

IFAE  
2016

# Misure di $LHCb$ legate alla matrice $CKM$

Lucia Grillo  
per l'esperimento  $LHCb$

$\alpha$

$\gamma$

$\beta$

UNIVERSITA' DEGLI STUDI  
DI MILANO  
BICOCCA

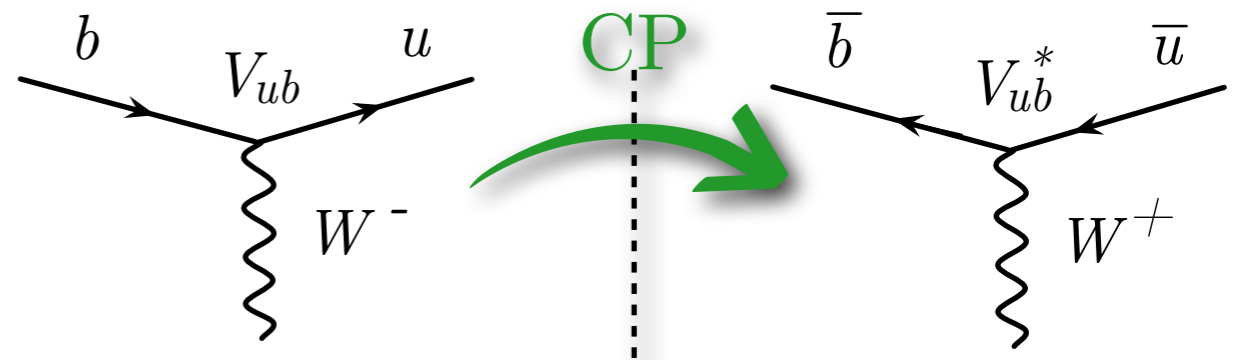
INFN

$LHCb$   
 ~~$LHCb$~~

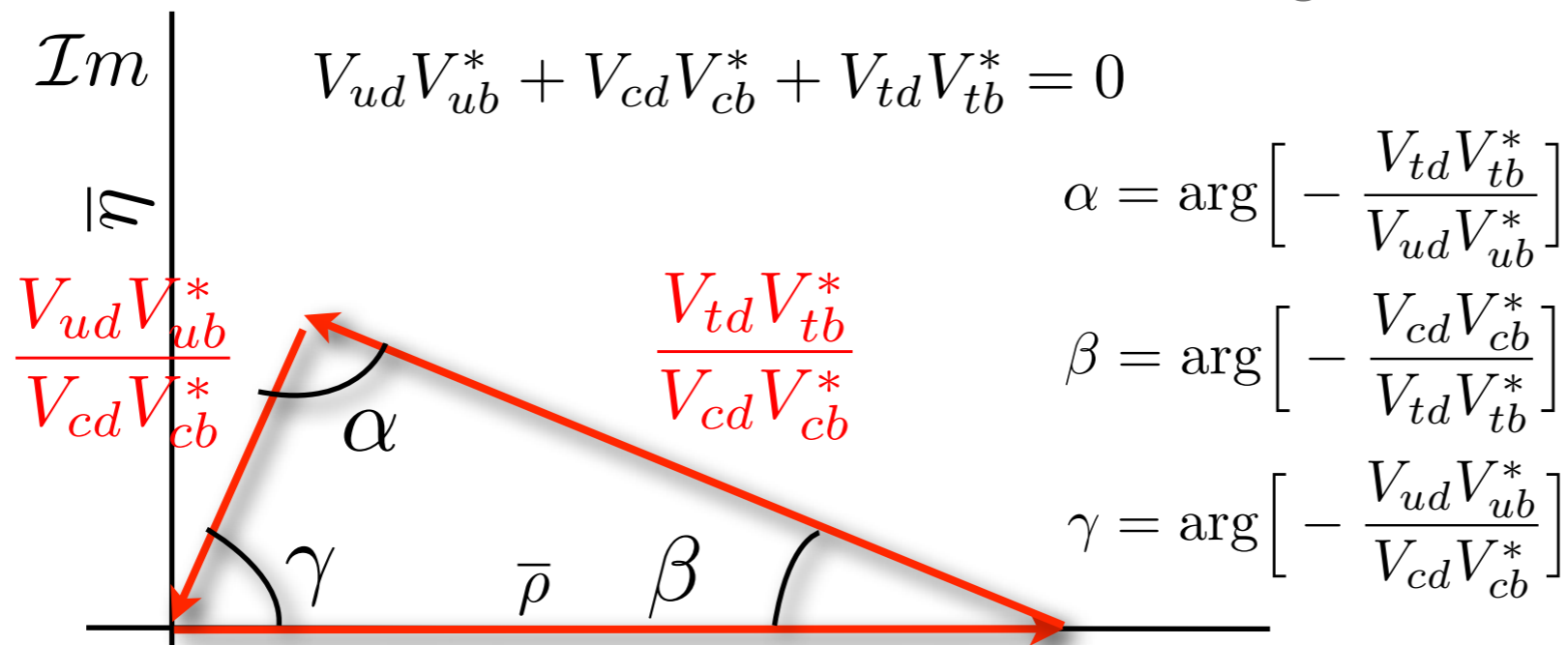
# La matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)

- Le costanti di accoppiamento delle correnti deboli cariche tra quark sono descritte dalla matrice CKM

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$



- Complessa e unitaria, con 3 generazioni di quark, la matrice CKM puo` accomodare violazione di  $CP$  nel Modello Standard
- Dalla condizione di unitarieta` della matrice, i triangoli di unitarieta`



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

$$\alpha = \arg \left[ - \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \right]$$

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

$$\gamma = \arg \left[ - \frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} \right]$$

- Altro triangolo di unitarieta`:  $V_{us} + V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0$   $\beta_s = \arg \left[ - \frac{V_{ts}V_{tb}^*}{V_{cs}V_{cb}^*} \right]$

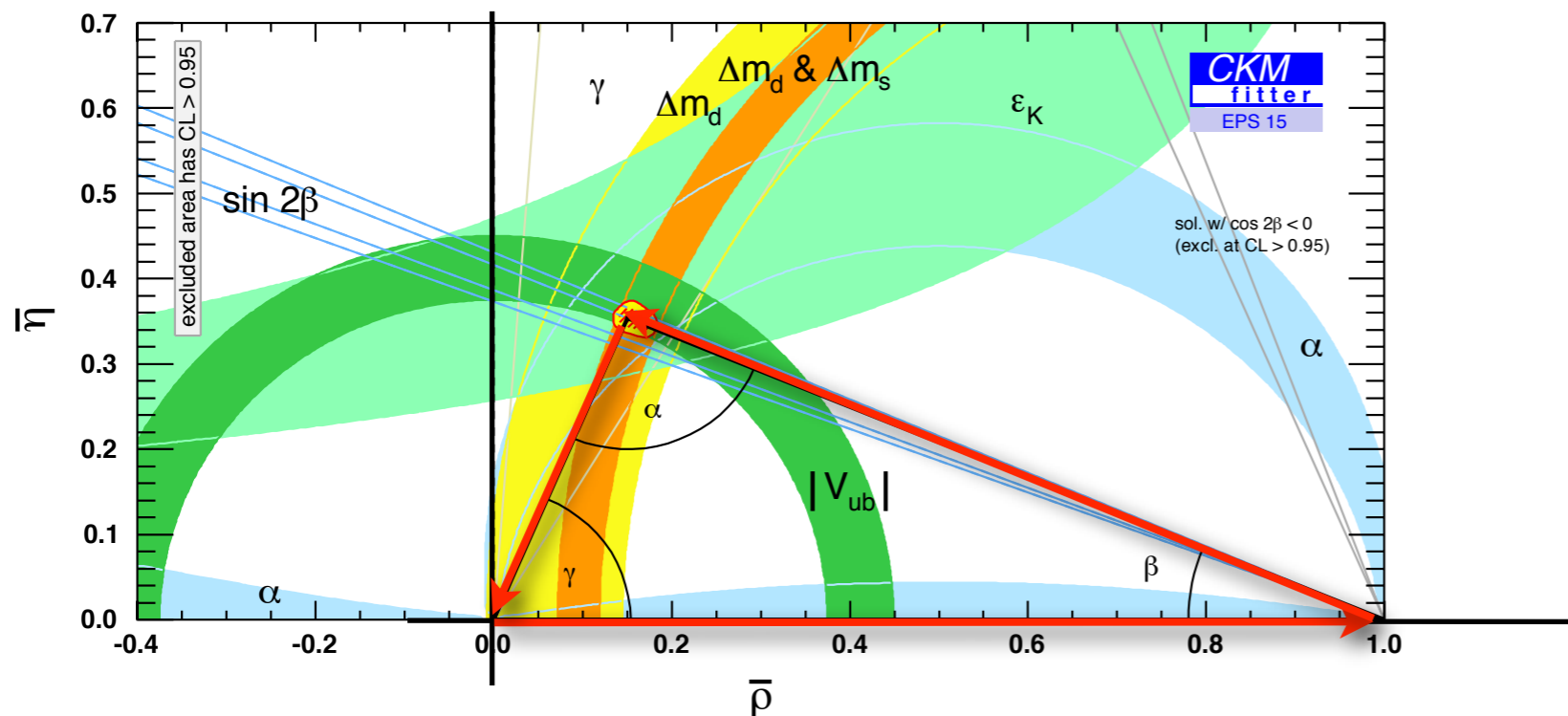
# La matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)

- Misure di precisione di decadimenti di adroni pesanti consentono la ridondante determinazione dei parametri della matrice CKM

