

Ricerche di violazione di CP nei decadimenti di adroni beauty a LHCb

Andrea Villa

Incontri di Fisica delle Alte Energie — Firenze, 3-5 Aprile 2024



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sommario

- Misura dell'angolo γ con decadimenti $B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$ totalmente e parzialmente ricostruiti.
[JHEP 02 \(2024\) 118](#) [JHEP 12 \(2023\) 013](#)
- Misura di violazione di CP dipendente dal tempo in decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ vicino alla risonanza $\phi(1020)$
[PRL 132 \(2024\) 051802](#)
- Misura dei parametri di mixing e di violazione di CP nei decadimenti $D^0 \rightarrow K^\mp \pi^\pm$ RS e WS
[LHCb-PAPER-2024-008](#), in preparazione

Violazione di CP

- Una delle 3 condizioni di Sakharov per spiegare l'asimmetria barionica dell'Universo
[Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5 \(1967\) 32](#)
- Osservata per la prima volta nel 1964 nei decadimenti di mesoni K^0
[Phys. Rev. Lett. 13 \(1964\) 138](#)
- In seguito osservata anche nei decadimenti di mesoni B^0 , B_s^0 , e B^+ (BaBar, Belle, LHCb)
[Phys. Rev. Lett. 87 \(2001\) 091801](#) [Phys. Rev. Lett. 87 \(2001\) 091802](#)
[Phys. Rev. Lett. 110 \(2013\) 221601](#) [Phys. Rev. Lett. 124 \(2020\) 031801](#)
- Ad oggi, evidenza anche nel decadimento $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ (LHCb)
[Phys. Rev. Lett. 131 \(2023\) 091802](#)

Violazione di CP

	d	s	b
u	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	λ	$A\lambda^3(\rho - i\eta)$
c	$-\lambda$	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	$A\lambda^2$
t	$A\lambda^3(1 - \rho - i\eta)$	$-A\lambda^2$	1

- Origine: presenza di una **fase complessa** nella matrice CKM
- Può manifestarsi in tre modi diversi: nel **decadimento**

$$A(M \rightarrow f) \neq A(\bar{M} \rightarrow \bar{f})$$

$$a_f^d = \frac{|A(M \rightarrow f)|^2 - |A(\bar{M} \rightarrow \bar{f})|^2}{|A(M \rightarrow f)|^2 + |A(\bar{M} \rightarrow \bar{f})|^2} \propto \sin(\delta_1 - \delta_2)\sin(\phi_1 - \phi_2)$$

N.B. richiede la presenza di almeno due ampiezze con fasi δ e ϕ **diverse**

Violazione di CP

- Origine: presenza di una **fase complessa** nella matrice CKM
- Può manifestarsi in tre modi diversi: nel **mixing**

$$A(M \rightarrow \bar{M}) \neq A(\bar{M} \rightarrow M)$$

$$\arg \left(\frac{M_{12}}{\Gamma_{12}} \right) = \phi_2^M - \phi_2^\Gamma \neq 0$$

N.B. M_{12} e Γ_{12} sono gli elementi fuori diagonale della matrice di evoluzione temporale del sistema $M - \bar{M}$

	d	s	b
u	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	λ	$A\lambda^3(\rho - i\eta)$
c	$-\lambda$	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	$A\lambda^2$
t	$A\lambda^3(1 - \rho - i\eta)$	$-A\lambda^2$	1

Violazione di CP

	d	s	b
u	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	λ	$A\lambda^3(\rho - i\eta)$
c	$-\lambda$	$1 - \frac{1}{2}\lambda^2$	$A\lambda^2$
t	$A\lambda^3(1 - \rho - i\eta)$	$-A\lambda^2$	1

- Origine: presenza di una **fase complessa** nella matrice CKM
- Può manifestarsi in tre modi diversi: nell'**interferenza** (tra decadimento e mixing)

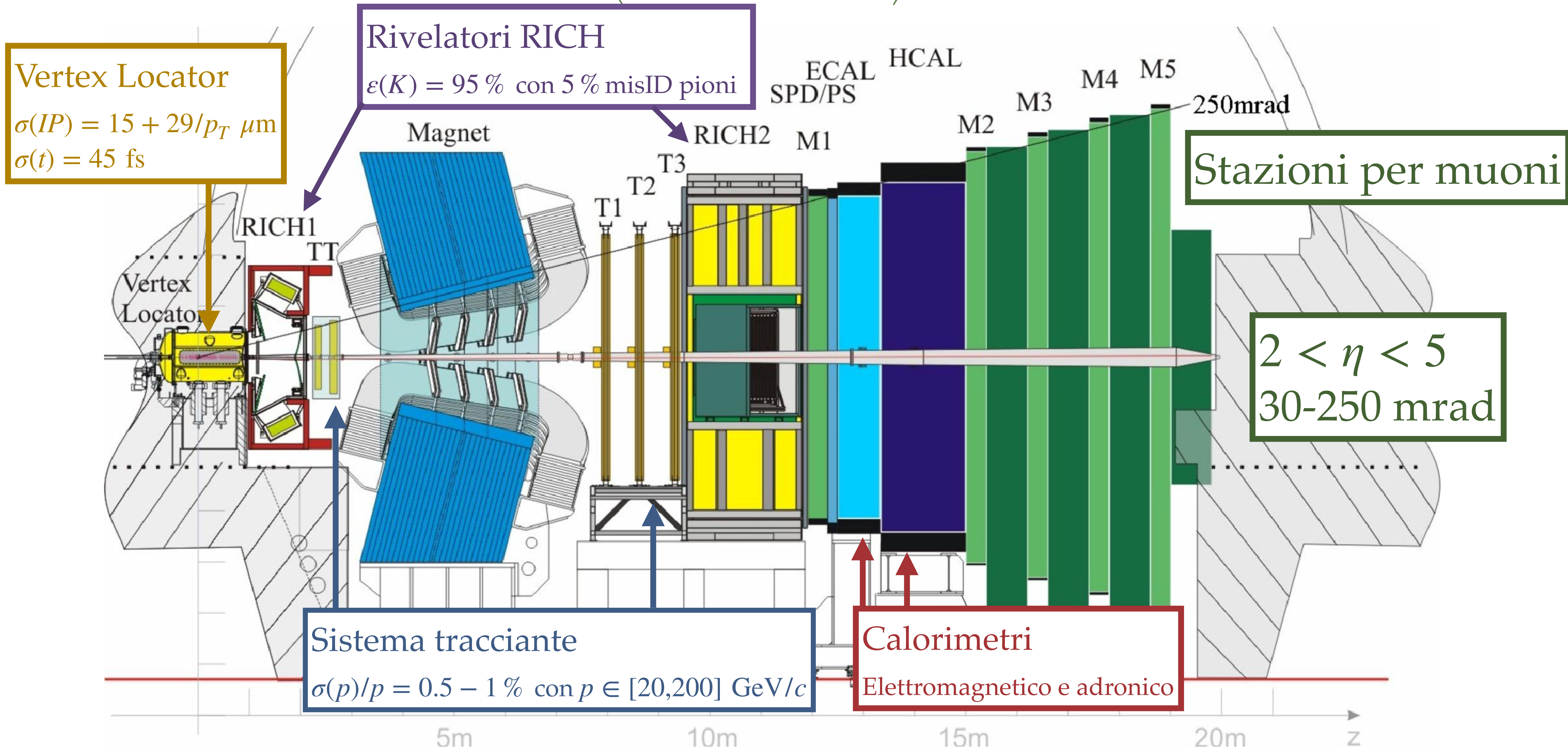
$$A(M \rightarrow f) + A(M \rightarrow \bar{M} \rightarrow f) \neq A(\bar{M} \rightarrow \bar{f}) + A(\bar{M} \rightarrow M \rightarrow \bar{f})$$

$$\lambda_f = \frac{q A(\bar{M} \rightarrow f)}{p A(M \rightarrow f)} \neq 0$$

N.B. gli autostati di massa sono $|M_{1,2}\rangle = p|M\rangle \pm q|\bar{M}\rangle$

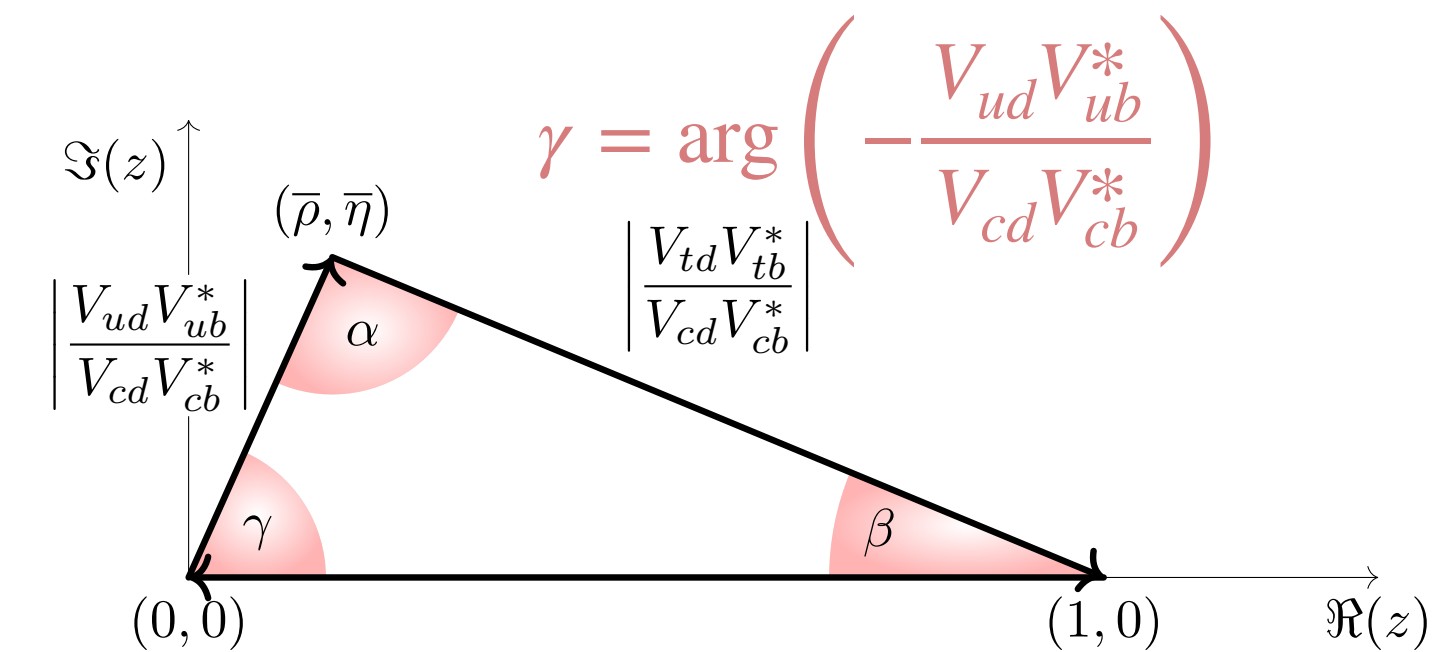
Il rivelatore LHCb (Run 1+2)

