Misure di violazione di CP nei mesoni B neutri a LHCb



Indice

- Violazione di CP nel Modello Standard
- Flavour Tagging
- Misure dell'angolo β

•
$$B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$$

•
$$B^0 \rightarrow D^+D^-$$

• Misure della fase ϕ_s

•
$$B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^- (\pi^+ \pi^-)$$

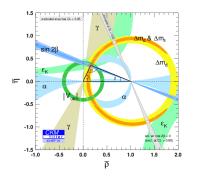
•
$$B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$$

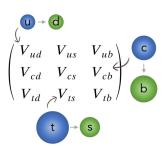
•
$$B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$$

- Violazione di CP nel decadimento $B_s^0 o D_s^\pm K^\mp$
- Conclusioni e Prospettive

Violazione di CP nel Modello Standard

- Nel Modello Standard i decadimenti deboli con cambiamento di sapore sono descritti dalla matrice 3x3 unitaria CKM
- È caratterizzata da tre angoli e una fase, la sola sorgente di CPV nel settore dei quark





- Buon accordo tra misure sperimentali e previsioni del Modello Standard per i parametri del triangolo unitario
- Potenzialità per migliorare la precisione delle misure

Fenomenologia della Violazione di CP

La Violazione di CP si può verificare in tre casi:

• Violazione Diretta o di Decadimento: considerando uno stato finale flavour specific questa violazione si realizza quando esiste una differenza tra un processo e il suo CP coniugato

$$\left|A_f/\bar{A}_{\bar{f}}\right| \neq 1 \qquad A_{CP} = \frac{\Gamma(P \longrightarrow f) - \Gamma(\bar{P} \longrightarrow \bar{f})}{\Gamma(P \longrightarrow f) + \Gamma(\bar{P} \longrightarrow \bar{f})} = (1 - \left|\bar{A}_{\bar{f}}/A_f\right|^2)/(1 + \left|\bar{A}_{\bar{f}}/A_f\right|^2)$$

• (Violazione Indiretta o di Mixing:) questa violazione si realizza quando esiste una differenza tra gli autostati di massa e quelli di CP

$$|q/p|
eq 1 \qquad A_{CP}(t) = rac{\Gamma(P(t) \longrightarrow f) - \Gamma(ar{P}(t) \longrightarrow ar{f})}{\Gamma(P(t) \longrightarrow f) + \Gamma(ar{P}(t) \longrightarrow ar{f})} = (1 - |q/p|^4)/(1 + |q/p|^4)$$

• (Violazione per Interferenza:) per uno stato finale di CP questa violazione si realizza a causa di un'interferenza tra il decadimento con o senza mixing

$$\lambda_f = (q/p) \cdot (\bar{A}_f/A_f)$$
 $A_{CP}(t)_{\Delta\Gamma=0} = S_{CP}sin(\Delta mt) + C_{CP}cos(\Delta mt)$

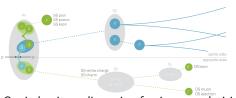
dove

$$S_{CP} = \frac{2 \text{Im}(\lambda_{fCP})}{1 + |\lambda_{fCP}|^2} \qquad C_{CP} = \frac{1 - |\lambda_{fCP}|^2}{1 + |\lambda_{fCP}|^2}$$

Etichettatura di sapore per i mesoni B alla produzione (Flavour Tagging)

EUR. PHYS. J. C (2012)72:2022, JINST10(2015)P10005, JINST11(2016)P05010, arXiv:1610.06019

Le misure relative alle oscillazioni di sapore e alle asimmetrie di CP dipendenti dal tempo richiedono la conoscenza del sapore del b alla produzione.



