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
 - $B_s^0 \to J/\psi K^+ K^-(\pi^+ \pi^-)$
 - $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\phi$
 - $B_s^0 \rightarrow D_s^+ D_s^-$
- Violazione di CP nel decadimento $B^0_s
 ightarrow D^\pm_s K^\mp$
- 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

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

• 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

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

dove

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

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 $\omega = \frac{N_{wrong}}{N_{taggred}}$
- 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: $\omega(\eta) = p_0 + p_1(\eta + < \eta >)$
- incertezza statistica: $\sigma_{\it stat} \propto 1/\sqrt{\epsilon_{\it eff} N}$

Status della misura di β

β angolo di uno dei triangoli unitari

•
$$\beta = \arg\left[-\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right]$$

•
$$\phi_d \approx 2\beta$$

• ϕ_d fase di mixing nel sistema $B^0_d - \bar{B}^0_d$

- $\beta_{wa} = (21.9 \pm 0.7)^{\circ}$
- $B_d \rightarrow J/\psi K_s^0$

•
$$B_d \rightarrow J/\psi K^*$$

•
$$B_d \rightarrow D^{*+}D^{*-}K_s$$

• $B_d \rightarrow D\pi^0$ • $B_d \rightarrow J/\psi\pi^0$

. . .

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



* World Average per il parametro sin(2eta) ottenuta da transizioni del tipo b o car cs

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

PRL 115, 031601 (2015)

- Decadimento dominato dalla transizione b → cc̄s 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 B⁰ - B
 ⁰

$$\begin{pmatrix} A(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^{0} \rightarrow J/\psi K_{s}^{0}) - \Gamma(\bar{B}^{0} \rightarrow J/\psi K_{s}^{0})}{\Gamma(\bar{B}^{0} \rightarrow J/\psi K_{s}^{0}) + \Gamma(\bar{B}^{0} \rightarrow J/\psi K_{s}^{0})} \\ = \frac{S \sin(\Delta m t) - C \cos(\Delta m t)}{\cosh(\frac{\Delta \Gamma}{2}) + A_{\Delta \Gamma} \sinh(\frac{\Delta \Gamma}{2})} \end{pmatrix}$$

fornisce l'accesso alle osservabili associate alla Violazione di CP • Campione dati del Run I



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

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(2β), contributo dominante a tree-level, transizione b → cc̄d
- Violazione di CP descritta dalle osservabili S e C

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

- 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

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

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



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

PRL 117, 261801 (2016)

- La calibrazione del Flavour Tagging viene realizzata sul canale flavour specific $B^0 \rightarrow D_s^+ D^-$
- Selezione simile a quella del canale di segnale
- I mesoni D sono ricostruiti negli stati finali $D \rightarrow K\pi\pi$ e $D_s \rightarrow KK\pi$
- 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

 $\left[\epsilon_{eff}^{OS+SSp+SS\pi} = (8.1\pm0.6)\%
ight]$



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 $B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$, vincola la differenza di fase al suo valore più preciso al mondo

$$\left(\Delta\phi=-0.16^{+0.19}_{-0.21}$$
 rad
ight)

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



Status della misura di ϕ_s

- ϕ_s fase di mixing nel sistema $B^0_s \bar{B}^0_s$
- $\phi_s \approx -2\beta_s$
- β_s angolo di uno dei triangoli unitari
- $\beta_s = \arg \left[-\frac{V_{ts}V_{tb}^*}{V_{cs}V_{cb}^*} \right]$
- $\phi_s^{\rm wa} = -0.030 \pm 0.033$ rad
- $\phi_s^{\it Global\,Fit} = -0.0376^{+0.007}_{-0.0008}$ rad
- $\left(B_s^0 \to J/\psi K^+ K^-\right)$

•
$$B_s^0 \to J/\psi \pi^+ \pi^-$$

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



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



N. Belloli

CPV nei mesoni B neutri

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

PRL 114, 041801 (2015)

- Golden mode per la misura della fase ϕ_s
- Decadimento che procede attraverso la transizione $b \rightarrow c\bar{c}s$ a tree-level
- Campione dati Run I (3 fb⁻¹)
- Possibili configurazioni per gli stati finali :
 - ▷ $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ (configurazione in onda-P, CP-pari/CP-dispari)
 - ▷ $B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$ (configurazione in onda-S, CP-dispari)
- Flavour Tagging : $\epsilon_{eff}^{OS+SSK} = (3.73 \pm 0.15)\%$







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

N. Belloli

CPV nei mesoni B neutri

IFAE 2017 13 / 26

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$	$0.5241 \pm 0.0034 \pm 0.0067$
δ_{\parallel} [rad]	$3.26 \begin{array}{c} +0.10 \\ -0.17 \end{array} \begin{array}{c} +0.06 \\ -0.07 \end{array}$
δ_{\perp} [rad]	$3.08 \ ^{+0.14}_{-0.15} \pm 0.06$
$\phi_s \ [rad]$	$-0.058 \pm 0.049 \pm 0.006$
$ \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 $(B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-)$ con $(B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)$ $\phi_s = -0.010 \pm 0.039$ rad $|\lambda| = 0.957 \pm 0.017$