$\mathcal{L} = 3 \text{ fb}^{-1}$ Run 1
 $\mathcal{L} = 6 \text{ fb}^{-1}$ Run 2



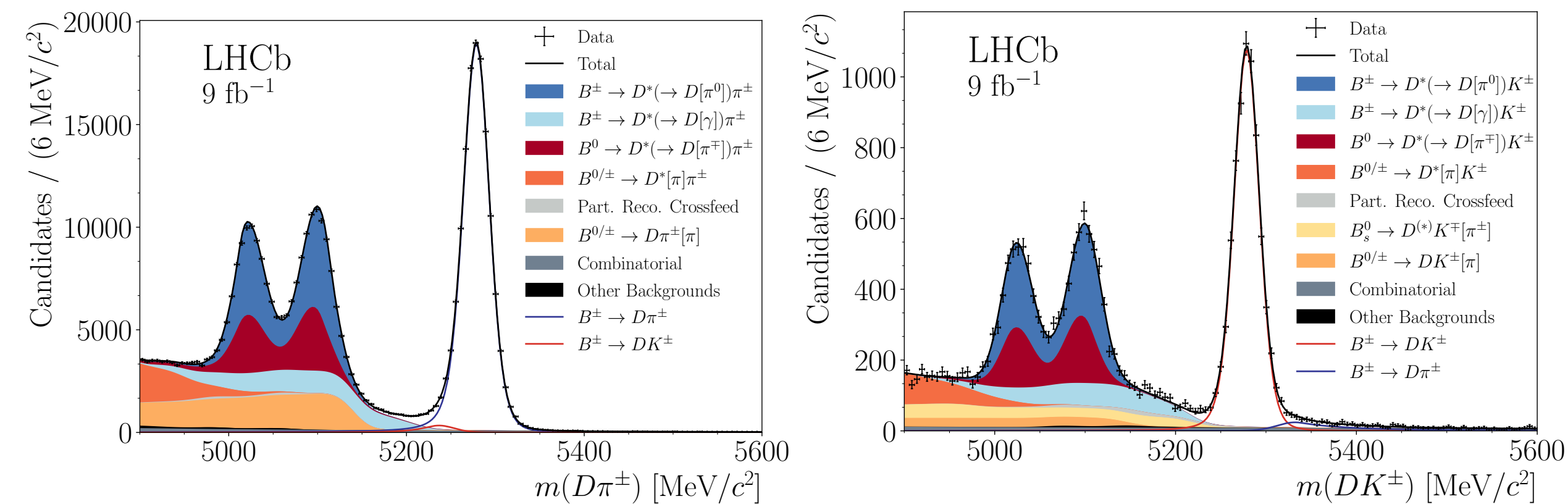
Misura di γ con decadimenti $B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$

- Angolo interno del triangolo unitario che si può costruire dalla matrice CKM
- Facilmente misurabile per via teorica, precisione $\mathcal{O}(10^{-7})$
- Può essere misurato tramite lo studio di transizioni $b \rightarrow c$ e $b \rightarrow u$ al tree-level
- Deviazioni dalle attese possono indicare **Nuova Fisica**
- Canale più adatto $B^\pm \rightarrow D^0 h^\pm$
- L'analogo con mesoni D^* ha una simile sensibilità ma è più complesso



- Due misure di LHCb con decadimenti $B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$, con $D^* \rightarrow D^0 \gamma$ o $D^0 \pi^0$, e $D^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h^-$ ($h = K, \pi$) usando l'intero campione Run 1+2
- In una misura γ e π^0 sono completamente ricostruiti, nell'altra no (statistica maggiore grazie alla selezione ridotta)
- Entrambe sono compiute in una maniera **model-independent**, usando solo input esterni da BESIII e CLEO [PRD 101, \(2020\) 112002](#) [PRD 102, \(2020\) 052008](#) [PRD 82, \(2010\) 112006](#)
- I risultati sono interpretati in funzione dei parametri di violazione di CP x, y, r_B, δ_B , e γ

Parzialmente ricostruito

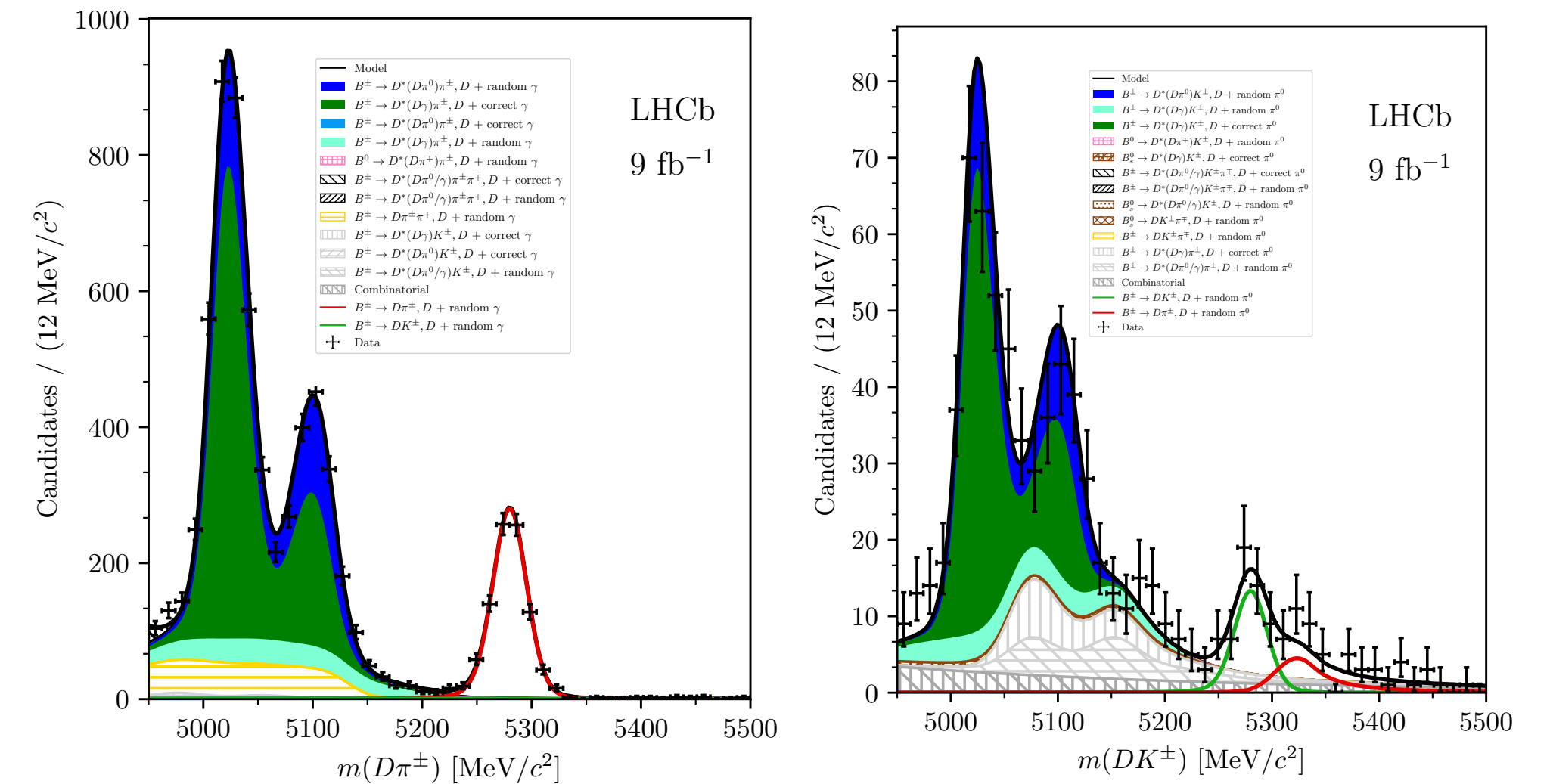


- $D^0\pi^0$ e $D^0\gamma$ distinti grazie alla differente distribuzione in $m(Dh^\pm)$

- $N(B^\pm \rightarrow D^*\pi^\pm) \approx 180k$

- $N(B^\pm \rightarrow D^*K^\pm) \approx 9k$

Totalmente ricostruito



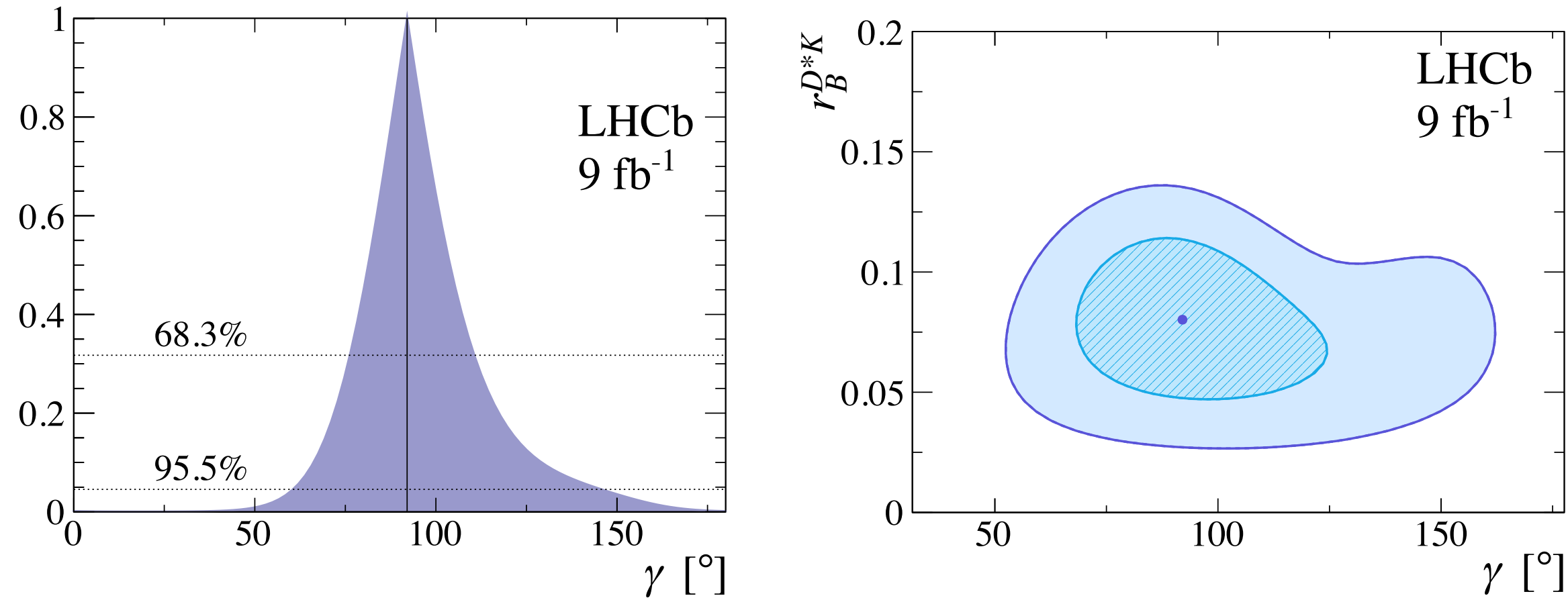
- Fit simultaneo a $m(Dh^\pm)$ e $m(D^0\pi^0/\gamma)$

