

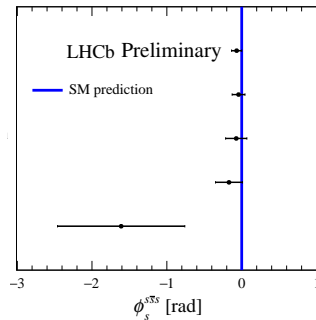
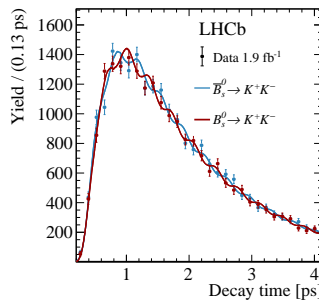
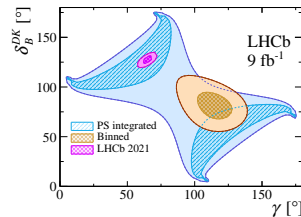
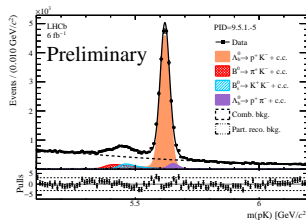
Stato delle ricerche di violazione di CP nei decadimenti degli adroni beauty a LHCb

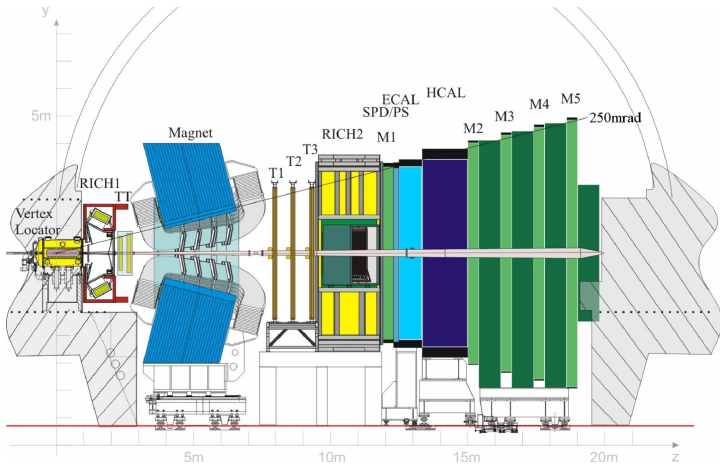
Andrea Villa
INFN e Università di Bologna



Incontri di Fisica delle Alte Energie - 12 Aprile 2023

- Misura della fase debole ϕ_s nel decadimento $B_s \rightarrow \phi\phi$
[LHCb-PAPER-2023-00] **NEW!**
- Studio di violazione di CP nei decadimenti $B^\pm \rightarrow [K^+K^-\pi^+\pi^-]_D h^\pm$ e $B^\pm \rightarrow [\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-]_D h^\pm$
[LHCb-PAPER-2022-037]
- Misura delle asimmetrie CP time-dependent nei decadimenti $B_{(s)}^0 \rightarrow h^+h'^-$
in corso
- Misura delle asimmetrie CP integrate nei decadimenti $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$
in corso





- Spettrometro a singolo braccio concentrato in avanti ($2 < \eta < 5$)
- Sensibile nella regione di massima produzione di coppie $b\bar{b}$ e $c\bar{c}$
- Rivelatore di vertice (VELO): ricostruzione di vertici secondari e ottima risoluzione sul parametro d'impatto,
- Rivelatori di emissione Cherenkov (RICH) per l'identificazione delle particelle (PID)
- Magnete, stazioni traccianti, calorimetri e camere per muoni
- Dati raccolti:
 - Run 1: $\mathcal{L} = 3 \text{ fb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 7\text{-}8 \text{ TeV}$
 - Run 2: $\mathcal{L} = 6 \text{ fb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$

