

106° Congresso Nazionale Società Italiana di Fisica

Milano, 14-18 settembre 2020



Misura del parametro di violazione di CP ϕ_s nei decadimenti
 $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ e $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ a LHCb.

Piera Muzzetto [UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAGLIARI E INFN]

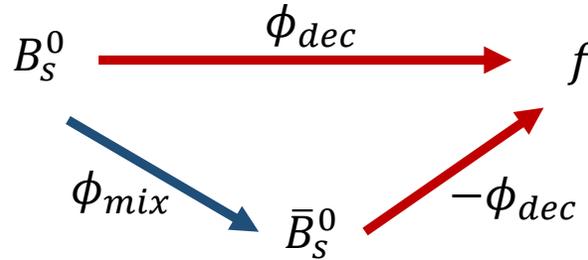
a nome della collaborazione LHCb



La fase di violazione di CP ϕ_s



La fase di violazione di CP ϕ_s deriva dall'interferenza fra il decadimento di un mesone B_s in uno stato finale di CP f e il decadimento dopo il mixing.



$$\phi_s = \phi_{mix} - 2\phi_{dec}$$

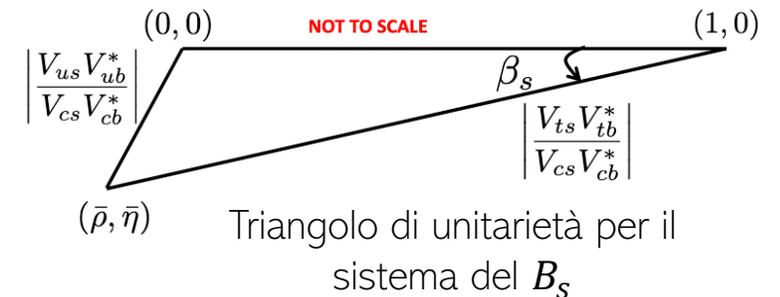
Perché è importante studiare ϕ_s ?

- ✓ Perfetto test del MS
- ✓ Molto sensibile ad effetti di fisica oltre il Modello Standard (MS)
- ✓ Predetta con precisione nel MS (al primo ordine),

$$\phi_s^{SM} = -2\beta_s = -0.03686_{-0.00068}^{+0.00096} \text{ rad} \quad \text{[CKM fitter]}$$

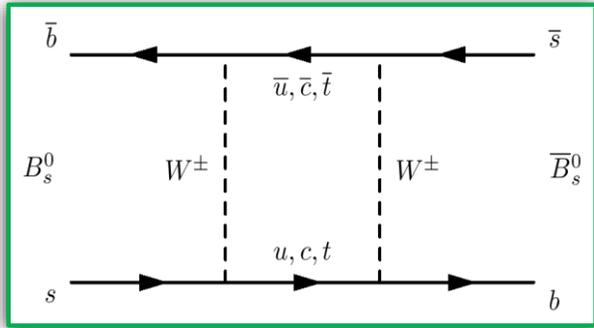
Dove studiare ϕ_s ?

- Tramite transizioni $b \rightarrow c\bar{c}s$, in decadimenti come $B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ and $B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$

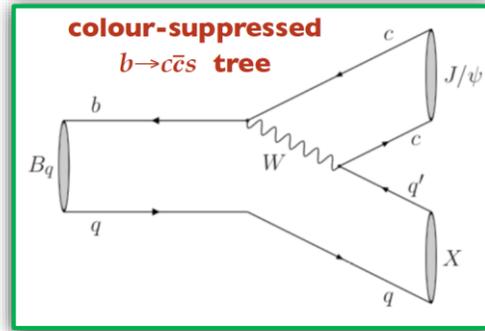


La fase di violazione di CP ϕ_s

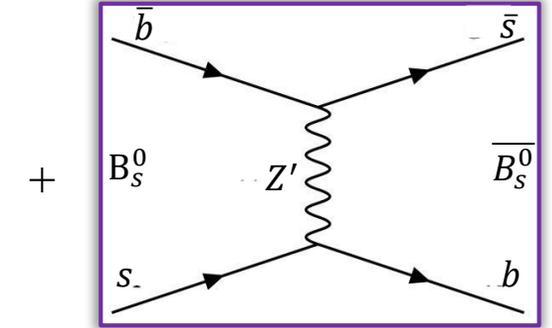
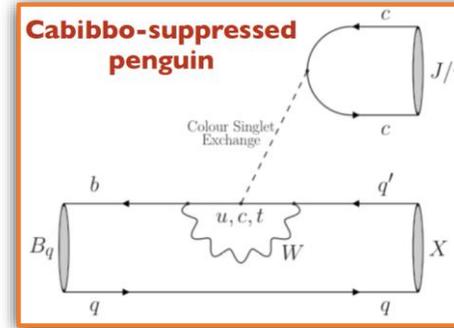
Diagramma di mixing



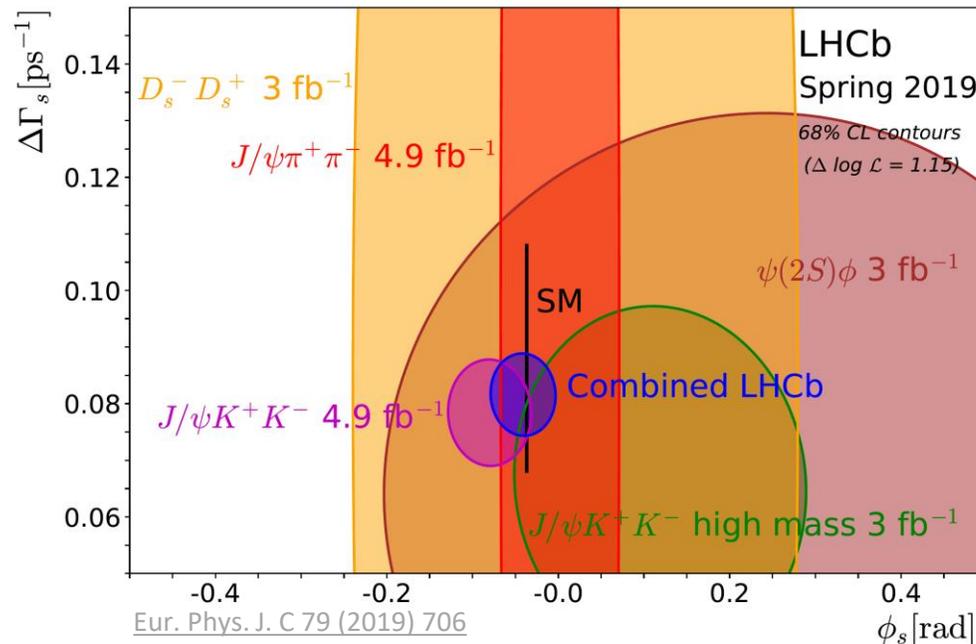
Contributo al primo ordine



Contributo di ordine successivo Contributo di Nuova Fisica



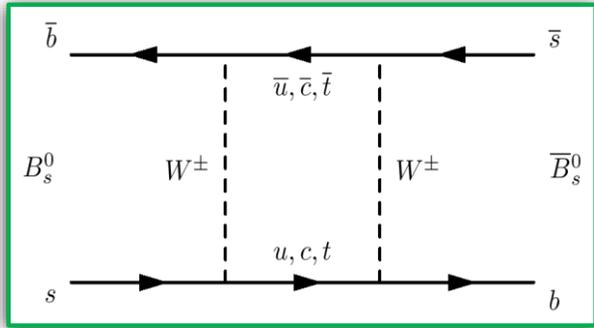
Le misure di ϕ_s sono fatte con differenti modi di decadimento a LHCb:



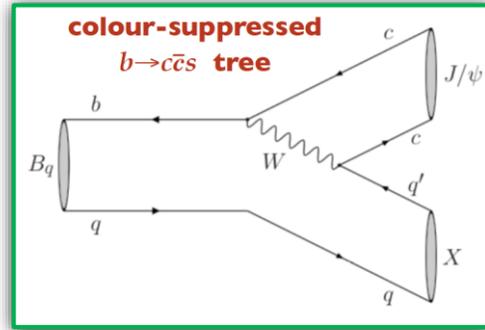
- $B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$
Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 211801
- $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$
Phys. Lett. B762 (2016) 253
- $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ (high mass)
JHEP 08 (2017) 037
- $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$
Eur. Phys. J. C 79 (2019) 706
- $B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$
Phys. Lett. B797 (2019) 134789

