Risultati per la selezione $K\pi$ (I)



Canale	Asimmetrie misurate (A_{mis})	Asimmetrie di CP (A_{CP})
$B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	$(-9.338 \pm 0.396)\%$	$(-8.40 \pm 0.40 \pm 0.25 \pm 0.14)\%$
$B_s \rightarrow \pi^+ K^-$	$(22.27 \pm 1.53)\%$	$(21.31 \pm 1.53 \pm 0.25 \pm 0.14)\%$

- Incertezze in rosso \Rightarrow dovute alle asimmetrie di PID
- Incertezze in blue \Rightarrow dovute alle asimmetrie di rivelazione

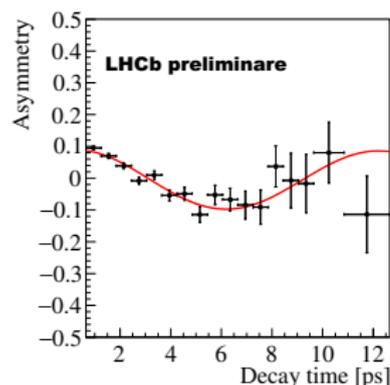
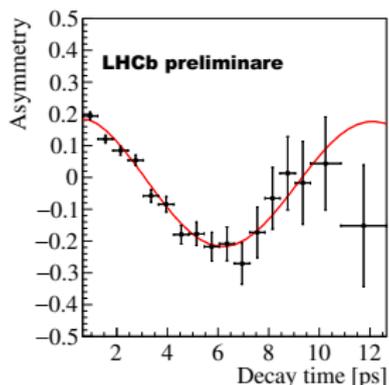
Risultati per la selezione $K\pi$ (II)



- Il canale dominante è $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ la cui asimmetria dipendente dal tempo si può osservare con gli algoritmi di identificazione del sapore

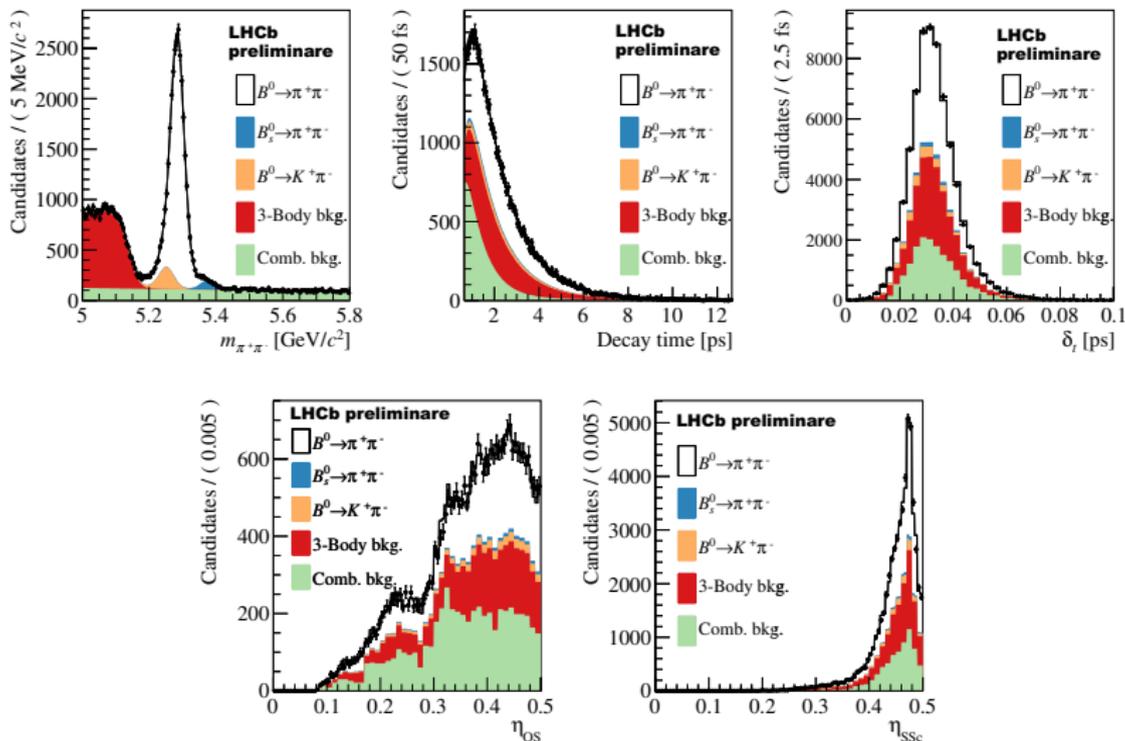
algoritmo d'identif. OS

algoritmo d'identif. SS($\pi + p$)