Misura della fase debole ϕ_s nel decadimento $B_s \rightarrow \phi\phi$

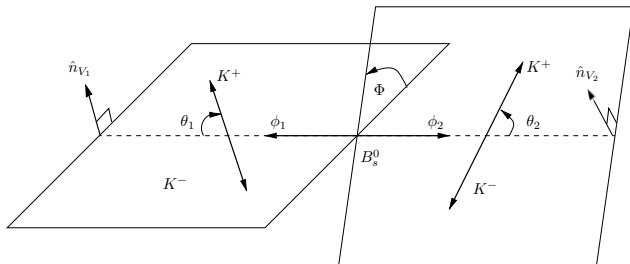
Misura della fase debole ϕ_s nel decadimento $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$

[LHCb-PAPER-2023-00] **NEW!**

- Il decadimento $B_s^0 \rightarrow \phi\phi \rightarrow K^+K^-K^+K^-$ è un ottimo banco di prova per la ricerca di **Nuova Fisica** oltre il Modello Standard (MS), in quanto può procedere solo tramite diagrammi a loop (o *pinguino*)
- Nel MS, la violazione di CP in funzione del tempo è caratterizzata dai due parametri $\phi_s^{\bar{s}\bar{s}s} \approx 0$ e $|\lambda| \approx 1$, che possono essere misurati nei **3 possibili stati di polarizzazione lineare** del sistema $\phi\phi$ ($0, \parallel, \perp$)
- Misura sui dati **Run 2** che rimpiazza la precedente misura con dati fino al 2016 [JHEP 12 (2019) 155]
- Il tasso di decadimento differenziale può essere scritto come

$$\frac{d^4\Gamma(t, \vec{\Omega})}{dt d\vec{\Omega}} \propto \sum_{k=1}^6 h_k(t) f_k(\vec{\Omega})$$

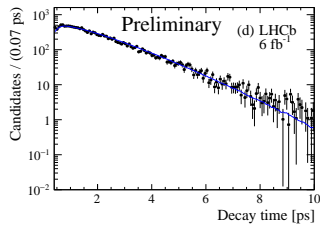
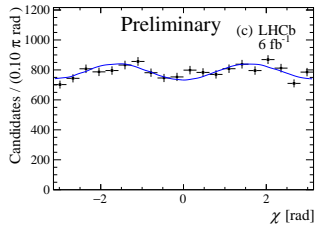
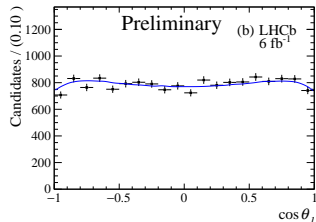
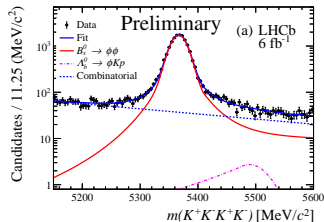
- $f_k(\vec{\Omega})$ funzioni angolari [JHEP 12 (2019) 155]
 $\vec{\Omega} = (\theta_1, \theta_2, \Phi)$
- $h_k(t)$ funzioni temporali, dipendenti dal sapore iniziale del B_s^0 , dalla massa e larghezza di decadimento degli autostati di massa leggero e pesante, e dalle fasi e ampiezze $\phi_{s,i}, |\lambda_i|$



Misura della fase debole ϕ_S nel decadimento $B_S \rightarrow \phi\phi$

[LHCb-PAPER-2023-00] **NEW!**

- Il sapore iniziale del mesone B_S^0 è determinato da algoritmi di **flavour-tagging**, calibrati su decadimenti $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ e $B_S^0 \rightarrow D_S^- \pi^+$
- Le accettanze angolari e temporali sono studiate tramite campioni simulati
- Sono compiuti sia un fit totale per ottenere $\phi_S^{\overline{SS}}$ che $|\lambda|$, sia un fit dipendente dalla polarizzazione usando $\phi_{S,i}$ e $|\lambda_i|$ ($i = 0, \parallel, \perp$)
- Vengono anche considerate possibili **interferenze** tra i vari stati di polarizzazione



Misura della fase debole ϕ_s nel decadimento $B_s \rightarrow \phi\phi$

[LHCb-PAPER-2023-00] **NEW!**

- Risultati Run 2:

Totale

$$\phi_s^{\bar{s}s} = -0.042 \pm 0.075 \pm 0.009 \text{ rad}$$

$$|\lambda| = 1.004 \pm 0.030 \pm 0.009$$

Polarizzati

$$\phi_{s,0} = -0.018 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$\phi_{s,\parallel} - \phi_{s,0} = 0.012 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$\phi_{s,\perp} - \phi_{s,0} = 0.017 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$|\lambda_0| = 1.02 \pm 0.17$$

$$|\lambda_{\parallel}/\lambda_0| = 0.78 \pm 0.21$$

$$|\lambda_{\perp}/\lambda_0| = 0.97 \pm 0.22$$

Misura della fase debole ϕ_s nel decadimento $B_s \rightarrow \phi\phi$

[LHCb-PAPER-2023-00] **NEW!**

• Risultati Run 2:

Totale

$$\phi_s^{\bar{s}s} = -0.042 \pm 0.075 \pm 0.009 \text{ rad}$$

$$|\lambda| = 1.004 \pm 0.030 \pm 0.009$$

Polarizzati

$$\phi_{s,0} = -0.018 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$\phi_{s,\parallel} - \phi_{s,0} = 0.012 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$\phi_{s,\perp} - \phi_{s,0} = 0.017 \pm 0.09 \text{ rad}$$

$$|\lambda_0| = 1.02 \pm 0.17$$

$$|\lambda_{\parallel}/\lambda_0| = 0.78 \pm 0.21$$

$$|\lambda_{\perp}/\lambda_0| = 0.97 \pm 0.22$$

• Combinazione con il Run 1:

$$\phi_s^{\bar{s}s} = -0.074 \pm 0.069 \text{ rad}$$

$$|\lambda| = 1.009 \pm 0.030$$

compatibili con il MS

- **Misura più precisa** al mondo di asimmetria CP time-dependent nei decadimenti $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$
- **Nessuna evidenza** di violazione di CP , né di dipendenza dallo stato di polarizzazione (misurata per la prima volta)

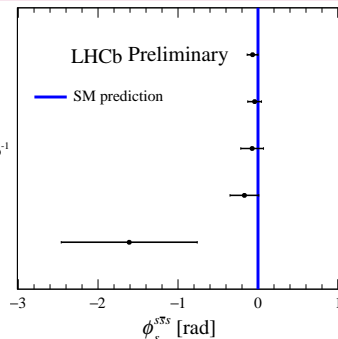
Run 1 + Run 2, 9 fb⁻¹

Run 2, 6 fb⁻¹

Run 1 + 2015 + 2016, 5 fb⁻¹

Run 1, 3 fb⁻¹

2011, 1 fb⁻¹



Studio di violazione di CP nei decadimenti $B^\pm \rightarrow [K^+K^-\pi^+\pi^-]_D h^\pm$ e $B^\pm \rightarrow [\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-]_D h^\pm$

- I decadimenti $B^\pm \rightarrow Dh^\pm$ permettono di misurare l'angolo della matrice CKM $\gamma = \arg\left(\frac{-V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}\right)$
- Il canale $D^0 \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ ha una ricca struttura risonante, che aumenta la sensibilità a γ se si studiano regioni particolari dello spazio delle fasi
- Ciò richiede la conoscenza della variazione della fase forte su tutto lo spazio delle fasi \implies si può estrarre da uno studio di ampiezza precedente [JHEP 02 (2019) 126], ma preferibile avere misure dirette in futuro
- Una analoga misura, con meno precisione, si può compiere con i decadimenti $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$
- L'ampiezza del decadimento può essere scritta come la somma delle due possibili transizioni:

$$\mathcal{A}_{B^-}(\Phi) = \mathcal{A}_{B^-}^{D^0 h^-} \left(\mathcal{A}_{D^0}(\Phi) + r_B^{Dh} e^{i(\delta_B^{Dh} - \gamma)} \mathcal{A}_{\bar{D}^0}(\Phi) \right)$$