- Same Side Taggers (SS)
- Opposite Side Taggers (OS)

Ogni algoritmo di tagging fornisce una decisione di tagging, relativa al sapore iniziale del mesone B e una probabilità che la decisione sia sbagliata (η)

• efficienza di tagging: frazione di eventi con una decisione di tagging

$$\epsilon_{tag} = \frac{N_{tagged}}{N_{tagged} + N_{untagged}}$$

- mistag: frazione di eventi con una decisione di tagging sbagliata $\omega = \frac{N_{wrong}}{N_{tagged}}$
- efficienza effettiva di tagging: fattore di riduzione del campione statistico in un'analisi con tagging $\epsilon_{eff} = \epsilon_{tag} (1 2\omega)^2$
- funzione di calibrazione: $\omega(\eta) = p_0 + p_1(\eta + \langle \eta \rangle)$
- incertezza statistica: $\sigma_{stat} \propto 1/\sqrt{\epsilon_{eff} N}$

Status della misura di β

- ullet eta angolo di uno dei triangoli unitari
- $\bullet \ \ \beta = \arg \left[-\frac{\mathit{V_{cd}}\mathit{V_{cb}^*}}{\mathit{V_{td}}\mathit{V_{tb}^*}} \right]$
- $\phi_d \approx 2\beta$
- ϕ_d fase di mixing nel sistema $B_d^0 \bar{B}_d^0$
- $\beta_{wa} = (21.9 \pm 0.7)^{\circ}$

•
$$B_d \to J/\psi K_s^0$$

•
$$B_d \rightarrow J/\psi K^*$$

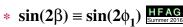
•
$$B_d \rightarrow D^{*+}D^{*-}K_s$$

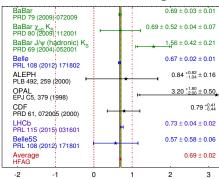
•
$$B_d \rightarrow D\pi^0$$

•
$$B_d \rightarrow J/\psi \pi^0$$

$$\bullet \ \, \boxed{B_d \to D^{(*)+}D^{(*)-}}$$

• • •





^{*} World Average per il parametro $\sin(2eta)$ ottenuta da transizioni del tipo b o car c s

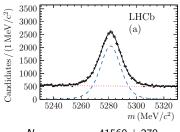
Misura della Violazione di CP nel decadimento $B^0 o J/\psi K_s^0$

PRL 115, 031601 (2015)

- Decadimento dominato dalla transizione $b \rightarrow c\bar{c}s$ a tree-level
- Golden mode per la misura dell'angolo β del Triangolo Unitario
- La misura dell'asimmetria dipendente dal tempo tra i tassi di decadimento per $B^0 \bar{B^0}$

fornisce l'accesso alle osservabili associate alla Violazione di CP

Campione dati del Run I



$$N_{B^{\mathbf{0}} \to J/\psi K_{s}^{\mathbf{0}}} = 41560 \pm 270$$

• Flavour Tagging : $(\epsilon_{\it eff}^{\it OS+SS\pi} \sim 3\%)$

Risultato

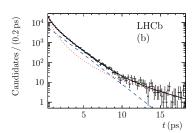
PRL 115, 031601 (2015)

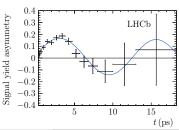
 I parametri S e C sono ottenuti da un fit sugli eventi di segnale aventi una decisione di tagging

$$S = 0.731 \pm 0.035(stat.) \pm 0.020(syst.)$$

$$C = -0.038 \pm 0.032(stat.) \pm 0.005(syst.)$$

- Risultato consistente e con simile precisone rispetto alle misure effettuate da Babar e Belle
- Principali contributi alle sistematiche
 - asimmetria di tagging nella componente di fondo (S)
 - \triangleright sistematica da Δm (C)





Misura della Violazione di CP nel decadimento $B^0 \rightarrow D^+D^-$

PRL 117, 261801 (2016)

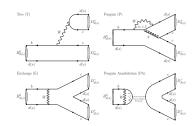
- Misura di $\sin(2\beta)$, contributo dominante a tree-level, transizione $b \to c\bar{c}d$
- Violazione di CP descritta dalle osservabili S e C

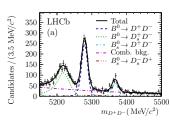
$$\frac{\mathcal{S}}{\sqrt{1-\mathcal{C}^2}} = -\sin(\phi_d + \Delta\phi_d)$$