Risultati per la selezione $\pi\pi$ (I)

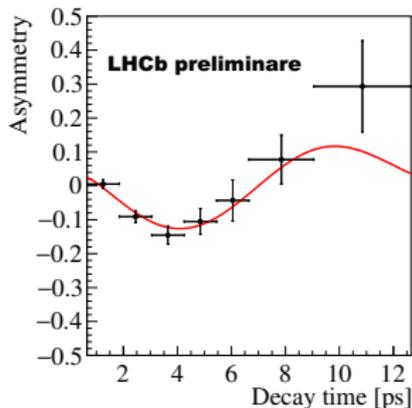
- Distribuzione delle osservabili usate nel fit



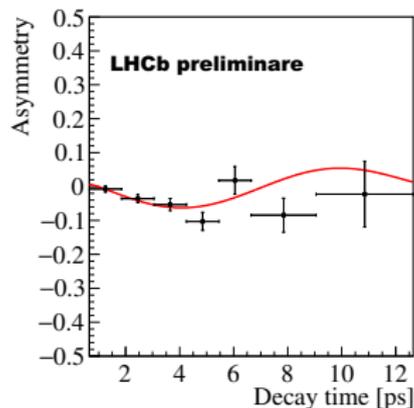
Risultati per la selezione $\pi\pi$ (II)

- L'asimmetria dipendente dal tempo è stata determinata sul decadimento $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ usando gli algoritmi di identificazione OS e $SS(\pi + p)$

algoritmo d'identif. OS



algoritmo d'identif. $SS(\pi + p)$



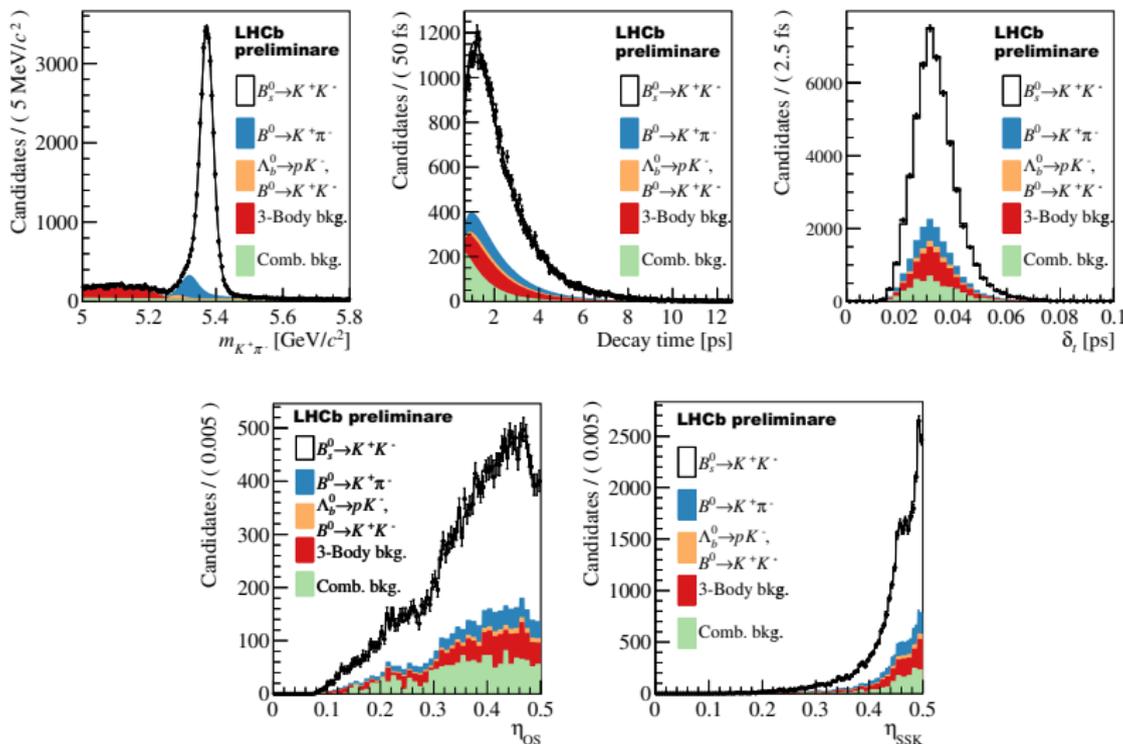
OS + SS($\pi + p$) ($\varepsilon_{eff} \sim 4\%$)