- $N(B^\pm \rightarrow D^*\pi^\pm) \approx 10k$

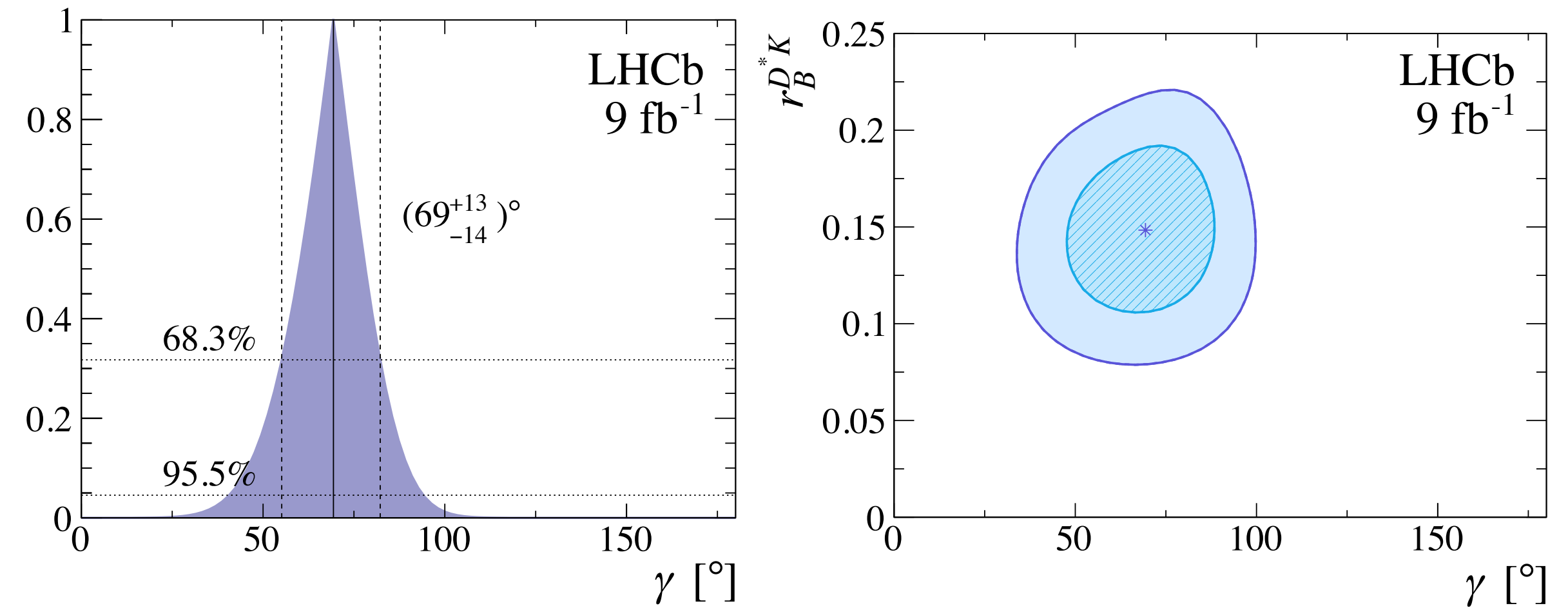
- $N(B^\pm \rightarrow D^*K^\pm) \approx 1k$

Misura di γ con decadimenti $B^\pm \rightarrow D^* h^\pm$

Parzialmente ricostruito



Totalmente ricostruito



• $\gamma = (92^{+21}_{-17})^\circ$ ← **Compatibili tra loro e con la media mondiale** →

• $r_B^{D^*K} = 0.080^{+0.022}_{-0.023}$, $\delta_B^{D^*K} = (310^{+15}_{-20})^\circ$

• $r_B^{D^*\pi} = 0.009^{+0.005}_{-0.007}$, $\delta_B^{D^*\pi} = (304^{+37}_{-38})^\circ$

• **Correlazione** con il risultato del totalmente ricostruito: **3%**

• $\gamma = (69^{+13}_{-14})^\circ$

• $r_B^{D^*K} = 0.15 \pm 0.03$, $\delta_B^{D^*K} = (311 \pm 14)^\circ$

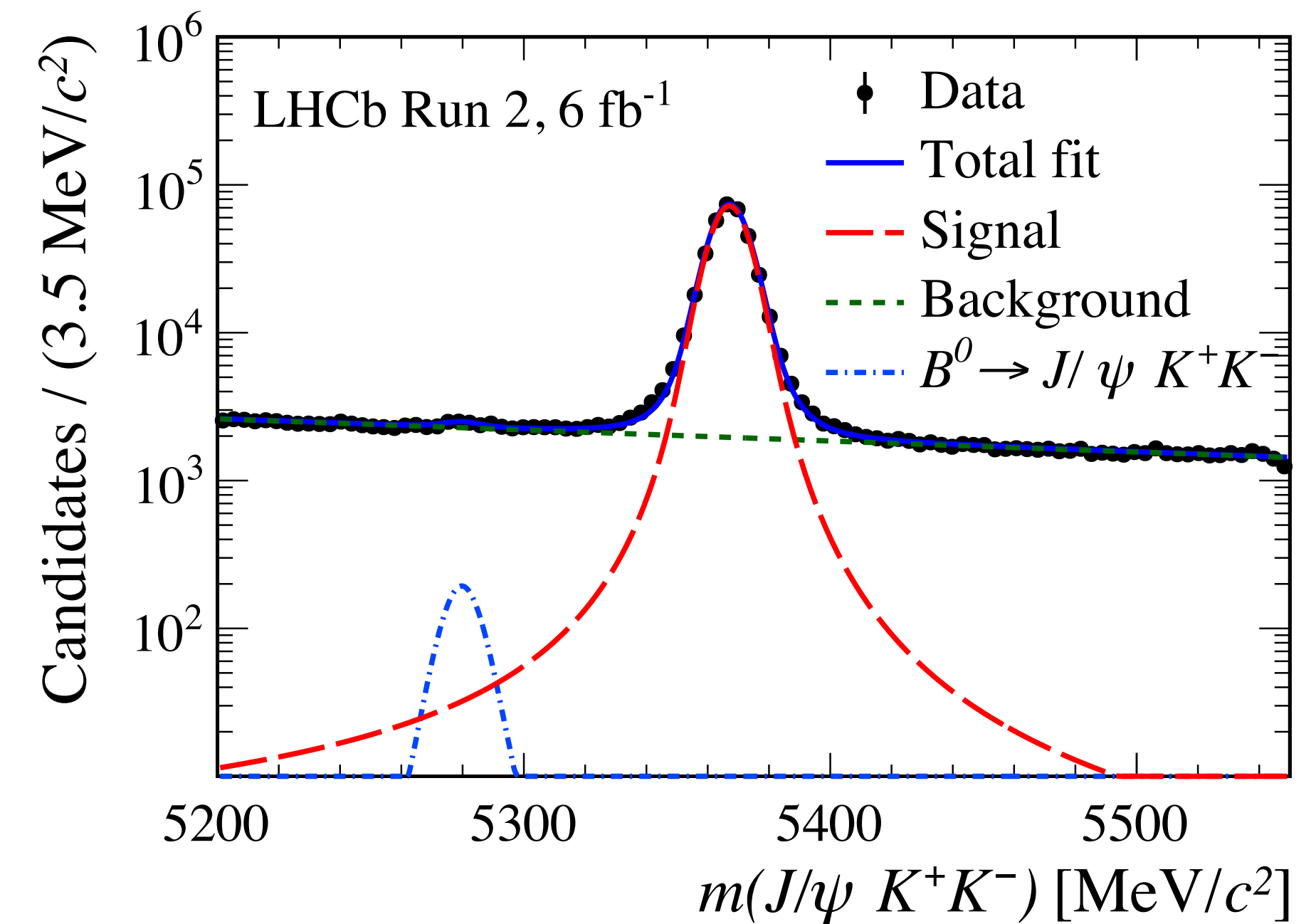
• $r_B^{D^*\pi} = 0.01 \pm 0.01$, $\delta_B^{D^*\pi} = (37 \pm 37)^\circ$

