

# Misure della matrice CKM e violazione di CP nel charm e nel beauty pp @ LHC 2016

Marcella Bona<sup>1</sup>, **Andrea Contu**<sup>2</sup>, Giacomo Fedi<sup>3</sup>, Michael J. Morello<sup>3</sup>  
*on behalf of the LHCb, ATLAS and CMS collaborations*

<sup>1</sup>Queen Mary University of London, <sup>2</sup>CERN, <sup>3</sup>Scuola Normale Superiore e INFN

17 Maggio 2016 - Pisa

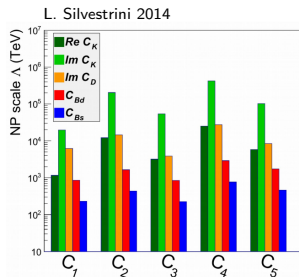
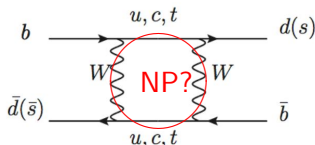


# Outline

- 1 Perché studiare la fisica del Charm e del Beauty?
- 2 Piani per l'LHC e upgrade degli esperimenti
- 3 Beauty
  - Misura di  $\phi_s$
  - Misura delle asimmetrie di CP nel mixing  $B^0 - \bar{B}^0$
  - Misure dell'angolo CKM  $\gamma$
  - $V_{ub}$
- 4 Charm
  - CPV
  - $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi \pi$
- 5 Conclusioni

# Fisica del flavour

- Allo stato attuale le misure nel settore del flavour sono consistenti con la struttura CKM con un'incertezza del 20-30% [JHEP05(2014)105]
  - Grande margine di miglioramento (ancora lontani dalla precisione dei test elettrodeboli)
- Ricerca di deviazioni dal SM complementare alla ricerca di nuove particelle in produzione diretta



- Previsioni teoriche più complicate ma i processi studiati sono sensibili a scale di energia superiori rispetto a quelle accessibili in ricerche dirette

# Violazione della simmetria CP nel Modello Standard

$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4/8 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda + A^2\lambda^5 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4(1 + 4A^2)/8 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3 [1 - (\rho + i\eta)(1 - \lambda^2/2)] & -A\lambda^2 + A\lambda^4 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - A^2\lambda^4/2 \end{pmatrix}}_{\text{Wolfenstein parametrisation}} + \mathcal{O}(\lambda^6) \\
 &\qquad\qquad\qquad \lambda = \sin(\theta_c) \approx 0.22, \quad \eta \approx 0.3
 \end{aligned}$$

- 3 generazioni di quark consentono di avere una fase che viola CP:  
 $\eta$  é l'unica sorgente di CPV nel SM

# Violazione della simmetria CP nel Modello Standard

$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4/8 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda + A^2\lambda^5 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4(1 + 4A^2)/8 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3 [1 - (\rho + i\eta)(1 - \lambda^2/2)] & -A\lambda^2 + A\lambda^4 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - A^2\lambda^4/2 \end{pmatrix}}_{\text{Wolfenstein parametrisation}} + \mathcal{O}(\lambda^6) \\
 &\qquad\qquad\qquad \lambda = \sin(\theta_c) \approx 0.22, \quad \eta \approx 0.3
 \end{aligned}$$

- 3 generazioni di quark consentono di avere una fase che viola CP:  
 $\eta$  é l'unica sorgente di CPV nel SM

Il sistema dei mesoni B molto favorevole per lo studio della CPV  
 $(A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K\pi) \approx 30\%)$

# Violazione della simmetria CP nel Modello Standard

$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4/8 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda + A^2\lambda^5 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4(1 + 4A^2)/8 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3 [1 - (\rho + i\eta)(1 - \lambda^2/2)] & -A\lambda^2 + A\lambda^4 [1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - A^2\lambda^4/2 \end{pmatrix}}_{\text{Wolfenstein parametrisation}} + \mathcal{O}(\lambda^6) \\
 &\qquad\qquad\qquad \lambda = \sin(\theta_c) \approx 0.22, \quad \eta \approx 0.3
 \end{aligned}$$

- 3 generazioni di quark consentono di avere una fase che viola CP:  
 $\eta$  é l'unica sorgente di CPV nel SM

Previsioni SM per CPV nel charm molto piccole ( $< 10^{-3}$ )

mixing e ampiezze dominati dalle prime due generazioni di quark

# Violazione della simmetria CP nel Modello Standard

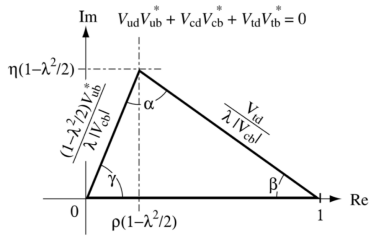
$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ -|V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & -|V_{ts}|e^{i\beta_s} & |V_{tb}| \end{pmatrix} \\
 &= \underbrace{\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4/8 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda + A^2\lambda^5[1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - \lambda^2/2 - \lambda^4(1 + 4A^2)/8 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3[1 - (\rho + i\eta)(1 - \lambda^2/2)] & -A\lambda^2 + A\lambda^4[1 - 2(\rho + i\eta)]/2 & 1 - A^2\lambda^4/2 \end{pmatrix}}_{\text{Wolfenstein parametrisation}} + \mathcal{O}(\lambda^6) \\
 &\qquad\qquad\qquad \lambda = \sin(\theta_c) \approx 0.22, \quad \eta \approx 0.3
 \end{aligned}$$

- 3 generazioni di quark consentono di avere una fase che viola CP:  $\eta$  é l'unica sorgente di CPV nel SM

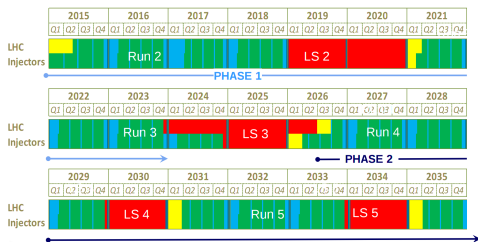
- Dall'unitarietà di  $V_{CKM}$  derivano delle relazioni tra gli i suoi elementi, i più noti sono