- $\mathcal{A}_{D^0}, \mathcal{A}_{\bar{D}^0}$ ampiezze dei decadimenti $D \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ (o $D \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$)
- $r_B^{Dh} = \mathcal{A}_{B^-}^{\bar{D}^0 h^-} / \mathcal{A}_{B^-}^{D^0 h^-}$ rapporto tra ampiezza soppressa e favorita (≈ 0.1 per DK e 0.005 per $D\pi$)
- δ_B^{Dh} differenza delle fasi deboli dei decadimenti
- Φ bin nello spazio delle fasi 5-dimensionale

- Si definiscono gli osservabili di violazione di CP :

$$x_\pm^{Dh} = r_B^{Dh} \cos(\delta_B^{Dh} \pm \gamma), \quad y_\pm^{Dh} = r_B^{Dh} \sin(\delta_B^{Dh} \pm \gamma)$$

tramite cui si possono scrivere gli eventi di segnale

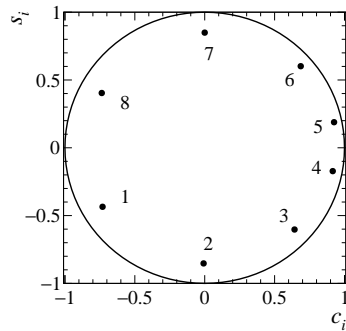
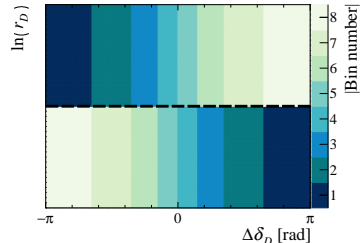
$$N_{\pm i}^{\pm} = N_{B^\pm}^{Dh} \left(F_{\pm i} + ((x_\pm^{Dh})^2 + (y_\pm^{Dh})^2) F_{\pm i} + 2\sqrt{F_{+i}F_{-i}}(x_\pm^{Dh} c_i - y_\pm^{Dh} s_i) \right)$$

- $F_{\pm i}$ frazione di eventi $D \rightarrow h^+h^-\pi^+\pi^-$ nel bin i -esimo
- $c_i, (s_i)$ valore medio della differenza del seno (coseno) di $\Delta\delta_D$ nel bin i -esimo dal modello di ampiezza di LHCb [JHEP 02 (2019) 126], in attesa di misure dirette da BESIII

- Un ulteriore vincolo su γ può essere imposto misurando anche le asimmetrie CP nel campione totale e il rapporto tra le larghezze rispetto al decadimento $D \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\pi^-$ [LHCb-PAPER-2022-017]:

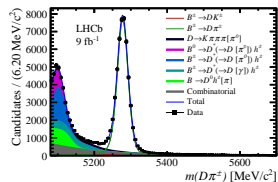
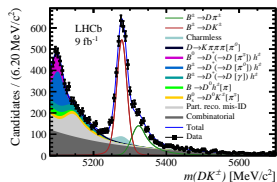
$$A_h^{KK\pi\pi} = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow Dh^-) - \Gamma(B^+ \rightarrow Dh^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow Dh^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow Dh^+)}$$

$$R^{KK\pi\pi} = \frac{R_{KK\pi\pi}}{R_{K\pi\pi\pi}}, \quad R_f = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow [f]_D K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow [f]_D K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow [f]_D \pi^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow [f]_D \pi^+)}$$



- Dal campione totale si ottengono i valori delle asimmetrie e dei rapporti delle larghezze:

CP -violating observable	Fit results
$A_K^{KK\pi\pi}$	$0.093 \pm 0.023 \pm 0.002$
$A_\pi^{KK\pi\pi}$	$-0.009 \pm 0.006 \pm 0.001$
$A_K^{\pi\pi\pi\pi}$	$0.060 \pm 0.013 \pm 0.001$
$A_\pi^{\pi\pi\pi\pi}$	$-0.0082 \pm 0.0031 \pm 0.0007$
$R_{CP}^{KK\pi\pi}$	$0.974 \pm 0.024 \pm 0.015$
$R_{CP}^{\pi\pi\pi\pi}$	$0.978 \pm 0.014 \pm 0.010$



