

Misure di violazione di CP in decadimenti $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$ a LHCb

Vincenzo Battista¹

¹Scuola Politecnica Federale di Losanna (EPFL), Losanna, Svizzera

Incontri di Fisica delle Alte Energie, 05/04/2018



- 1 Introduzione
- 2 Analisi dei decadimenti $B^0 \rightarrow D^{\mp} \pi^{\pm}$
- 3 Conclusioni

Per un'introduzione all'esperimento LHCb, date un'occhiata alle altre presentazioni della sessione intensità!

Introduzione

Violazione di CP (VCP) nel Modello Standard (MS)

VCP: fase complessa nella matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) che descrive correnti cariche nelle interazioni deboli.

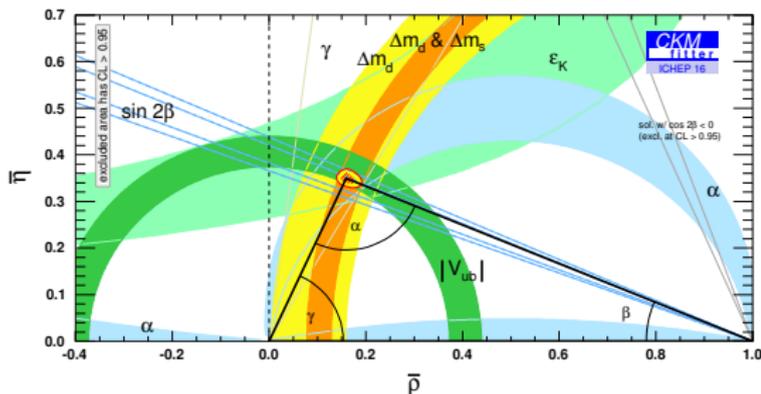
$$\mathcal{L}_{cc} = \frac{g}{\sqrt{2}} (\bar{u} \quad \bar{c} \quad \bar{t}) V_{CKM} \gamma^\mu \frac{(1 - \gamma^5)}{2} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} W_\mu^+ + h.c..$$

Perchè la misuriamo?

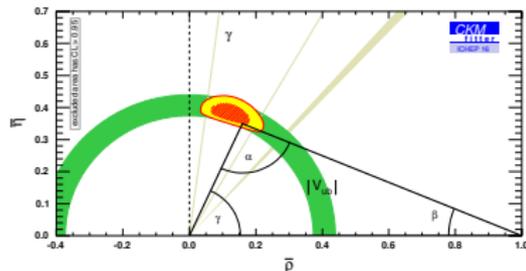
- Il MS non spiega la grande asimmetria fra *materia* e *antimateria* nell'universo → deve esserci **nuova fisica**.
- Discrepanze con il MS possono indicare fisica *oltre* il MS.

La VCP è amplificata nella fisica del **quark b** (gli angoli del TU sono simili).

Unitarietà di $V_{CKM} \rightarrow$ *Triangolo di Unitarietà* (TU).



$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$$



Misure dirette su $B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)}$.

E' l'angolo del TU *meno* conosciuto.

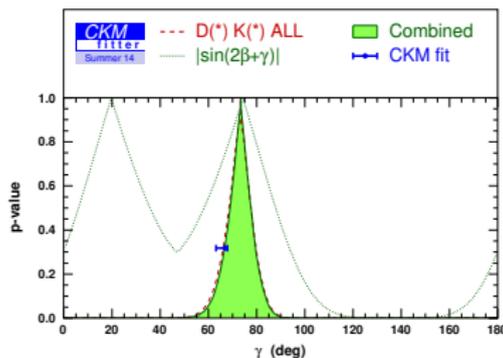
Valore centrale:

- Combinazione globale: $(65.40^{+0.97}_{-1.16})^\circ$
- Misure dirette: $(72.1^{+5.4}_{-5.8})^\circ$

Misure dirette dominate da $B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)}$
(miglior sensitività).

E' cruciale migliorare la precisione su γ da
misure **dependenti dal tempo**.

- Oggi: $\sin(2\beta + \gamma)$ a LHCb da $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$.
- Misure passate di $\sin(2\beta + \gamma)$ a BaBar e Belle da $B^0 \rightarrow D^{(*)}\pi/\rho$.



Limiti su $\sin(2\beta + \gamma)$ da $B^0 \rightarrow D^{(*)}\pi/\rho$.