La fase di violazione di CP ϕ_s

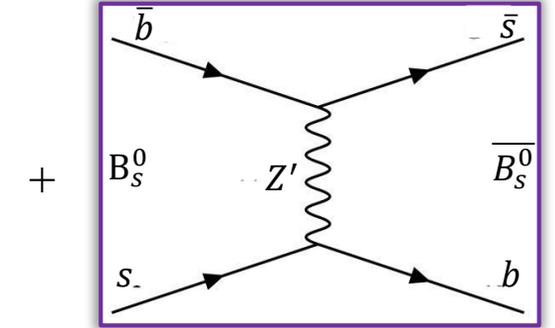
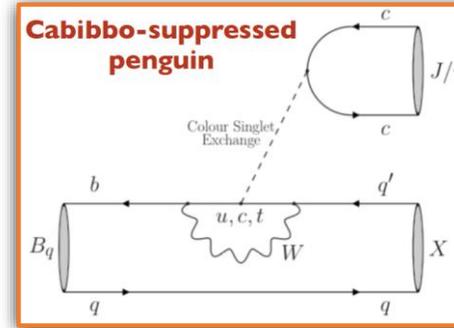
Diagramma di mixing



Contributo al primo ordine



Contributo di ordine successivo Contributo di Nuova Fisica



FASE MISURABILE:

CPV due to mixing-decay interference

$$\phi_s = \underbrace{\phi_s^{SM}}_{-2\beta_s} + \cancel{\Delta\phi_s^{peng}} + \Delta\phi_s^{NP}$$

Datasets used:

- 2015: 0.3 fb⁻¹
- 2016: 1.6 fb⁻¹
- 2017: 1.7 fb⁻¹
- 2018: 2.1 fb⁻¹

Canali di decadimento discussi in questa presentazione:

$B_s \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+K^-$

- Canale d'oro
- Maggiore BR, $\mathcal{O}(10^{-5})$
- Stato finale accessibile sia dalla componente CP-even che CP-odd
- Permette di ottenere $\Gamma_s = \frac{\Gamma_H + \Gamma_L}{2}$,
 $\Delta\Gamma_s = \Gamma_H - \Gamma_L$ and $\Delta m_s = m_H - m_L$
- Dominato dal contributo al primo ordine

$B_s \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\pi^+\pi^-$

- BR, $\mathcal{O}(10^{-6})$
- Stato finale quasi interamente CP-odd
- Permette di ottenere Γ_H
- Dominato dal contributo al primo ordine

Strategia: analisi angolare e dipendente dal tempo.

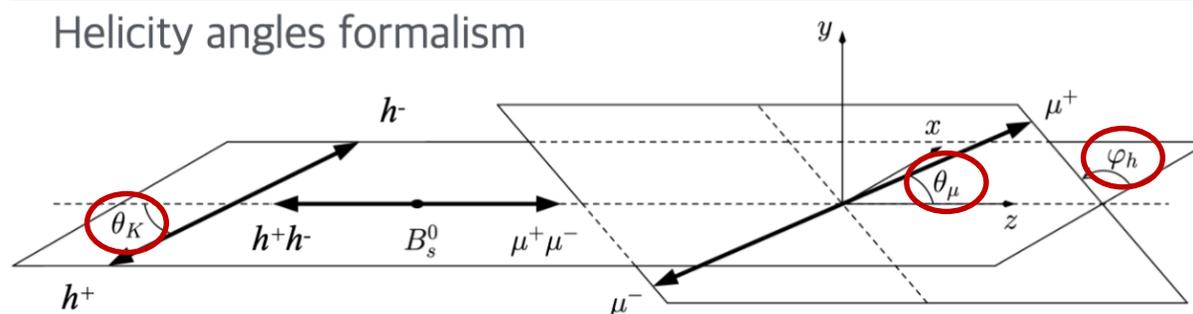
Definizione della asimmetria CP dipendente dal tempo:

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}_s^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(B_s^0(t) \rightarrow f)}{\Gamma(\bar{B}_s^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(B_s^0(t) \rightarrow f)} = \eta_f \sin \phi_s \sin(\Delta m_s t)$$

Sperimentalmente : $A_{CP}(t) = \eta_f \cdot e^{-\frac{1}{2}\Delta m_s^2 \sigma_t^2} \cdot (1 - 2\omega) \cdot \sin \phi_s \cdot \sin(\Delta m_s t)$

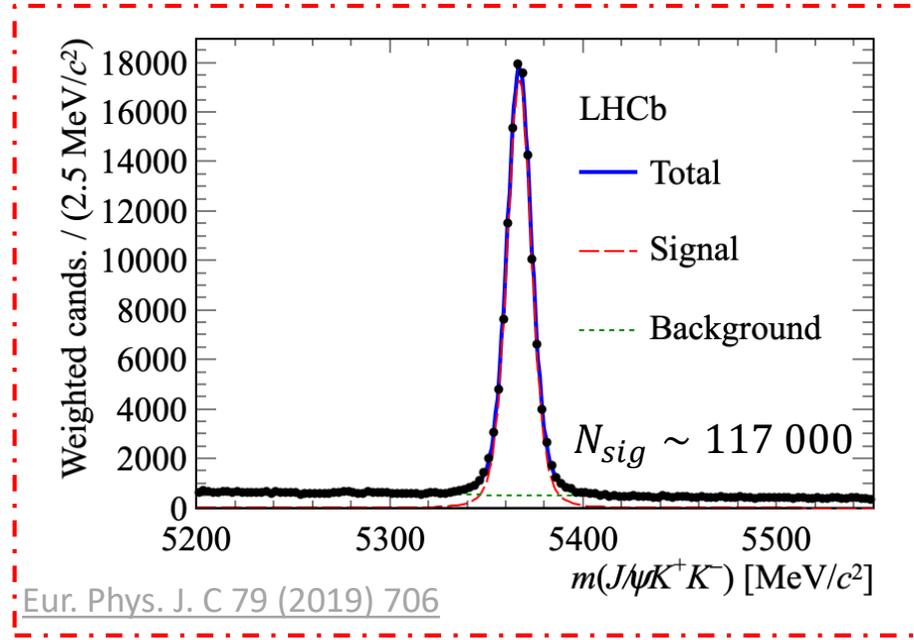
Requisiti:

- Conoscenza dell'autovalore di CP dello stato finale $\eta_f \rightarrow$ analisi angolare;
- B_s oscilla velocemente \rightarrow eccellente risoluzione temporale σ_t ;
- Conoscenza del sapore del mesone alla produzione: probabilità di sbagliare l'identificazione ω ;
- Modellare le efficienze angolari e temporale $\epsilon(t, \Omega)$ nelle distribuzioni differenziali del tempo di decadimento

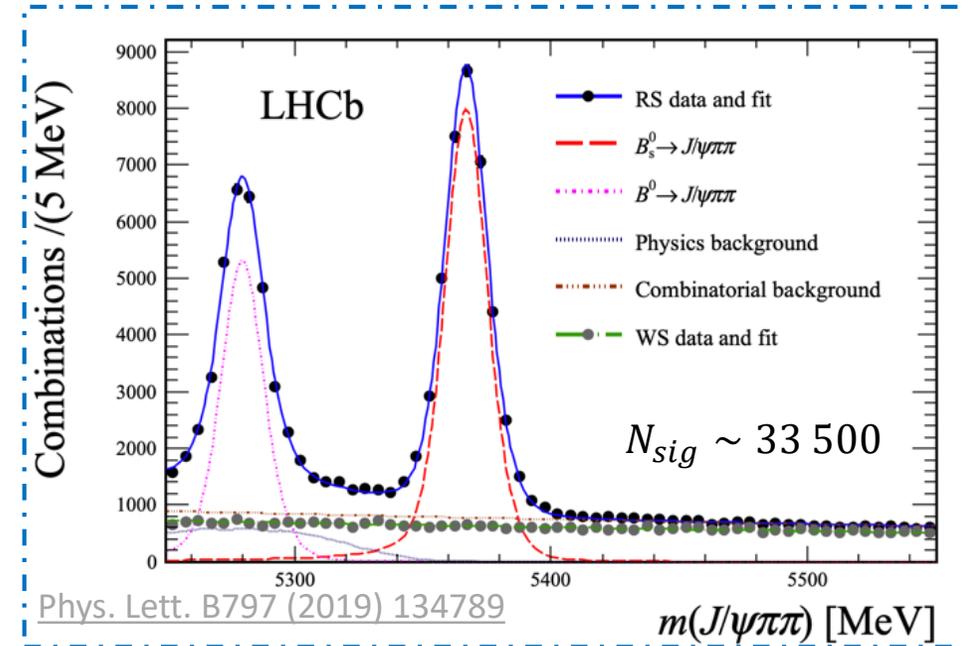


Selezione dei candidati

$$B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$$



$$B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$$



Sono stati utilizzati degli alberi decisionali per selezionare i candidati di segnale

- La larghezza della distribuzione del segnale dipende evento per evento dall'errore della massa invariante, per correlarla dal $\cos\theta_\mu$

- Il fondo combinatoriale è stimato usando un campione di dati di $J/\psi \pi^\pm \pi^\pm$ (wrong-sign data)