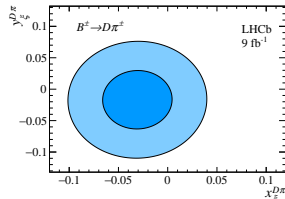
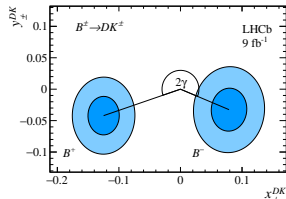
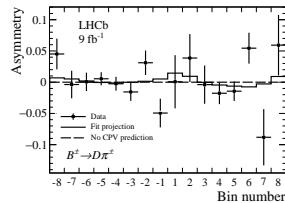
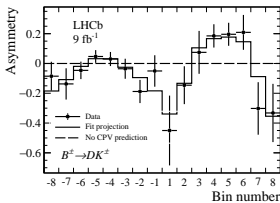
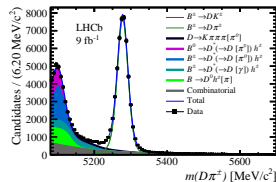
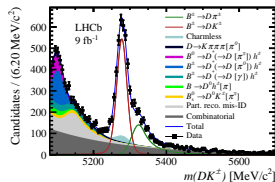
- Dal campione totale si ottengono i valori delle asimmetrie e dei rapporti delle larghezze:

CP -violating observable	Fit results
$A_{KK}^{KK\pi\pi}$	$0.093 \pm 0.023 \pm 0.002$
$A_{\pi}^{KK\pi\pi}$	$-0.009 \pm 0.006 \pm 0.001$
$A_{KK}^{\pi\pi\pi\pi}$	$0.060 \pm 0.013 \pm 0.001$
$A_{\pi}^{\pi\pi\pi\pi}$	$-0.0082 \pm 0.0031 \pm 0.0007$
$R_{CP}^{KK\pi\pi}$	$0.974 \pm 0.024 \pm 0.015$
$R_{CP}^{\pi\pi\pi\pi}$	$0.978 \pm 0.014 \pm 0.010$

- Fittando le distribuzioni nei vari bin, si ottengono i valori degli osservabili di violazione di CP

CP -violating observable	Fit result ($\times 10^2$)
x_{-}^{DK}	$7.9 \pm 2.9 \pm 0.4 \pm 0.4$
y_{-}^{DK}	$-3.3 \pm 3.4 \pm 0.4 \pm 3.6$
x_{+}^{DK}	$-12.5 \pm 2.5 \pm 0.3 \pm 1.7$
y_{+}^{DK}	$-4.2 \pm 3.1 \pm 0.3 \pm 1.3$
$x_{\xi}^{D\pi}$	$-3.1 \pm 3.5 \pm 0.7 \pm 0.1$
$y_{\xi}^{D\pi}$	$-1.7 \pm 4.7 \pm 0.6 \pm 1.1$

- Incertezze dominate dalla statistica



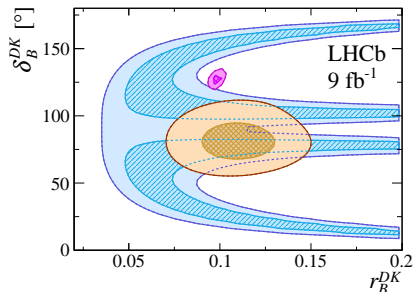
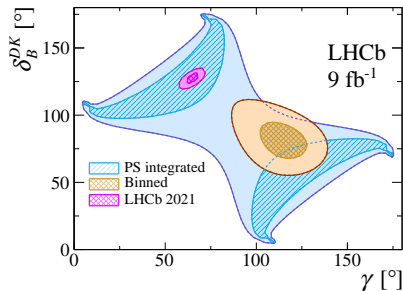
- I risultati si possono interpretare in funzione degli osservabili fisici, ottenendo:

$$\delta_B^{DK} = (81_{-13}^{+14})^\circ \quad r_B^{DK} = 0.110 \pm 0.020$$

$$\delta_B^{D\pi} = (298_{-118}^{+62})^\circ \quad r_B^{D\pi} = 0.0041_{-0.0041}^{+0.0054}$$

$$\gamma = (116_{-14}^{+12})^\circ$$

- I risultati dell'analisi **binnata** e **integrata** sono compatibili con i precedenti **risultati di LHCb** [JHEP 12 (2021) 141]
- Prima misura di osservabili di CP nei decadimenti $B^\pm \rightarrow [K^+K^-\pi^+\pi^-]_D h^\pm$
- La misura dei parametri riguardanti la variazione della fase forte da parte di BESIII permetterà di aggiornare la misura in maniera model-independent