Nessuna misura di γ ha sensitività sufficiente
→ bisogna **combinare** misure da approcci
complementari.

Analisi dei decadimenti $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$

Analisi di $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$ dipendente dal tempo a LHCb

VCP dall'**interferenza** tra ampiezze con e senza *oscillazione*:

- sensitività a $2\beta + \gamma$
- processo al prim'ordine teoricamente pulito

$$S_f = -\frac{2r_{D\pi} \sin[\delta - (2\beta + \gamma)]}{1 + r_{D\pi}^2}$$

$$S_{\bar{f}} = \frac{2r_{D\pi} \sin[\delta + (2\beta + \gamma)]}{1 + r_{D\pi}^2}$$

$$C_f = -C_{\bar{f}} = \frac{1 - r_{D\pi}^2}{1 + r_{D\pi}^2}$$

Si possono misurare γ e δ avendo:

- angolo $\beta \approx 22.2^\circ$
- rapporto

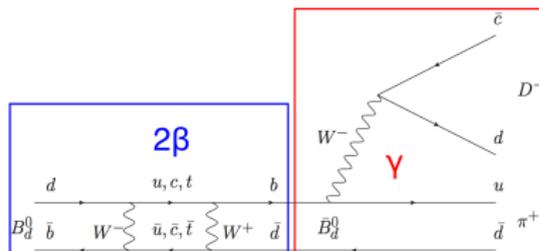
$$r_{D\pi} = \left| \frac{A(B^0 \rightarrow D^+ \pi^-)}{A(B^0 \rightarrow D^- \pi^+)} \right| \sim 0.018$$

La grande statistica (~ 500 k) compensa la piccola sensitività dovuta al basso valore di $r_{D\pi}$

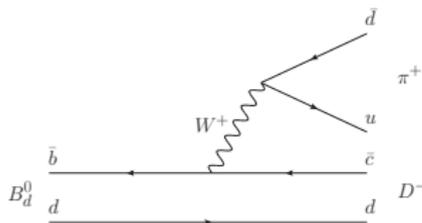
$$\Gamma_{B^0 \rightarrow f}(t) \propto e^{-\Gamma t} [1 + C_f \cos(\Delta m t) - S_f \sin(\Delta m t)]$$

$$\Gamma_{B^0 \rightarrow \bar{f}}(t) \propto e^{-\Gamma t} [1 + C_{\bar{f}} \cos(\Delta m t) - S_{\bar{f}} \sin(\Delta m t)]$$

$$(f = D^- \pi^+, \bar{f} = D^+ \pi^-)$$



Ampiezza $b \rightarrow u$ con oscillazione.



Ampiezza $b \rightarrow c$.

Selezione del campione (1)

Dati: 3 fb^{-1} (Run 1, 2011+2012).

Pre-selezione: criteri **cinematici** e **topologici** su $B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm$ e $D^\mp \rightarrow K^\pm \pi^\mp \pi^\mp$

Veti per la rimozione di:

- fondi "fisici"
- associazioni erranee fra B^0 e vertice primario

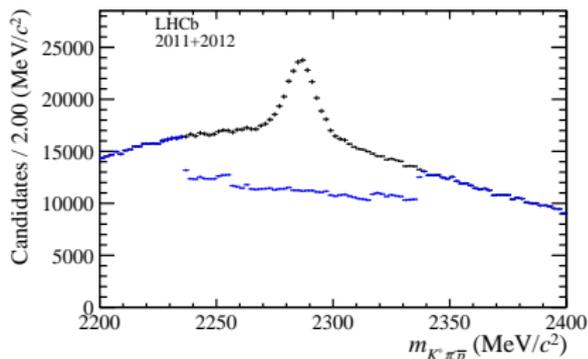
Analisi multivariata (MVA) per la discriminazione fra **segnale** e **fondo combinatorio**

Prestazione globale (con pre-selezione già applicata):

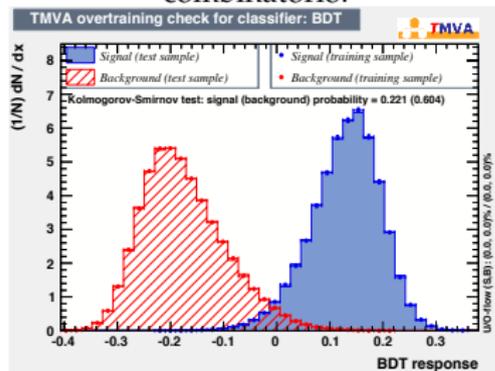
Efficienza di segnale ($70.7 \pm 0.1\%$)