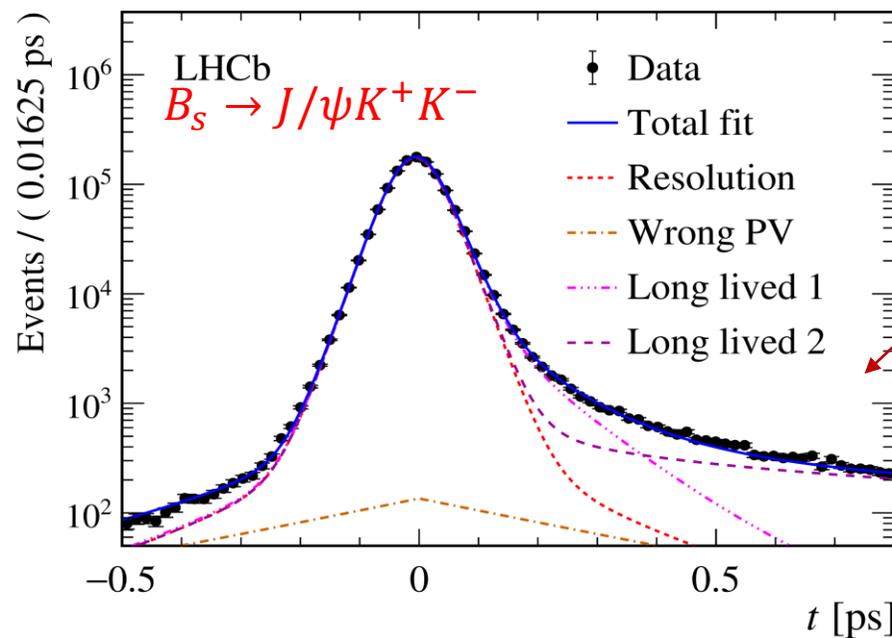
Risoluzione temporale

Per stimare la risoluzione temporale evento per evento viene utilizzato l'errore sul tempo di decadimento (δ_t), calibrato usando un campione di dati $J/\psi h^+ h^-$ provenienti dal vertice primario

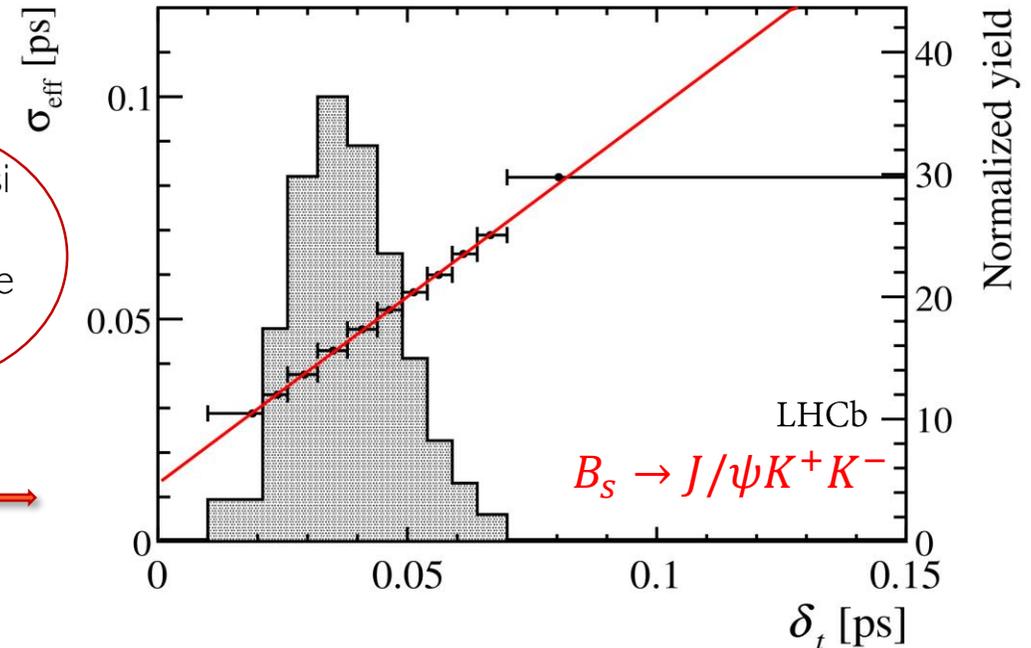
Modello di risoluzione: tripla Gaussiana $\longrightarrow \sigma_{eff}(\delta t) = \sqrt{(-2/\Delta m_s^2) \ln D}$, with $D = \sum_{i=1}^3 f_i e^{-\sigma_i^2 \Delta m_s^2 / 2}$

Eur. Phys. J. C 79 (2019) 706

Eur. Phys. J. C 79 (2019) 706



Fit in diversi bin di δ_t per ottenere $\sigma_{eff}(\delta t)$



Risoluzione media:

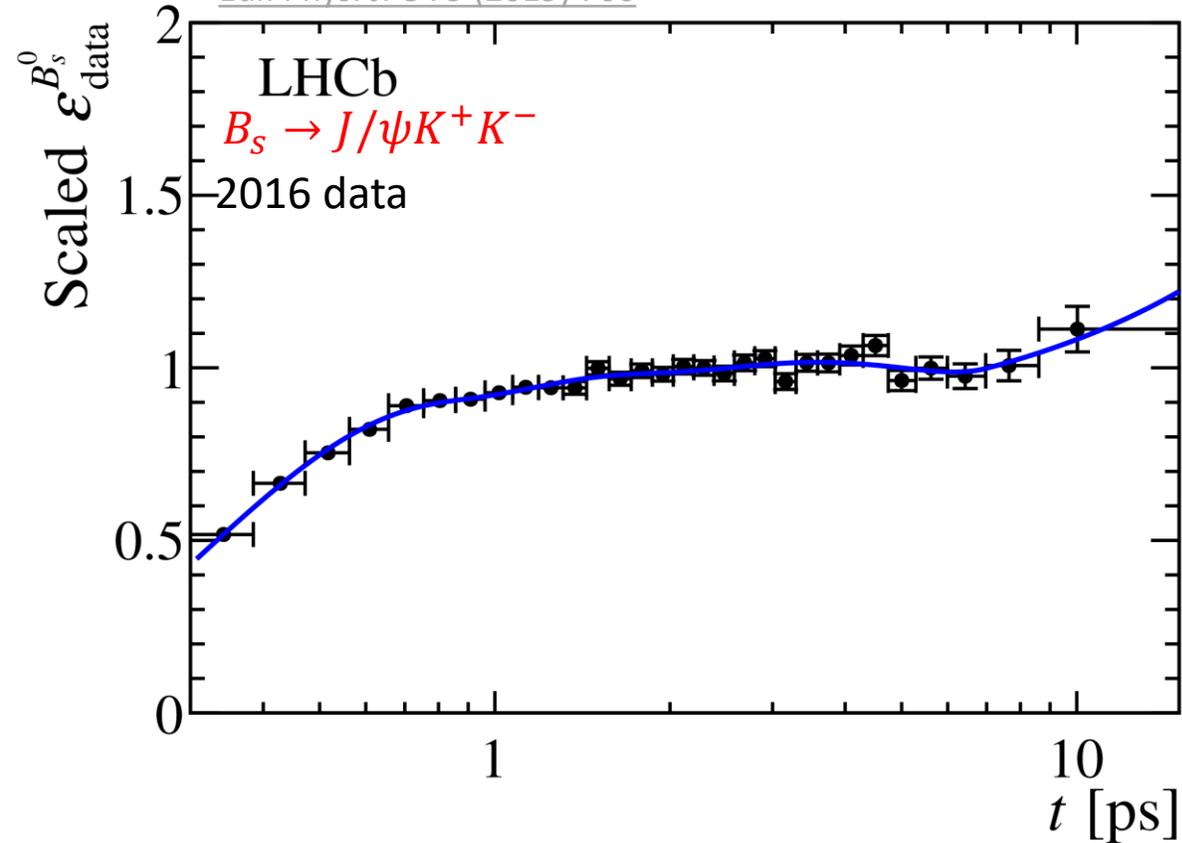
$$\sigma_{eff} = 45.5 \text{ fs } B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$$

$$\sigma_{eff} = 41.5 \text{ fs } B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$$

Efficienza temporale

Canale di controllo: $B^0 \rightarrow J/\psi K^*(892)^0$ (τ noto con elevata precisione $\tau_{B^0} = \frac{1}{\Gamma_d} = 1.520 \pm 0.004$ ps).