• **Maggiore sensibilità** a γ nonostante la minore statistica

Violazione di CP dipendente dal tempo PRL 132 (2024) 051802

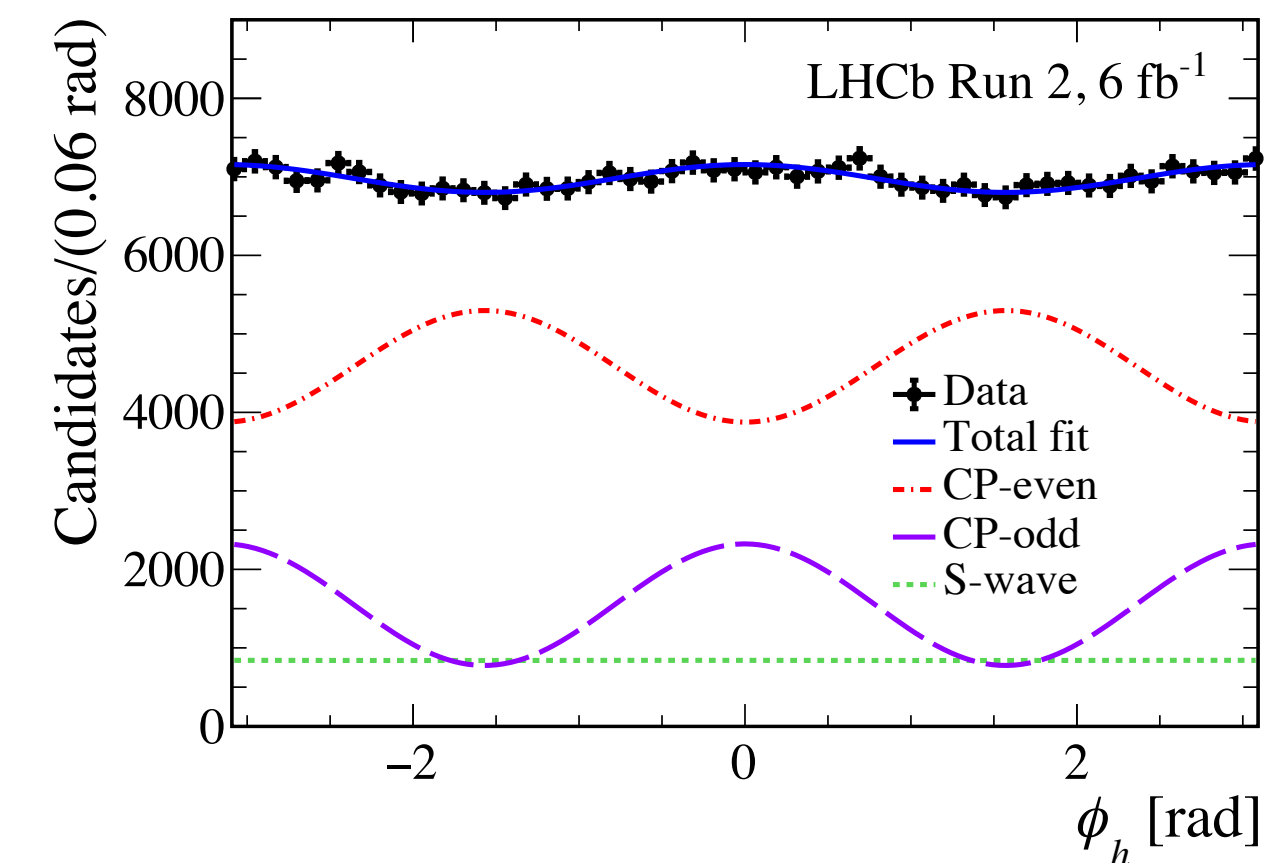
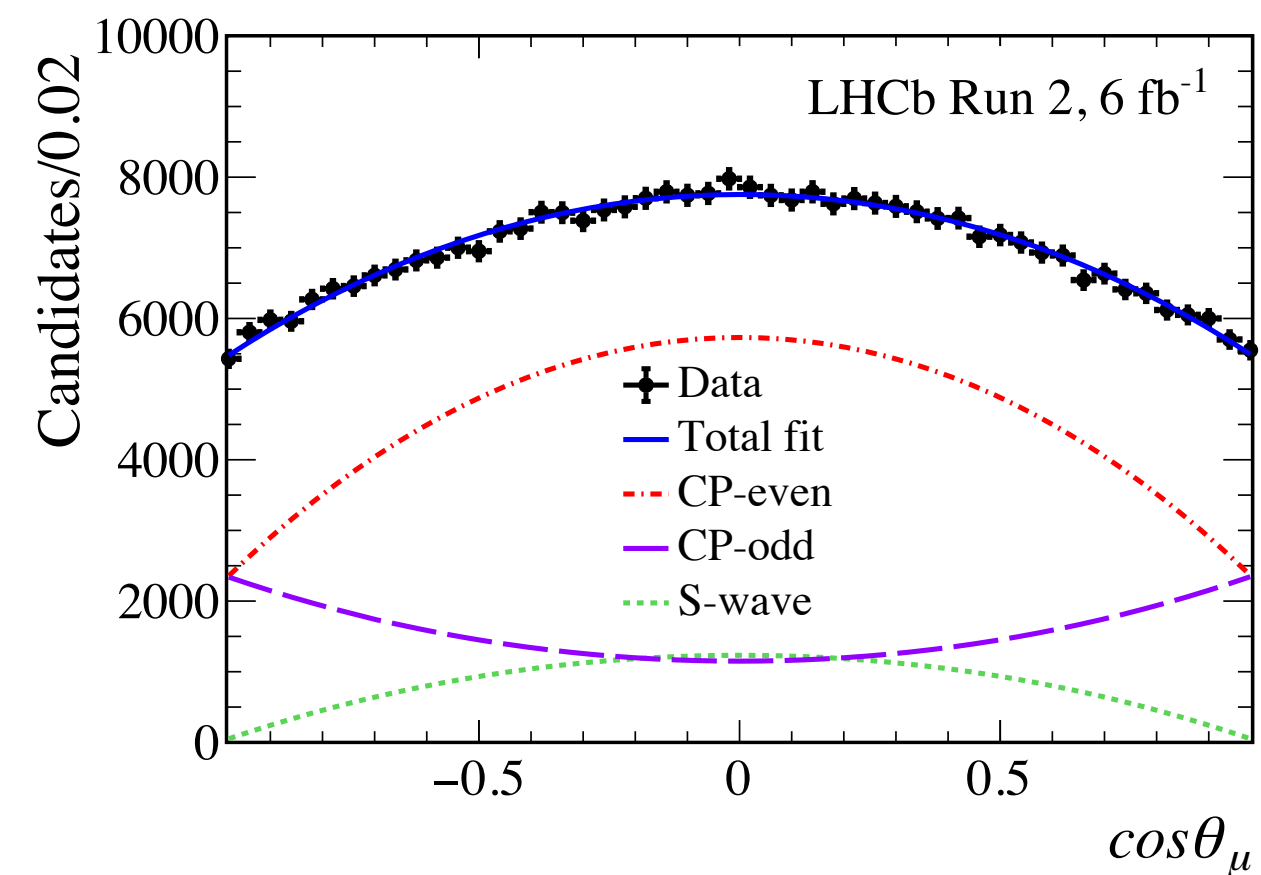
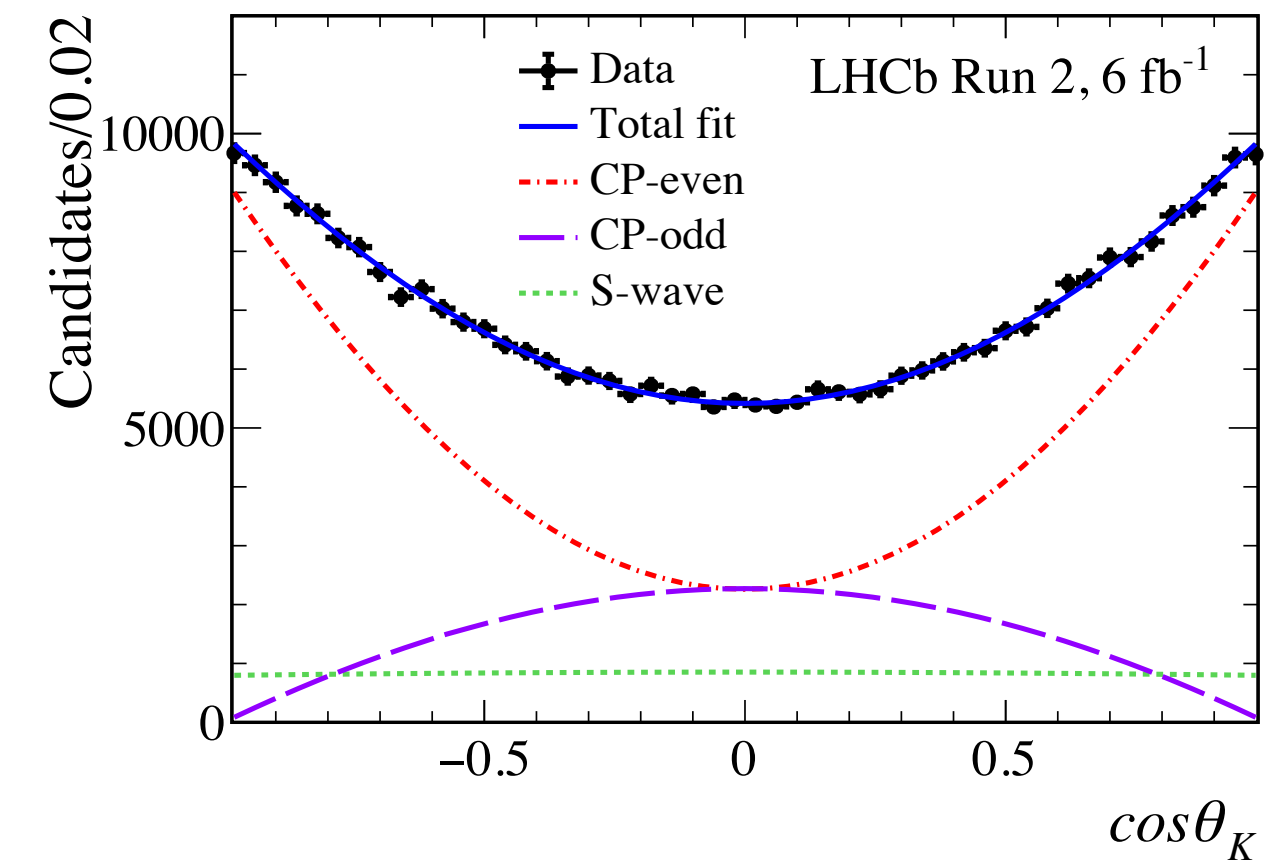
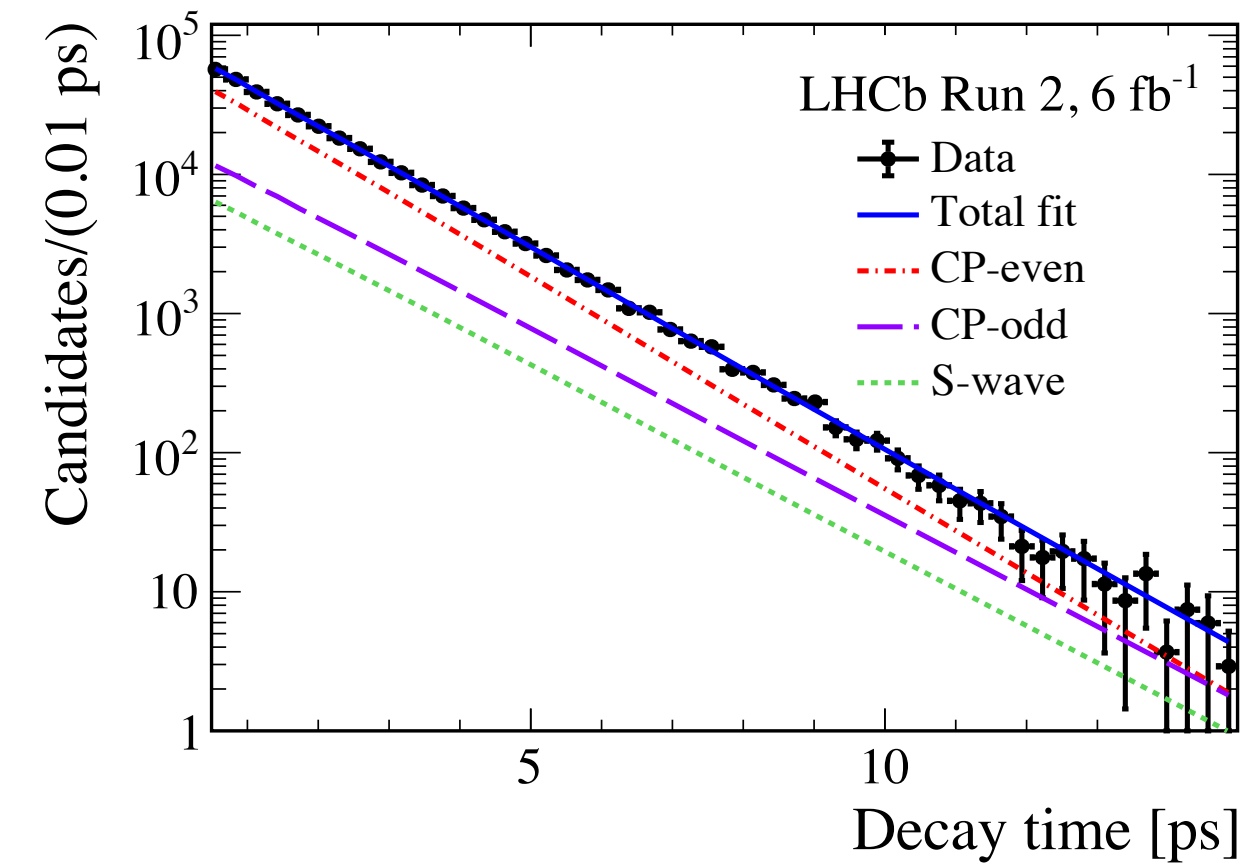
- ϕ_s : fase tra le ampiezze di mixing e di decadimento in un autostato di CP contenente risonanze $c\bar{c}$ del mesone B_s^0
- Il Modello Standard prevede $\phi_s = -2\beta_s = (-0.0368^{+0.0009}_{-0.0006})$ rad
- Misure sempre più precise possono gettare luce sulla fisica **oltre il MS**
- La media mondiale è dominata dallo studio dei decadimenti $B_s^0 \rightarrow J/\psi h^+ h^-$
- Misura di ϕ_s con $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^+ K^-$ con l'intero campione Run 2 di LHCb pubblicata, assieme alla combinazione con l'analisi Run 1
- Migliorate le prestazioni della PID, del flavour tagging, e la risoluzione sul tempo di decadimento del B_s^0