C $_{\pi\pi}$ = $-0.34 \pm 0.06 \pm 0.01$

S $_{\pi\pi}$ = $-0.63 \pm 0.05 \pm 0.01$

Risultati per la selezione KK (I)

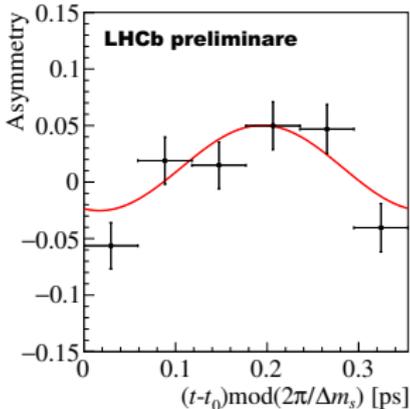
- Distribuzione delle osservabili usate nel fit



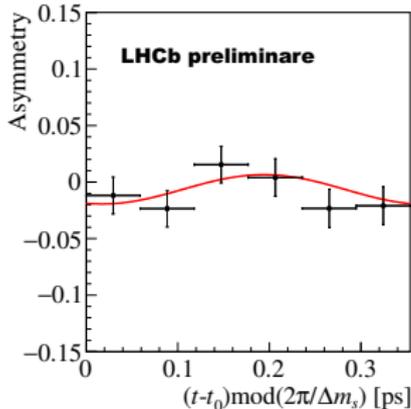
Risultati per la selezione KK (II)

- L'asimmetria dipendente dal tempo è stata determinata sul decadimento $B_s \rightarrow K^+ K^-$ usando gli algoritmi di identificazione OS e SSk

algoritmi d'identif. OS



algoritmo d'identif. SSk



OS + SSkNN ($\varepsilon_{eff} \sim 3.7\%$)

$C_{KK} = 0.20 \pm 0.06 \pm 0.02$

$S_{KK} = 0.18 \pm 0.06 \pm 0.02$

$A_{KK}^{\Delta\Gamma} = -0.79 \pm 0.07 \pm 0.10$

Conclusioni

- Abbiamo fornito sia una misura dipendente dal tempo che una integrata nel tempo della violazione di CP nei decadimenti $B \rightarrow hh$
- Tutti i valori finali sono in **accordo con i risultati precedenti**
- Le misure di A_{CP} , $C_{\pi^+\pi^-}$ e $S_{\pi^+\pi^-}$ **sono le più precise** provenienti da un singolo esperimento
- Usando un test χ^2 i risultati nella selezione K^+K^- differiscono da (0, 0, -1) con un significanza di 4σ
 \implies **è la più forte evidenza di TD CPV nei decadimenti dei B_s**
- Articolo in fase di pubblicazione: *LHCb-PAPER-2018-006*

$C_{\pi^+\pi^-}$	=	$-0.34 \pm 0.06 \pm 0.01$
$S_{\pi^+\pi^-}$	=	$-0.63 \pm 0.05 \pm 0.01$
$C_{K^+K^-}$	=	$0.20 \pm 0.06 \pm 0.02$
$S_{K^+K^-}$	=	$0.18 \pm 0.06 \pm 0.02$
$A_{K^+K^-}^{\Delta\Gamma}$	=	$-0.79 \pm 0.07 \pm 0.10$
$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+\pi^-)$	=	$(-8.4 \pm 0.4 \pm 0.3)\%$
$A_{CP}(B_s \rightarrow \pi^+K^-)$	=	$(21.3 \pm 1.5 \pm 0.3)\%$