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

$$V_{us} V_{ub}^* + V_{cs} V_{cb}^* + V_{ts} V_{tb}^* = 0$$



# LHC roadmap



- L'upgrade di LHCb avverrà dopo Run 2
- Quello di CMS ed ATLAS dopo Run 3
- LHCb ha iniziato a esplorare futuri scenari per arrivare a  $300\text{-}3000\text{ fb}^{-1}$  ("Theater of Dreams workshop", Manchester)

$\int \mathcal{L} dt$	LHC era			HL-LHC era	
	2010-12 (Run-1)	2015-18 (Run-2)	2020-22 (Run-3)	2025-28 (Run-4)	2030++ (Run-5)
ATLAS, CMS	$25\text{ fb}^{-1}$	$100\text{ fb}^{-1}$	$300\text{ fb}^{-1}$	→	$3000\text{ fb}^{-1}$
LHCb	$3\text{ fb}^{-1}$	$8\text{ fb}^{-1}$	$23\text{ fb}^{-1}$	$46\text{ fb}^{-1}$	$100\text{ fb}^{-1}$

## Grandi sezioni d'urto

$$\sigma(pp \rightarrow B^+ + X, 7\text{TeV}) \approx \sigma(pp \rightarrow B^0 + X, 7\text{TeV}) \approx 40\mu\text{b}$$

$$\sigma(pp \rightarrow B_s^0 + X, 7\text{TeV}) \approx 10\mu\text{b} \text{ [JHEP08(2013)117]}$$

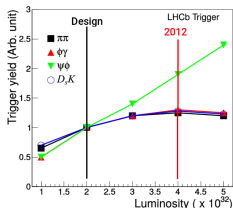
$$\sigma(pp \rightarrow c\bar{c} + X, 13\text{TeV}) \approx 3\text{mb} \text{ [JHEP03(2016)159]}$$

Miniera d'oro da sfruttare!

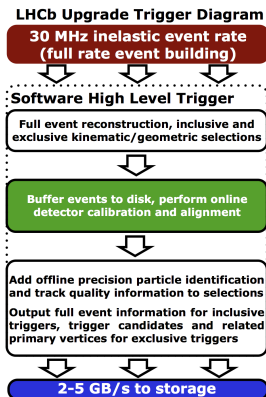


# Upgrade di LHCb in Run 3

- Il goal é aumentare la statistica di un fattore 10 runnando a luminosità più alta ( $\mathcal{L} \approx 4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-2}$ )



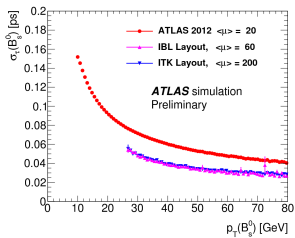
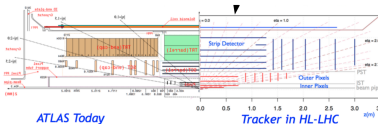
- Importanti upgrade di VELO, tracciatori, RICH e sistema di DAQ
- Read-out dell'intero detector a 40MHz (VELO letto a 1 MHz in Run1) per utilizzare da subito l'informazione disponibile nell'HLT
- Scrittura degli eventi a 2-5 GB/s ( $\sim 0.3$  in Run 1)
- Performance in output HLT allineate all'offline performance grazie alla calibrazione online (primi tentativi con esito positivo già in in Run-2)



# Upgrade di ATLAS e CMS

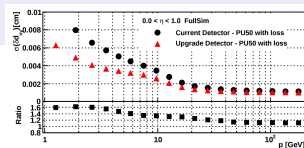
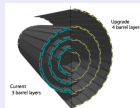
## ATLAS (ATL-PHYS-PUB-2013-010)

- IBL in Run 2 e ITK per HL-LHC migliorano la risoluzione sul tempo di decadimento del 30%



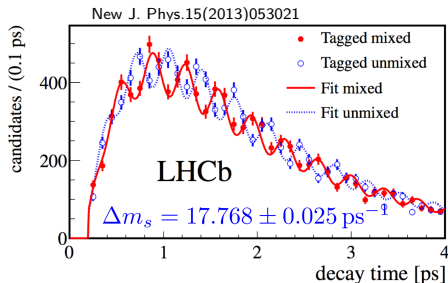
## CMS - Fine del 2016 (CERN-LHCC-2012-016)

- Extra layer di silicon pixel
- Più vicino alla beam line
- Material budget ridotto
- **Migliori performance per B**



# Violazione di CP e Mixing nei mesoni neutri

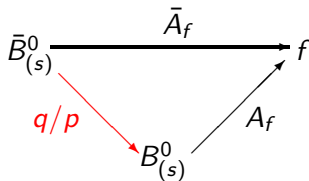
- 1 CPV nel decadimento:  $|\bar{A}_f/A_f| \neq 1$
- 2 CPV nel mixing:  $|q/p| \neq 1$
- 3 CPV nell'interferenza di mixing e decadimento:  $\phi \equiv \arg \left\{ \frac{q}{p} \frac{A_f}{\bar{A}_f} \right\}$



Autostati EM e Forti

$$|P_{L,H}\rangle = p|P^0\rangle \pm q|\bar{P}^0\rangle$$

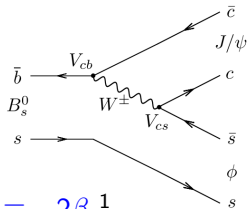
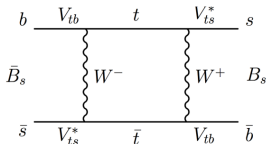
Autostati di massa



Osservabili di mixing

- $\Delta m \equiv (m_H - m_L)$
- $\Gamma \equiv (\Gamma_L + \Gamma_H)/2$
- $\Delta\Gamma \equiv \Gamma_L - \Gamma_H$