Misura delle asimmetrie CP time-dependent nei decadimenti $B_{(s)}^0 \rightarrow h^+ h'^-$

Misura delle asimmetrie CP time-dependent nei decadimenti $B_{(s)}^0 \rightarrow h^+ h'^-$

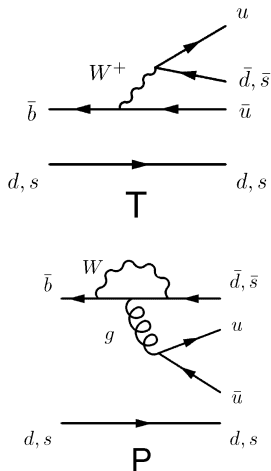
in corso

- I decadimenti a due corpi privi di charm dei mesoni B^0 e B_s^0 permettono di testare il Modello Standard e misurare gli angoli della matrice CKM
- Molti di decadimenti procedono principalmente tramite loop \Rightarrow grandi **incertezze adroniche** ma sensibili a Nuova Fisica
- Gli osservabili di violazione di CP possono essere misurati in maniera **integrata** ($B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ e $B_s^0 \rightarrow \pi^+ K^-$):

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

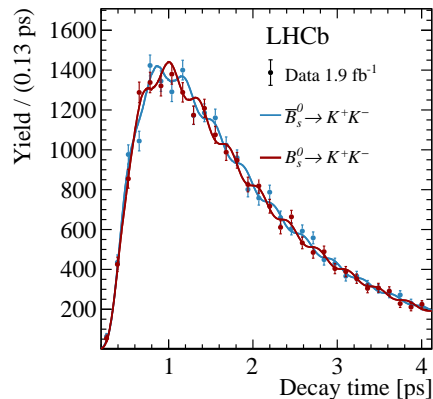
oppure **dipendente dal tempo** ($B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ e $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$):

$$\begin{aligned} A_{CP}(t) &= \frac{\Gamma_{\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f}(t) - \Gamma_{B_{(s)}^0 \rightarrow f}(t)}{\Gamma_{\bar{B}_{(s)}^0 \rightarrow f}(t) + \Gamma_{B_{(s)}^0 \rightarrow f}(t)} \\ &= \frac{S_f \sin(\Delta m_{d(s)} t) - C_f \cos(\Delta m_{d(s)} t)}{\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right) + A_f^{\Delta\Gamma} \sinh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right)} \end{aligned}$$



$$A_{CP}(t) = \frac{S_f \sin(\Delta m_{d(s)} t) - C_f \cos(\Delta m_{d(s)} t)}{\cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right) + A_f^{\Delta\Gamma} \sinh\left(\frac{\Delta\Gamma_{d(s)}}{2} t\right)}$$

- C_f : violazione di CP nel decadimento
 - S_f : violazione di CP nell'interferenza tra mixing e decadimento
 - $A_f^{\Delta\Gamma} = \sqrt{1 - (C_f)^2 - (S_f)^2}$ constraint da verificare a posteriori
- Analisi compiuta da LHCb con dati raccolti fino al 2016 [JHEP 03 (2021) 075]
- Attualmente in corso la misura con l'intero campione Run 2 $\Rightarrow 3\times$ più statistica