- Gli eventi sono selezionati con $m(K^+K^-) \in [990, 1050] \text{ MeV}/c^2$, attorno alla risonanza $\phi(1020)$
- Un fit alla distribuzione di massa invariante $m(\mu^+\mu^-K^+K^-)$ è compiuto per ottenere sWeights per le distribuzioni temporali e angolari
- Fondo combinatorio ridotto con classificatore BDT
- Tagli di PID stringenti per sopprimere i fondi da misID



Violazione di CP dipendente dal tempo PRL 132 (2024) 051802

- Ampiezze CP -pari e dispari sono definite per descrivere le distribuzioni temporali e angolari
- Un **fit simultaneo** è compiuto in 48 bin di massa invariante, categoria di trigger, anno di raccolta e polarità del magnete
- Il fit è compiuto anche riscrivendo l'ampiezza in funzione dello stato di **polarizzazione** della coppia K^+K^- ($0, \parallel, \perp$) in cerca di dipendenze



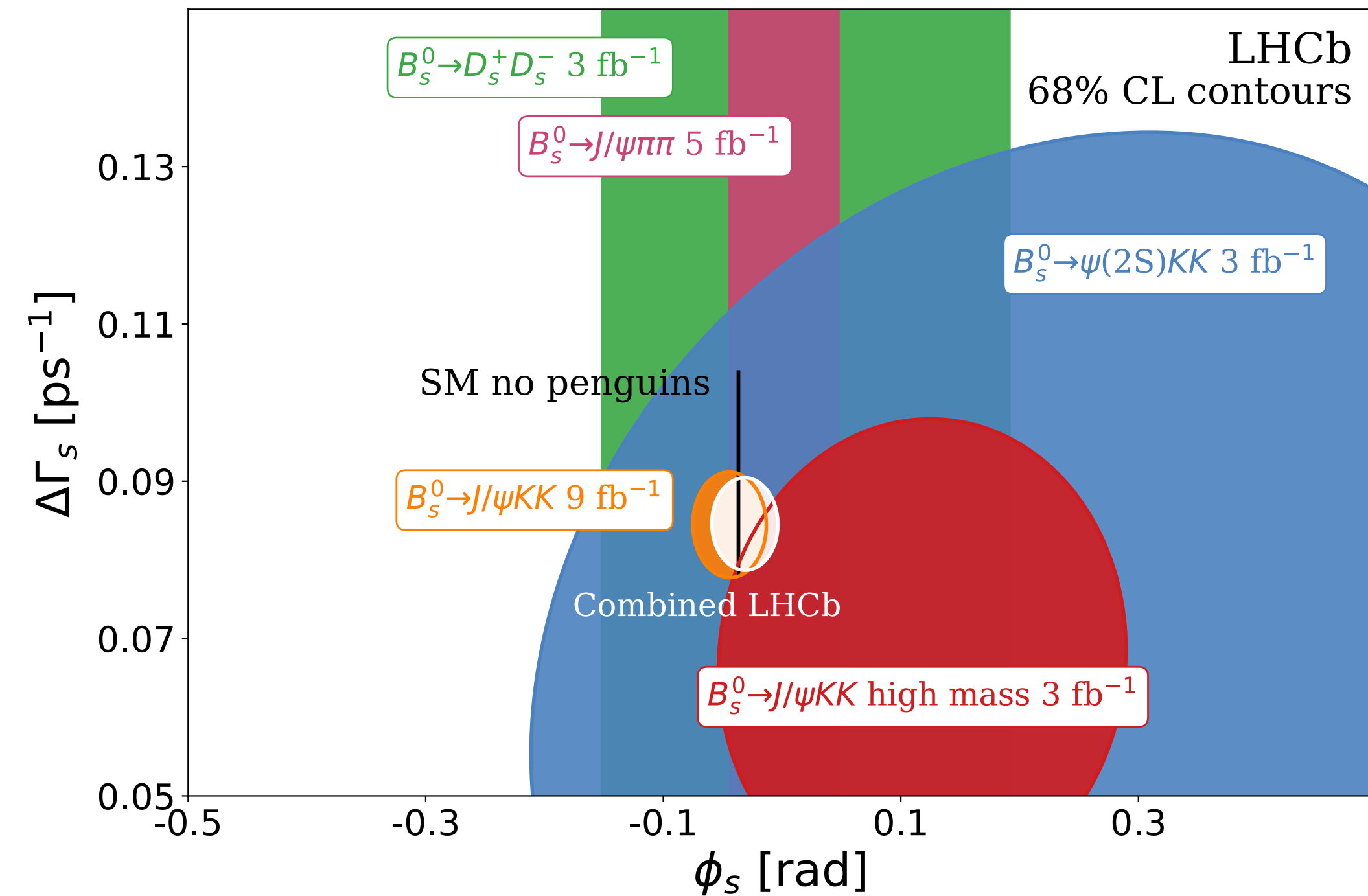
- Risultati Run 2:

$$\begin{aligned}\phi_s &= (-0.039 \pm 0.022 \pm 0.006) \text{ rad} \quad \text{statisticamente limitata} \\ \Gamma_s - \Gamma_d &= (-0.0056^{+0.0012}_{-0.0015} \pm 0.0014 \pm) \text{ ps}^{-1} \\ \Delta\Gamma_s &= (0.0845 \pm 0.0044 \pm 0.0024) \text{ ps}^{-1}\end{aligned}$$

- Singola misura **più precisa al mondo**. Nessuna evidenza di violazione di CP dipendente dal tempo, né dallo stato di polarizzazione della coppia K^+K^-
- Combinazione con tutti i risultati di LHCb da $B_s^0 \rightarrow J/\psi h^+ h^-$, $B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$, $B_s^0 \rightarrow \psi(2S) K^+ K^-$:

$$\phi_s = (-0.031 \pm 0.018) \text{ rad}$$

- Risultato più preciso al mondo, consistente con le previsioni del MS e compatibile con l'ipotesi di **conservazione di CP**

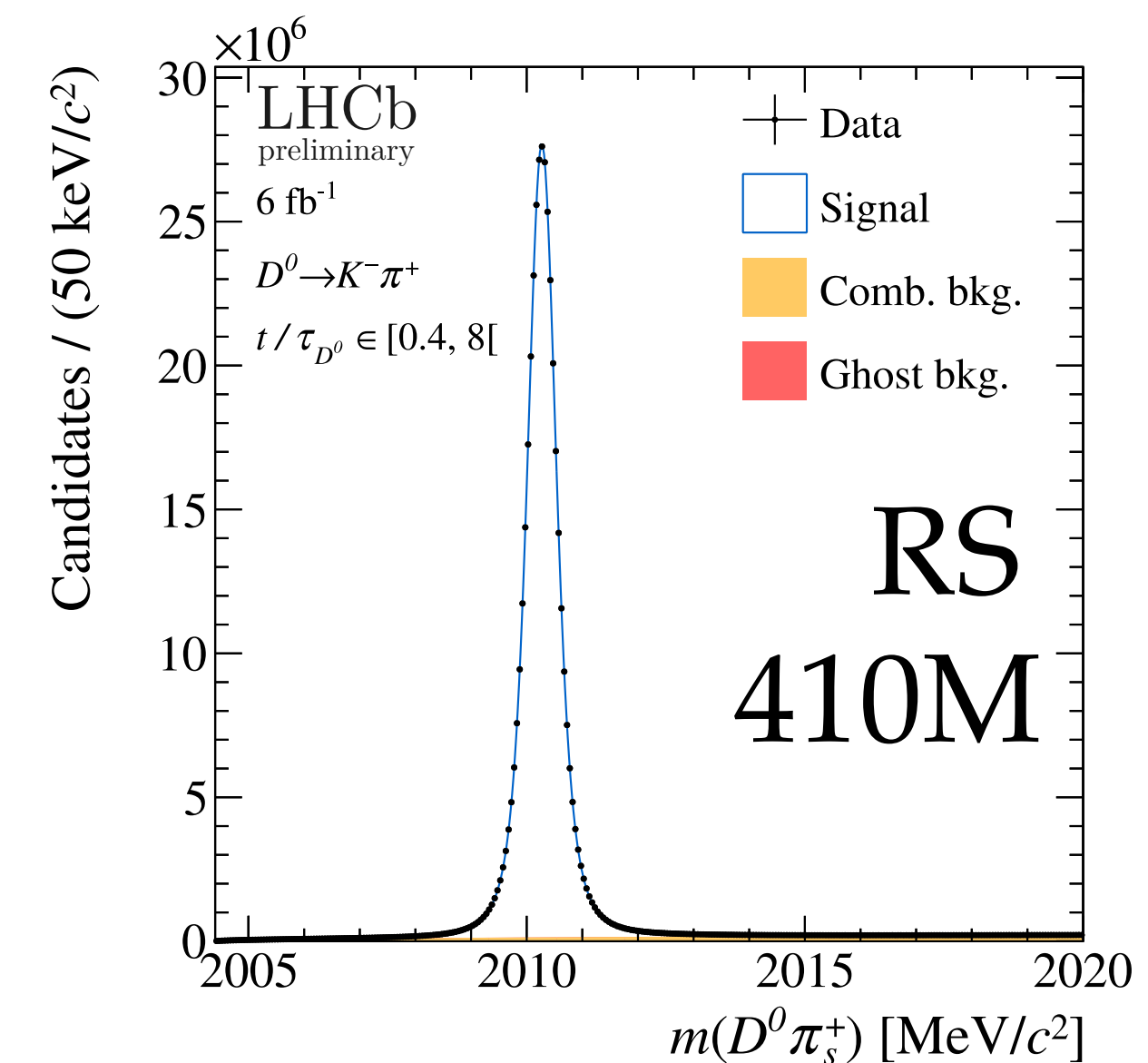
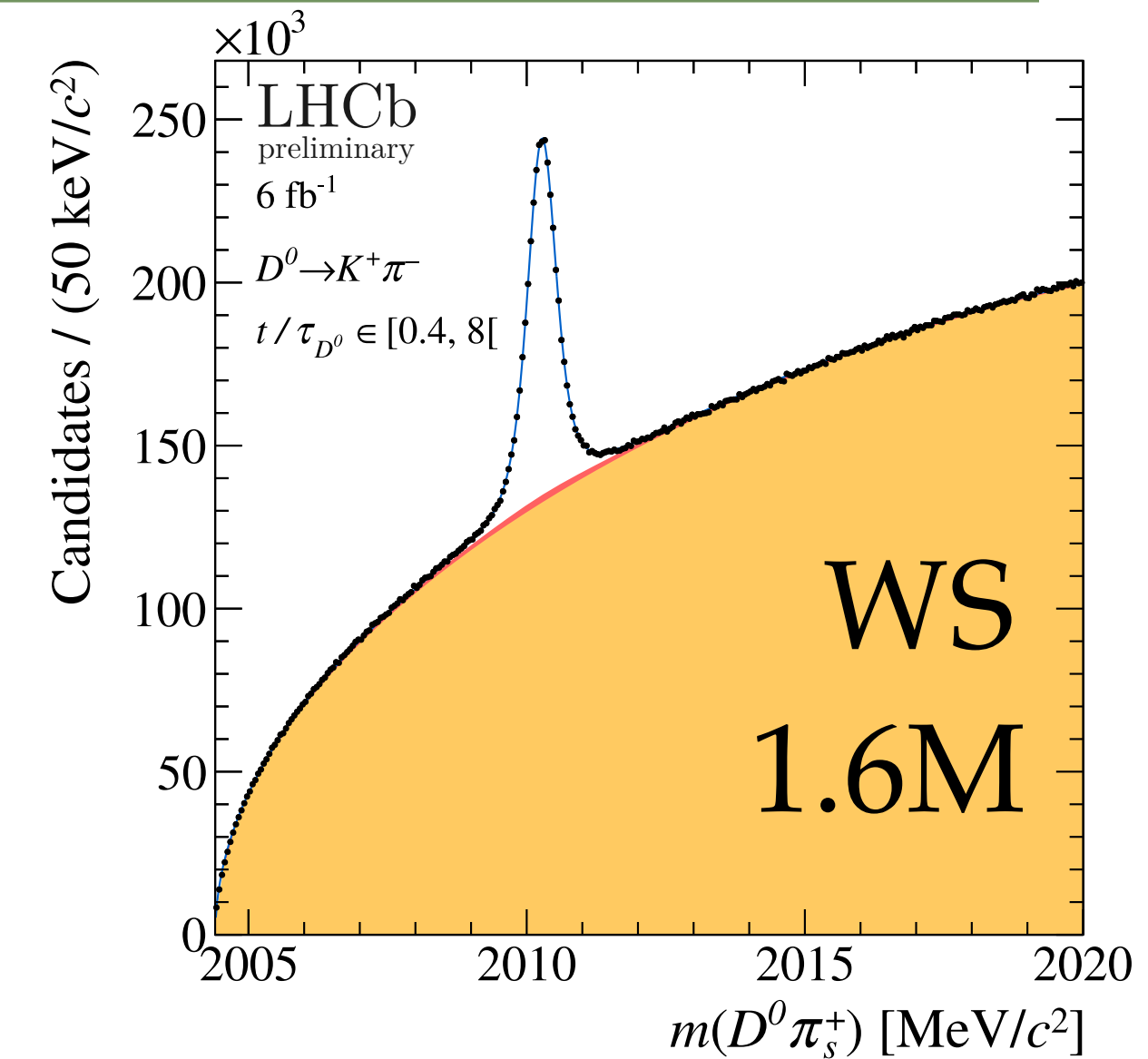