# Misura di $\phi_s$ in $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \phi(K^+ K^-)$

Decay  $\phi_D = \arg(V_{cb} V_{cs}^*)$ Mixing  $\phi_M = 2 \arg(V_{tb} V_{ts}^*)$ 

$$\phi_s = \phi_M - 2\phi_D \stackrel{SM}{=} -2 \arg\left(-\frac{V_{cb} V_{cs}^*}{V_{tb} V_{ts}^*}\right) \equiv -2\beta_s^1$$

- Teoricamente molto pulita:  $\phi_s \stackrel{SM}{=} 0.0369 \pm 0.0013$  rad [UTfit]

$$\phi_s \stackrel{SM}{=} -0.0376_{-0.0008}^{+0.0007} \text{ rad [CKMFitter]}$$

- Sperimentalmente accessibile misurando l'asimmetria dipendente dal tempo

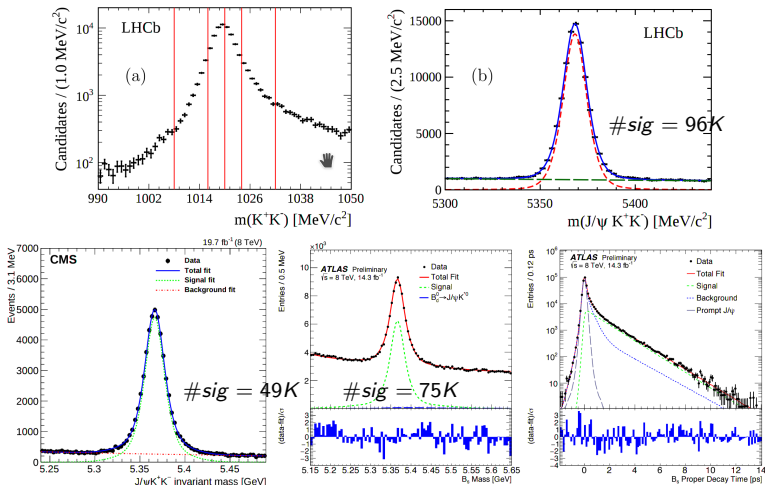
$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma_{B_s^0} - \Gamma_{\bar{B}_s^0}}{\Gamma_{B_s^0} + \Gamma_{\bar{B}_s^0}} = \frac{S_f \sin(\Delta m t) - C_f \cos(\Delta m t)}{\cosh(\Delta \Gamma t/2) - A_{\Delta \Gamma} \sinh(\Delta \Gamma t/2)}$$

$$\lambda_f = \frac{qA_f}{pA_f}, \quad \phi_s = -\arg(\lambda_f), \quad C_f = \frac{1-|\lambda_f|^2}{1+|\lambda_f|^2}, \quad S_f = \frac{2\mathcal{I}(\lambda_f)}{1+|\lambda_f|^2}, \quad A_{\Delta \Gamma} = -\frac{2\mathcal{R}(\lambda_f)}{1+|\lambda_f|^2}$$

<sup>1</sup>Trascurando contributi da diagrammi a pinguino

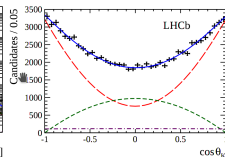
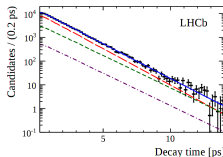
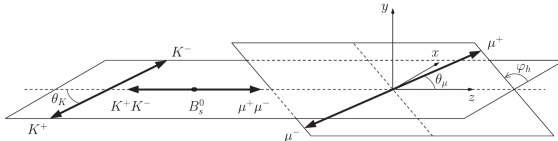
# Misura di $\phi_s$ in $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$

- Analisi time-dependent e tagged
- Osservabili,  $\phi_s$ ,  $\Delta m_s$ ,  $\Gamma_s$ ,  $\Delta\Gamma_s$ , ...



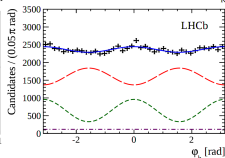
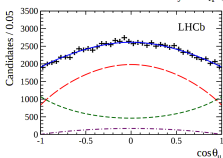
# Misura di $\phi_s$ in $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$

- Decadimento  $P \rightarrow VV$ , analisi angolare necessaria per distinguere (statisticamente) le componenti CP-even e CP-odd



CP-even

CP-odd

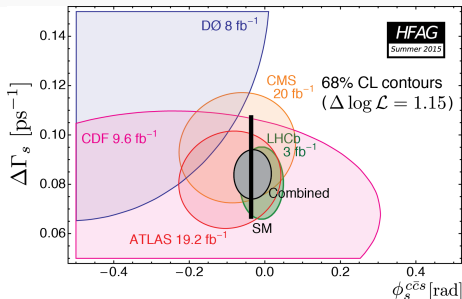


S-wave

# Misura di $\phi_s$ in $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$

## HFAG 2015

Exp.	Mode	Dataset	$\phi_s^{CP}$	$\Delta\Gamma_s$ ( $\text{ps}^{-1}$ )
CDF	$J/\psi\phi$	$9.6 \text{ fb}^{-1}$	$[-0.60, +0.12]$ , 68% CL	$+0.068 \pm 0.026 \pm 0.009$
D0	$J/\psi\phi$	$8.0 \text{ fb}^{-1}$	$-0.55^{+0.38}_{-0.36}$	$+0.163^{+0.065}_{-0.064}$
ATLAS	$J/\psi\phi$	$4.9 \text{ fb}^{-1}$	$+0.12 \pm 0.25 \pm 0.05$	$+0.053 \pm 0.021 \pm 0.010$
ATLAS	$J/\psi\phi$	$14.3 \text{ fb}^{-1}$	$-0.119 \pm 0.088 \pm 0.036$	$+0.096 \pm 0.013 \pm 0.007$
ATLAS	above 2 combined	—	$-0.094 \pm 0.083 \pm 0.033$	$+0.082 \pm 0.011 \pm 0.007$
CMS	$J/\psi\phi$	$20 \text{ fb}^{-1}$	$-0.075 \pm 0.097 \pm 0.031$	$+0.095 \pm 0.013 \pm 0.007$
LHCb	$J/\psi K^+K^-$	$3.0 \text{ fb}^{-1}$	$-0.058 \pm 0.049 \pm 0.006$	$+0.0805 \pm 0.0091 \pm 0.0033$
LHCb	$J/\psi\pi^+\pi^-$	$3.0 \text{ fb}^{-1}$	$+0.070 \pm 0.068 \pm 0.008$	—
LHCb	above 2 combined	—	$-0.010 \pm 0.039(\text{tot})$	—
LHCb	$D_s^+ D_s^-$	$3.0 \text{ fb}^{-1}$	$+0.02 \pm 0.17 \pm 0.02$	—
All combined	—	—	$-0.034 \pm 0.033$	$+0.084 \pm 0.007$