In questo talk risultati di



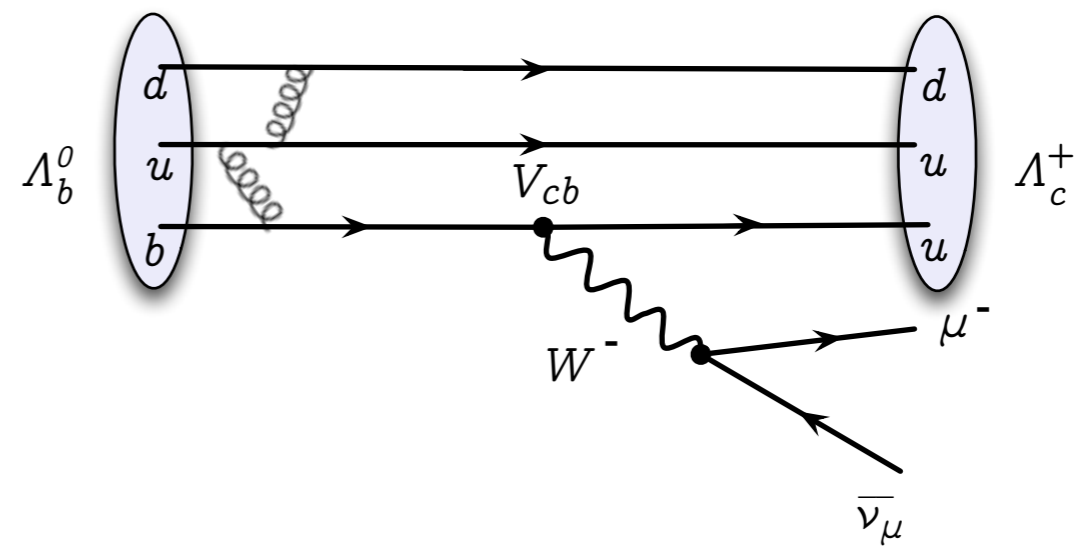
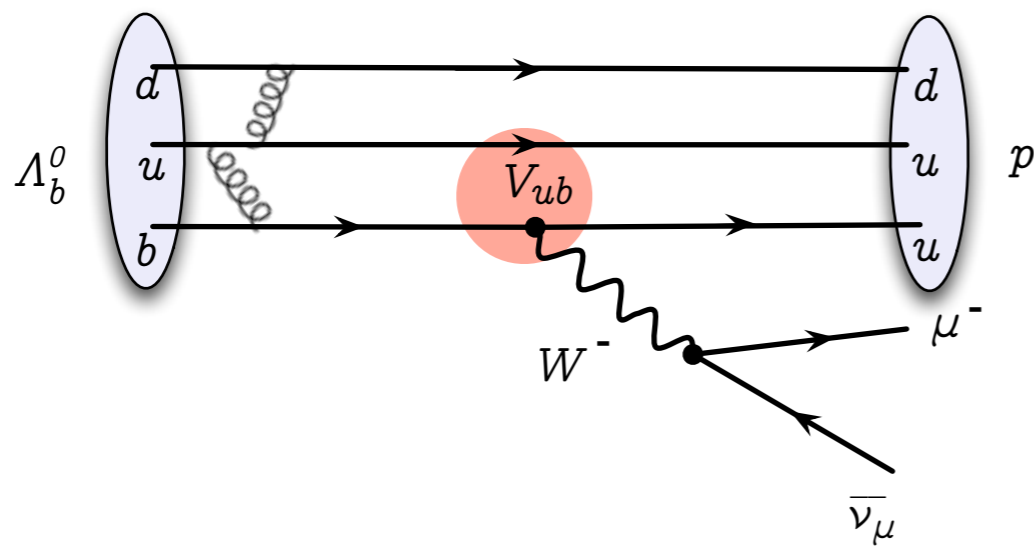
- ✓ Determinazione del parametro CKM  $|V_{ub}|$
- ✓ Misura della frequenza di oscillazione del  $B^0$
- ✓ Misure di  $\mathcal{CP}$  nelle oscillazioni dei mesoni neutri  $B^0$  e  $B_s^0$
- ✓ Determinazioni dell'angolo CKM  $\gamma$  (solo un assaggio)



# Determinazione di $|V_{ub}|$

[Nature Physics 10 \(2015\) 1038](#)

- La misura di  $|V_{ub}|$ , insieme a quella di  $\gamma$  determina il Triangolo di Unitarieta' da decadimenti a tree level
- Tensione tra le determinazioni inclusive e esclusive di  $|V_{ub}|$
- **Strategia di LHCb:** misura del rapporto tra i rapporti di diramazione dei decadimenti del barione  $\Lambda_b^0$  in  $p\mu^-\bar{\nu}_\mu$  e  $\Lambda_c^+\mu^-\bar{\nu}_\mu$



# Determinazione di $|V_{ub}|$

[Nature Physics 10 \(2015\) 1038](#)

- La misura di  $|V_{ub}|$ , insieme a quella di  $\gamma$  determina il Triangolo di Unitarieta' da decadimenti a tree level
- Tensione tra le determinazioni inclusive e esclusive di  $|V_{ub}|$
- **Strategia di LHCb:** misura del rapporto tra i rapporti di diramazione dei decadimenti del barione  $\Lambda_b^0$  in  $p\mu^-\bar{\nu}_\mu$  e  $\Lambda_c^+\mu^-\bar{\nu}_\mu$

$$\frac{|V_{ub}|^2}{|V_{cb}|^2} = \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu^-\bar{\nu}_\mu)} R_{FF}$$

$R_{FF} = 1.470 \pm 0.115(\text{stat}) \pm 0.104(\text{syst})$   
 W. Detmold, C. Lehner and S. Meinel  
[arXiv:1503.01421](#)

misura di Belle [arXiv:1312.7826](#)

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu)_{q^2 > 15 \text{ GeV}^2/c^4}}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+\mu^-\bar{\nu}_\mu)_{q^2 > 7 \text{ GeV}^2/c^4}} = \frac{N(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu)}{N(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+(-\rightarrow pK^-\pi^+)\mu^-\bar{\nu}_\mu)} \times \frac{\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+(-\rightarrow pK^-\pi^+)\mu^-\bar{\nu}_\mu)}{\epsilon(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu)} \times \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+)$$

world average

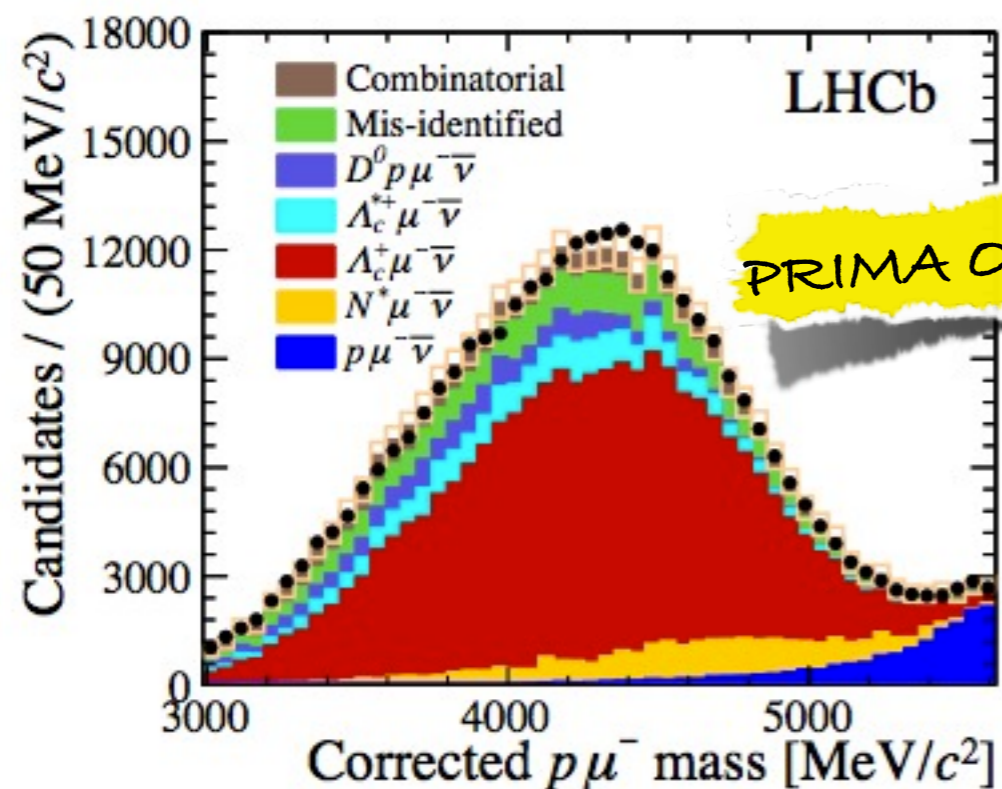
$$|V_{cb}| = (39.5 \pm 0.8) \times 10^{-3}$$

- Boosted decision tree rimuove il fondo di decadimenti con ulteriori tracce cariche che potrebbero formare un vertice con un candidato  $p\mu$ .
- Efficienze calcolate da simulazione, con molte correzioni data-driven

# Determinazione di $|V_{ub}|$

- Fit alla “massa corretta”,  $m_{\text{corr}} = \sqrt{m_{h\mu}^2 + p_{\perp}^2} + p_{\perp}$  sono usati per estrarre il numero di eventi di segnale e di campione di controllo, considerando l'incertezza per evento

$$N(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu^- \bar{\nu}_{\mu}) = 17687 \pm 733 \quad (\mathcal{L} = 2 \text{ fb}^{-1})$$

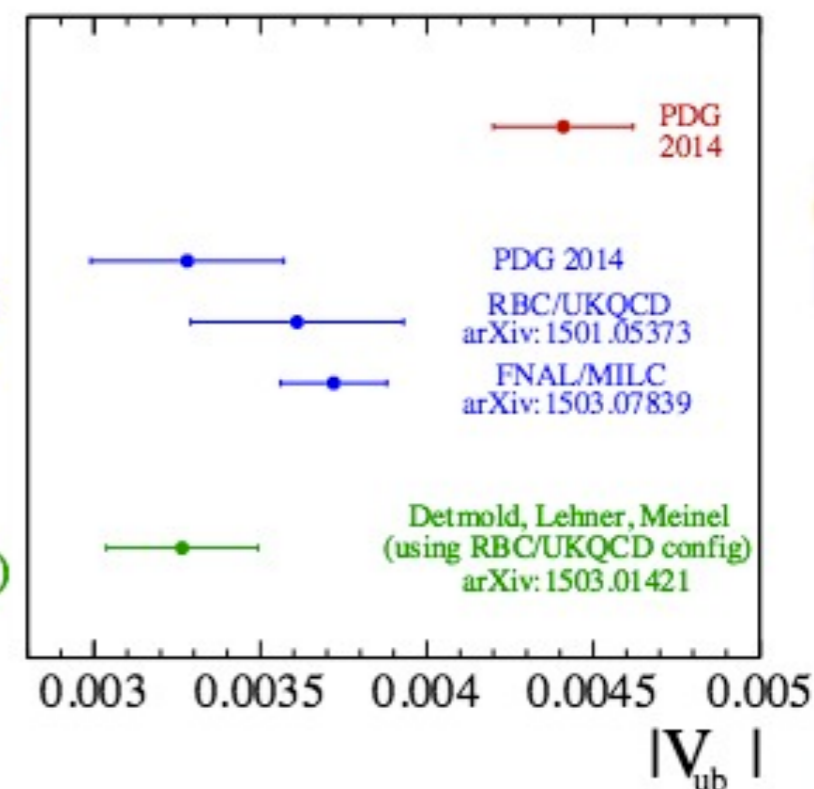


Inclusive

PRIMA OSSERVAZIONE

Exclusive  
( $B \rightarrow \pi l \nu$ )

LHCb  
( $\Lambda_b^0 \rightarrow p \mu \nu$ )



$$|V_{ub}| = (3.27 \pm 0.15(\text{exp}) \pm 0.16(\text{theo}) \pm 0.06(|V_{cb}|)) \times 10^{-3}$$

- In accordo con la world average delle misure esclusive, deviazione di  $3.5\sigma$  dalla misura inclusiva
- utile per verificare la consistenza di  $|V_{ub}|/|V_{cb}|$  con  $\beta$
- Work in progress:** determinazione di  $|V_{ub}|$  utilizzando altri canali di decadimento

FIRST @ Hadron colliders

[Nature Physics 10 \(2015\) 1038](https://doi.org/10.1038/nature13171)