Eur. Phys. J. C 79 (2019) 706



$$\varepsilon_{B_s^0}^{data}(t) = \varepsilon_{B^0}^{data}(t) \times \frac{\varepsilon_{B_s^0}^{MC}(t)}{\varepsilon_{B^0}^{MC}(t)}$$

Piccola correzione che tiene conto delle differenze nei rispettivi tempi di vita

Validazione del metodo usando $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$:

- $\frac{\tau(B^+)}{\tau(B^0)} = 1.0783 \pm 0.0024$ vs $\frac{\tau(B^+)^{PDG}}{\tau(B^0)^{PDG}} = 1.076 \pm 0.004$

- $\Gamma_{B^+} - \Gamma_d = -0.0475 \pm 0.0005 \text{ ps}^{-1}$

vs

$$(\Gamma_{B^+} - \Gamma_d)^{PDG} = -0.0474 \pm 0.0023 \text{ ps}^{-1}$$

$(B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-)$

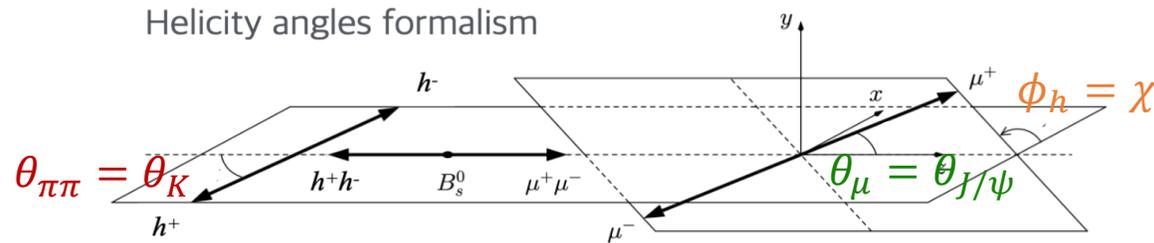
$(B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)$

Efficienza angolare

$$B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$$

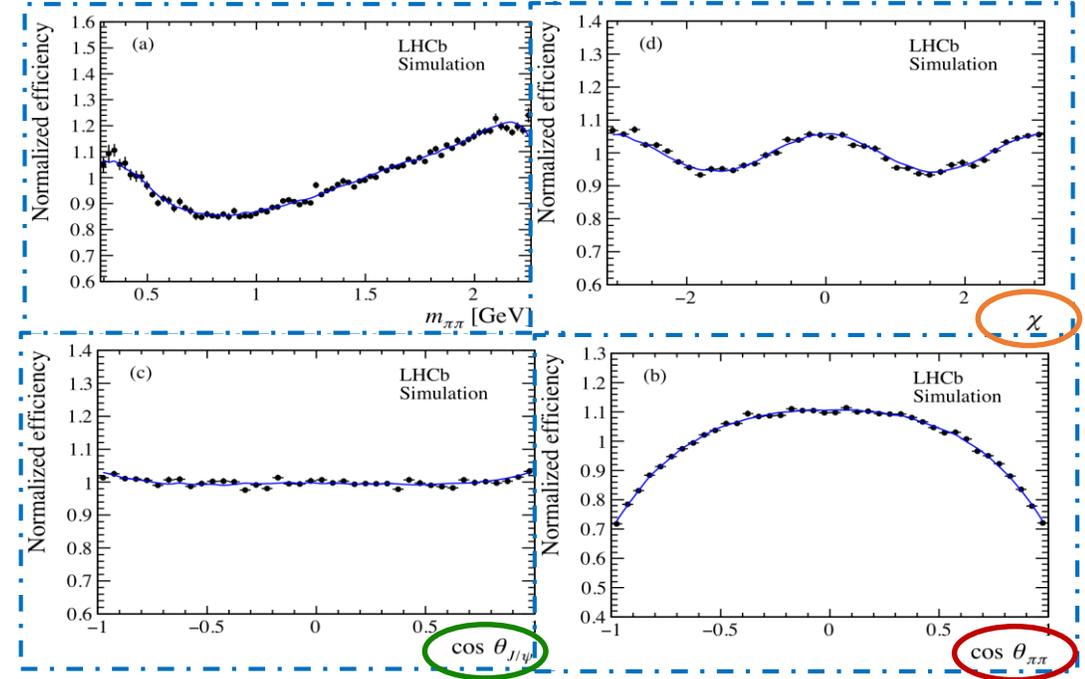
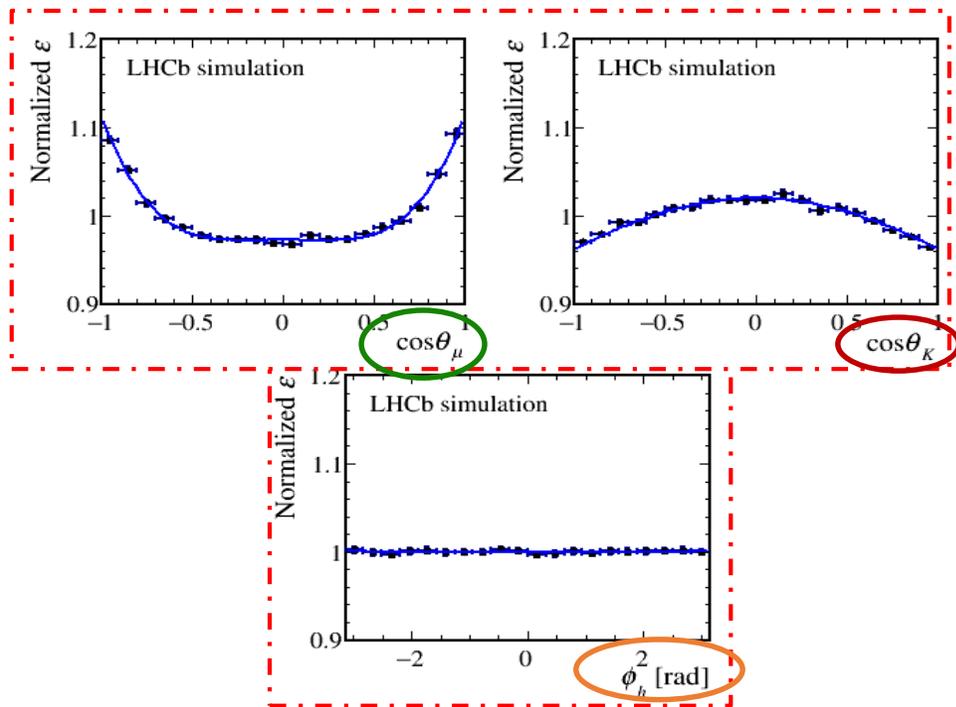
$$B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$$

La selezione e l'accettazione geometrica del rivelatore hanno un'efficienza non uniforme negli angoli di elicità



Eur. Phys. J. C 79 (2019) 706

Phys. Lett. B 797 (2019) 134789

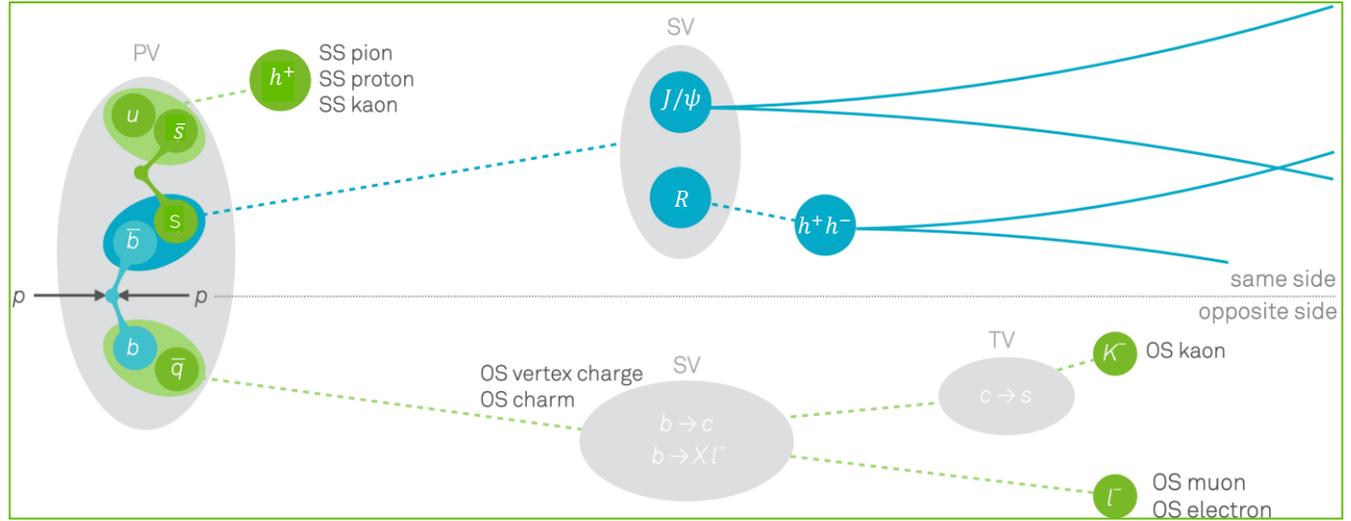


Identificazione del sapore



Due algoritmi: *same side* (SS) e *opposite side* (OS)

SS: il sapore del B_s^0 è correlato alla carica del K creato nella stessa frammentazione