Reiezione del fondo combinatorio ($99.911 \pm 0.002\%$)

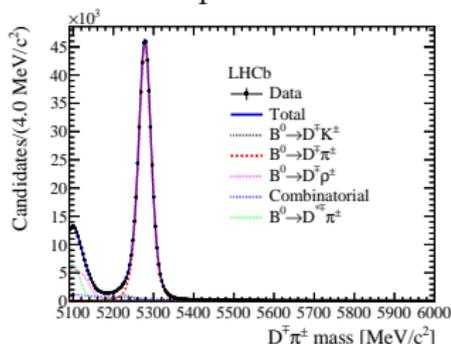
Esempio: veto su $\Lambda_b^0 \rightarrow \pi \Lambda_c^0 (\rightarrow p K \pi)$



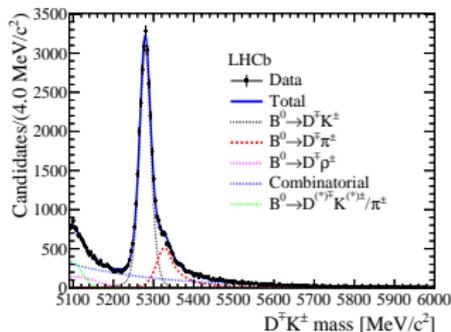
Risposta della MVA per segnale e fondo combinatorio:



Campione π :



Campione K :



Due sottoinsiemi disgiunti in base alla risposta del rivelatore *Cherenkov* sulla particella X dal $B^0 \rightarrow D^\mp X^\pm$:

- campione π (X più probabilmente pione)
- campione K (X più probabilmente kaone)

Fondo $B^0 \rightarrow D^\mp K^\pm$ controllato mediante le efficienze di identificazione π/K :

$$N_{B^0 \rightarrow DK}^\pi = \frac{1 - \epsilon_{\text{ID}}(B^0 \rightarrow DK)_K}{\epsilon_{\text{ID}}(B^0 \rightarrow DK)_K} \times N_{B^0 \rightarrow DK}^K$$

$$N_{B^0 \rightarrow D\pi}^K = \frac{1 - \epsilon_{\text{ID}}(B^0 \rightarrow D\pi)_\pi}{\epsilon_{\text{ID}}(B^0 \rightarrow D\pi)_\pi} \times N_{B^0 \rightarrow D\pi}^\pi$$

Candidati nel campione π in [5220, 5600] MeV/c^2 :

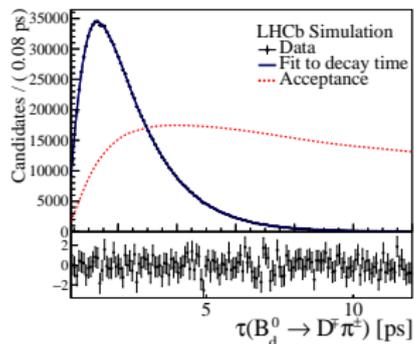
- segnale 479000 ± 700
- fondo 34400 ± 300

Accettanza e risoluzione temporale

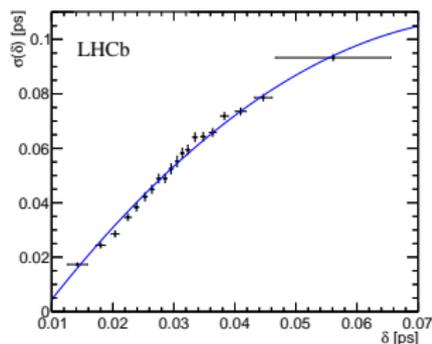
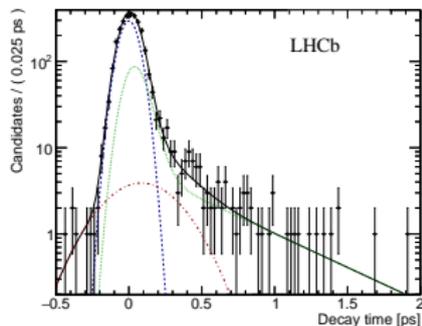
Accettanza $a(t)$: inefficienza dovuta alla geometria di LHCb e alla pre-selezione.
Forma funzionale adattata su campioni simulati:

$$FDP(t) = a(t)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Risoluzione temporale studiata su campione di dati D^\pm + traccia carica casuale
⇒ il tempo di decadimento è in media nullo, con larghezza=risoluzione