# Oscillazioni di sapore dei mesoni neutri $B$

- Descrizione dell'oscillazione e decadimento:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ |\bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - i\frac{\Gamma_{11}}{2} & M_{12} - i\frac{\Gamma_{12}}{2} \\ M_{12}^* - i\frac{\Gamma_{12}^*}{2} & M_{22} - i\frac{\Gamma_{22}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ |\bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Gli autostati di massa sono sovrapposizione degli autostati di sapore:

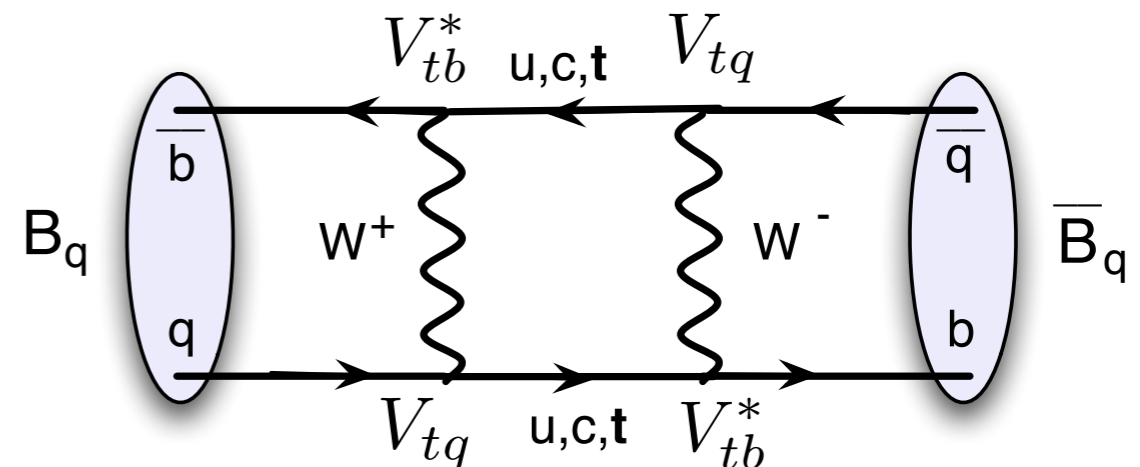
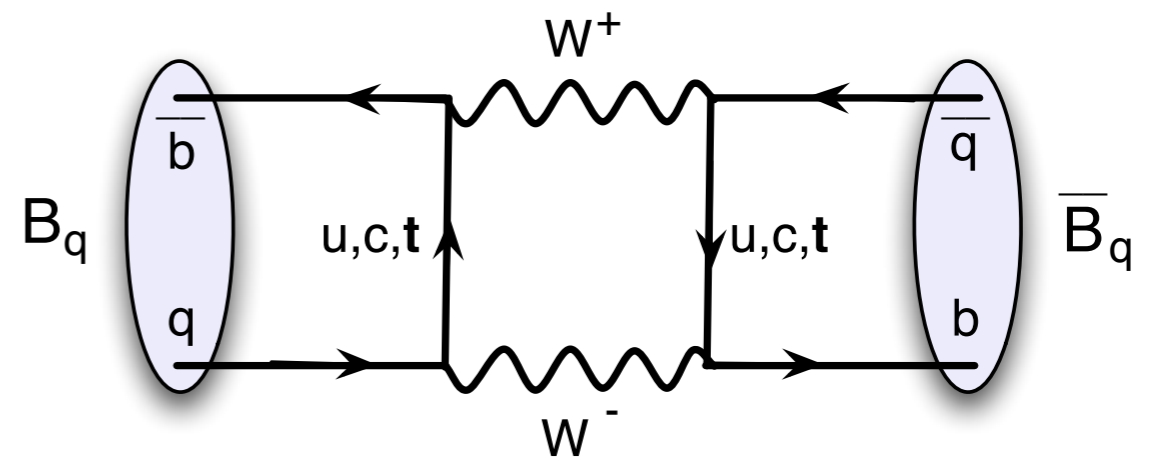
$$|B_L\rangle = p|B_q\rangle + q|\bar{B}_q\rangle$$

$$|B_H\rangle = p|B_q\rangle - q|\bar{B}_q\rangle$$

- Osservabili del mixing:

$$\Delta\Gamma = \Gamma_L - \Gamma_H$$

$$\Delta m = m_H - m_L$$



$$\Delta m \propto (V_{tb}^* V_{tq})^2$$

# Misura di precisione

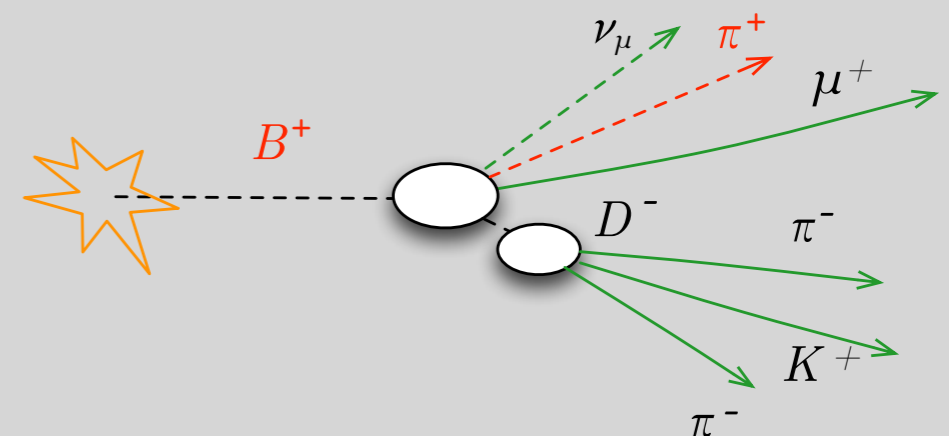
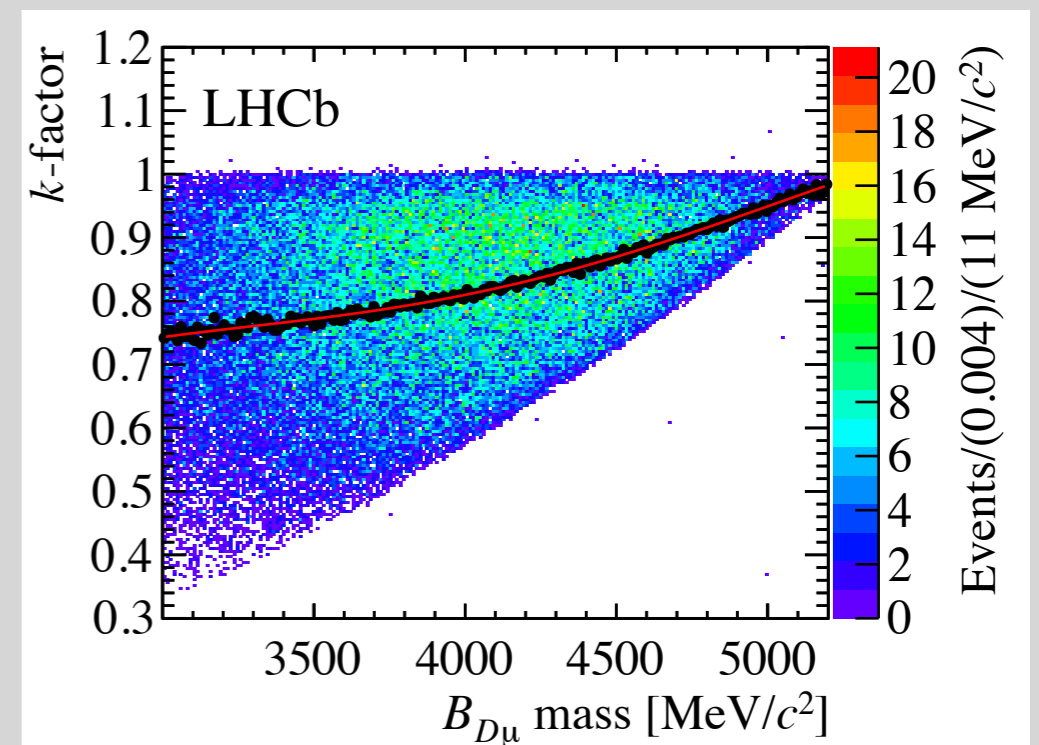
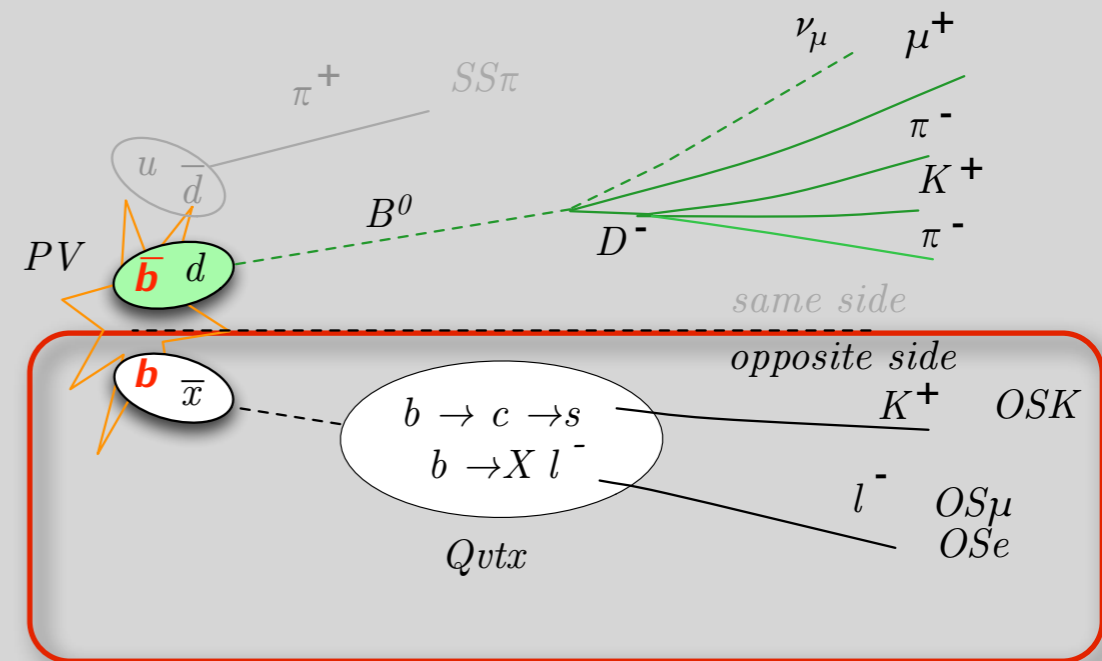
## di $\Delta m_d$

[LHCb-CONF-2015-003](#)

- Asimmetria di mixing misurata utilizzando  $2.2(0.8) \cdot 10^6$  decadimenti  $B^0 \rightarrow D^{(*)-} \mu^+ \nu_\mu X$

$$A(t) = \frac{N^{unmix}(t) - N^{mix}(t)}{N^{unmix}(t) + N^{mix}(t)} = \cos(\Delta m_d t)$$