- SM, tree-level : $\phi_d = 2\beta$
- Contributo da correzioni al SM di ordine superiore : $\Delta\phi_d$
- La misura dipendente dal tempo del tasso di decadimento fornisce l'accesso a queste osservabili

$$\frac{d\Gamma(t,\,d,\,\omega)}{dt}\,\propto\,e^{-\,t\,/\,\tau}\,\Big[\mathbf{1}-d(\mathbf{1}-\mathbf{2}\omega)\Big(S\,\sin(\Delta mt)-C\,\cos(\Delta mt)\Big)\Big]$$

- Campione dati dell'intero Run I (3 fb^{-1})
- Mesoni D ricostruiti negli stati finali $D \to K\pi\pi, KK\pi$





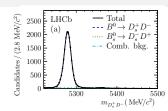
$$N_{D^+D^-} = 1610 \pm 50$$

$B^0 \to D_s^+ D^-$ come canale di controllo

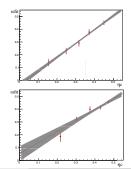
PRL 117, 261801 (2016)

- La calibrazione del Flavour Tagging viene realizzata sul canale flavour specific $B^0 \to D_s^+ D^-$
- Selezione simile a quella del canale di segnale
- I mesoni D sono ricostruiti negli stati finali $D \to K\pi\pi$ e $D_s \to KK\pi$
- Nell'analisi sono impiegate le combinazioni dei tagger OS e (SSp+SSπ)
- L'efficienza effettiva ottenuta è la più alta, ad ora, tra le analisi dipendenti dal tempo ad LHCb

$$\epsilon_{\it eff}^{\it OS+SSp+SS\pi} = (8.1 \pm 0.6)\%$$



$$N_{D_s^+D^-}=16736\pm134$$



Risultato

PRL 117, 261801 (2016)

 I parametri S e C sono ottenuti da un fit al tempo di decadimento per i candidati taggati

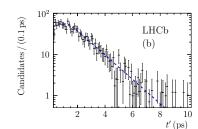
$$S = -0.54^{+0.17}_{-0.16}(stat.) \pm 0.05(syst.)$$

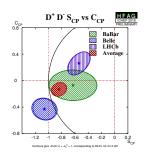
$$C = 0.26^{+0.18}_{-0.17}(stat.) \pm 0.02(syst.)$$

- Conservazione della simmetria di CP esclusa a 4σ
- Questo risultato, combinato con la misura in $B^0 \to J/\psi K_s^0$, vincola la differenza di fase al suo valore più preciso al mondo

$$\Delta \phi = -0.16^{+0.19}_{-0.21}$$
 rad

- Piccolo contributo dai diagrammi di ordine superiore
- Simmetria SU(3) $\Rightarrow \Delta \phi_d = \Delta \phi_s$, la misura può essere trasferita al canale $B^0 \to D_s^+ D_s^-$





Status della misura di ϕ_s

- ullet ϕ_s fase di mixing nel sistema $B_s^0 ar{B}_s^0$
- $\phi_s \approx -2\beta_s$
- ullet eta_s angolo di uno dei triangoli unitari

•
$$\beta_s = \arg\left[-\frac{V_{ts}V_{tb}^*}{V_{cs}V_{cb}^*}\right]$$

•
$$\phi_s^{wa} = -0.030 \pm 0.033$$
 rad

$$\quad \bullet \ \phi_s^{\it Global \, Fit} = -0.0376^{+0.007}_{-0.0008} \ {\rm rad}$$

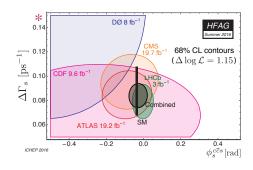
•
$$\left(B_s^0 \to J/\psi K^+ K^-\right)$$

•
$$\left(B_s^0 \to J/\psi \pi^+ \pi^-\right)$$

•
$$B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$$

•
$$B_s^0 \to \psi(2S)\phi$$

. . .