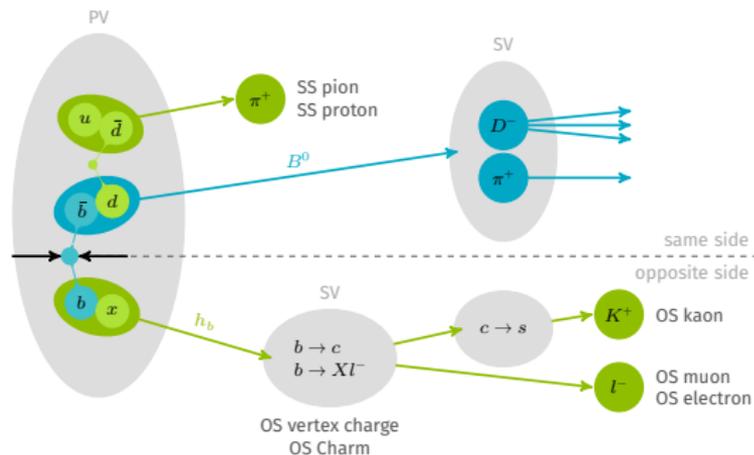


La risoluzione è adattata in intervalli dell'errore sul tempo ricostruito.
Risoluzione media: $\langle \sigma \rangle = 0.05491 \pm 0.00038$ ps



Etichettatura del sapore del B^0 in produzione

"Stesso lato" (SL): correlazione fra sapore del B^0 e carica di protone/pione prodotti nella stessa frammentazione.



"Lato opposto" (LO): anti-correlazione fra sapore del B^0 e contenuto in quark dell'altro adrone b (dedotto dallo stato finale).

Efficienza:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{etichettati}}}{N_{\text{etichettati}} + N_{\text{non etichettati}}}$$

Frazione di errore:

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

Ogni algoritmo predice una **probabilità di errore η** per ogni B^0 mediante analisi multivariata \Rightarrow una *calibrazione* $\omega(\eta)$ è necessaria.

Efficienza effettiva:

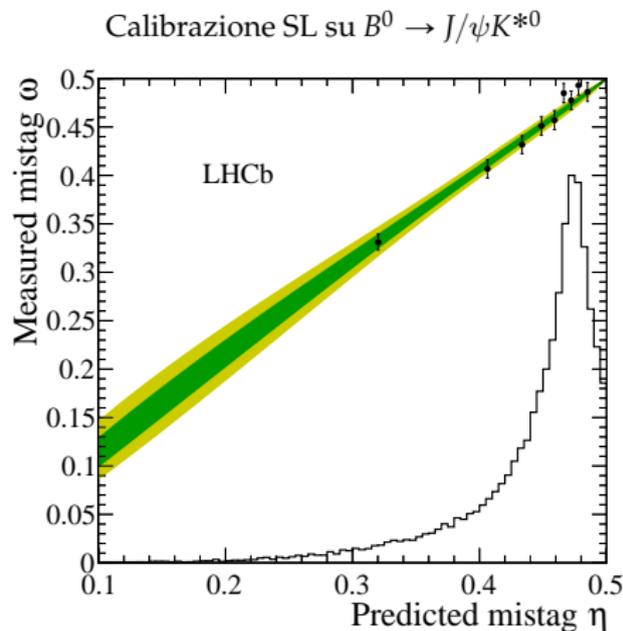
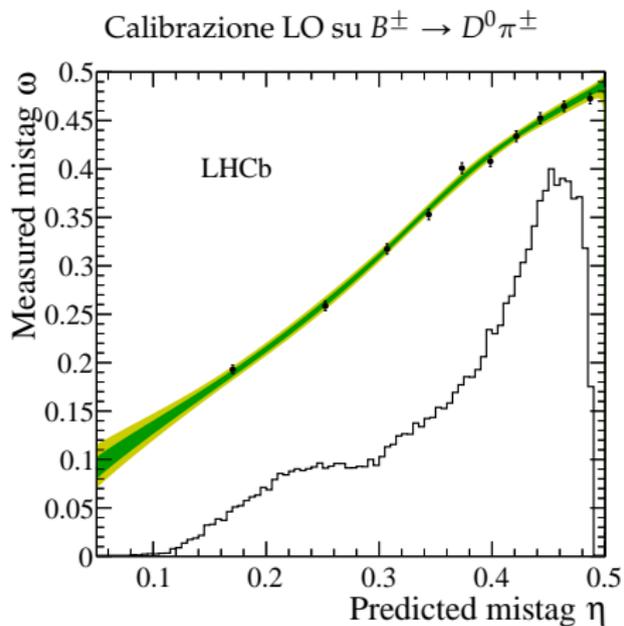
$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon \langle (1 - \omega(\eta))^2 \rangle = \varepsilon \langle D^2 \rangle$$