- ✓ Flavor tagging  $\mathcal{P} = \epsilon_{tag}(1 - 2\omega)^2 \sim 2.4\%$
- ✓ Ricostruzione del tempo di decadimento
  - rapporto  $k = p_{reco}/p_{true}$  determinato da simulazione
  - correzione del tempo di decadimento ricostruito e descrizione della risoluzione sul momento
- ✓ Eliminazione del fondo
  - Multivariate Classifier per eliminare decadimenti di fondo e.g.  $B^+ \rightarrow D^{(*)-} \mu^+ \nu_\mu X^+$



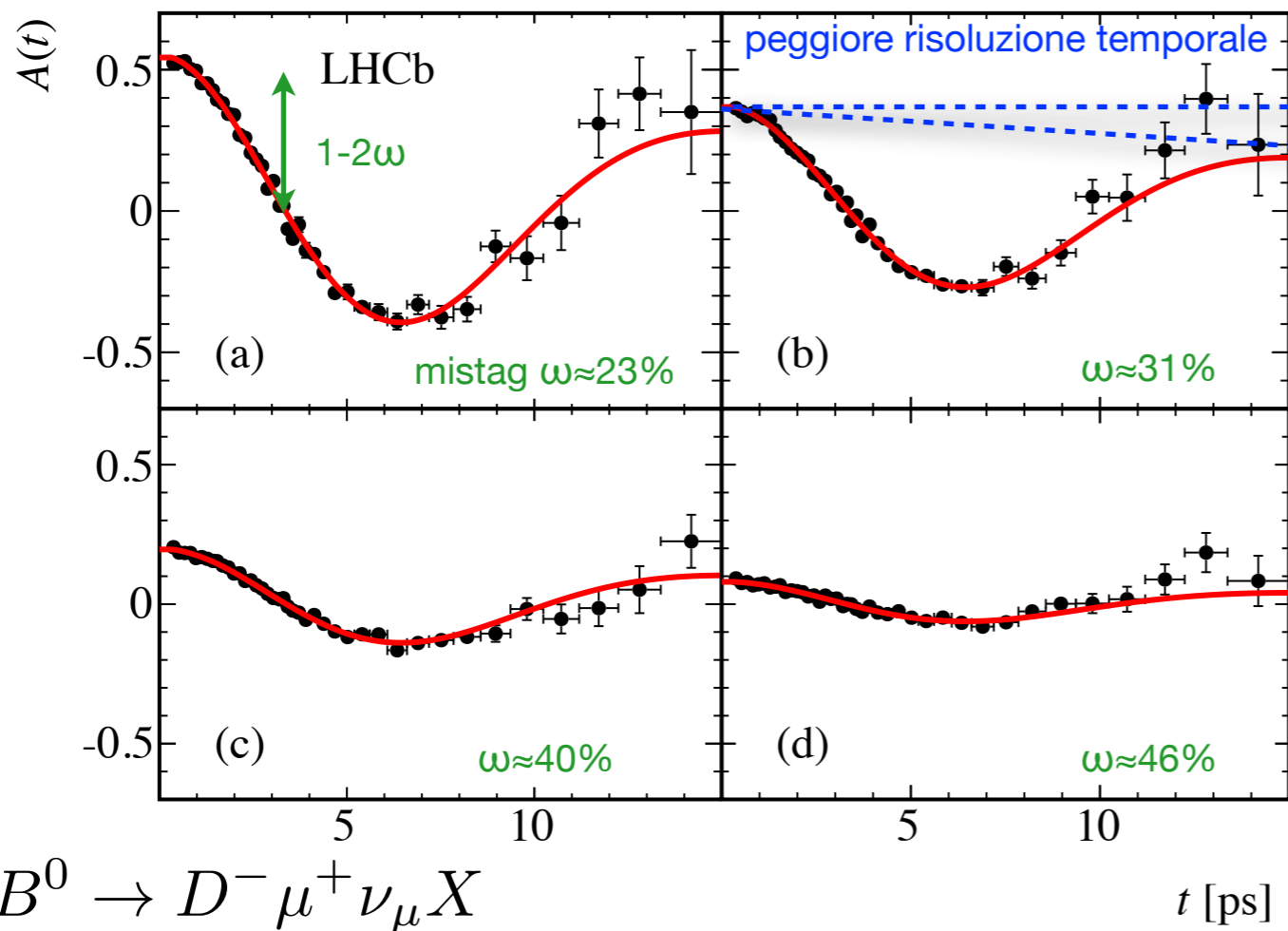


# Misura di precisione

## di $\Delta m_d$

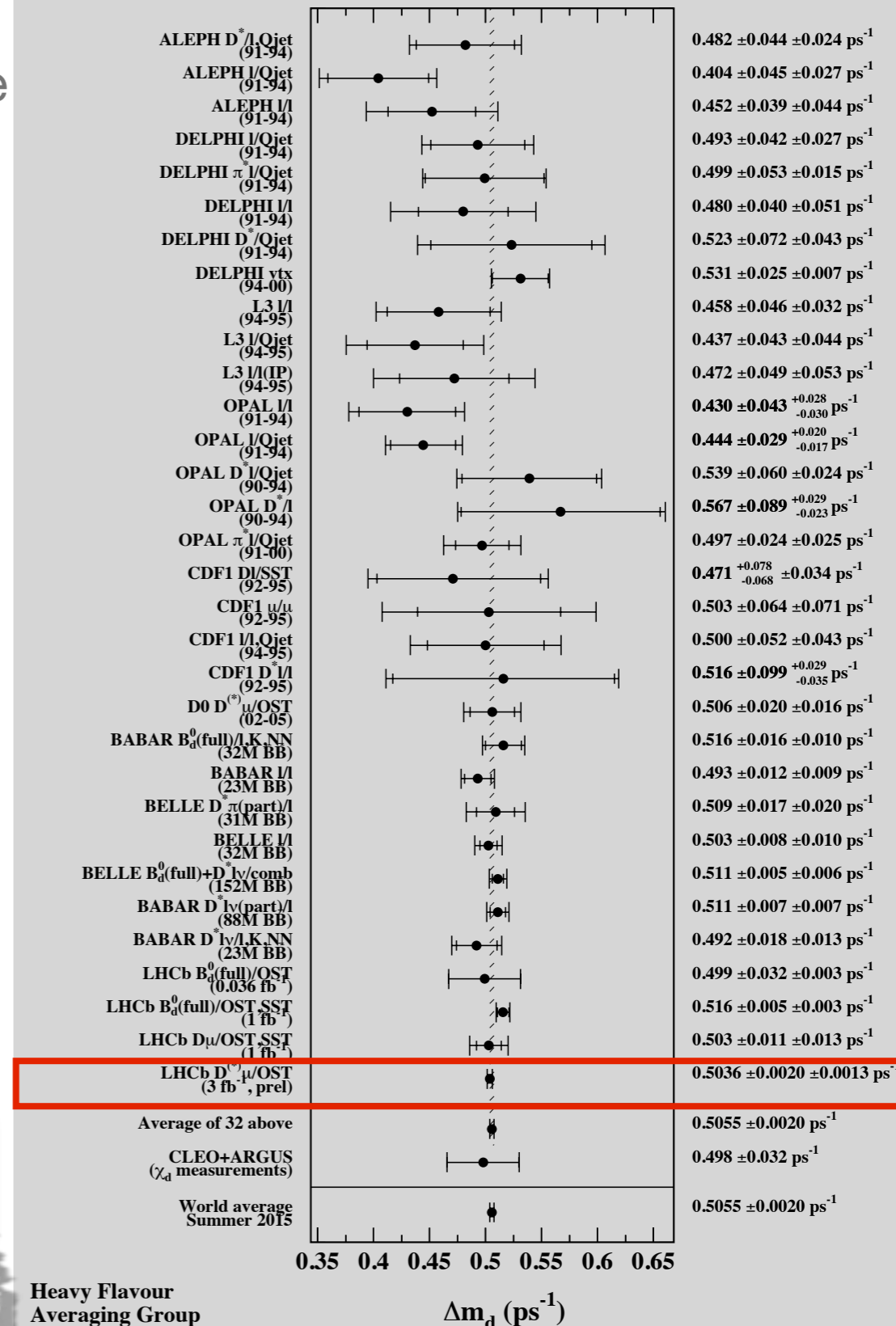
LHCB-CONF-2015-003

- Fit del tempo di decadimento per eventi “mixed” e “unmixed”
- Asimmetria nelle quattro categorie di mistag



$$\Delta m_d = 505.0 \pm 2.1(\text{stat}) \pm 1.0(\text{syst}) \text{ns}^{-1}$$

WORLD'S BEST



# Oscillazioni di sapore dei mesoni neutri $B$

- Descrizione dell'oscillazione e decadimento:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ |\bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - i\frac{\Gamma_{11}}{2} & M_{12} - i\frac{\Gamma_{12}}{2} \\ M_{12}^* - i\frac{\Gamma_{12}^*}{2} & M_{22} - i\frac{\Gamma_{22}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ |\bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Gli autostati di massa sono sovrapposizione degli autostati di sapore:

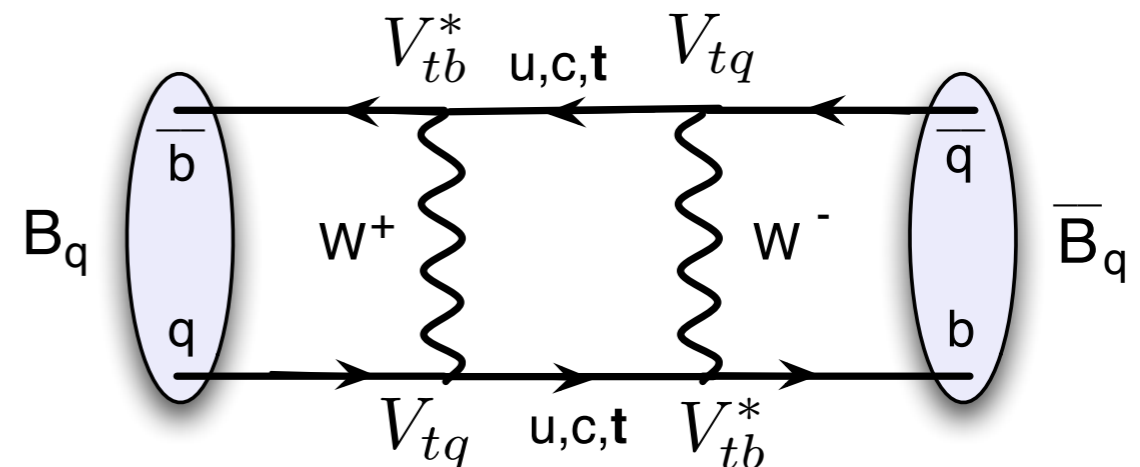
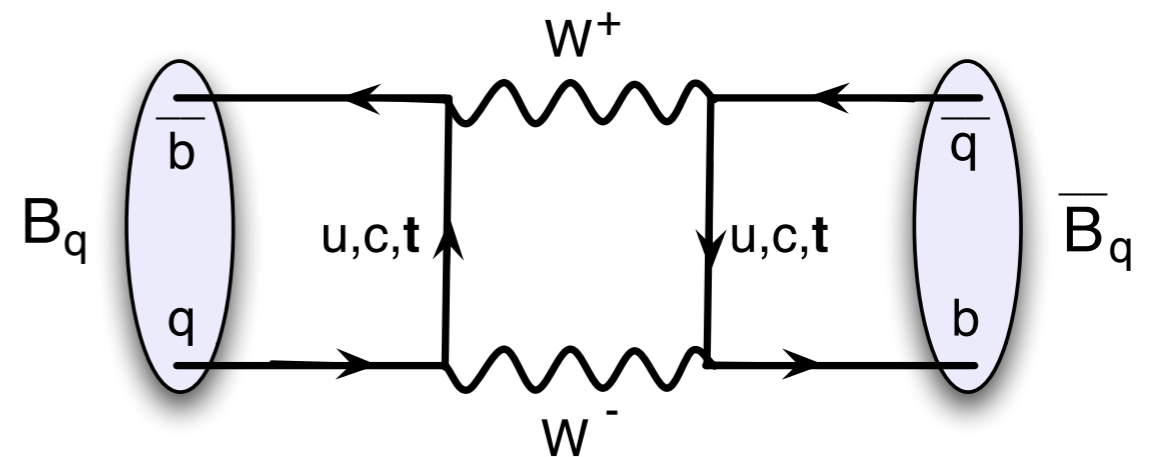
$$|B_L\rangle = p|B_q\rangle + q|\bar{B}_q\rangle$$