• Nessuna evidenza di Violazione di CP nel decadimento (λ ${\sim}1)$

• Accordo con la previsione del SM (contributi agli ordini superiori trascurabili)

N. Belloli

Misura della Violazione di CP nel decadimento $B^0_{\epsilon} ightarrow D^{\mp}_{\epsilon} K^{\pm}$

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

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

- Campione dati del Run I
- Stati finali considerati : $D_{\rm s} \rightarrow KK\pi, K\pi\pi, \pi\pi\pi$
- Fit di massa simultaneo (m(B⁰_s)) $m(D_s)$, $ln \mid L(\pi/K) \mid$) usato per separare fondo da segnale
- Flavour Tagging : $\epsilon_{\text{off}}^{OS+SS} = (4.98 \pm 0.26)\%$



 $K^{*}\pi^{*}\pi^{*}\pi^{*}\pi^{*}\pi^{*}\pi^{*}\pi^{*}$

N Belloli

CPV nei mesoni B neutri

Candidates / (0.85 MeV/c 60

50

40

30

20

Risultato

LHCb-CONF-2016-015



 $\left(\gamma = (127^{+17}_{-22})^{\circ} \ \delta = (358^{+15}_{-16})^{\circ} \ r_{D_sK} = 0.37^{+0.10}_{-0.09} \ (68.3\% CL)\right)$



- + Evidenza di Violazione di CP a 3.6 σ
- Risultato compatibile con la combinazione di γ ottenuta dalle altre misure di LHCb (escl. B⁰_s → D[∓]_sK[±])

Conclusioni e Prospettive





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 < η < 5)
- Ottimizzato per la rivelazione dei decadimenti di adroni B
- Il 25 % di coppie bb 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 $ightarrow \sigma_t \sim$ 50 fs
- Risoluzione in impulso $\rightarrow \frac{\sigma_p}{p} \sim 0.5 0.8$ % (p<100 GeV/c)
- Risoluzione sul Parametro d'Impatto $\rightarrow \sigma_{IP} \sim 20 \ \mu m \ (p_T \ elevato)$
- Efficienza di Identificazione $\rightarrow \epsilon_{\rm K} \sim$ 95%, $\epsilon_{\pi}^{\rm misid} \sim$ 5% (p<100 GeV/c)

Backup - II Rivelatore LHCb (Struttura)



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

PLB762(2016)253-262

 Prima misura di φ_s usando risonanza cc̄ superiore

$$\begin{split} X(t,\Omega) &= \frac{d^{\mathbf{4}} \Gamma(B_{\mathbf{S}}^{\mathbf{0}} \to \psi(\mathbf{2}S)\phi)}{dtd\Omega} \propto \sum_{k=1}^{\mathbf{10}} h_{k}(t) f_{k}(\Omega) \\ \lambda &= \eta_{i}(q/\rho)(\bar{A}_{i}A_{i}) \qquad \phi_{\mathbf{S}} = -\arg(\eta_{i}\lambda) \end{split}$$

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

Parameter	Value
$\Gamma_s \; [\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.668 \pm 0.011 \pm 0.006$
$\Delta \Gamma_s \; [\mathrm{ps}^{-1}]$	$0.066^{+0.041}_{-0.044}\pm0.007$
$ A_{\perp} ^2$	$0.264^{+0.024}_{-0.023}\pm0.002$
$ A_0 ^2$	$0.422 \pm 0.014 \pm 0.003$
δ_{\parallel} [rad]	$3.67^{+0.13}_{-0.18}\pm0.03$
δ_{\perp} [rad]	$3.29^{+0.43}_{-0.39} \pm 0.04$
$\phi_s \text{ [rad]}$	$0.23^{+0.29}_{-0.28}\pm0.02$
$ \lambda $	$1.045^{+0.069}_{-0.050}\pm0.007$
F_S	$0.061^{+0.026}_{-0.025}\pm0.007$
δ_S [rad]	$0.03 \pm 0.14 \pm 0.02$





N. Belloli

CPV nei mesoni B neutri

Backup - ϕ_s in $B_s^0 \rightarrow D_s D_s$

PRL 113, 211801 (2014)

- Transizione b → cc̄s, stato finale CP-pari, analisi non angolare
- Mesoni D_s ricostruiti negli stati finali
 - $\triangleright D_s D_s \rightarrow (KK\pi)(KK\pi)$
 - $\triangleright D_s D_s \rightarrow (KK\pi)(\pi\pi\pi)$
 - $\triangleright D_s D_s \rightarrow (KK\pi)(K\pi\pi)$
 - $\triangleright D_s D_s \rightarrow (\pi \pi \pi)(\pi \pi \pi)$
- Boosted decision tree per la soppressione del fondo combinatorio
- Flavour Tagging : $\epsilon_{eff}^{OS+SSK} = (5.33 \pm 0.18 \pm 0.17)\%$
- Misura dipendente dal tempo del tasso di decadimento

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

 $\phi_s = 0.02 \pm 0.17(stat) \pm 0.02(syst)$ rad



 $\mid \lambda \mid = 0.91^{+0.18}_{-0.15}(stat) \pm 0.02(syst)$

IFAE 2017 22 / 26