- Il meccanismo GIM e gli elementi della matrice CKM sopprime le transizioni in corrente neutra con cambiamento del sapore (FCNC) nei decadimenti degli adroni con charm
- Tali processi sono quindi potenti strumenti per **testare il MS**.
- Le predizioni teoriche sugli effetti di QCD a lungo raggio sono molto incerte, e misure dirette possono gettare ulteriore luce sul loro impatto in questi decadimenti
- Il decadimento $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ è dato dall'**interferenza** tra le transizioni Cabibbo-favorita ($\bar{D}^0 \rightarrow K^-\pi^+$, **RS**) e doppiamente Cabibbo-soppressa ($D^0 \rightarrow K^+\pi^-$, **WS**) grazie al mixing
- Il rapporto $R_{K\pi}^\pm(t) = \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow K^\pm\pi^\mp)}{\Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow K^\pm\pi^\mp)}$ permette di accedere ai parametri di mixing x_{12} e y_{12} , le fasi deboli ϕ_f^M e ϕ_f^Γ , e l'asimmetria $CP A_{K\pi}$ che il MS prevede con alta precisione

Mixing $D^0 - \overline{D^0}$ e CPV con $D^0 \rightarrow K\pi$

LHCb-PAPER-2024-008
in preparazione

- Nuova misura di LHCb con l'intero campione Run 2 in arrivo a breve
- I campioni WS e RS sono divisi in 18 bin di tempo di decadimento per calcolare il rapporto del numero di eventi di segnale
- Gli eventi dovuti a pioni fantasma sono soppressi grazie a tagli fiduciali e all'uso di un classificatore MVA dedicato
- Possibili sorgenti di bias studiate: fondi **doppiamente mis-identificati**, asimmetrie di **produzione** e **rivelazione**, bias nella misura del **tempo di decadimento**
- Correzioni calcolate con metodi **data-driven**



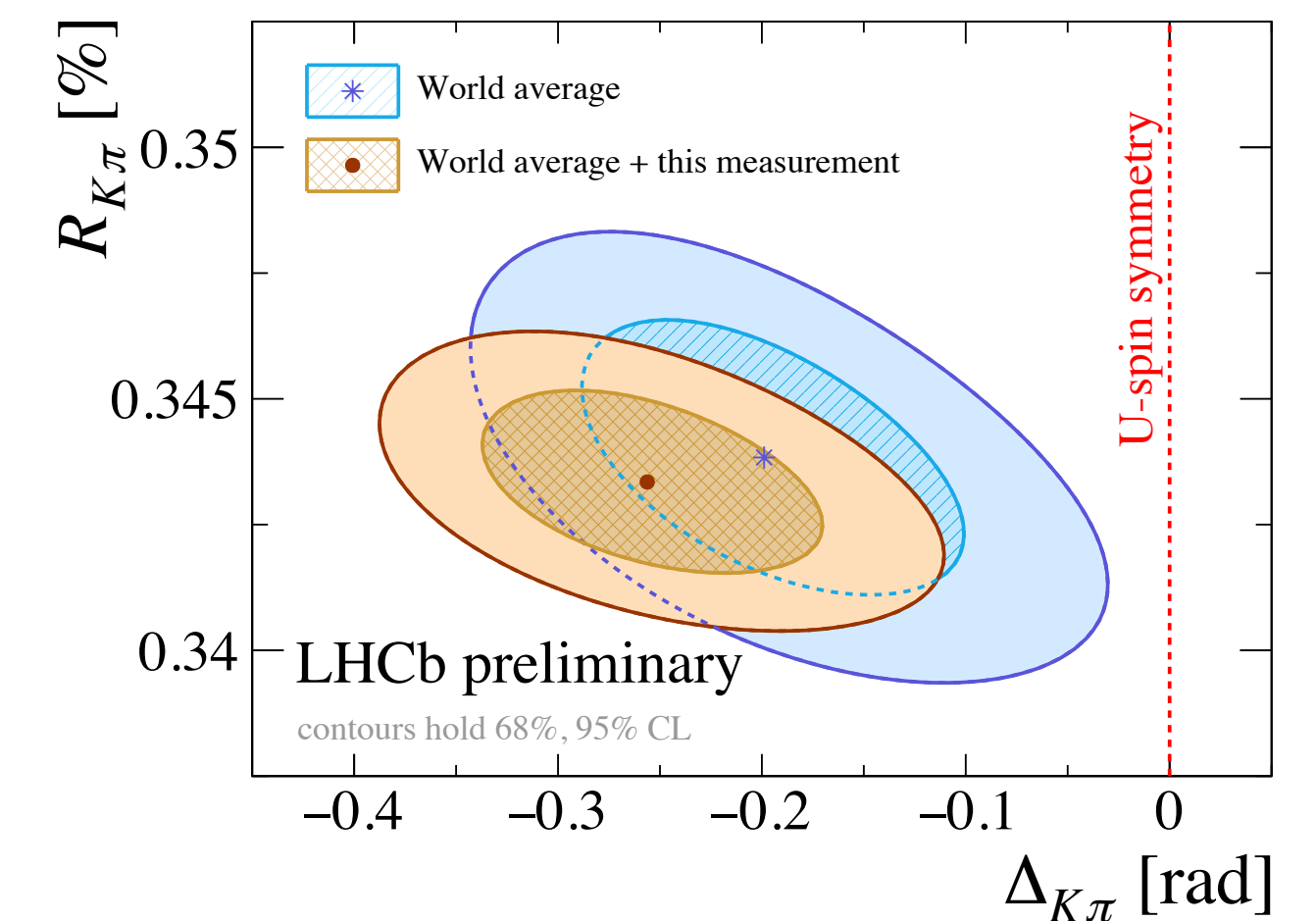
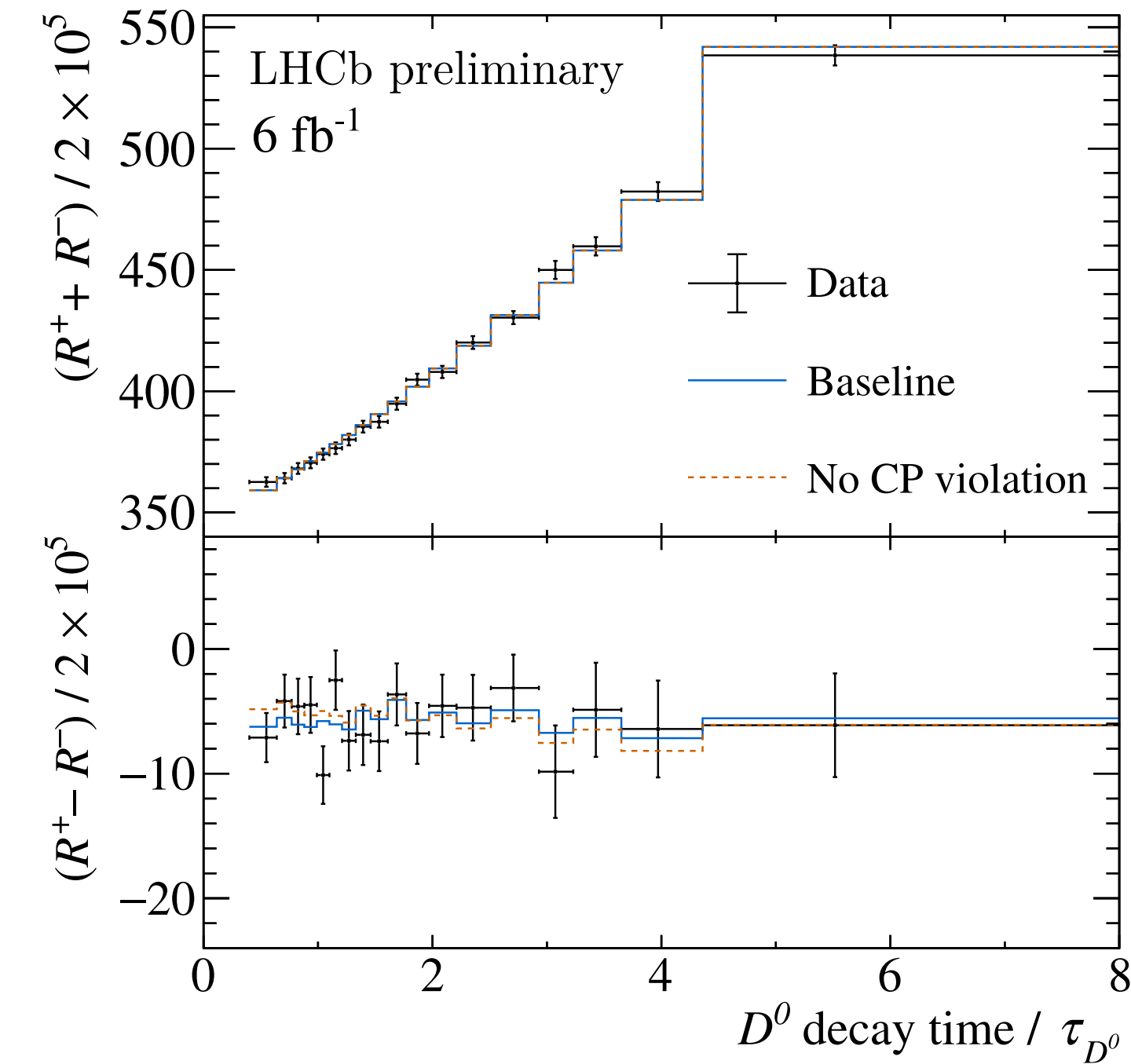
Mixing $D^0 - \overline{D^0}$ e CPV con $D^0 \rightarrow K\pi$