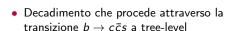


^{*68%} CL contours per gli esperimenti CDF, D0, ATLAS, CMS e LHCb considerando i canali $B_s^0 \to J/\psi \phi$, $B_s^0 \to J/\psi K^+K^-$, $B_s^0 \to \psi(2S)\phi$, $B_s^0 \to J/\psi \pi^+\pi^-$ e $B_s^0 \to D_s^+D_s^-$

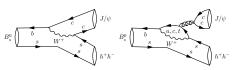
ϕ_s in $B_s^0 \to J/\psi K^+ K^- (\pi^+ \pi^-)$

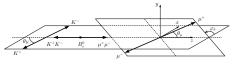
PRL 114, 041801 (2015)

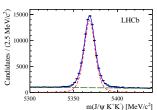
ullet Golden mode per la misura della fase ϕ_s



- Campione dati Run I (3 fb⁻¹)
- Possibili configurazioni per gli stati finali :
 - $B_s^0 \to J/\psi \phi$ (configurazione in onda-P, CP-pari/CP-dispari)
 - \triangleright $B_s^0 \to J/\psi K^+ K^-$ (configurazione in onda-S, CP-dispari)
- Flavour Tagging : $\epsilon_{\it eff}^{\it OS+SSK} = (3.73 \pm 0.15)\%$







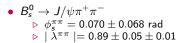
$$N_{B_{\epsilon}^{0} \to J/\psi K^{+}K^{-}} = 95690 \pm 350$$

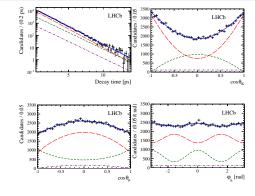
CPV nei mesoni B neutri

Risultato

PRL 114, 041801 (2015)

Parameter	Value
$\Gamma_s \; [\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.6603 \pm 0.0027 \pm 0.0015$
$\Delta\Gamma_s~[\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.0805 \pm 0.0091 \pm 0.0032$
$ A_{\perp} ^2$	$0.2504 \pm 0.0049 \pm 0.0036$
$ A_0 ^2$	$0.5241 \pm 0.0034 \pm 0.0067$
$\delta_{\parallel} \; [{\rm rad}]$	$3.26 ^{ +0.10}_{ -0.17} ^{ +0.06}_{ -0.07}$
δ_{\perp} [rad]	$3.08^{~+0.14}_{~-0.15} \pm 0.06$
ϕ_s [rad]	$-0.058 \pm 0.049 \pm 0.006$
$ \lambda $	$0.964 \pm 0.019 \pm 0.007$
$\Delta m_s~[\mathrm{ps}^{-1}]$	$17.711 {}^{+0.055}_{-0.057} \pm 0.011$





• Combinando ($B^0_s o J/\psi K^+K^-$) con ($B^0_s o J/\psi \pi^+\pi^-$)

$$\phi_s = -0.010 \pm 0.039 \; ext{rad} \hspace{1.5cm} \mid \lambda \mid = 0.957 \pm 0.017
brace$$

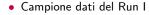
- Nessuna evidenza di Violazione di CP nel decadimento $(\lambda \sim 1)$
- Accordo con la previsione del SM (contributi agli ordini superiori trascurabili)

Misura della Violazione di CP nel decadimento $B_s^0 o D_s^\mp K^\pm$

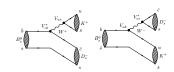
LHCb-CONF-2016-015

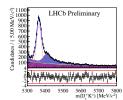
- Determinazione di $(\gamma + \phi_s)$ da osservabili associate a CPV
- Contributo dominante a tree-level, transizioni $b \rightarrow cs\bar{u}/b \rightarrow u\bar{c}s$
- Misura del tasso di decadimento dipendente dal tempo per le quattro configurazioni di B-flavour e stato finale

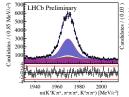
$$\frac{d\Gamma_{B}\mathbf{0} \longrightarrow_{f}(t)}{dt} \propto e^{-\Gamma_{S}t} \Big[\cosh\Big(\frac{\Delta\Gamma_{S}t}{2}\Big) A_{f}^{\Delta\Gamma} \sinh\Big(\frac{\Delta\Gamma_{S}t}{2}\Big) C_{f} \cos\Big(\Delta m_{s}t\Big) - S_{f} \sin\Big(\Delta m_{s}t\Big) \Big]$$

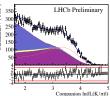


- Stati finali considerati : $D_s \rightarrow KK\pi, K\pi\pi, \pi\pi\pi$
- Fit di massa simultaneo (m(B^s_s), m(D_s), ln | L(π/K) |) usato per separare fondo da segnale
- Flavour Tagging : $\epsilon_{eff}^{OS+SS} = (4.98 \pm 0.26)\%$