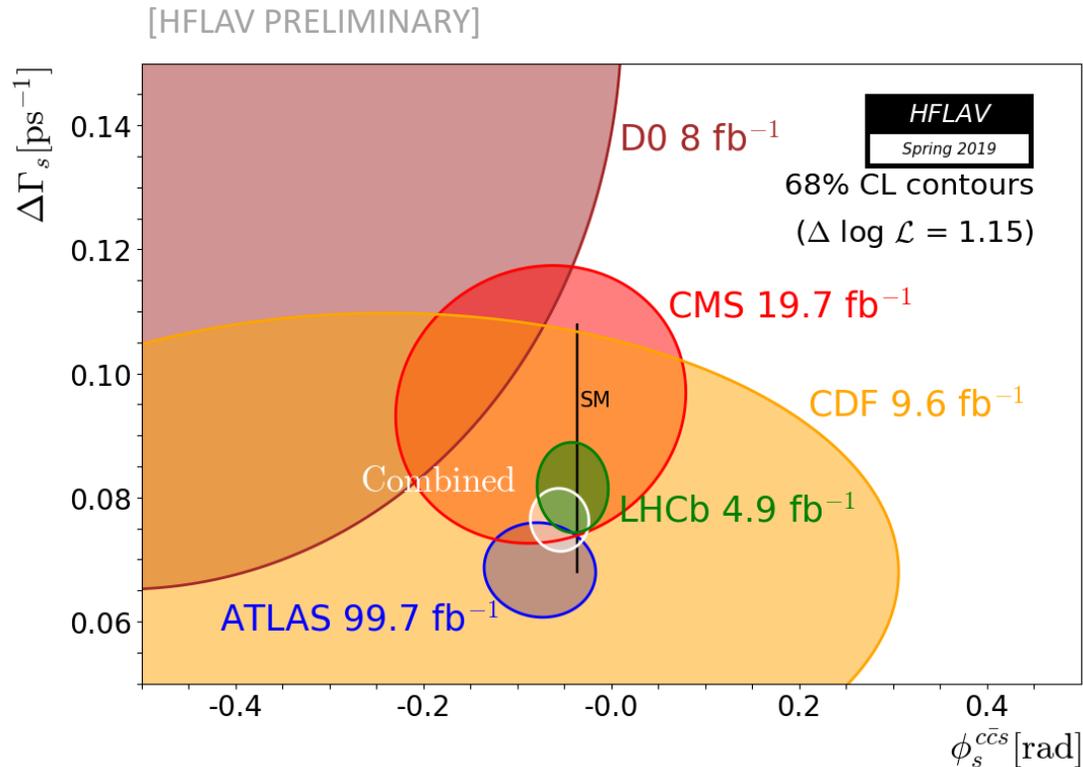
OS: il sapore del B_s^0 è anti-correlato con la carica dello stato finale dell'altro adrone b

Per stimarne il rendimento si usa il **tagging power** $\epsilon_{tag} D^2 = \epsilon_{tag} (1 - 2\omega)^2$

Grande tagging power = migliore sfruttamento dei dati

$$\epsilon_{tag} D^2 = 4.73 \pm 0.34 \%$$

$$\epsilon_{tag} D^2 = 5.06 \pm 0.38 \%$$



Combinazione preliminare di HFLAV

$$\phi_s = -0.055 \pm 0.021 \text{ rad}$$

$$\Delta\Gamma_s = 0.0764^{+0.0034}_{-0.0033} \text{ ps}^{-1}$$

Predizione MS: $\phi_s^{SM} = -0.03686^{+0.00096}_{-0.00068} \text{ rad}$



$$\phi_s = -0.083 \pm 0.041 \pm 0.006 \text{ rad}$$



$$\phi_s = -0.057 \pm 0.060 \pm 0.011 \text{ rad}$$

Combinazione di tutti i risultati di LHCb (Run1 and 2)

$$\phi_s = -0.041 \pm 0.025 \text{ rad}$$

ϕ_s 0.1 σ away from SM
in accordo con il MS

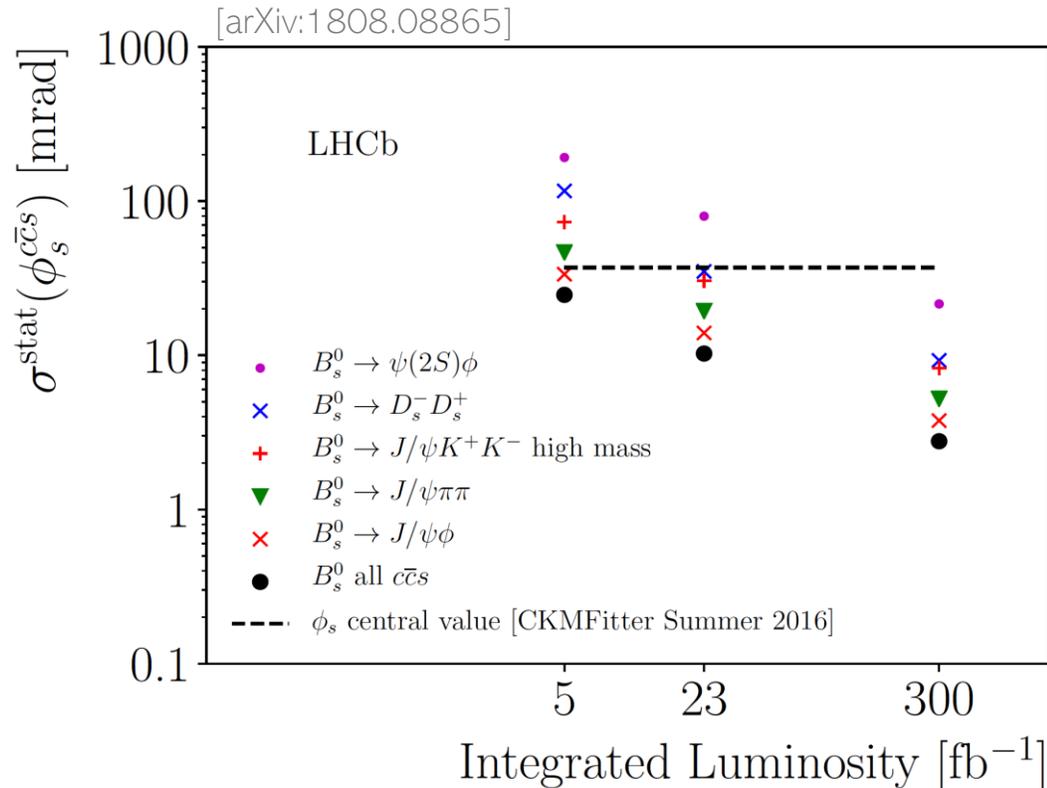
ϕ_s 1.6 σ away from 0

consistente con l'assenza di CPV nell'interferenza

Conclusioni and prospettive future



- Sono state presentate le misure più precise di $\phi_s^{c\bar{c}s}$ eseguite utilizzando i dati raccolti da LHCb nel 2015 e nel 2016;
- I risultati sono consistenti con le predizioni del MS e con l'assenza di CPV nell'interferenza:
 - Tali risultati sono principalmente dominati dalla statistica



Prospettive future

300/fb: $\sigma^{\text{STAT}}(\phi_s) \sim 4$ mrad usando solo $B_s^0 \rightarrow J/\psi K K$

- ϕ_s sarà limitato dalla statistica

Prossimo futuro

- Le analisi dei dati raccolti nel 2017-2018 sono in sviluppo ed è atteso un significativo miglioramento nella precisione della misura di ϕ_s
- Nuova misura con $B_s \rightarrow J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K^+ K^-$

Diapositive di supporto

È richiesta un'analisi angolare per separare le componenti CP-even e CP-odd dello stato finale.
Per questo viene studiato la distribuzione differenziale del tempo di decadimento:

$$\frac{d^4\Gamma}{dt d\Omega} \sim \sum_k f_k(\Omega) \varepsilon(t, \Omega) (1 - 2\omega) h_k(t|B_s^0) \otimes G(t|\sigma_t)$$

Somma di 10 termini, 4 ampiezze e i loro termini di interferenza

$$h_k = e^{-\Gamma_s t} \left[a_k \cosh \frac{\Delta\Gamma_s t}{2} + b_k \sinh \frac{\Delta\Gamma_s t}{2} + c_k \cos(\Delta m_s t) + d_k \sin(\Delta m_s t) \right]$$