$$|B_H\rangle = p|B_q\rangle - q|\bar{B}_q\rangle$$

- Osservabili del mixing:

$$\Delta\Gamma = \Gamma_L - \Gamma_H$$

$$\Delta m = m_H - m_L$$



$$\Delta m \propto (V_{tb}^* V_{tq})^2$$

# Oscillazioni di sapore dei mesoni neutri $B$

- Descrizione dell'oscillazione e decadimento:

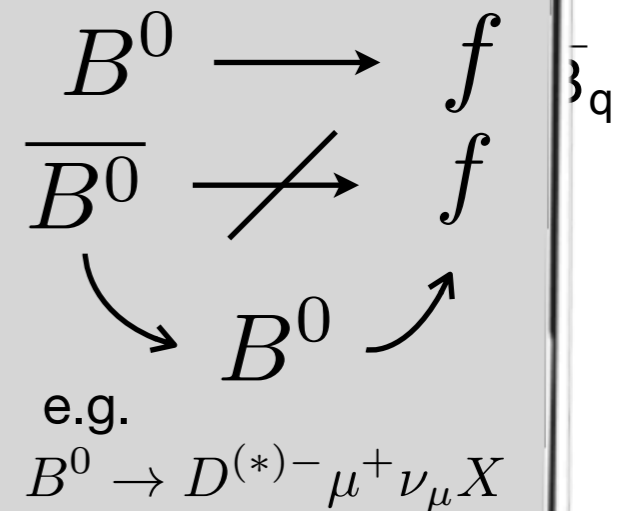
$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ | \bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - i\frac{\Gamma_{11}}{2} & M_{12} - i\frac{\Gamma_{12}}{2} \\ M_{21} - i\frac{\Gamma_{21}}{2} & M_{22} - i\frac{\Gamma_{22}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |B_q(t)\rangle \\ | \bar{B}_q(t)\rangle \end{pmatrix}$$

- Gli autostati degli

$$\mathcal{P}(\bar{B} \rightarrow B) \stackrel{?}{\neq} \mathcal{P}(B \rightarrow \bar{B})$$

- Utilizzando decadimenti dei mesoni  $B$  *flavor-specifici* (e.g. semileptonici):

$$a_{sl} = \frac{N(\bar{B} \rightarrow B \rightarrow f) - N(B \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{f})}{N(\bar{B} \rightarrow B \rightarrow f) + N(B \rightarrow \bar{B} \rightarrow \bar{f})}$$



- Osservazioni

- Predizioni del Modello Standard:

$$a_{sl}^s = (2.22 \pm 0.27) \times 10^{-5}$$

$$a_{sl}^d = (-4.7 \pm 0.6) \times 10^{-4}$$

[A. Lenz and U. Nierste, arXiv:hep-ph/0612167.](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0612167)

[M. Artuso, G. Borissov A. Lenz arXiv:1511.09466](https://arxiv.org/abs/1511.09466)

$$\Delta m \propto (V_{tb}^* V_{tq})^2$$

# Asimmetrie

## semileptoniche $a_{sl}^s$ , $a_{sl}^d$

[Phys. Lett. B 728 \(2014\) 607-615](#)

[Phys. Rev. Lett. 114 \(2015\) 041601](#)

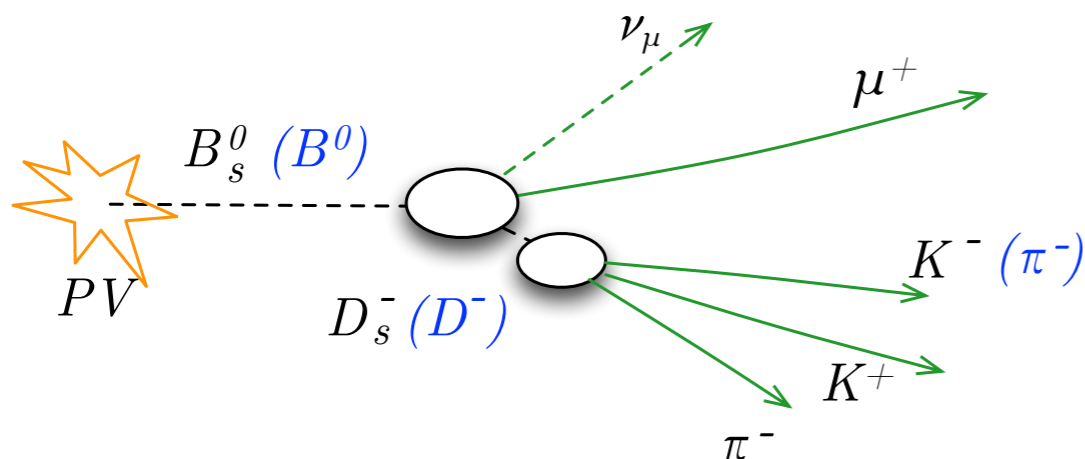
- Asimmetria di carica dello stato finale, senza distinguere il sapore del mesone  $B$

$$A_{\text{meas}}(t) = \frac{\Gamma(f, t) - \Gamma(\bar{f}, t)}{\Gamma(f, t) + \Gamma(\bar{f}, t)} = \frac{a_{sl}}{2} + A_D - \left( A_P + \frac{a_{sl}}{2} \right) \frac{\cos(\Delta mt)}{\cosh(\Delta\Gamma t/2)}$$

- Asimmetrie di ricostruzione/rivelazione

$$A_D = \frac{\epsilon(f) - \epsilon(\bar{f})}{\epsilon(f) + \epsilon(\bar{f})}$$

- Muoni, Kaoni e Pioni nello stato finale
- Valutate con tecniche data-driven su campioni di calibrazione

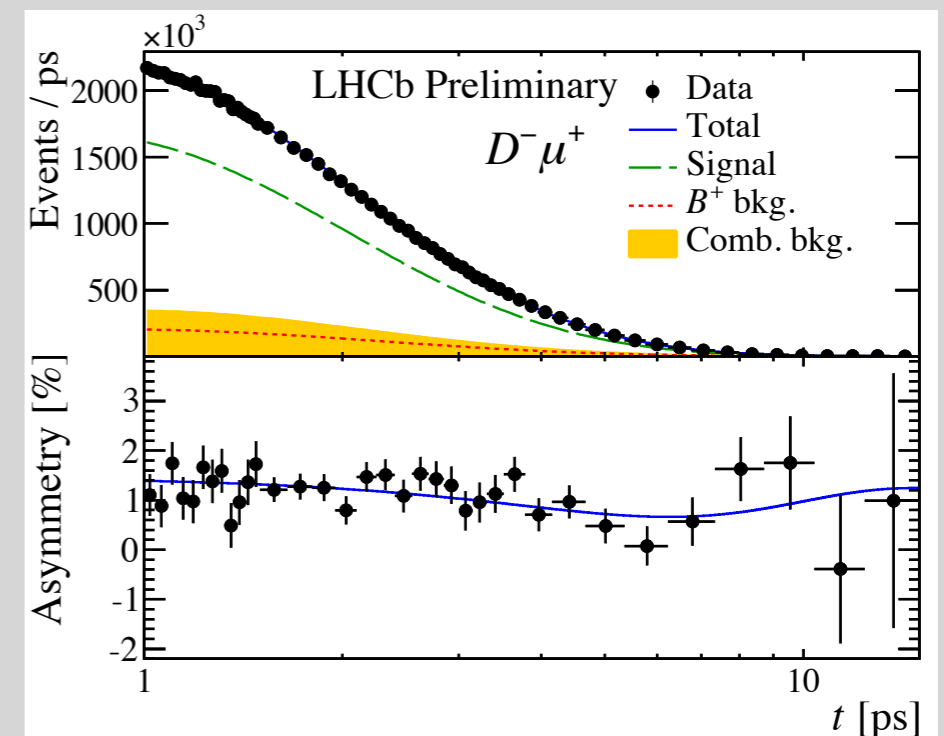


Decadimenti  $B_s^0 \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu_\mu X$  e  $B^0 \rightarrow D^{(*)-} \mu^+ \nu_\mu X$  usati per misurare  $a_{sl}^s$  e  $a_{sl}^d$