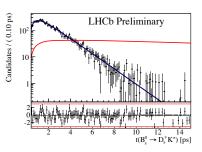


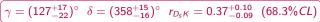


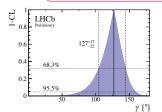
Risultato

LHCb-CONF-2016-015

Value
$0.735 \pm 0.142 \pm 0.048$
$0.395 \pm 0.277 \pm 0.122$
$0.314 \pm 0.274 \pm 0.107$
$-0.518 \pm 0.202 \pm 0.073$
$-0.496 \pm 0.197 \pm 0.071$







- ullet Evidenza di Violazione di CP a 3.6 σ
- Risultato compatibile con la combinazione di γ ottenuta dalle altre misure di LHCb (escl. B_s⁰ → D_s[∓]K[±])

Conclusioni e Prospettive

•
$$\left(B^{\mathbf{0}} \to J/\psi K_s^{\mathbf{0}}\right)$$

• Run I : $\beta = (0.41 \pm 0.02)$ rad

 \implies Run II : $\beta = ($ $\pm 0.01)$ rad

 \implies Upgrade : $\beta = (\pm 0.003)$ rad

 ϕ_s

•
$$\left(B_s^{\mathbf{0}} \to J/\psi K^+ K^- (\pi^+ \pi^-)\right)$$

- $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$
- $B_s^0 \rightarrow D_s D_s$

• Run I : $\phi_s = (-0.010 \pm 0.039)$ rad

 \implies Run II : $\phi_s = ($ $\pm 0.02)$ rad

 \implies Upgrade : $\phi_s = (\pm 0.006)$ rad

•
$$B_s^0 \rightarrow D_s^{\pm} K^{\mp}$$

• Run I : $\gamma = (127^{+17}_{22})^{\circ}$

 \implies Run II : $\gamma \sim (\pm 11)^{\circ}$

 \implies Upgrade (50 fb^{-1}) : $\gamma \sim (\pm 2)^{\circ}$

 γ (LHCb combination)

•
$$\gamma = (72.2^{+6.8}_{-7.3})^{\circ}$$

 \implies Run II : $\gamma \sim (\pm 4)^{\circ}$

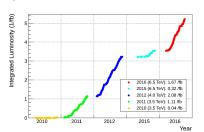
 \implies Upgrade (50 fb⁻¹): $\gamma \sim (\pm 0.9)^{\circ}$

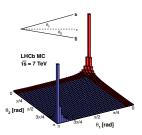


Backup - Il Rivelatore LHCb (Caratteristiche)

Int. J. Mod. Phys. A 30, 1530022 (2015)

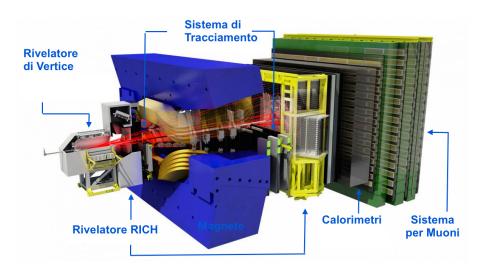
- LHCb è un rivelatore a braccio singolo, uno spettrometro in avanti (2 $< \eta <$ 5)
- Ottimizzato per la rivelazione dei decadimenti di adroni B
- Il 25 % di coppie $b\bar{b}$ prodotte nelle collisioni è contenuta nella sua accettanza
- In grado di ottenere misure di alta precisione nella fisica del flavour





- Risoluzione sul tempo di decadimento $\rightarrow \sigma_t \sim$ 50 fs
- Risoluzione in impulso $\rightarrow \frac{\sigma_p}{\rho} \sim 0.5 0.8 \%$ (p<100 GeV/c)
- Risoluzione sul Parametro d'Impatto \rightarrow $\sigma_{IP} \sim$ 20 μ m (p_T elevato)
- Efficienza di Identificazione $\rightarrow \epsilon_K \sim 95\%$, $\epsilon_{\pi}^{misid} \sim 5\%$ (p<100 GeV/c)

Backup - Il Rivelatore LHCb (Struttura)