L'errore statistico dipende da ε_{eff} :

$$\sigma_{S_f, S_{\bar{f}}} \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}}$$

Calibrazione degli algoritmi di etichettatura

La forma funzionale di $\omega(\eta)$ per SL e LO è ottimizzata su *campioni di controllo*.



Analisi del tempo di decadimento

FDP per tempo di decadimento t , etichette di sapore \vec{d} e stato finale f , date le probabilità di errore $\vec{\eta}$, l'accettanza a e la risoluzione \mathcal{R} :

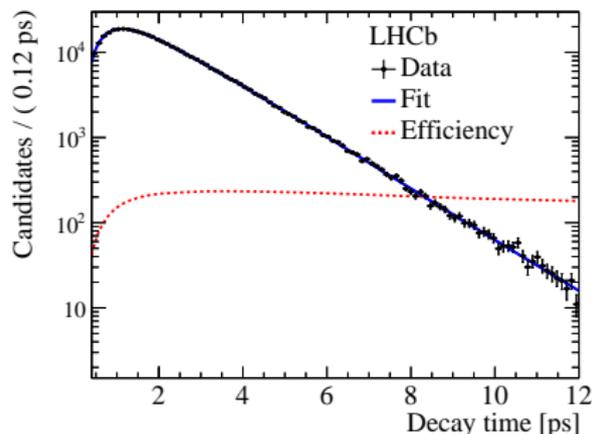
$$P(t, f, \vec{d} | \vec{\eta}) \propto a(t) \left[\mathcal{P}(t', f, \vec{d} | \vec{\eta}) \otimes \mathcal{R}(t' - t) \right]$$

27 parametri liberi:

- coefficienti S_f e $S_{\vec{f}}$;
- accettanza;
- calibrazioni degli algoritmi di etichettatura;
- asimmetrie di produzione (A_P) e rilevazione (A_R);

Vincoli gaussiani:

- $\Delta m = 0.5050 \pm 0.0023 \text{ ps}^{-1}$ (da LHCb [arXiv:1604.03475])
- $\Gamma = 0.6588 \pm 0.0017 \text{ ps}^{-1}$ (da [HFLAV])



Risultato dell'adattamento della FDP:

$$S_f = 0.058 \pm 0.021 \quad A_P = (-0.64 \pm 0.28)\%$$

$$S_{\vec{f}} = 0.038 \pm 0.021 \quad A_R = (0.86 \pm 0.19)\%$$

$$\text{corr} = 44\%$$

$$\text{corr} = 58\%$$

Efficienza effettiva: $\epsilon_{\text{eff}} = (5.59 \pm 0.01)\%$

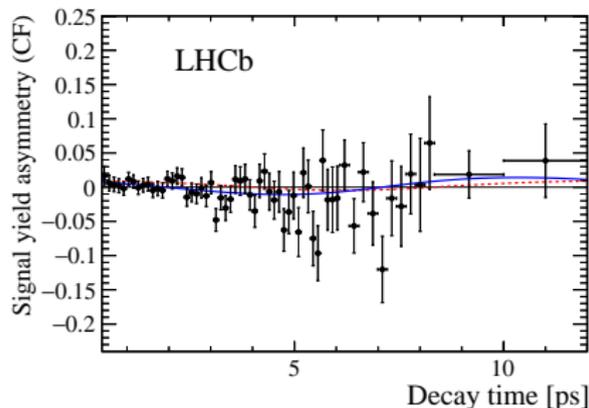
Violazione di CP

Caso senza VCP: $S_f = -S_{\bar{f}}$

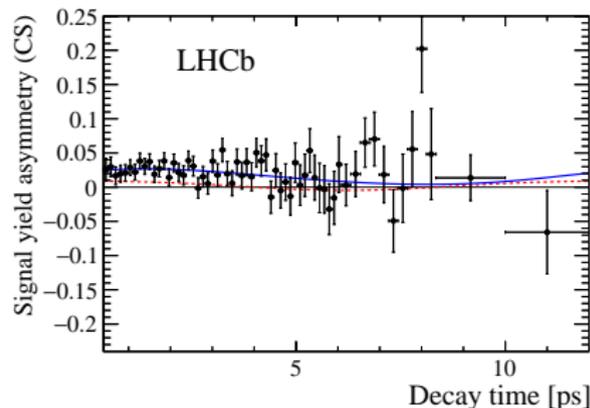
\Rightarrow evidenza di VCP con significanza di 2.7σ (dal Teorema di Wilks).

Visualizzazione: asimmetrie fra ampiezze *Cabibbo-favorite* (CF) e *Cabibbo-sopresse* (CS).

$$A_{CF} = \frac{\Gamma_{B^0 \rightarrow f}(t) - \Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow \bar{f}}(t)}{\Gamma_{B^0 \rightarrow f}(t) + \Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow \bar{f}}(t)}$$



$$A_{CS} = \frac{\Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow f}(t) - \Gamma_{B^0 \rightarrow \bar{f}}(t)}{\Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow f}(t) + \Gamma_{B^0 \rightarrow \bar{f}}(t)}$$



Curva blu: risultato dell'adattamento ai dati

Curva rossa: risultato atteso senza VCP

Il contributo maggiore all'incertezza totale è dato dall'errore **statistico**.

Contributo	S_f	$S_{\bar{f}}$
incertezza su Δm (vincolo gaussiano)	0.0073	0.0061
efficienze di identificazione	0.0008	0.0008
distorsione dello stimatore	0.0068	0.0018
sottrazione del fondo	0.0042	0.0023
etichettatura del sapore (modelli)	0.0011	0.0015
etichettatura del sapore (asimmetrie)	0.0012	0.0015
accettanza	0.0007	0.0007
$\Delta\Gamma = 0^1$	0.0007	0.0007
risoluzione temporale	0.0012	0.0008
$C_f = -C_{\bar{f}} = 1^2$	0.0006	0.0006
totale	0.0111	0.0073
incertezza statistica	0.0198	0.0199

¹Gli autostati di massa B_L e B_H hanno la stessa larghezza Γ

² $r_{D\pi}^2 \sim 0$

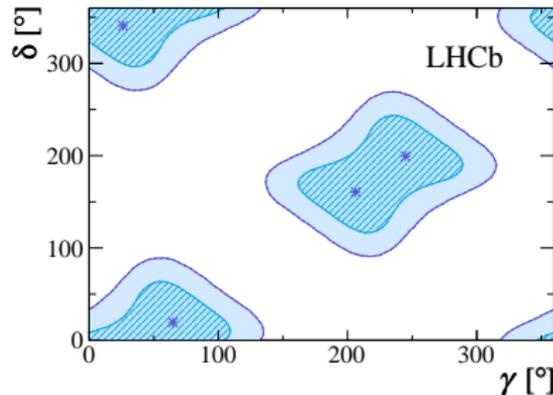
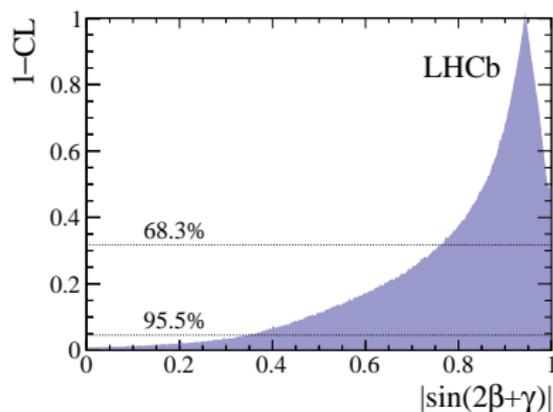
Interpretazione del risultato

Ingredienti:

- Valore di $r_{D\pi}$ stimato assumendo simmetria SU(3) ([arXiv:0803.4296] e [arXiv:1007.4619]):

$$r_{D\pi} = \tan \theta_c \frac{f_{D^+}}{f_{D_s}} \sqrt{\frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D_s^\pm \pi^\mp)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^\mp \pi^\pm)}} = 0.0182 \pm 0.0012 \pm 0.0036(\text{SU}(3))$$

- $\beta = (22.2 \pm 0.7)^\circ$ da media mondiale [HFLAV]



Intervalli con livello di confidenza al 68 % (metodo descritto in [JHEP 12 (2016) 087]):

$\sin(2\beta + \gamma)$ in $[0.77, 1.0]$

γ in $[5, 86]^\circ$ e $[185, 266]^\circ$

δ in $[-41, 41]^\circ$ e $[140, 220]^\circ$

Conclusioni

La misura di S_f e $S_{\bar{f}}$ a LHCb è più precisa della media mondiale, e la prima in un collisionatore adronico.