- Asimmetria di produzione dei  $B$

$$A_P = \frac{\sigma(\bar{B}) - \sigma(B)}{\sigma(\bar{B}) + \sigma(B)}$$

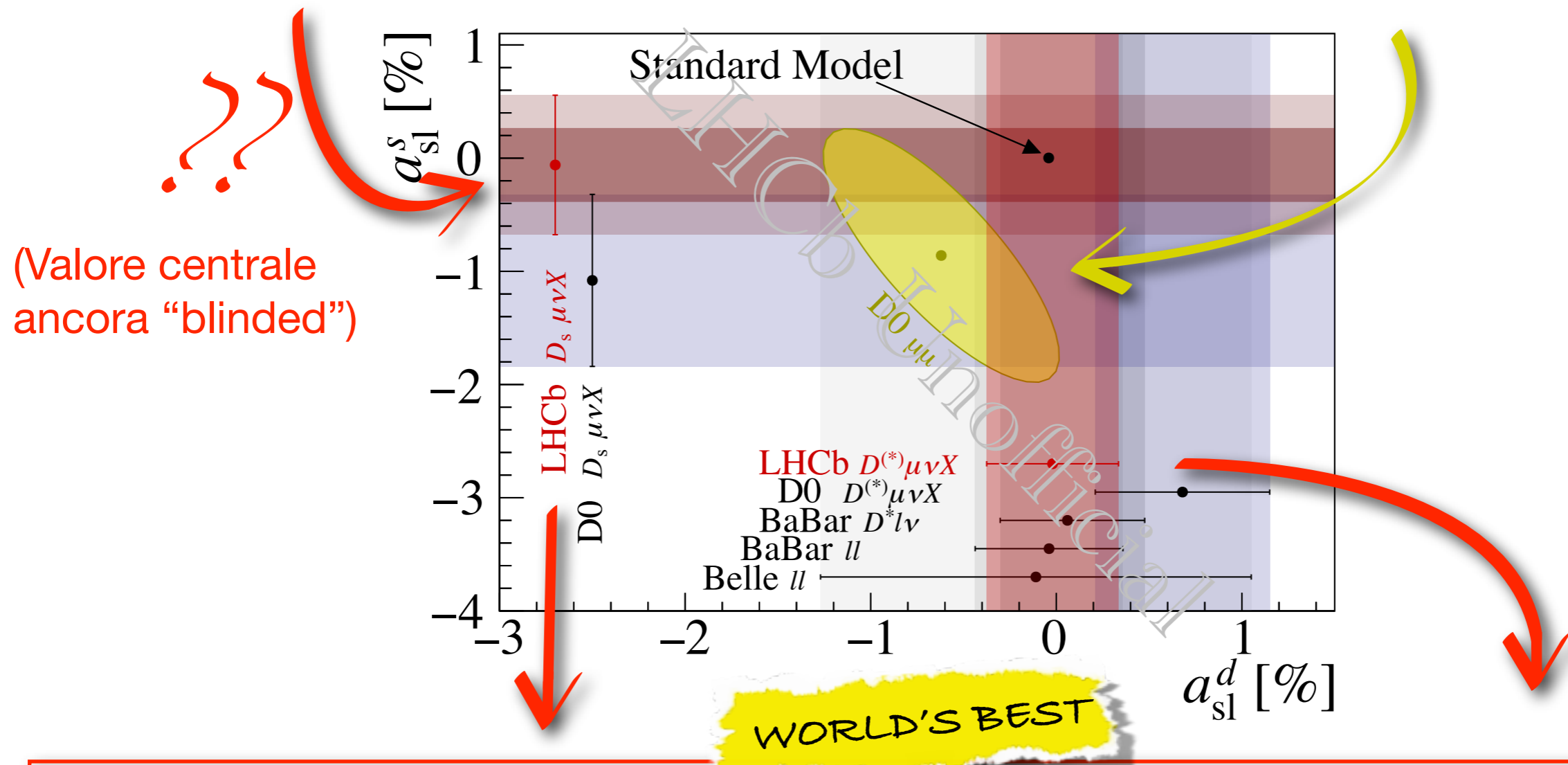
- rapida oscillazione del  $B_s \rightarrow$  analisi integrata nel tempo di decadimento
- oscillazione lenta del  $B_d \rightarrow$  fit al tempo di decadimento per separare  $A_P$  e  $a_{sl}^d$



# Attuale status sperimentale

Incerteza stimata per la misura di  $a_{sl}^s$  di LHCb con tutto il campione del Run-I

Misura dell'esperimento D0 di non-zero CPV ( $\sim 3\sigma$ ) nell'analisi di-muonica [PRD89 \(2014\) 012002](https://arxiv.org/abs/1312.5347)



(Valore centrale ancora "blinded")

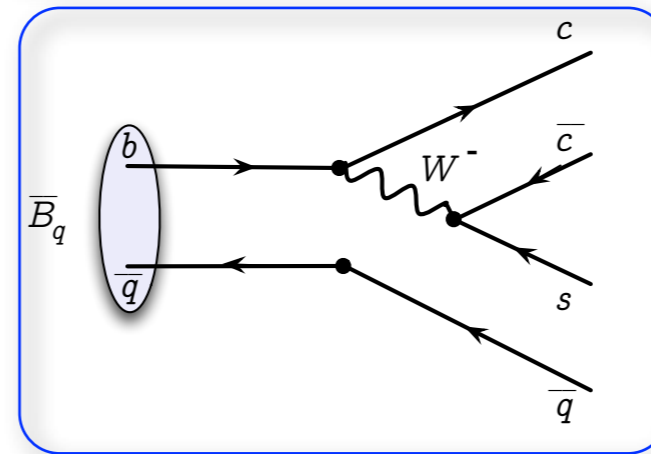
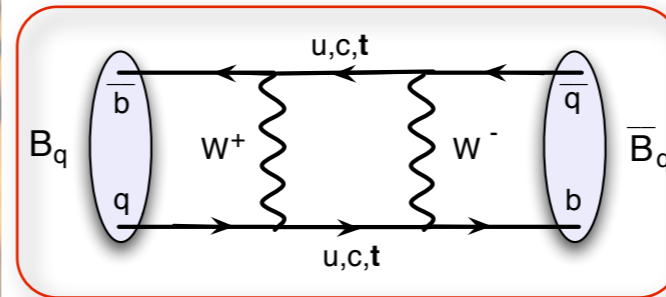
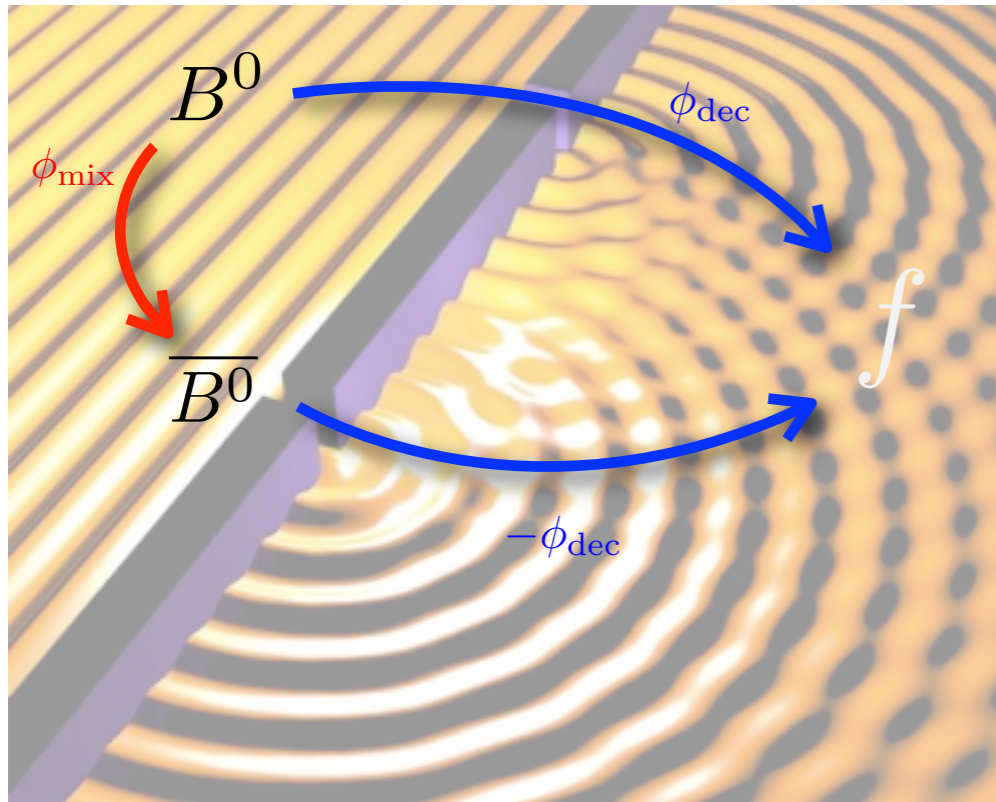
WORLD'S BEST

$$a_{sl}^s = (-0.06 \pm 0.50(\text{stat}) \pm 0.36(\text{syst}))\% \quad a_{sl}^d = (-0.02 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.30(\text{syst}))\%$$

[Phys. Lett. B 728 \(2014\) 607-615](https://arxiv.org/abs/1312.5347)

[Phys. Rev. Lett. 114 \(2015\) 041601](https://arxiv.org/abs/1312.5347)

# Violazione di CP nell'interferenza tra due ampiezze



$$\phi_q = \phi_{\text{mix}} - 2\phi_{\text{dec}}$$

$$\phi_q = -2 \left( -\frac{V_{cb}V_{cq}^*}{V_{tb}V_{tq}^*} \right) = 2\beta_{(s)}$$

trascurando il contributo di penguin diagrams

- “Mixing induced”  $CP$  : nell'interferenza tra l'ampiezza del decadimento diretto del mesone e decadimento del mesone dopo l'oscillazione di sapore

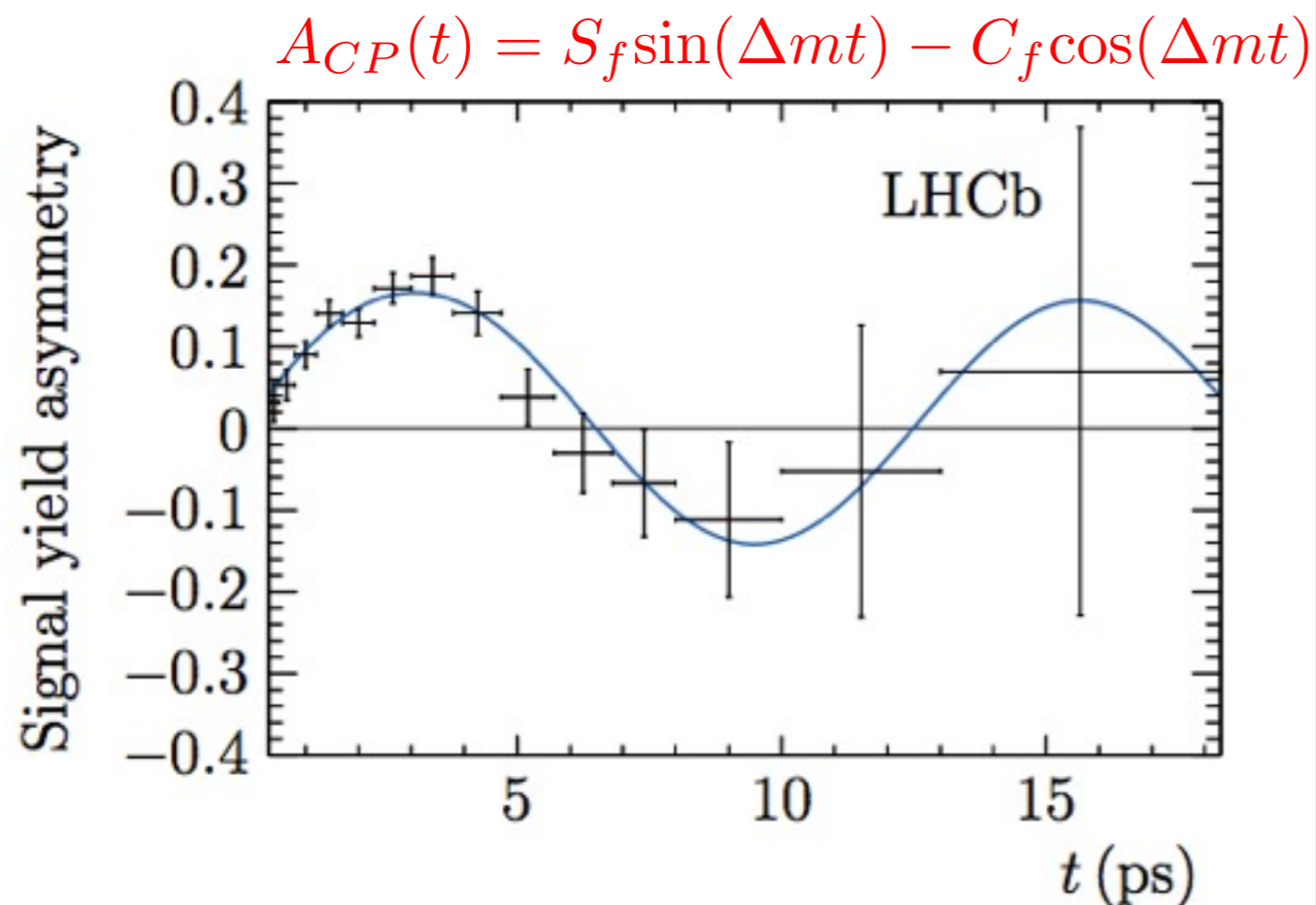
- Considerando il sistema del  $B^0$ , decadimenti  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$