LHCb-PAPER-2024-008
in preparazione

- I parametri di mixing sono ottenuti minimizzando un χ^2 dei risultati in ogni bin di tempo

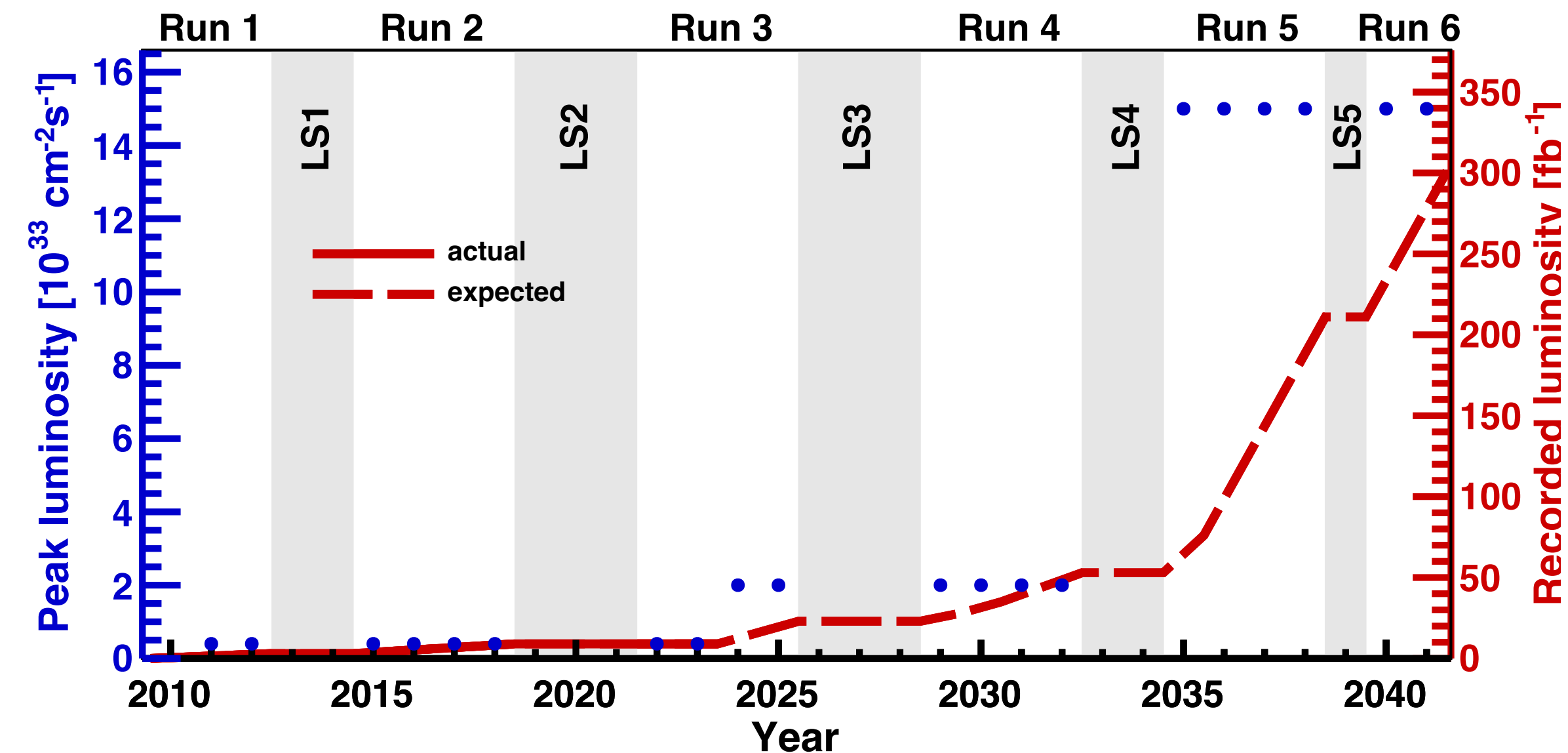
Parameters		Correlations					
		$R_{K\pi}$	$c_{K\pi}$	$c'_{K\pi}$	$A_{K\pi}$	$\Delta c_{K\pi}$	$\Delta c'_{K\pi}$
$R_{K\pi}$	$(343.1 \pm 2.0) \times 10^{-5}$	100.0	-92.4	80.0	0.9	-0.8	0.1
$c_{K\pi}$	$(51.4 \pm 3.5) \times 10^{-4}$		100.0	-94.1	-1.4	1.4	-0.7
$c'_{K\pi}$	$(13.1 \pm 3.7) \times 10^{-6}$			100.0	0.7	-0.7	0.1
$A_{K\pi}$	$(-7.1 \pm 6.0) \times 10^{-3}$				100.0	-91.5	79.4
$\Delta c_{K\pi}$	$(3.0 \pm 3.6) \times 10^{-4}$					100.0	-94.1
$\Delta c'_{K\pi}$	$(-1.9 \pm 3.8) \times 10^{-6}$						100.0

- Singola misura **più precisa al mondo**, compatibile con l'ipotesi di conservazione di CP e **statisticamente limitata**
- Miglioramento di un **fattore 2** delle incertezze sistematiche, e di un fattore 1.5-1.6 dell'incertezza totale rispetto alla precedente misura (2015-2016)
- Deviazione dall'ipotesi di conservazione della simmetria $SU(3)_F$ di 4σ (da confermare dopo combinazione appropriata con ulteriori misure)



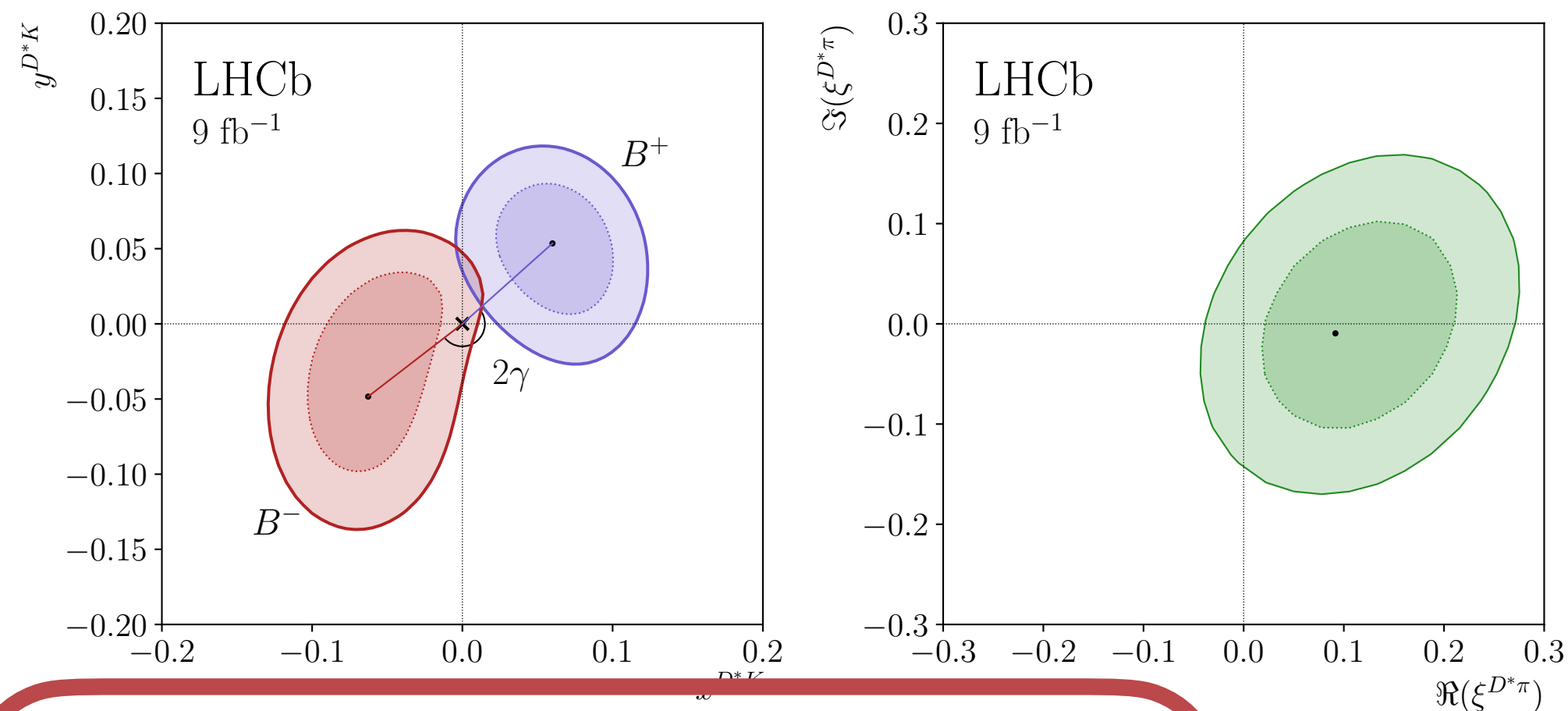
Conclusioni

- Lo studio degli adroni contenenti quark b e c permette di compiere test di **alta precisione** del Modello Standard
- Per comprendere l'asimmetria barionica osservata nell'Universo è fondamentale investigare la violazione di CP con maggiore dettaglio
- L'esperimento LHCb si è dimostrato capace di produrre misure estremamente precise in questo campo
- Alla fine del Run 3 si prevede di raccogliere **14 fb^{-1}** di statistica, quasi il doppio del campione combinato Run 1 + 2