- $\phi_s = -0.034 \pm 0.033$ ,  $\Gamma_s = +0.084 \pm 0.007$ , compatibile con lo SM

- Controllo di contributi a pinguino comincia a essere un problema

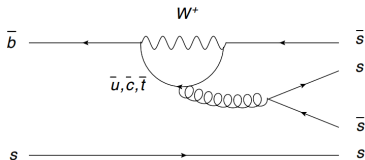
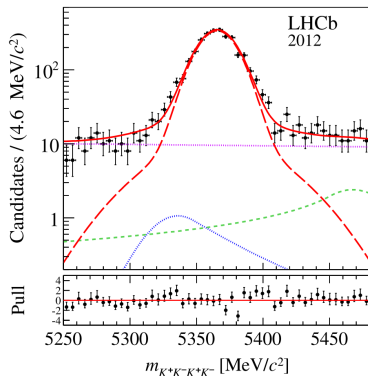
$$\phi_s^{meas} = \phi_s + \delta_{Penguin} + \delta_{NP}$$

- Penguin to tree suppression :  $\epsilon = |V_{us}|^2 / (1 - |V_{us}|^2) \approx 5\%$
- Difficile da calcolare a causa di effetti non perturbativi
- Accesso a  $\delta_P$  usando decadimenti con enhanced penguin/tree ratio [Faller et al. arXiv:0810.4248, DeBruyn & Fleischer, arXiv:1412.6834]
- Misura di LHCb in  $B^0 \rightarrow J/\psi\pi\pi$  permette di mettere un limite  $|\delta_P| < 0.03$  [PLB 742 (2015) 3849]

# $\phi_s$ con $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$

- Analisi simile a  $B_s^0 \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-)$
- Dominato da diagrammi a pinguino  $\rightarrow$  permette di sondare eventuali nuove particelle in loops

[Phys.Rev.D90 (2014) 052011]

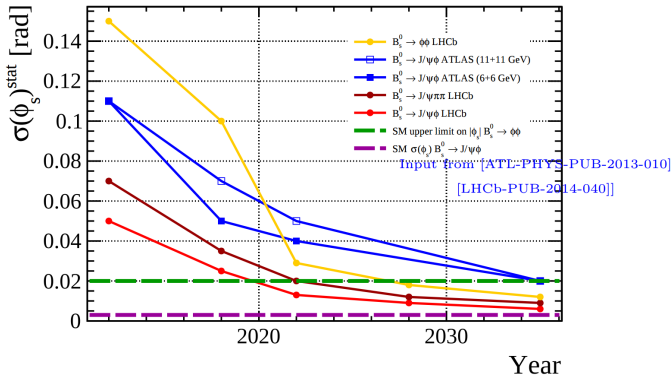


- $\phi_s^{SM} < 0.02$  rad
- $\phi_s = -170 \pm 150_{stat} \pm 30_{syst}$  mrad
- Precision paragonabile ai  $b \rightarrow c\bar{c}s$  golden modes
- Nessuna discrepanza, per ora...



# Prospettive per $\phi_s$

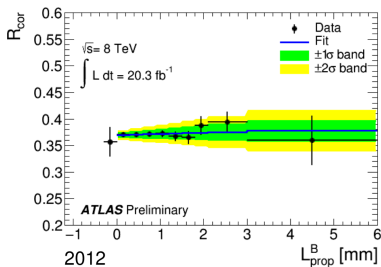
Greig Cowan (Edinburgh) @ HL-LHC 2015



Si raggiungerà lo SM nel  $\sim 2030$

# Misura di $\Delta\Gamma_d$ ad ATLAS (PRELIMINARY)

- $\Delta\Gamma_d$  da  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  e  $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$
- Predizione SM:  $\Delta\Gamma_d/\Gamma_d = (0.56 \pm 0.04) \times 10^{-2}$  [UTfit]  
 $\Delta\Gamma_d/\Gamma_d = (0.42 \pm 0.08) \times 10^{-2}$  [Lenz e Nierste]
- Risultato preliminare di ATLAS con  $25.2 \text{ fb}^{-1}$  (dati Run1 a 7 e 8 TeV)
- $\Delta\Gamma_d/\Gamma_d$  determinato dal rapporto di yield in bin di proper decay length tra i due canali



- $\Delta\Gamma_d/\Gamma_d = (-0.1 \pm 1.4) \times 10^{-2}$
- Singola misura più precisa
- In corso di approvazione nella collaborazione, più informazioni nel talk a [DIS 2016\(Borisov\)](#)

# Misura di $a_{sl}^d$ e $a_{sl}^s$

- CPV in mixing utilizzando decadimenti semileptonici (flavour specific) dei mesoni B neutri
- Deviazione dallo SM vista da D0 [PRD 89, 012002 (2014)]

Lenz, Nierste [JHEP 0706:072 (2007)]

$$\bullet a^q = \frac{P(\bar{B}_q \rightarrow B_q \rightarrow f) - P(B_q \rightarrow \bar{B}_q \rightarrow \bar{f})}{P(\bar{B}_q \rightarrow B_q \rightarrow f) + P(B_q \rightarrow \bar{B}_q \rightarrow \bar{f})} = 1 - \left| \frac{q}{p} \right|^2 \approx \frac{\Delta\Gamma_q}{\Delta m_q} \tan(\phi_q^{12})$$