	S_f [%]	$S_{\bar{f}}$ [%]
Belle [PRD 73 092003]	$+6.8 \pm 2.9 \pm 1.2$	$+3.1 \pm 3.0 \pm 1.2$
BaBar [PRD 73 111101]	$-2.3 \pm 4.8 \pm 1.4$	$+4.3 \pm 4.8 \pm 1.4$
LHCb	$+5.8 \pm 2.0 \pm 1.1$	$+3.8 \pm 2.0 \pm 0.7$

$B^0 \rightarrow D^{\mp} \pi^{\pm}$ segue una recente analisi di LHCb di $B^0 \rightarrow D_s^{\mp} K^{\pm}$ [JHEP 03 (2018) 059]:

$$\gamma = (128_{-22}^{+17})^{\circ}$$

$$\delta = (358_{-14}^{+13})^{\circ}$$

$$r_{D_s K} = 0.37_{-0.09}^{+0.10}$$

\Rightarrow i risultati su $B^0 \rightarrow D^{\mp} \pi^{\pm}$ e $B^0 \rightarrow D_s^{\mp} K^{\pm}$ sono compatibili con il MS [Nucl. Phys. B671 (2003) 459]

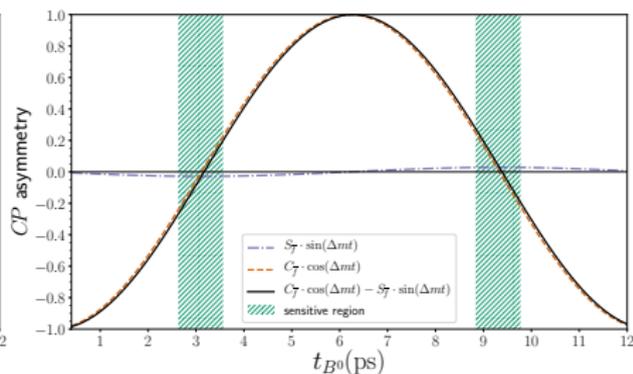
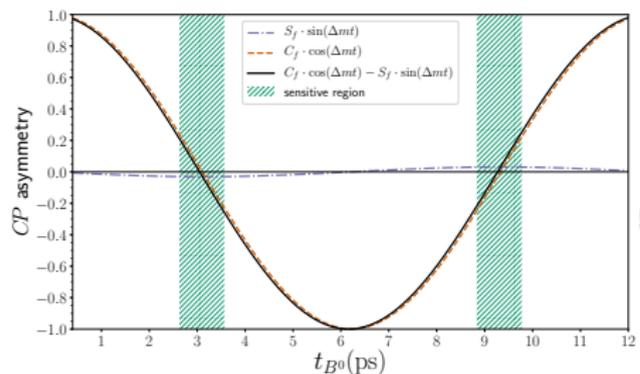
L'analisi dei dati Run 2 migliorerà significativamente l'incertezza statistica.