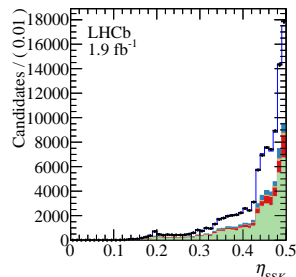
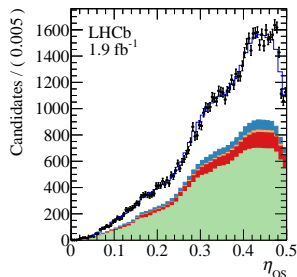
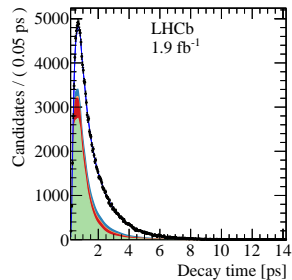
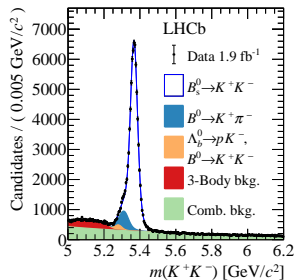


- Gli osservabili vengono estratti tramite un fit simultaneo alle distribuzioni di:

- Massa invariante $m(h^+ h'^-)$
- Tempo di decadimento t
- Risposta del flavour-tagging ξ_{OS}, ξ_{SS}
- Probabilità di mis-tag η_{OS}, η_{SS}

- Vari effetti sperimentali da considerare

- Asimmetrie di interazione
- Asimmetrie di rivelazione (PID)
- Asimmetrie del flavour tagging e di produzione
- Accettazione e risoluzione temporale



- Nuova misura di violazione di CP nei decadimenti a 2 corpi dei mesoni B^0 e B^0_s in corso
- Campione totale **Run 2**, $\mathcal{L} = 6 \text{ fb}^{-1}$
- Precisione prevista sugli osservabili:

$$\delta(A_{CP}^{B^0 \rightarrow K^+ \pi^-}) = 2 \times 10^{-3}$$

$$\delta(A_{CP}^{B^0_s \rightarrow \pi^+ K^-}) = 8 \times 10^{-3}$$

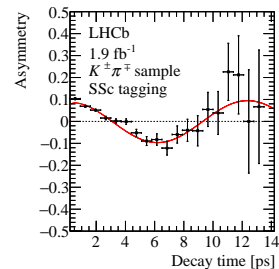
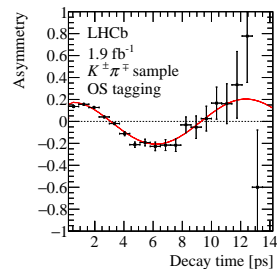
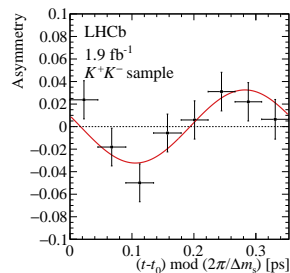
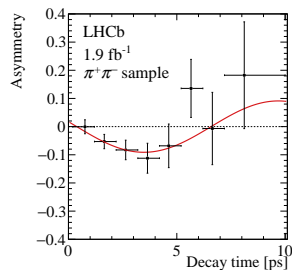
$$\delta(C_{\pi\pi}) = 0.03$$

$$\delta(S_{\pi\pi}) = 0.02$$

$$\delta(C_{KK}) = 0.02$$

$$\delta(S_{KK}) = 0.02$$

- Misura **più precisa al mondo** di questi osservabili

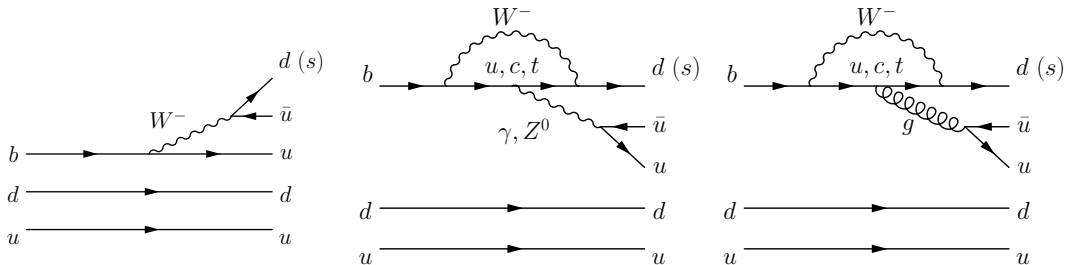


Misura delle asimmetrie CP integrate nei decadimenti $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$