Backup - ϕ_s in $B_s^0 \to \psi(2S)\phi$

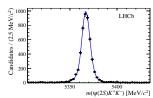
PLB762(2016)253-262

• Prima misura di ϕ_s usando risonanza $c\bar{c}$ superiore

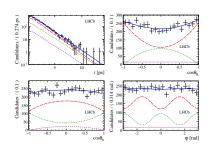
$$\begin{split} X(t,\Omega) &= \frac{d^{\mathbf{d}}\Gamma(B_{\mathbf{S}}^{\mathbf{G}} \to \psi(\mathbf{2}S)\phi)}{dtd\Omega} \propto \sum_{k=\mathbf{1}}^{\mathbf{10}} h_k(t) f_k(\Omega) \\ \lambda &= \eta_{\tilde{I}}(q/\rho) (\tilde{A}_{\tilde{I}}A_{\tilde{I}}) \qquad \qquad \phi_{\mathbf{S}} = -\arg(\eta_{\tilde{I}}\lambda) \end{split}$$

• Flavour Tagging : $\epsilon_{\it eff}^{\it OS+SSK} = (3.88 \pm 0.13 \pm 0.12)\%$

Parameter	Value
$\Gamma_s \; [\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.668 \pm 0.011 \pm 0.006$
$\Delta\Gamma_s~[\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.066^{+0.041}_{-0.044} \pm 0.007$
$ A_{\perp} ^2$	$0.264^{+0.024}_{-0.023}\pm0.002$
$ A_0 ^2$	$0.422 \pm 0.014 \pm 0.003$
$\delta_{\parallel} \; [{\rm rad}]$	$3.67^{+0.13}_{-0.18} \pm 0.03$
δ_{\perp} [rad]	$3.29^{+0.43}_{-0.39} \pm 0.04$
ϕ_s [rad]	$0.23^{+0.29}_{-0.28} \pm 0.02$
$ \lambda $	$1.045^{+0.069}_{-0.050}\pm0.007$
F_S	$0.061^{+0.026}_{-0.025} \pm 0.007$
δe [rad]	$0.03 \pm 0.14 \pm 0.02$



$$N_{B_s^0 \to \psi(2S)\phi} = 4695 \pm 71$$



Backup - ϕ_s in $B_s^0 \to D_s D_s$

PRL 113, 211801 (2014)

- Transizione $b \to c\bar{c}s$, stato finale CP-pari, analisi non angolare
- Mesoni D_s ricostruiti negli stati finali

$$\triangleright D_sD_s \rightarrow (KK\pi)(KK\pi)$$

$$D_sD_s \rightarrow (KK\pi)(\pi\pi\pi)$$

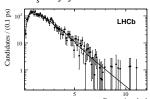
$$\triangleright D_s D_s \rightarrow (KK\pi)(K\pi\pi)$$

- $D_s D_s \to (\pi \pi \pi)(\pi \pi \pi)$
- Boosted decision tree per la soppressione del fondo combinatorio
- Flavour Tagging : $\epsilon_{\it eff}^{\it OS+SSK} = (5.33 \pm 0.18 \pm 0.17)\%$
- Misura dipendente dal tempo del tasso di decadimento

$$\Gamma(t) \propto e^{-\Gamma t} \left[\cosh\left(\frac{\Delta \Gamma_{s} t}{2}\right) - \frac{2 \mid \lambda \mid \cos \phi_{s}}{1 + \mid \lambda \mid^{2}} \sin\left(\frac{\Delta \Gamma t}{2}\right) + \frac{1 - \mid \lambda \mid^{2}}{1 + \mid \lambda \mid^{2}} \cos\left(\Delta m_{s} t\right) - \frac{2 \mid \lambda \mid \sin \phi_{s}}{1 + \mid \lambda \mid^{2}} \sin\left(\Delta m_{s} t\right) \right]$$

$$\phi_{s} = 0.02 \pm 0.17 (stat) \pm 0.02 (syst) rad \qquad |\lambda| = 0.91^{+0.18}_{-0.15} (stat) \pm 0.02 (syst)$$

 $N_{B_s^0 \to D_s D_s} = 3345 \pm 62$



Decay time [ps]