*Grazie per
l'attenzione!*

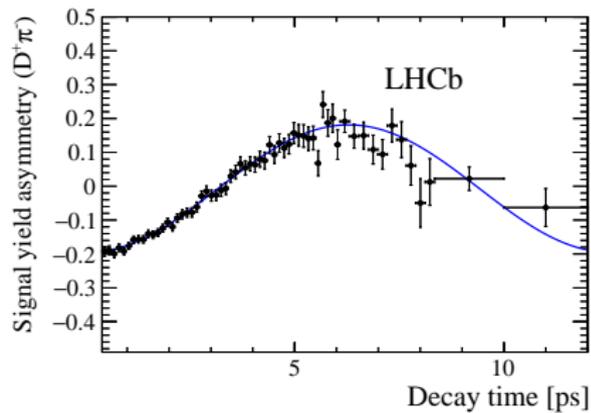
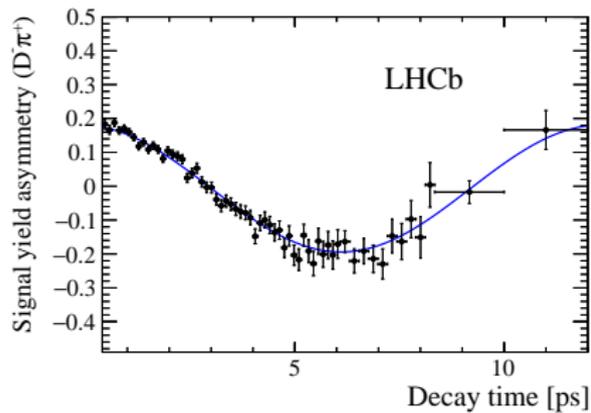
Appendice

Calibrazioni libere nell'adattamento della FDP al tempo di decadimento

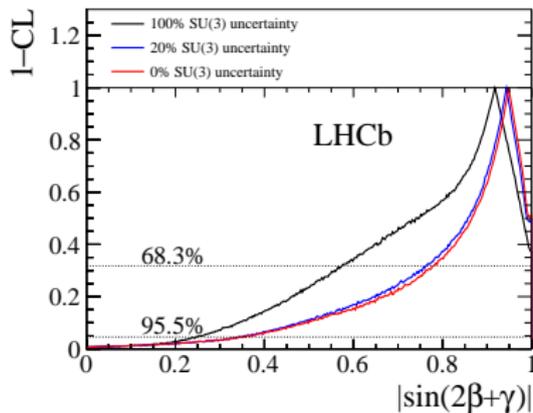
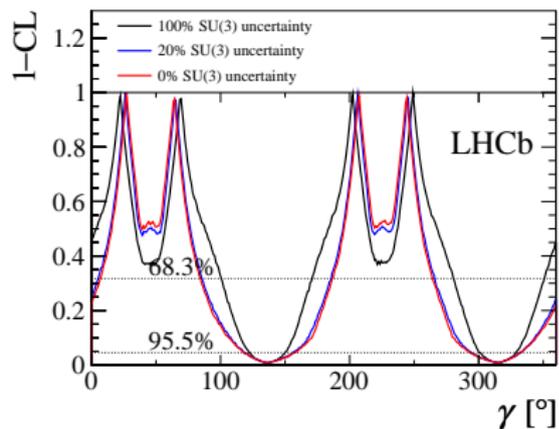
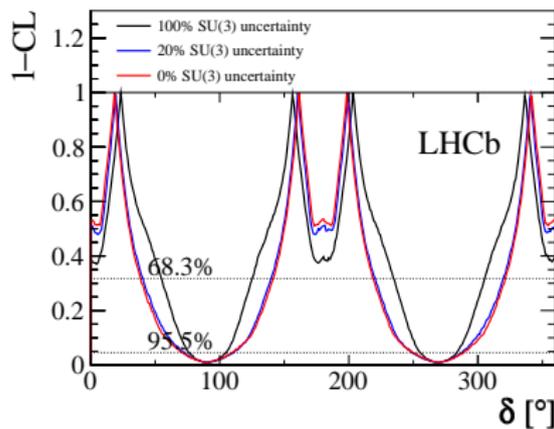


Correlazioni fra parametri fisici nell'adattamento della FDP

	S_f	$S_{\bar{f}}$	A_P	A_R	Δm	Γ
S_f	1	0.44	-0.11	-0.05	-0.34	0.00
$S_{\bar{f}}$		1	-0.10	-0.07	0.29	0.00
A_P			1	0.58	0.00	0.00
A_R				1	0.00	0.00
Δm					1	0.00
Γ						1



Impatto dell'approssimazione di simmetria SU(3)



visible int/bunch crossing	~ 1	~ 1	~ 6	~ 6	~ 55
inst Δ_{LHCb} $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	4×10^{32}	4×10^{32}	2×10^{33}	2×10^{33}	$1-2 \times 10^{34}$
$f dt \Delta_{LHCb}$	3 fb^{-1}	9 fb^{-1}		50 fb^{-1}	300 fb^{-1}
	2011-2012 Run 1	2015-2018 Run 2	2021-2023 Run 3	2026-2029 Run 4	2031-... Run 5/6