Diapositive di supporto

Osservabili di CPV (II)

- γ e β_s sono legate a C_f e S_f da complicate equazioni non lineari
- I diagrammi a pinguino introducono parametri adronici (d, θ, d', θ') nella ampiezze di decadimento:
 - incertezze aggiuntive sulla misura di γ e β_s
 - con le simmetrie di **Isospin** e **U-spin** si possono vincolare i parametri adronici e ridurre le incertezze teoriche su γ e β_s

$$C_{\pi\pi} = \frac{2d \sin(\theta) \sin(\gamma)}{1 - 2d \cos(\theta) \cos(\gamma) + d^2},$$

$$C_{KK} = \frac{2\tilde{d}' \sin(\theta') \sin(\gamma)}{1 + 2\tilde{d}' \cos(\theta') \cos(\gamma) + \tilde{d}'^2},$$

$$S_{\pi\pi} = -\frac{\sin(2\beta + 2\gamma) - 2d \cos(\theta) \sin(2\beta + \gamma) + d^2 \sin(2\beta)}{2d \cos(\theta) \cos(\gamma) + d^2},$$

$$S_{KK} = -\left(\frac{\sin(-2\beta_s + 2\gamma) + 2\tilde{d}' \cos(\theta') \sin(-2\beta_s + \gamma) + \tilde{d}'^2 \sin(-2\beta_s)}{1 + 2\tilde{d}'^2 \cos(\theta') \cos(\gamma) + \tilde{d}'^2} \right).$$

Physics Letters B, Volume 741

Sistematiche

- Due metodi principali:
 - **Parametri fissati** → ripetere il fit ai dati 100 volte cambiando il valore dei parametri fissati in accordo ai loro errori (e correlazioni con gli altri parametri)
 - **Modelli**: generare pseudo-esperimenti con il modello base e ripetere il fit con il modello base e quello alternativo
- La somma in quadratura della media e la RMS della variazione è presa come incertezza sistematica

Parametri	$C_{\pi^+\pi^-}$	$S_{\pi^+\pi^-}$	$C_{K^+K^-}$	$S_{K^+K^-}$	$A_{K^+K^-}^{\Delta\Gamma}$	$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+\pi^-)$	$A_{CP}(B_s \rightarrow \pi^+K^-)$
Accettanza temporale	0.0011	0.0004	0.0020	0.0017	0.0778	0.0004	0.0002
Calibrazione risoluzione temporale	0.0014	0.0013	0.0108	0.0119	0.0051	0.0001	0.0001
Modello risoluzione temporale	0.0001	0.0005	0.0002	0.0002	0.0003	trascurabile	trascurabile
Parametri d'ingresso	0.0025	0.0024	0.0092	0.0107	0.0480	trascurabile	0.0001
Calibrazione algoritmo OS	0.0018	0.0021	0.0018	0.0019	0.0001	trascurabile	trascurabile
Calibrazione algoritmo SSk	n/a	n/a	0.0061	0.0086	0.0004	n/a	n/a
Calibrazione algoritmo SS	0.0015	0.0017	n/a	n/a	n/a	trascurabile	trascurabile
Modello temp. fondi incrociati	0.0075	0.0059	0.0022	0.0024	0.0003	0.0001	0.0001
Fondo 3-corpi	0.0070	0.0056	0.0044	0.0043	0.0304	0.0008	0.0043
Modello temporale fondo comb.	0.0016	0.0016	0.0004	0.0002	0.0019	0.0001	0.0005
Modello massa segnale (reso)	0.0027	0.0025	0.0015	0.0015	0.0023	0.0001	0.0041
Modello massa segnale (code)	0.0007	0.0008	0.0013	0.0013	0.0016	trascurabile	0.0003
Modello massa fondo comb.	0.0001	0.0003	0.0002	0.0002	0.0016	trascurabile	0.0001
Asimmetria PID	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.0025	0.0025
Asimmetria rivelazione	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	0.0014	0.0014
Totale	0.0115	0.0095	0.0165	0.0191	0.0966	0.0030	0.0066