$$\begin{aligned} A_{CP}(t) &= \frac{\Gamma_{B^0 \rightarrow f}(t) - \Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow f}(t)}{\Gamma_{B^0 \rightarrow f}(t) + \Gamma_{\bar{B}^0 \rightarrow f}(t)} \\ &= S_f \sin(\Delta m t) - C_f \cos(\Delta m t) \end{aligned}$$

$$\text{with } \Delta\Gamma = 0 \quad S_{J/\psi K_S^0} \approx \sin(2\beta)$$

# Misura di $\sin(2\beta)$

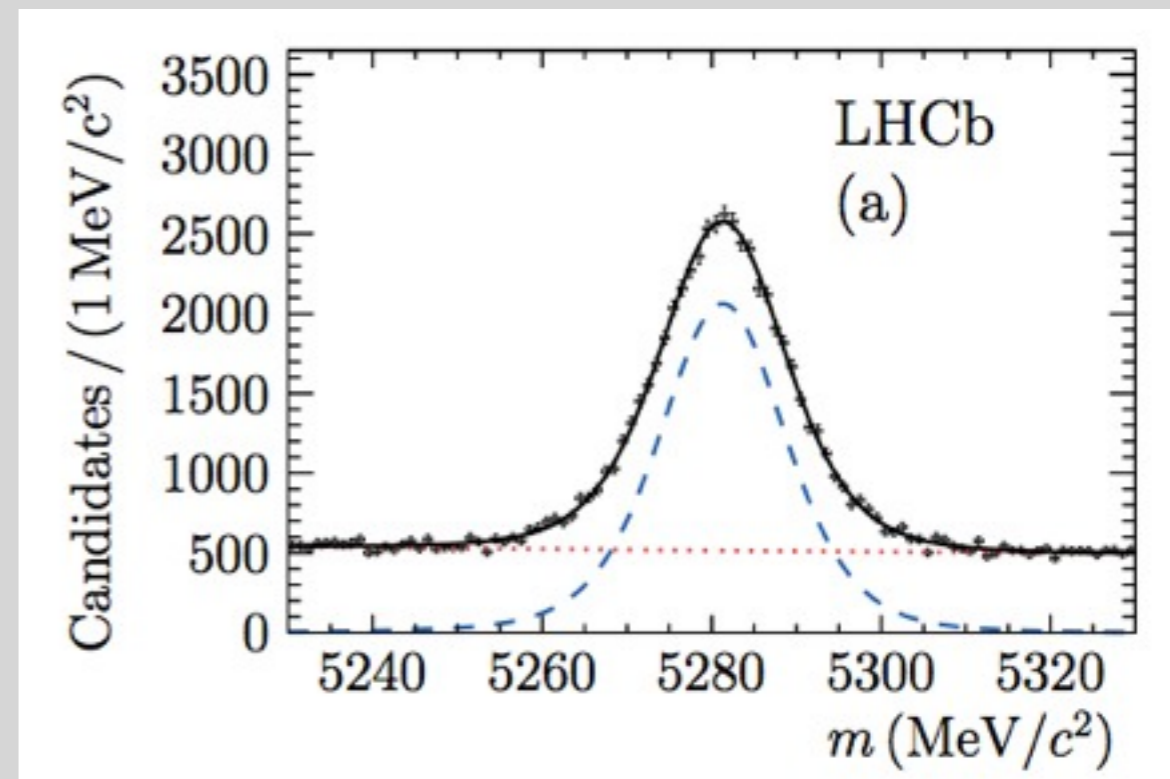
- Osservabili estratte con un fit unbinned di maximum likelihood multidimensionale
- Gli effetti delle asimmetrie nel flavor tagging e nella produzione dei mesoni  $B$  sono presi in considerazione



- Consistente con la world average e precisione simile alle B-factories

[PRL 115, 031601 \(2015\)](#)

41560 tagged  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  candidates



$$S_{J/\psi K_S^0} \approx \sin(2\beta)$$

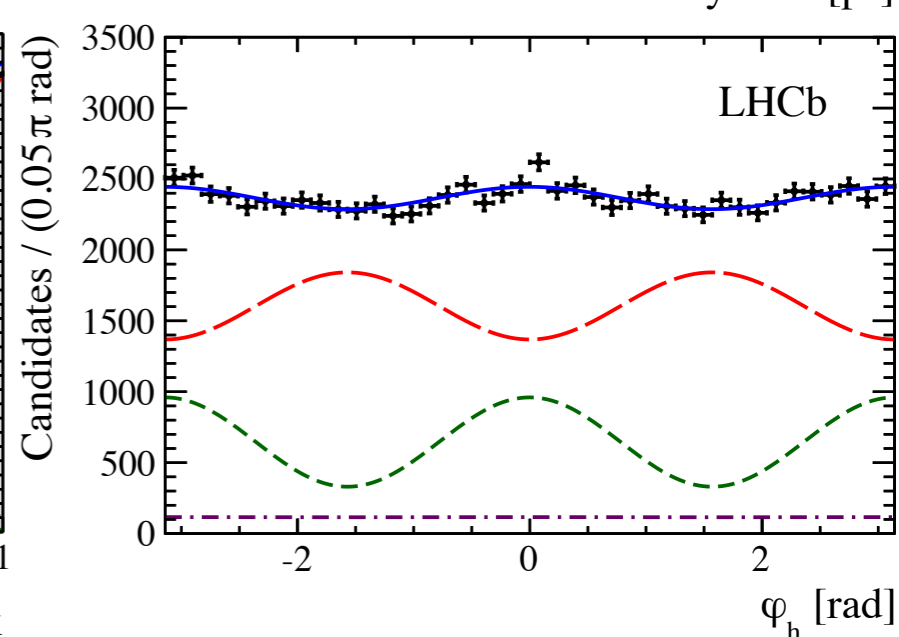
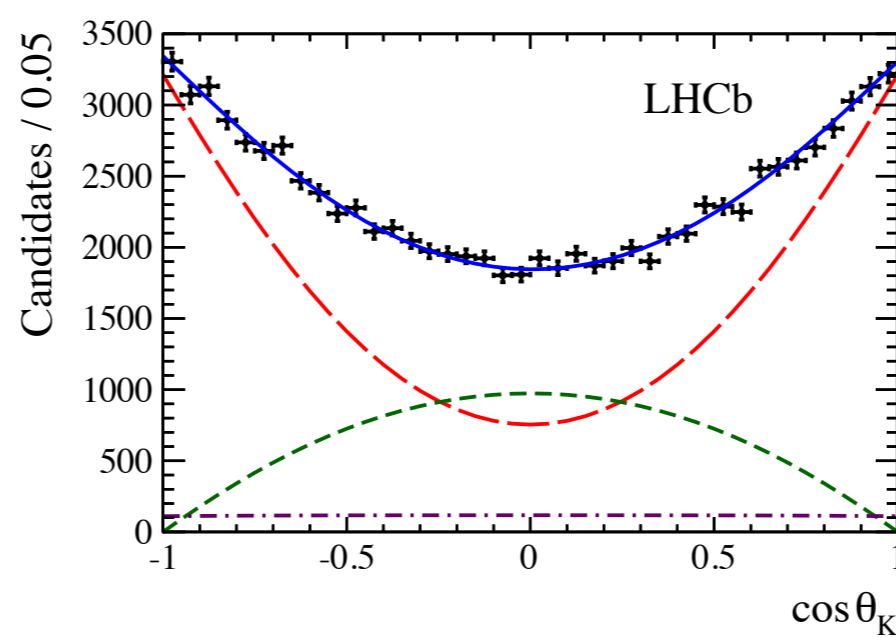
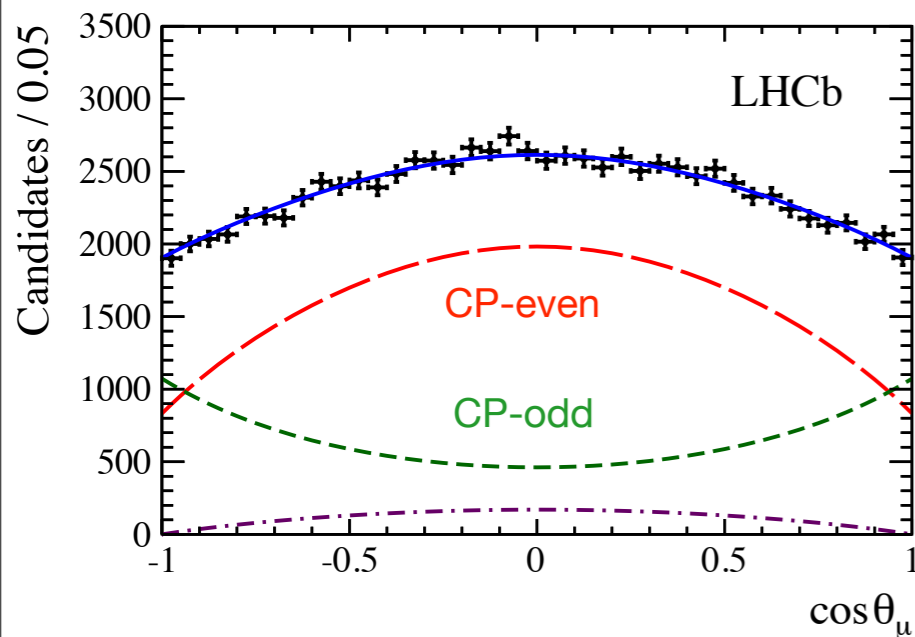
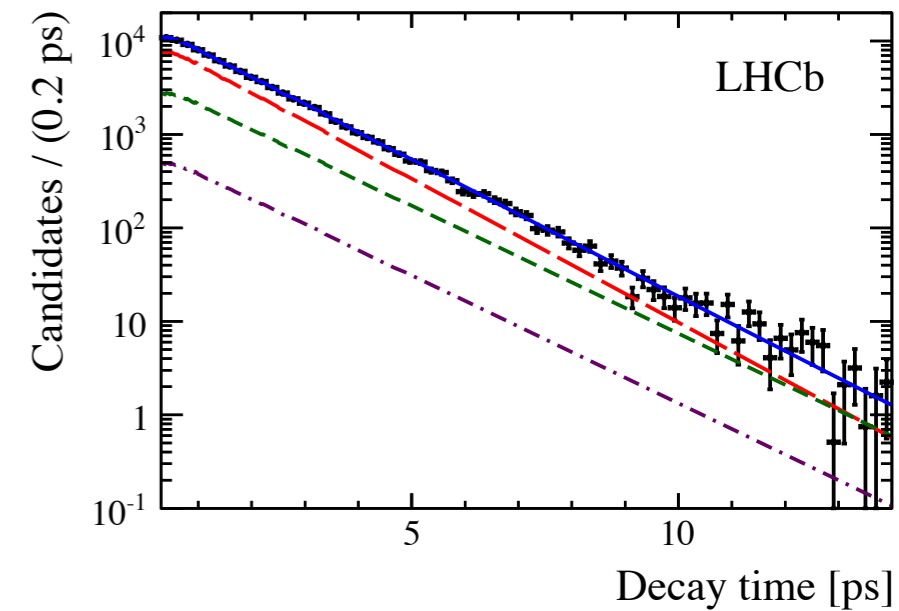
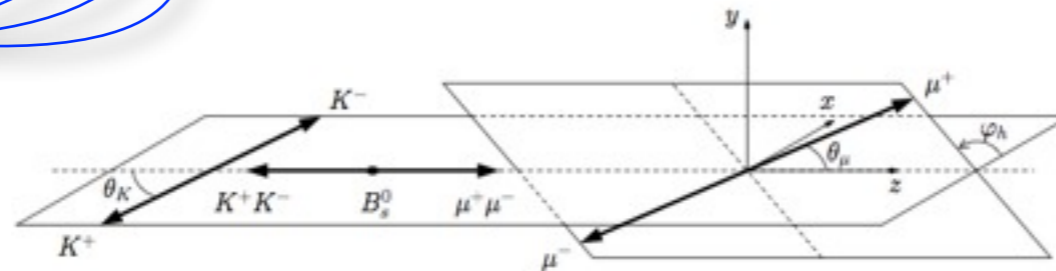
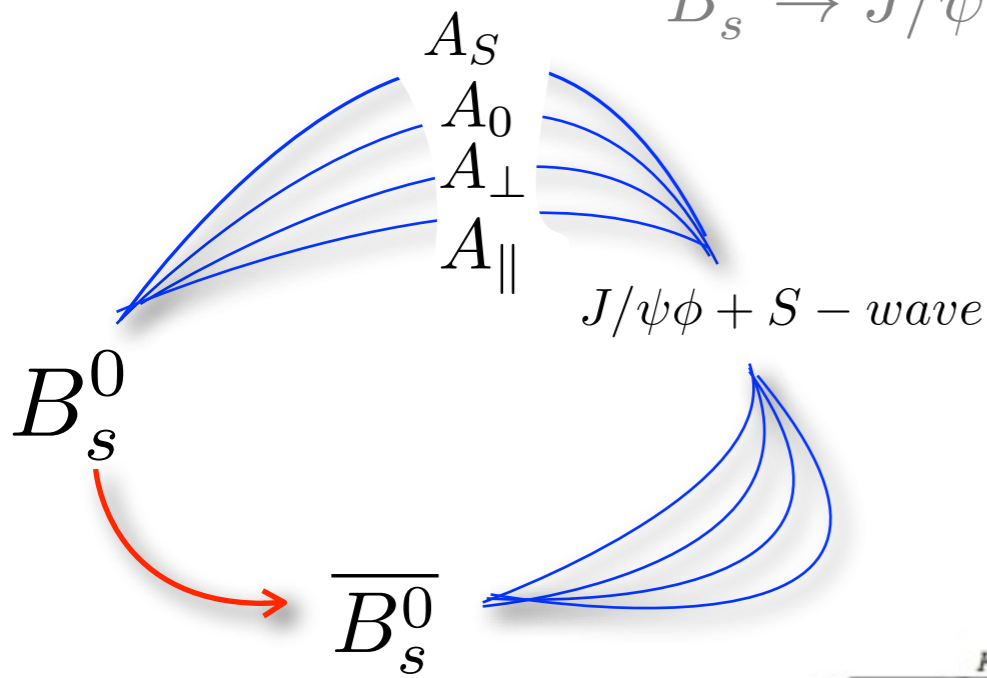
$$S_{J/\psi K_S^0} = +0.731 \pm 0.035 \pm 0.020$$
$$C_{J/\psi K_S^0} = -0.038 \pm 0.032 \pm 0.005$$