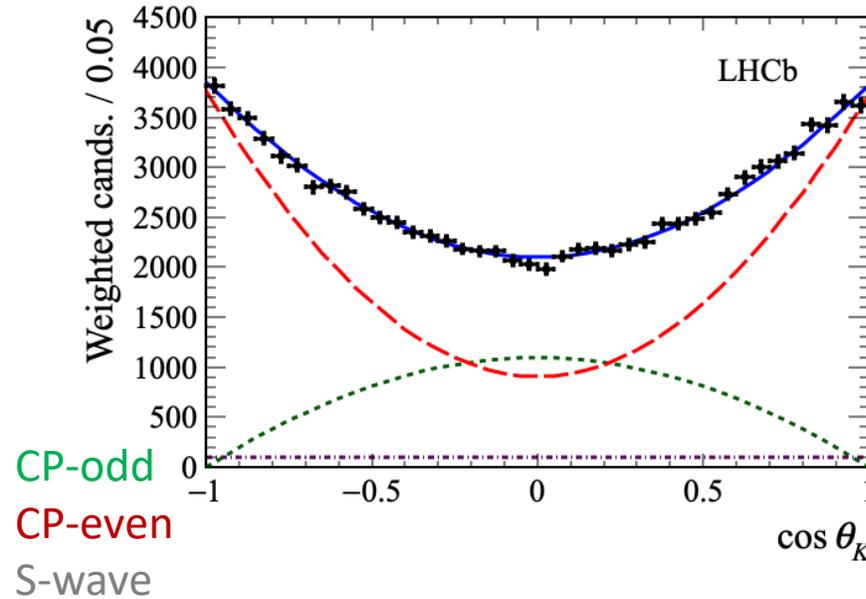
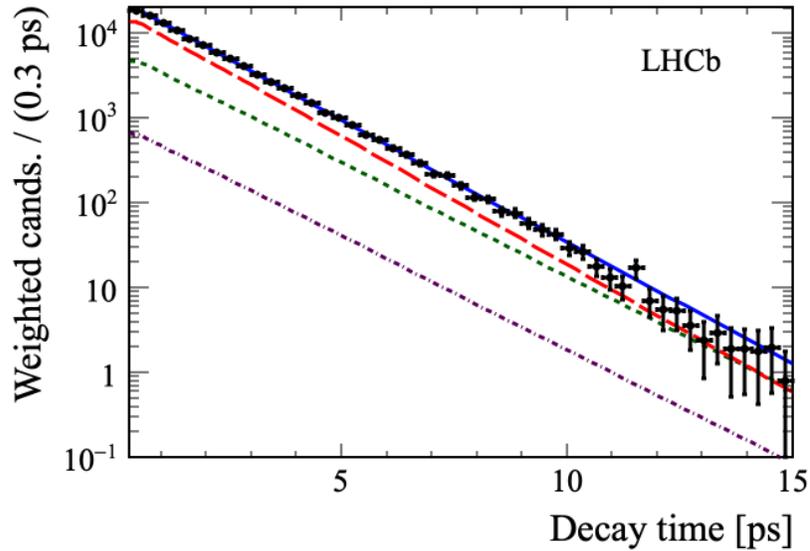
$$\text{Con } \Gamma_s = \frac{\Gamma_H + \Gamma_L}{2} \text{ and } \Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$$

NB: la PDF viene valutata per 4 casi di identificazione di sapore: SS, OS, SS and OS, candidati non identificati.

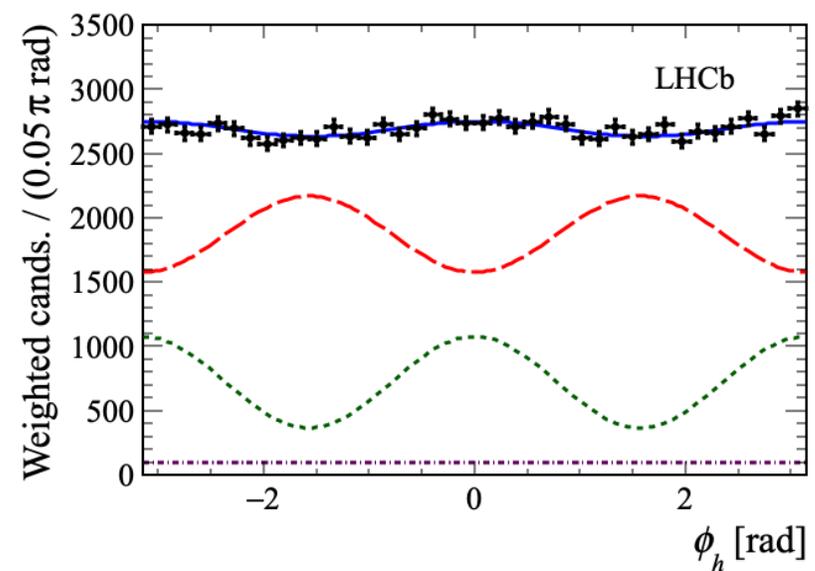
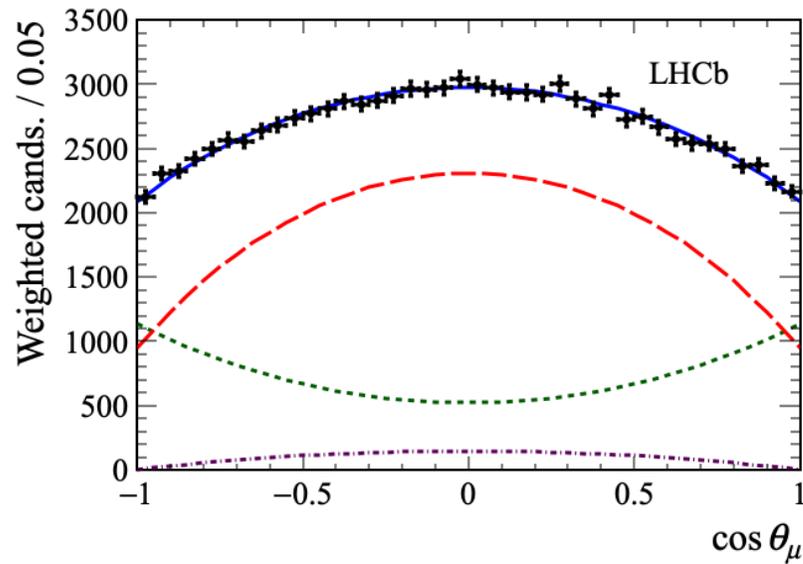
Viene fatto un fit simultaneo in differenti sotto-campioni: $m(KK)$ 6 bin (analisi di ampiezza in $B_s \rightarrow J/\psi\pi\pi$), anno, categoria di trigger and identificazione del sapore

Tutti i parametri fisici sono tenuti liberi e in comune fra i sotto-campioni, eccetto per le frazioni della componente S-wave nei bin di $m(KK)$.

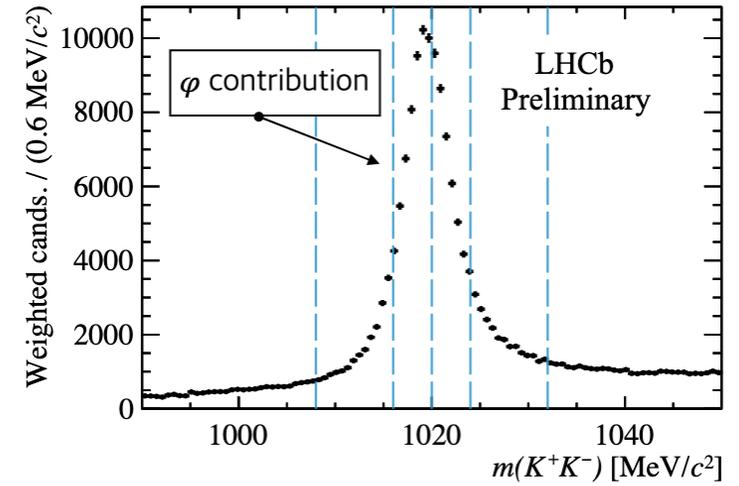
Risultati $B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$