Calibrazione degli algoritmi di identificazione del sapore

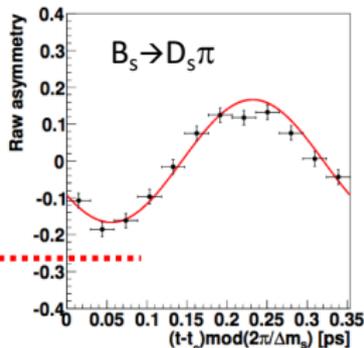
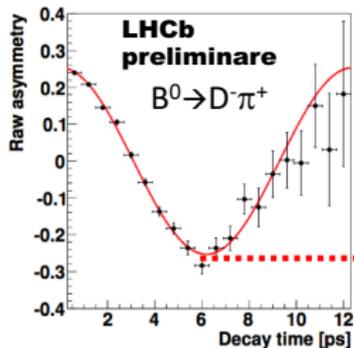
- La probabilità di errore η , calcolata dagli algoritmi, deve essere calibrata in modo da ottenere un stima di $\omega(\eta)$ corretta
- Funzione di calibrazione:

$$\omega(\eta) = p_0 + p_1 \cdot (\eta - \hat{\eta})$$

- La combinazione degli algoritmi **OS** è calibrata direttamente durante il fit finale grazie al decadimento $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$
- Gli algoritmi **protone SS** e **pione SS** sono calibrati usando il canale di decadimento $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$
 - Una volta calibrati i due algoritmi vengono combinati insieme in un **unico identificatore** (**SS**($\pi + p$))
 - La combinazione è successivamente ricalibrata durante il fit finale
- L'algoritmo **kaone SS** (**SSk**) è calibrato usando il decadimento $B_s \rightarrow D_s^+ \pi^-$
 - Il numero di eventi di $B_s \rightarrow \pi^+ K^-$ non è sufficiente per ottenere una calibrazione attendibile
 - differenze tra i due modi di decadimento sono tenute in considerazioni effettuando un ripesamento cinematico

Risoluzione temporale

- Determinata eseguendo un fit TD ad un campione di eventi $B_{(s)} \rightarrow D_{(s)}\pi$:
 - Modello di risoluzione è una doppia gaussiana, studiata da un campione MC
→ frazioni relative tra le gaussiane e il rapporto tra le larghezze è fissato ai valori della simulazione
 - $\Gamma_{(s)}$ e $\Delta\Gamma_{(s)}$ sono fissate alle medie di HFLAV
 - Nel fit è utilizzato solo l'algoritmo OS
- Parametri sono fissati nel fit al campione di $B \rightarrow hh$
- Errori e correlazioni sono tenute in considerazione come sistematiche



$$\sigma_1(\delta_t) = q_0 + q_1 \cdot (\delta_t - \hat{\delta}_t)$$

$$\sigma_2(\delta_t) = r_\sigma \cdot \sigma_1(\delta_t)$$

q_0	=	46.1 ± 2.5 fs
q_1	=	0.81 ± 0.23
$\rho(q_0, q_1)$	=	-0.32

Accettanza temporale

- Accettanza del tempo di decadimento per i decadimenti del B^0 può essere determinata dai dati:
 - gli spettri $K\pi$, $\pi\pi$ e KK vengono divisi in categorie del tempo di decadimento
 - Per ogni categoria viene eseguito un fit sulla massa invariante in modo da determinare il numero di eventi di $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$
 - Viene costruito un istogramma con la distribuzione del tempo di decadimento del $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$
 - Dato che $\Delta\Gamma_d = 0$, l'accettanza può essere ricavata dividendo l'istogramma ottenuto per un puro esponenziale con $\tau = 1.520 \text{ ps}$
 - L'accettanza ottenuta è infine fittata con una funzione efficace
- Per gli altri modi di decadimento:
 - Il rapporto delle accettanze con il $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ è determinato dal MC.
 - L'istogramma della accettazione del $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ ottenuto precedentemente è riscaldato usando il relativo rapporto
 - Il nuovo istogramma ottenuto è fittato con una funzione efficace