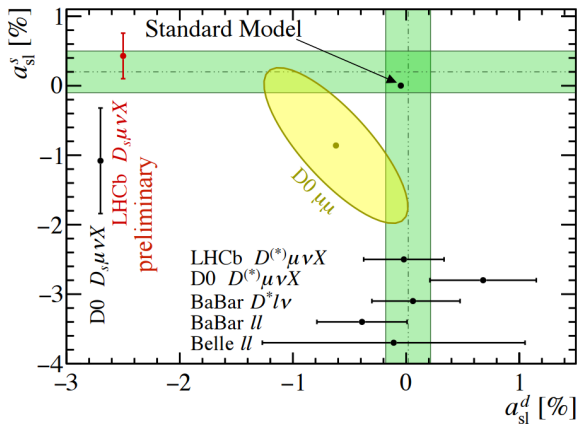
- Predizioni:  $a_{sl}^d = (-4.6 \pm 0.6) \times 10^{-4}$ ,  $a_{sl}^s = (2.22 \pm 0.27) \times 10^{-5}$   
Artuso, Borissov, Lenz [arXiv:1511.09466]

- Sperimentalmente

$$A_{raw}^d(t) = \frac{N(f,t) - N(\bar{f},t)}{N(f,t) + N(\bar{f},t)} \approx A_D + \frac{a_{sl}^d}{2} + \left( A_P - \frac{a_{sl}^d}{2} \right) \cos(\Delta m_d t)$$

$$A_{raw}^s = \frac{N(f) - N(\bar{f})}{N(f) + N(\bar{f})} \approx A_D + \frac{a_{sl}^s}{2} + \left( A_P - \frac{a_{sl}^s}{2} \right) \int \cos(\Delta m_s t) dt$$

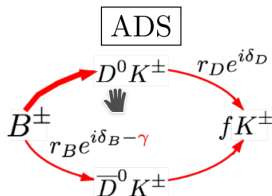
# Misura di $a_{sl}^d$ e $a_{sl}^s$



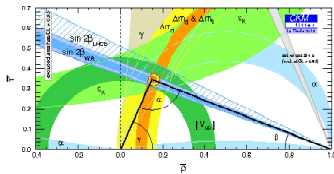
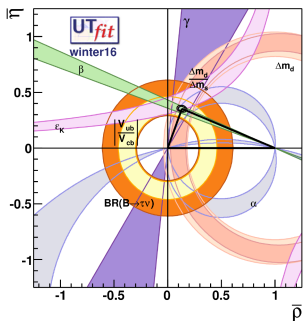
Misure di LHCb compatibili con le previsioni del Modello Standard

# Misura di $\gamma$ con diagrammi ad albero

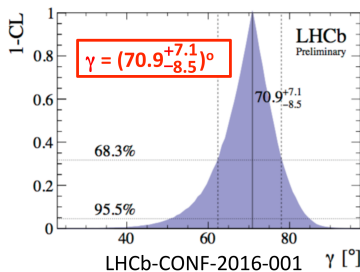
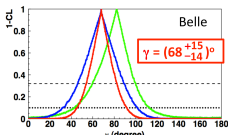
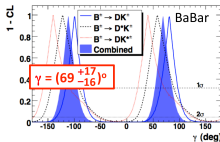
- L'angolo meno noto nel triangolo di unitarietà
- Piccola incertezza teorica
- Sensitività finale dipende dall'utilizzo di molti canali di decadimento indipendenti:
- $B^+ \rightarrow Dh^+, D \rightarrow hh$ , GLW/ADS
- $B^+ \rightarrow Dh^+, D \rightarrow K\pi\pi\pi$ , ADS
- $B^+ \rightarrow DK^+, D \rightarrow K_S^0 hh$ , GGSZ
- $B^+ \rightarrow DK^+, D \rightarrow K_S^0 K\pi$ , GLS
- $B^0 \rightarrow DK^{0*}, D \rightarrow hh$ , GLW/ADS
- Time dependent  $B_s^0 \rightarrow D_s K$



# Misura di $\gamma$ con diagrammi ad albero



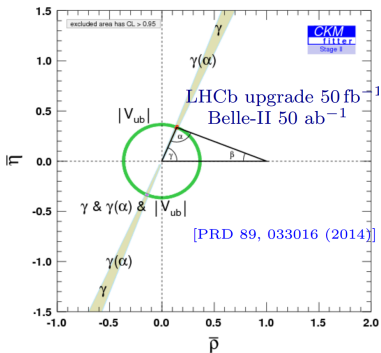
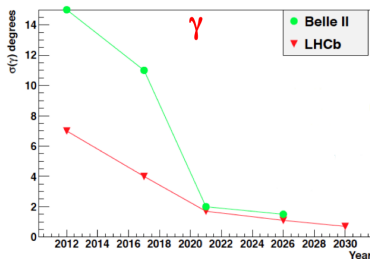
- Incertezze teoriche piccole da D mixing, K mixing, CPV in D
- World average ormai dominata da LHCb



# Misura di $\gamma$ con diagrammi ad albero

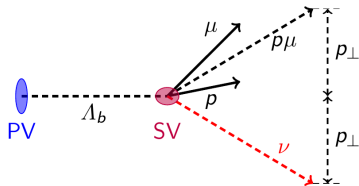
- Precisione attesa da LHCb:

$$\sigma(\gamma) \approx 4^\circ \text{ in Run 2, sotto il grado alla fine di Run 3}$$



# Misura di $|V_{ub}|$ con decadimenti barionici [arxiv:1504.01568]

- Discrepanza tra misure esclusive ( $B \rightarrow \pi l \nu$ ) e inclusive (any  $b \rightarrow ul\nu$ )
- LHCb misura  $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p \mu \nu) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c(\rightarrow p K \pi) \mu \nu)$ : sensibile a  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$
- Misura effettuata a alto  $q^2$ , dove le previsioni di LQCD [arxiv:1503.01421] sono piu' precise