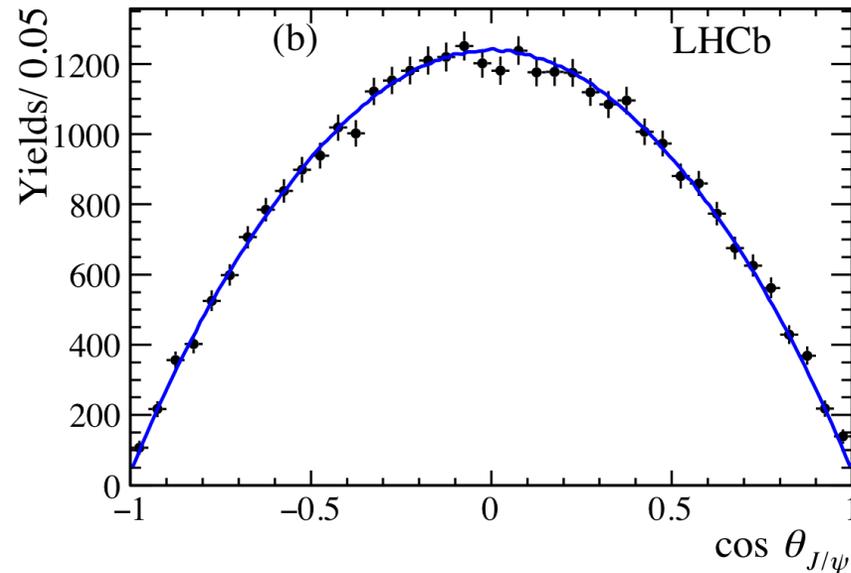
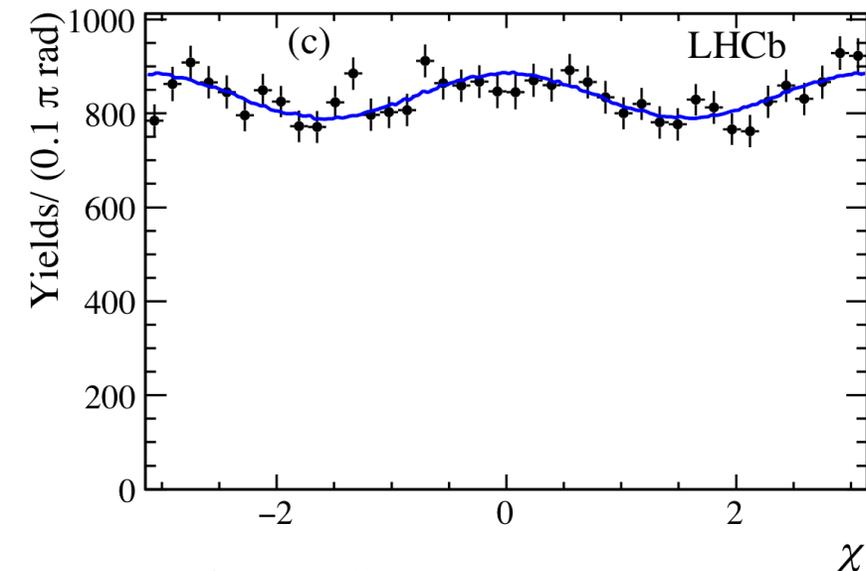
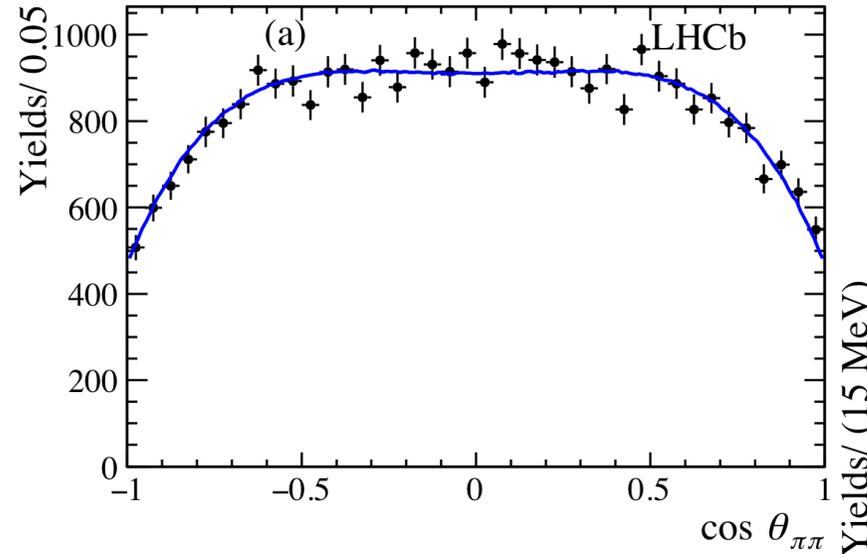
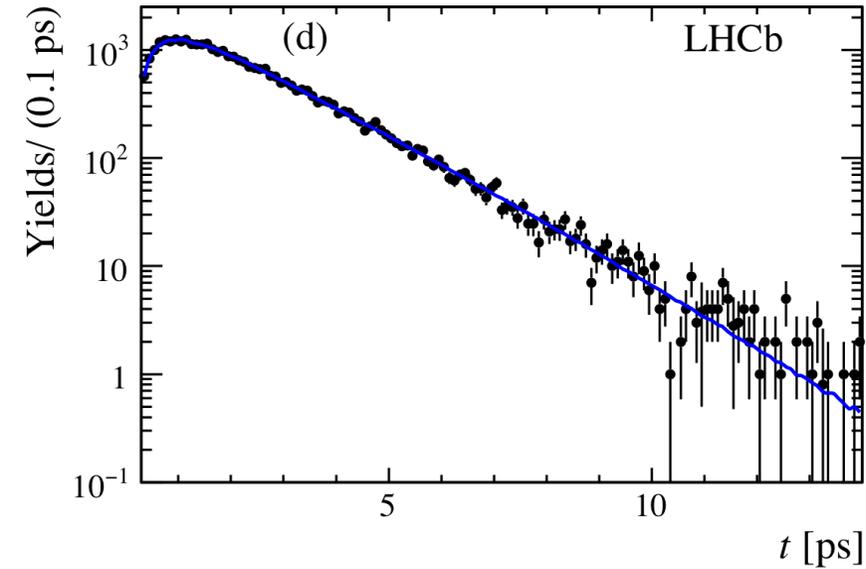


CP-odd
CP-even
S-wave



$$\begin{aligned} \phi_s &= -0.083 \pm 0.041 \pm 0.006 \text{ rad} \\ |\lambda| &= 1.012 \pm 0.016 \pm 0.006 \\ \Gamma_s - \Gamma_d &= -0.0041 \pm 0.0024 \pm 0.0015 \text{ ps}^{-1} \\ \Delta\Gamma_s &= 0.0773 \pm 0.0077 \pm 0.0026 \text{ ps}^{-1} \end{aligned}$$

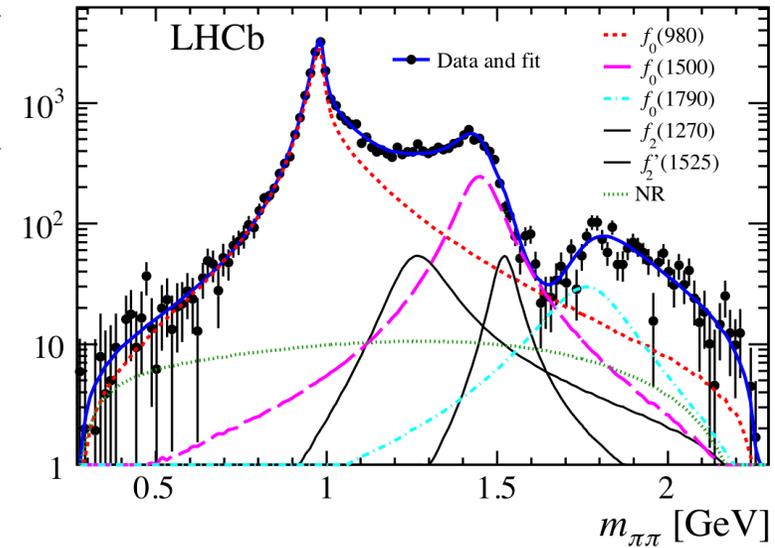




$$\phi_s = -0.057 \pm 0.060 \pm 0.011 \text{ rad}$$

$$|\lambda| = 1.01_{-0.06}^{+0.08} \pm 0.03$$

$$\Gamma_H - \Gamma_d = -0.050 \pm 0.004 \pm 0.004 \text{ ps}^{-1}$$



Identificazione del sapore: calibrazione e rendimento



- Vengono usati due algoritmi di identificazione del sapore:
 - **opposite side** e same side.
- Per ogni algoritmo la probabilità di sbagliare l'identificazione η viene calibrata usando dei canali di calibrazione di cui si conosce la probabilità stimata $\omega = p_0 + p_1(\eta - \langle \eta \rangle)$ dove $\langle \eta \rangle$ è la probabilità stimata media del campione di calibrazione
- Campioni di calibrazione:
 - $B^+ \rightarrow J/\psi K^+ OS$
 - $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+ SS$