Misura delle asimmetrie CP integrate nei decadimenti $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$

in corso

- Ricerca di violazione di CP in decadimenti **barionici**, ancora da osservare
- Misura delle asimmetrie CP nei decadimenti $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-$ e $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-$ con l'intero campione Run 1+2 di LHCb
- Possibili transizioni tree-level o a loop
 - Sensibili a Nuova Fisica
 - Diagrammi simili a quelli del $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$, dove violazione di CP è già stata osservata



- La nuova misura permetterà di raggiungere precisioni **al di sotto dell'1%** in entrambi i canali

- Stato sperimentale attuale, dominato da LHCb Run1

	$A_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-)$	$A_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-)$
CDF [Phys. Rev. Lett. 113]	$(-10 \pm 8 \pm 4)\%$	$(6 \pm 7 \pm 3)\%$
LHCb [Phys. Lett. B 784]	$(-2.0 \pm 1.3 \pm 1.9)\%$	$(-3.5 \pm 1.7 \pm 2.0)\%$

- Notevoli incertezze sistematiche, dovute alla asimmetria di produzione della Λ_b^0 e di interazione dei protoni
- Strategia: si misura l'asimmetria grezza nei dati

$$A_{raw}(f) = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + N(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}$$

- E si sottraggono le asimmetrie sperimentali per ottenere A_{CP} :

$$\begin{aligned} A_{CP}(f) &= \frac{\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{f})} \\ &= A_{raw}(f) - A_D(f) - A_{PID}(f) - A_P(\Lambda_b^0) - A_{trigger}(f) \end{aligned}$$

- Riduzione dei sistematici grazie alla nuova misura di asimmetria di produzione della Λ_b^0 [JHEP 10 (2021) 060]

Misura delle asimmetrie CP integrate nei decadimenti $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$

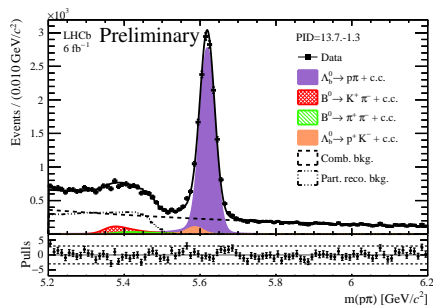
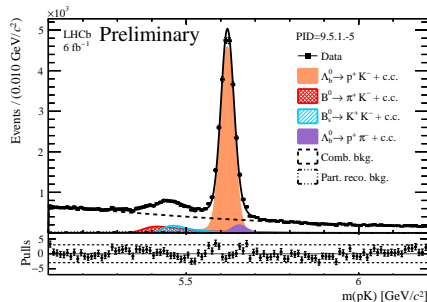
in corso

- Fit simultaneo agli 8 spettri di massa invariante $m(h^+ h^-)$ per stimare il numero di eventi di fondo cross-feed in ogni campione

$$A_{raw}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-) = (x.xx \pm 0.76)\%$$

$$A_{raw}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-) = (x.xx \pm 0.95)\%$$

- Nuovo metodo **tag-and-probe** ideato per stimare le asimmetrie dovute al trigger \implies uso di campioni semileptonici con alta statistica
- Aggiornamento e combinazione con la misura Run 1 alla luce dei recenti risultati per ridurre gli effetti sistematici
- La misura sar  la **pi  precisa al mondo** sui decadimenti del barione $\Lambda_b^0 \rightarrow ph^-$



- L'esperimento LHCb si sta dimostrando in grado di produrre misure di alta precisione su numerosi osservabili di violazione di CP
- Sono stati presentati i risultati più recenti e due **anticipazioni** di misure in corso
- Il Modello Standard continua a superare qualsiasi test \implies sempre più importante la **fisica di precisione**
- Con l'inizio del Run 3, ci si appresta a raccogliere ancora più dati a un'energia di 14 TeV con un rivelatore **quasi completamente nuovo**
- Tanti nuovi risultati in arrivo nel futuro \implies **stay tuned!**