Corrected mass

$$M_{corr} = \sqrt{p_{\perp}^2 + M_{p\mu}^2} + p_{\perp}$$

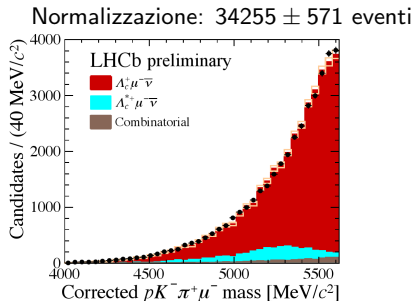
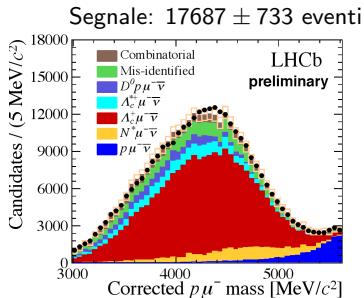
Peaks at  $M_{\Lambda_b^0}$

- $q^2$  determinato con ambiguità quadratica usando il puntamento al PV e  $M_{\Lambda_b^0}$ : si richiede che entrambe le soluzioni siano sopra  $15 \text{ GeV}^2$  per minimizzare la migrazione di eventi tra bin



# Misura di $|V_{ub}|$ con decadimenti barionici [arxiv:1504.01568]

- Fondo ridotto grazie tecniche di isolamento sensibili alla presenza di tracce extra vicino al vertice di decadimento del segnale

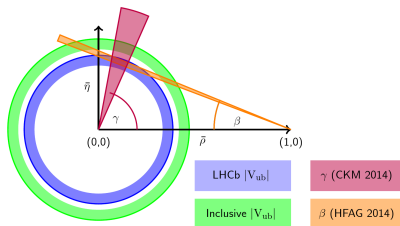
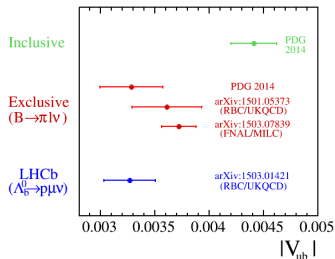


- Sistematica principale dovuta alla precisione su  $\mathcal{B}(\Lambda_c \rightarrow pK\pi)$ , efficienza di trigger e tracciamento, modello di decadimento della  $\Lambda_c$

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu)_{q^2 > 15 \text{ GeV}^2}}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c \mu\nu)_{q^2 > 7 \text{ GeV}^2}} = (1.00 \pm 0.04 \pm 0.08) \times 10^{-2}$$

# Misura di $|V_{ub}|$ con decadimenti barionici [arxiv:1504.01568]

- Usando misure esclusive di  $|V_{cb}|$ :  
 $|V_{ub}| = (3.27 \pm 0.15(\text{exp}) \pm 0.17(\text{theory}) \pm 0.06(|V_{cb}|)) \times 10^{-3}$
- Sistematically limitata da calcoli di lattice QCD per  $\Lambda_b^0$  form factor
- Discrepanza di  $3.5\sigma$  rispetto a misure inclusive

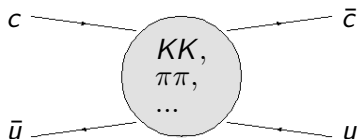
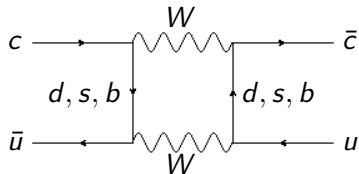


## • Futuro:

- Possibile effettuare altre misure usando  $B_s^0 \rightarrow K \mu \nu$  e migliorare la conoscenza di  $\mathcal{B}(\Lambda_c \rightarrow p K \pi)$
- **Belle II?**  $\rightarrow \sigma(|V_{ub}|) \sim 2 - 3\%$

# Fisica del quark charm

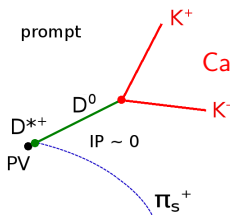
- Up-type quark: sonda di NP nel settore del flavour, complementare agli studi negli adroni K e B
- Mixing e violazione di CP predetti dallo SM sono piccoli a causa del GIM mechanism e soppressioni CKM  $\rightarrow$  background SM piccolo
- La precisione raggiunta attualmente nel charm, non sistematicamente limitata, fornisce già oggi ottime prospettive per la fisica del B nel futuro



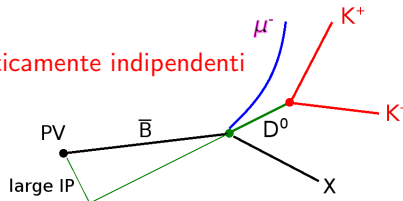
- Contributi long-distance non sono trascurabili e predizioni teoriche precise sono difficili. Sinergia tra teoria e misure sperimentali necessaria per ridurre e tenere sotto controllo tali contributi.

# Fisica del Charm a LHCb

- Copiosa produzione di charm all'LHC produced world best measurements:
  - Mixing e CPV in WS  $D^0 \rightarrow K\pi$  [PRL 111 (2013) 251801]
  - CPV diretta in  $\Delta A_{CP}$  [JHEP 07 (2014) 041]
  - CPV indiretta in  $A_F$  [PRL 112 (2014) 041801] (only 2011 data!)
  - Ricerca di CPV in decadimenti multicorpo [PLB 726 (2013) 623, PLB 728 (2014) 585, JHEP 10 (2014) 005 ...]
- L'incertezza statistica domina ancora le misure principali
- Il flavour del  $D$  alla produzione determinato in due modi:



Campioni statisticamente indipendenti

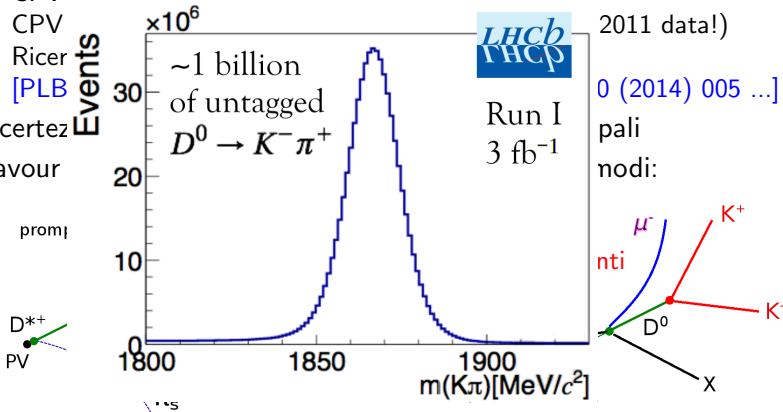


# Fisica del Charm a LHCb

- Copiosa produzione di charm all'LHC produced world best measurements:

- Mixing e CPV in WS  $D^0 \rightarrow K\pi$  [PRL 111 (2013) 251801]
- CPV diretta in  $\Delta A_{CP}$  [JHEP 07 (2014) 041]
- CPV
- Ricer [PLB

- L'incertez
- Il flavour



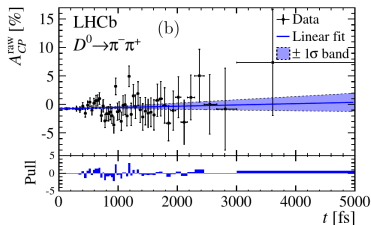
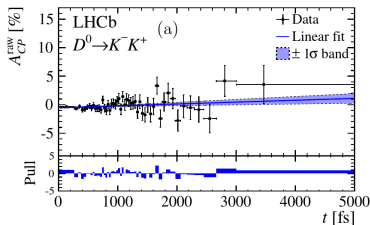
# CPV in presenza di mixing: misura di $A_{\Gamma}$ in $D^0 \rightarrow hh$

[JHEP04(2015)043]

- Asimmetria del tempo di vita effettivo tra  $D^0$  and  $\bar{D}^0$

$$A_{\Gamma} = \frac{\tau_{\bar{D}^0}^{\text{eff}} - \tau_{D^0}^{\text{eff}}}{\tau_{\bar{D}^0}^{\text{eff}} + \tau_{D^0}^{\text{eff}}} \approx \left( \left| \frac{q}{p} \right| - \left| \frac{p}{q} \right| \right) y \cos \phi - \left( \left| \frac{q}{p} \right| + \left| \frac{p}{q} \right| \right) x \sin \phi$$

- Misura quasi pura di CPV indiretta
- L'ultima misura di LHCb ( $3 \text{ fb}^{-1}$ ) utilizza  $D^0$  da decadimenti semileptonici di B
- Fit dell'evoluzione temporale dell'asimmetria:  $A_{CP}(t) \approx A_0 - A_{\Gamma} \frac{t}{\tau}$



$$A_{\Gamma}(KK) = (-0.134 \pm 0.077_{\text{stat}}^{+0.026}_{-0.034})\% \quad A_{\Gamma}(\pi\pi) = (-0.092 \pm 0.145_{\text{stat}}^{+0.025}_{-0.033})\%$$

# CPV in presenza di mixing: misura di $A_{\Gamma}$ in $D^0 \rightarrow hh$

- Combinando le due misure di LHCb

$$A_{\Gamma}(KK) = (-0.072 \pm 0.050)\%$$

$$A_{\Gamma}(\pi\pi) = (-0.010 \pm 0.087)\%$$

- Assumendo CPV universale:

$$A_{\Gamma} = (-0.056 \pm 0.044)\%$$

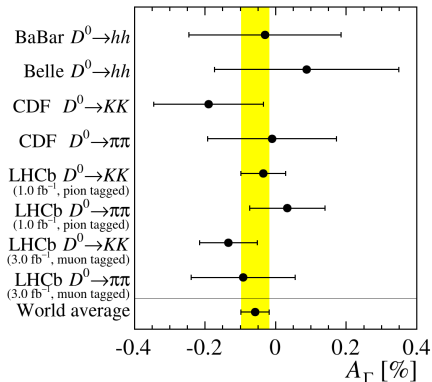
- Aggiungendo anche

Belle [[arXiv:1212.3478](https://arxiv.org/abs/1212.3478)],

BaBar [[PRD87 \(2013\) 012004](https://arxiv.org/abs/1301.01204)],

e CDF [[PRD90 \(2014\) 111103](https://arxiv.org/abs/1401.11103)]

$$A_{\Gamma} = (-0.058 \pm 0.040)\%$$



## CPV nel decadimento: misura di $\Delta A_{CP}$ [arXiv:1602.03160]

- La CPV nel decadimento ( $|A_f/\bar{A}_f|$ ) dipende dallo stato finale
- Le asimmetrie individuali  $A_{CP}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$ ,  $A_{CP}(D^0 \rightarrow K^+K^-)$  sono uguali e opposte (dovuto alla struttura CKM)
- LHCb misura  $\Delta A_{CP} = A_{CP}(K^+K^-) - A_{CP}(\pi^+\pi^-)$  (integrata nel tempo)
- Sperimentalmente robusta, molte sistematiche si cancellano al primo ordine, infatti  $A_{raw} = A_{CP} + \underbrace{A_{produzione} + A_{rivelazione}}_{\text{simili per } KK \text{ e } \pi\pi}$

$$\Delta A_{CP} \approx A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi)$$

- Recente misura a LHCb ( $D^*$  tagged,  $3 \text{ fb}^{-1}$ ):