$$\boxed{\varepsilon_{tag} D^2 = 4.73 \pm 0.34 \%}$$

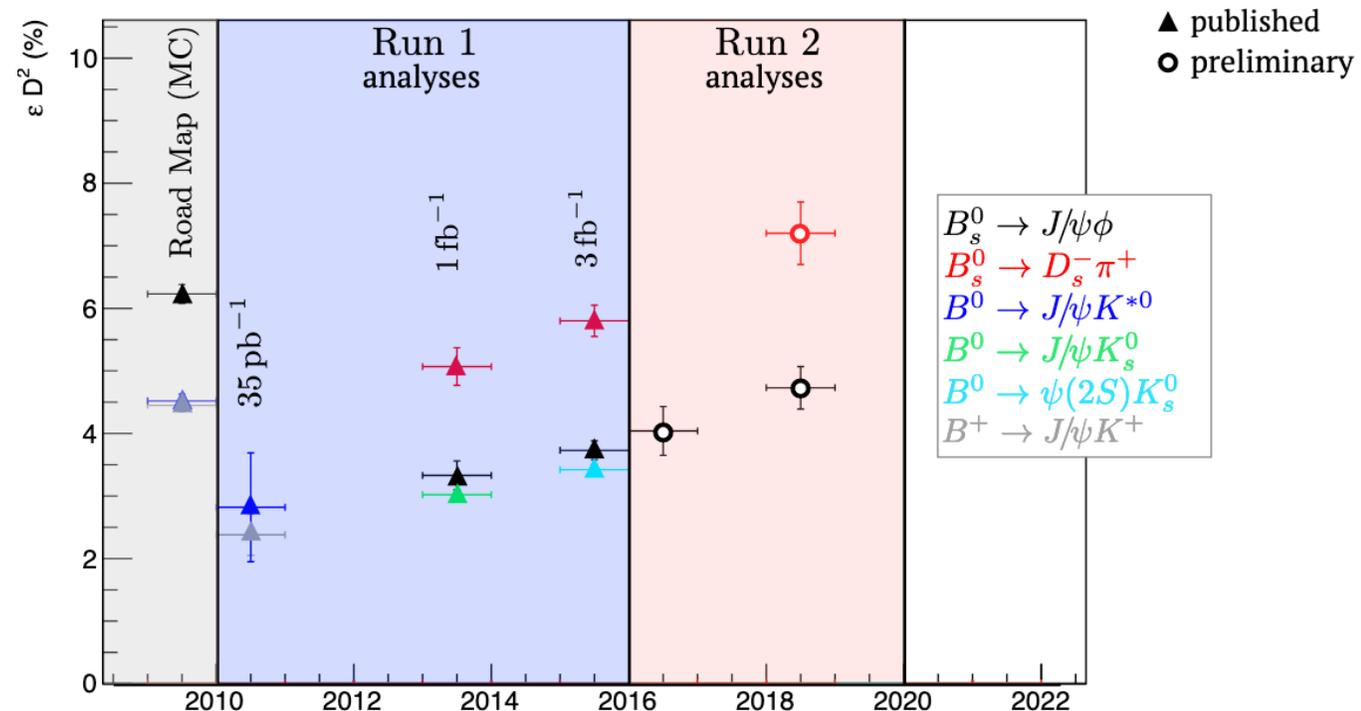


Run1 era
 $\approx 3.73 \%$

$$\boxed{\varepsilon_{tag} D^2 = 5.06 \pm 0.38 \%}$$



Run1 era
 $\approx 3.89 \%$



Sistematiche per $B_s \rightarrow J/\psi K^+ K^-$



ϕ_s è affetta soprattutto da Time res. & Ang. Acc., $\Delta\Gamma_s$ ($|\lambda|$) da Mass factorisation (& Ang. Acc.), $\Gamma_s - \Gamma_d$ da Time eff.

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 width parametrisation	0.0006	0.0005	-	-	0.05	0.009	-	0.0002	0.001
Mass factorisation	0.0002	0.0004	0.004	0.0037	0.01	0.004	0.0007	0.0022	0.016
Multiple candidates	0.0006	0.0001	0.0011	0.0011	0.01	0.002	0.0003	0.0001	0.001
Fit bias	0.0001	0.0006	0.001	-	0.02	0.033	-	0.0003	0.001
C_{SP} factors	-	0.0001	0.001	0.0010	0.01	0.005	-	0.0001	0.002
Time res.: applicability of prompt	-	-	-	-	-	0.001	-	-	0.001
Time res.: t bias	-	-	0.0032	0.0010	0.08	0.001	0.0002	0.0003	0.005
Time res.: wrong PV	-	-	-	-	-	0.001	-	-	0.001
Ang. acc.: MC sample size	0.0003	0.0004	0.0011	0.0018	-	0.004	-	-	0.001
Ang. acc.: BDT correction	0.0020	0.0011	0.0022	0.0043	0.01	0.008	0.0001	0.0002	0.001
Ang. acc.: low-quality tracks	0.0002	0.0001	0.0005	0.0014	-	0.002	0.0002	0.0001	-
Ang. acc.: t & σ_t dependence	0.0008	0.0012	0.0012	0.0007	0.03	0.006	0.0002	0.0010	0.003
Dec.-time eff.: statistical	0.0002	0.0003	-	-	-	-	0.0012	0.0008	-
Dec.-time eff.: kin. weighting	-	-	-	-	-	-	0.0002	-	-
Dec.-time eff.: p.d.f. weighting	-	-	-	-	-	-	0.0001	0.0001	-
Dec.-time eff.: $\Delta\Gamma_s = 0$ sim.	0.0001	0.0002	-	-	-	-	0.0003	0.0005	-
Length scale	-	-	-	-	-	-	-	-	0.004
Quadratic sum of syst.	0.0024	0.0019	0.0061	0.0064	0.10	0.037	0.0015	0.0026	0.018

Sistematiche per $B_s \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$

Phys. Lett. B797 (2019) 134789



$\Gamma_H - \Gamma_d$ principalmente affetta da **Background**, ϕ_s e $|\lambda|$ da **Resonance modelling**

Source	$\Gamma_H - \Gamma_{B^0}$ [fs ⁻¹]	$ \lambda $ [$\times 10^{-3}$]	ϕ_s [mrad]
t acceptance	2.0	0.0	0.3
τ_{B^0}	0.2	0.5	0.0
Efficiency ($m_{\pi\pi}, \Omega$)	0.2	0.1	0.0
t resolution width	0.0	4.3	4.0
t resolution mean	0.3	1.2	0.3
Background	3.0	2.7	0.6
Flavour tagging	0.0	2.2	2.3
Δm_s	0.3	4.6	2.5
Γ_L	0.3	0.4	0.4
B_c^+	0.5	-	-
Resonance parameters	0.6	1.9	0.8
Resonance modelling	0.5	28.9	9.0
Production asymmetry	0.3	0.6	3.4
Total	3.8	29.9	11.0

- 1) Utilizzo dei WS ripesati nel fit
- 2) Variazione del numero di eventi di fondo entro $\pm 1\sigma$

- 1) Variazione dei fattori di Barriera
- 2) Utilizzo di $f_0(500)$ al posto del NR
- 3) Soluzione II
- 4) Aggiunta di $\rho(770)$

$$A_R(m_{\pi\pi}) = \sqrt{2J_R + 1} \sqrt{P_R P_B} F_B^{L_B} F_R^{L_R} A_R(m_{\pi\pi}) \left(\frac{P_B}{m_B}\right)^{L_B} \left(\frac{P_R}{m_0}\right)^{L_R}$$

→ Fattori di Barriera

Table 5: Fit results of the resonant structure for both Solutions I and II. These results do not supersede those in Ref. [21] for the resonant fractions.

Component	Fit fractions (%)	Transversity fractions (%)		
		0		⊥
Solution I				
$f_0(980)$	60.09 ± 1.48	100	–	–
$f_0(1500)$	8.88 ± 0.87	100	–	–
$f_0(1790)$	1.72 ± 0.29	100	–	–
$f_2(1270)$	3.24 ± 0.48	13 ± 3	37 ± 9	50 ± 10
$f_2'(1525)$	1.23 ± 0.86	40 ± 13	31 ± 14	29 ± 25
NR	2.64 ± 0.73	100	–	–
Solution II				
$f_0(980)$	93.05 ± 1.12	100	–	–
$f_0(1500)$	6.47 ± 0.41	100	–	–
$f_0(1710)$	0.74 ± 0.11	100	–	–
$f_2(1270)$	3.22 ± 0.44	17 ± 4	30 ± 8	53 ± 10
$f_2'(1525)$	1.44 ± 0.36	35 ± 8	31 ± 12	34 ± 17
NR	8.13 ± 0.79	100	–	–

Flatté

Breit-Wigner

- P_B momento della J/ψ nel sistema a riposo (SAR) del B_s ;
- P_R momento di h^\mp nel SAR di R;
- m_B massa del B_s ;
- m_0 valore centrale della massa di R;
- L_B momento angolare tra J/ψ e R;
- L_R spin di R (momento angolare di $\pi\pi$).

Contributi di ordine successivo (pinguino)



Con l'aumento della precisione è fondamentale studiare i contributi a pinguino!

- Assumendo la simmetria di sapore SU(3) possiamo valutare la grandezza di tali contributi usando transizioni $b \rightarrow c\bar{c}d$ (con scambio di quark spettatori s-d) dove non sono soppressi
- $SU(3)_F$: $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ and $B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0$ sono transizioni $b \rightarrow c\bar{c}d$.

$$\Delta\phi_{s,0}^{J/\psi\phi} = 0.000_{-0.011}^{+0.009} \text{ (stat)} \quad {}_{-0.009}^{+0.004} \text{ (syst) rad}$$

$$\Delta\phi_{s,\parallel}^{J/\psi\phi} = 0.001_{-0.014}^{+0.010} \text{ (stat)} \pm 0.008 \text{ (syst) rad}$$

$$\Delta\phi_{s,\perp}^{J/\psi\phi} = 0.003_{-0.014}^{+0.010} \text{ (stat)} \pm 0.008 \text{ (syst) rad}$$

Precisione del ~ 10 mrad \longrightarrow Da comparare con la precisione attuale HFLAV di 21 mrad



Tali contributi sono trascurabili per ora ma non troppo diversi dall'accuratezza di ϕ_s quindi con l'aumento della luminosità (e della precisione) sarà cruciale ottenere predizioni di ϕ_s che includono anche i contributi pinguino.