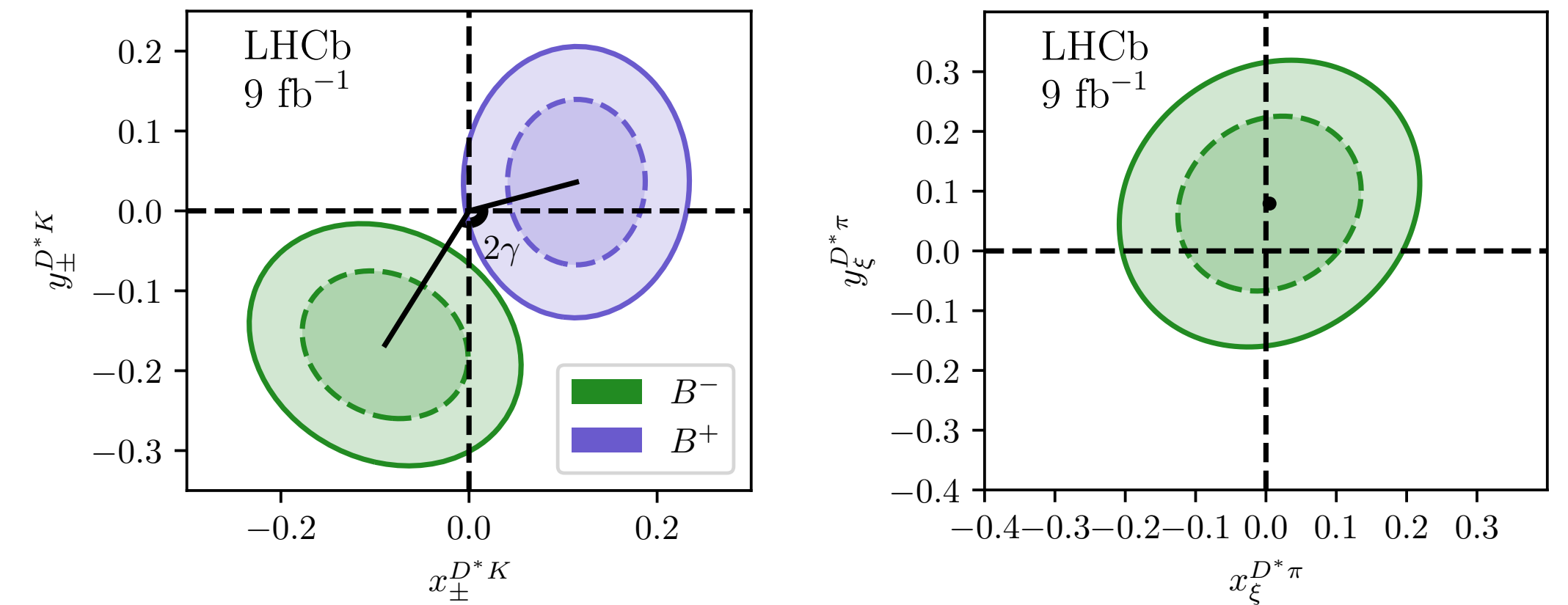
BACKUP

Parzialmente ricostruito



- $x_-^{D^*K} = (-6.3 \pm 2.9 \pm 1.1 \pm 0.6) \times 10^{-2}$
- $y_-^{D^*K} = (-4.8 \pm 5.7 \pm 1.4 \pm 1.5) \times 10^{-2}$
- $x_+^{D^*K} = (6.0 \pm 2.6 \pm 0.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$
- $y_+^{D^*K} = (5.4 \pm 2.9 \pm 0.9 \pm 0.4) \times 10^{-2}$
- $\Re(\xi^{D^*\pi}) = (11.5 \pm 9.4 \pm 3.3 \pm 2.3) \times 10^{-2}$
- $\Im(\xi^{D^*\pi}) = (-0.9 \pm 9.7 \pm 2.5 \pm 2.1) \times 10^{-2}$

Totalmente ricostruito



- $x_-^{D^*K} = (-8.91 \pm 3.55 \pm 2.04 \pm 0.23) \times 10^{-2}$
- $y_-^{D^*K} = (-16.75 \pm 3.98 \pm 1.48 \pm 0.64) \times 10^{-2}$
- $x_+^{D^*K} = (11.42 \pm 3.16 \pm 1.26 \pm 0.41) \times 10^{-2}$
- $y_+^{D^*K} = (3.6 \pm 4.41 \pm 2.12 \pm 0.30) \times 10^{-2}$
- $\Re(\xi^{D^*\pi}) = (0.51 \pm 5.0 \pm 2.66 \pm 0.93) \times 10^{-2}$
- $\Im(\xi^{D^*\pi}) = (7.92 \pm 5.04 \pm 3.78 \pm 0.83) \times 10^{-2}$

Parzialmente ricostruito

- Incertezze statistiche e sistematiche:

Source	$x_-^{D^*K}$	$y_-^{D^*K}$	$x_+^{D^*K}$	$y_+^{D^*K}$	$\Re(\xi^{D^*\pi})$	$\Im(\xi^{D^*\pi})$
Efficiency correction of (c_i, s_i)	0.23	0.29	0.21	0.20	0.47	0.31
Mass shape parameterisation	0.35	0.58	0.38	0.33	1.17	0.90
Fixed $\xi_{D\gamma}$ parameter	0.14	0.19	0.15	0.08	0.22	0.32
Fixed branching ratios	0.58	0.44	0.33	0.50	1.09	0.54
Fixed efficiencies	0.23	0.48	0.18	0.27	0.70	0.38
Fixed yield ratios	0.66	0.85	0.46	0.43	1.45	0.77
Bias Correction	0.29	0.35	0.12	0.16	0.62	0.51
Dalitz-bin migration	0.00	0.02	0.04	0.10	0.03	0.11
Inputs for CPV backgrounds	0.35	0.33	0.38	0.21	2.22	1.93
Total of above uncertainties	1.11	1.36	0.85	0.87	3.28	2.46
Strong-phase inputs	0.57	1.54	0.18	0.41	2.33	2.13
Total systematic uncertainty	1.25	2.05	0.87	0.95	4.02	3.26
Statistical uncertainty	2.93	5.69	2.58	2.87	9.37	9.67

Totalmente ricostruito

- Incertezze statistiche e sistematiche:

Source	$\sigma(x_+^{D^*K})$	$\sigma(x_-^{D^*K})$	$\sigma(y_+^{D^*K})$	$\sigma(y_-^{D^*K})$	$\sigma(x_\xi^{D^*\pi})$	$\sigma(y_\xi^{D^*\pi})$
Neglecting correlations	0.05	0.03	0.19	0.04	0.70	1.48
Efficiency correction of (c_i, s_i)	0.53	0.18	0.18	0.20	0.64	1.73
Invariant mass shape parameter	0.09	0.16	0.20	0.05	0.39	0.06
Fixed yield ratios	0.09	0.03	0.03	0.01	0.33	0.15
Bin dependence of the invariant-mass shape	0.40	0.38	0.41	0.33	1.78	1.57
DP bin migration	0.32	0.70	0.03	0.17	1.2	2.0
A_b^0 background	0.97	1.34	0.55	0.77	1.13	1.43
Semileptonic B backgrounds	0.27	1.29	0.02	0.67	0.03	0.04
Merging data subsamples	0.06	0.02	0.12	0.03	0.06	0.34
CP-violation in $B^{\pm,0} \rightarrow DK^{\pm}\pi^{0,\mp}$	0.03	0.13	1.97	0.99	0.13	0.68
Total systematic	1.26	2.04	2.12	1.48	2.66	3.78
Strong-phase inputs (external)	0.41	0.23	0.30	0.64	0.93	0.83
Statistical	3.16	3.55	4.41	3.98	5.00	5.04

- Incertezze statistiche e sistematiche:

Source	$ A_0 ^2$	$ A_\perp ^2$	ϕ_s [rad]	$ \lambda $	$\delta_\perp - \delta_0$ [rad]	$\delta_\parallel - \delta_0$ [rad]	$\Gamma_s - \Gamma_d$ [ps ⁻¹]	$\Delta\Gamma_s$ [ps ⁻¹]	Δm_s [ps ⁻¹]
Mass parametrization	0.04	0.03	0.03	0.02	0.15	0.12	0.02	0.04	0.03
Mass shape statistical	0.04	0.04	0.05	0.09	0.62	0.33	0.02	0.01	0.11
Mass factorization	0.11	0.10	0.42	0.19	0.54	0.60	0.12	0.16	0.18
B_c^+ contamination	0.04	0.05	—	0.02	—	0.17	(0.07)	(0.03)	—
D-wave component	0.04	0.04	0.02	—	0.07	0.13	0.01	0.03	0.02
Ghost tracks	0.07	0.04	0.02	0.10	0.18	0.18	0.02	—	0.01
Multiple candidates	0.01	—	0.27	0.22	0.90	0.41	0.01	0.01	0.24
Particle identification	0.06	0.09	0.27	0.27	1.31	0.51	0.05	0.15	0.46
C_{SP} factors	—	0.01	0.01	0.03	0.73	0.41	—	0.01	0.04
DTR calibration	—	—	0.03	0.02	0.11	0.07	—	—	0.05
DTR model applicability	—	—	0.08	0.03	0.26	0.09	—	—	0.09
Time bias correction	0.04	0.05	0.06	0.05	0.77	0.11	0.03	0.05	0.44
Angular efficiency	0.05	0.14	0.25	0.32	0.42	0.44	0.01	0.02	0.13
Angular resolution	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.08	—	0.01	0.02
Kinematic weighting	0.24	0.09	0.01	0.01	0.98	0.86	0.02	0.03	0.31
Momentum uncertainty	0.08	0.04	0.04	—	0.07	0.11	0.01	—	0.13
Longitudinal scale	0.07	0.04	0.04	—	0.10	0.09	0.02	—	0.31
Neglected correlations	—	—	—	—	4.20	4.96	—	—	—
Total systematic uncertainty	0.32	0.24	0.6	0.5	4.8	5.2	0.14	0.24	0.9
Statistical uncertainty	0.17	0.23	2.2	1.1	7.5	6.0	0.14	0.44	3.3

- Incertezze statistiche e sistematiche:

Source	$R_{K\pi}$ [10^{-5}]	$c_{K\pi}$ [10^{-4}]	$c'_{K\pi}$ [10^{-6}]	$A_{K\pi}$ [10^{-3}]	$\Delta c_{K\pi}$ [10^{-4}]	$\Delta c'_{K\pi}$ [10^{-6}]
Mass mismodeling	0.5	0.8	0.9	1.4	0.8	0.8
Ghost soft pions	0.4	0.8	0.8	1.1	0.8	1.1
Instrumental asymmetry	—	—	—	1.2	0.7	0.7
a_{KK}^d external input	—	—	—	1.1	—	—
ΔY external input	—	—	—	—	0.1	0.1
Doubly misidentified background	0.1	0.1	0.1	—	—	—
Common removal	0.2	—	—	—	—	—
Decay-time bias	0.1	0.2	0.1	0.1	—	—
m_{D^0}/τ_{D^0} external input	—	0.1	0.1	—	—	—
Total systematic uncertainty	0.7	1.1	1.2	2.4	1.3	1.4
Statistical uncertainty	1.9	3.3	3.5	5.5	3.3	3.5
Total uncertainty	2.0	3.5	3.7	6.0	3.6	3.8