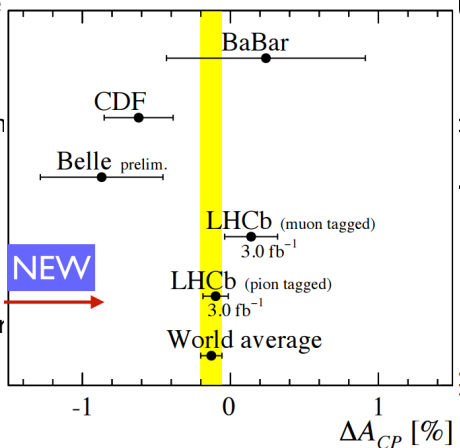
$$\Delta A_{CP} = (-0.10 \pm 0.08 \pm 0.03)\%$$



# CPV nel decadimento: misura di $\Delta A_{CP}$ [arXiv:1602.03160]

- La CPV nel decadimento ( $|A_f/\bar{A}_f|$ ) dipende dallo stato finale
- Le asimmetrie individuali  $A_{CP}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$ ,  $A_{CP}(D^0 \rightarrow K^+K^-)$  sono uguali e opposte (CIMA)

- LHCb misura nel tempo
- Sperimentalmente in ordine, infatti



(integrata nel  
cellano al primo  
e)

- Recente misura

$$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi \pi$$

- “Golden channel”, da accesso a  $x = \Delta m/\Gamma$ ,  $y = \Delta\Gamma/2\Gamma$ ,  $q/p$  e  $\phi$
- Analisi Dalitz e Time dependent
- Due approcci possibili: model dependent (amplitude analysis) e independent (analisi in bin di Dalitz, fasi forti per ogni bin prese da misura di CLEO)
- Recente misura dei parametri di mixing pubblicata da LHCb coi dati 2011 [[JHEP04\(2016\)033](#)], usando il metodo model independent

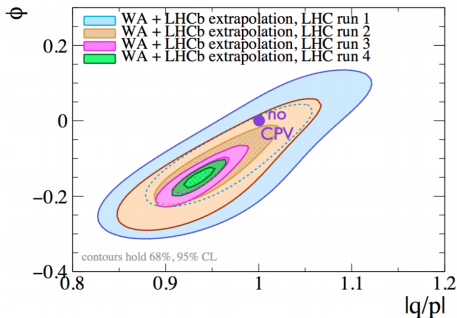
$$x = (-0.86 \pm 0.53 \pm 0.17) \times 10^{-2}$$

$$y = (+0.03 \pm 0.46 \pm 0.13) \times 10^{-2}$$

- Aggiornamenti a con i dati di tutto il Run 1 attesi entro l'anno

# Prospettive per la ricerca di CPV nel charm

- Molte misure ancora limitate dalla statistica
- LHCb riuscirà a sondare CPV nel Charm a livello dello Standard Model!



$\int \mathcal{L} dt$	LHC era			HL-LHC era	
	Run-1 (2010-12)	Run-2 (2015-18)	Run-3 (2020-22)	Run-4 (2025-28)	Run-5 (2030+)
$x [10^{-3}]$	1.22	0.92	0.42	0.25	0.18
$y [10^{-3}]$	0.53	0.37	0.15	0.09	0.06
$ q/p  [10^{-3}]$	59	44	20	12	8
$\phi$ [mrad]	89	70	33	20	14

Mixing and indirect  $CP$  violation sensitivities

# Conclusioni

- LHC e' una straordinaria beauty e charm factory
  - LHCb, ATLAS e CMS stanno facendo un lavoro eccellente nell'analizzare i campioni di dati pi abbondanti mai raccolti.
  - Medie mondiali dominate con  $\sigma_{stat} > \sigma_{syst}$
- Questo e' solo all'inizio di una nuova era nello studio della Fisica del Flavour
- RunII, LHCb-Upgrade e soprattutto HL-LHC rappresentano un'opportunita' unica per sfruttare l'enorme potenziale del LHC in questo settore.

# Proiezioni (LHCb-PUB-2014-040)

Type	Observable	LHC Run 1	LHCb 2018	LHCb upgrade	Theory
$B_s^0$ mixing	$\phi_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi)$ (rad)	0.049	0.025	<b>0.009</b>	$\sim 0.003$
	$\phi_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980))$ (rad)	0.068	0.035	<b>0.012</b>	$\sim 0.01$
	$A_{\text{sl}}(B_s^0)$ ( $10^{-3}$ )	2.8	1.4	<b>0.5</b>	0.03
Gluonic penguin	$\phi_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi \phi)$ (rad)	0.15	0.10	<b>0.018</b>	0.02
	$\phi_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{*0})$ (rad)	0.19	0.13	<b>0.023</b>	$< 0.02$
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi K_S^0)$ (rad)	0.30	0.20	<b>0.036</b>	0.02
Right-handed currents	$\phi_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi \gamma)$ (rad)	0.20	0.13	<b>0.025</b>	$< 0.01$
	$\tau^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi \gamma)/\tau_{B_s^0}$	5%	3.2%	<b>0.6%</b>	0.2%
Electroweak penguin	$S_3(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.04	0.020	<b>0.007</b>	0.02
	$q_0^2 A_{\text{FB}}(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-)$	10%	5%	<b>1.9%</b>	$\sim 7\%$
	$A_1(K \mu^+ \mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.09	0.05	<b>0.017</b>	$\sim 0.02$
	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)$	14%	7%	<b>2.4%</b>	$\sim 10\%$
Higgs penguin	$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ ( $10^{-9}$ )	1.0	0.5	<b>0.19</b>	0.3
	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$	220%	110%	<b>40%</b>	$\sim 5\%$
Unitarity triangle angles	$\gamma(B \rightarrow D^{(*)} K^{(*)})$	7°	4°	<b>0.9°</b>	negligible
	$\gamma(B^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm)$	17°	11°	<b>2.0°</b>	negligible
	$\beta(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$	1.7°	0.8°	<b>0.31°</b>	negligible
Charm CP violation	$A_\Gamma(D^0 \rightarrow K^+ K^-)$ ( $10^{-4}$ )	3.4	2.2	<b>0.4</b>	-
	$\Delta A_{CP}$ ( $10^{-3}$ )	0.8	0.5	<b>0.1</b>	-