# Misure di $2\beta_s$

[PRL 114 \(2015\) 041801](#)

$B_s^0 \rightarrow J/\psi[\rightarrow \mu^+ \mu^-] \phi[\rightarrow K^+ K^-]$  96000 candidati

- Analisi angolare e del tempo di decadimento per separare gli autostati di  $CP$  nello stato finale





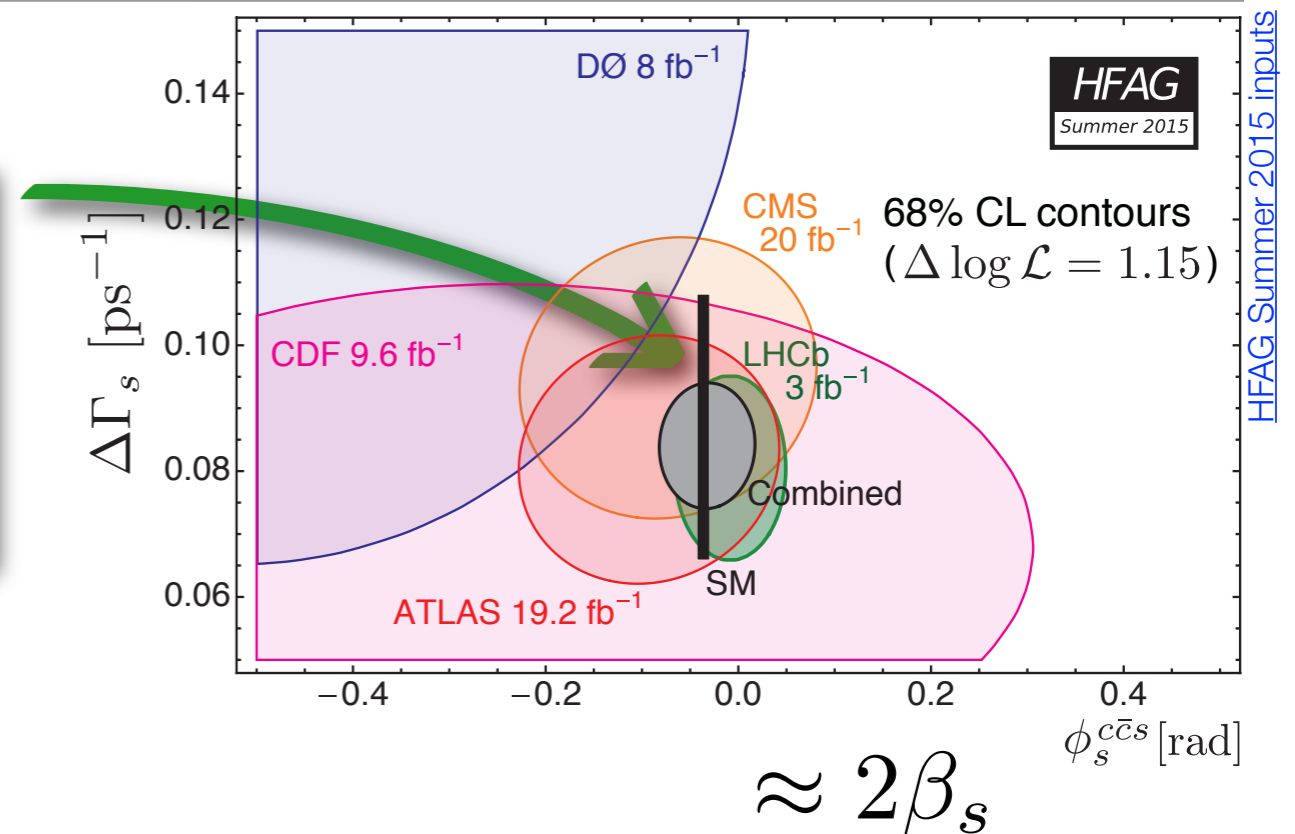
# Misure di $2\beta_s$

- Risultati:

$$B_s^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^- \quad \text{PRL 114 (2015) 041801}$$

$$B_s^0 \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \quad \text{PLB 736 (2014) 186}$$

$$B_s^0 \rightarrow D_s^- D_s^+ \quad \text{PRL 113 (2014) 211801}$$

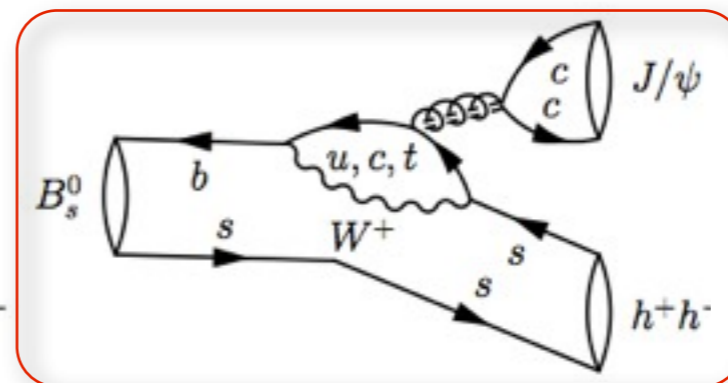
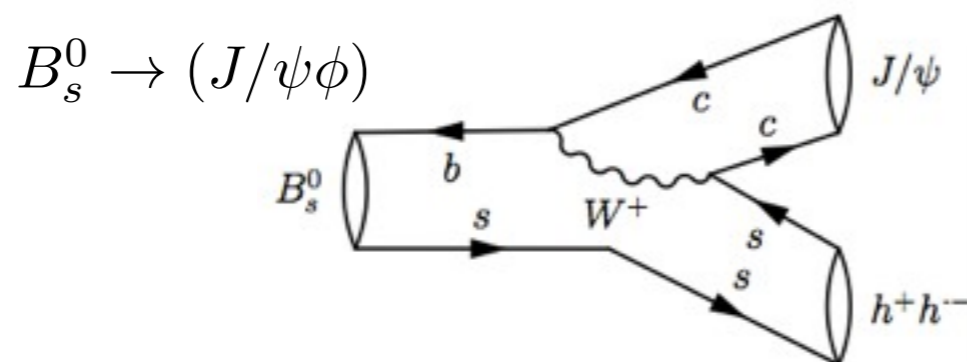


- Controllo del contributo dei penguin diagrams con l'analisi dei decadimenti

$$B_s^0 \rightarrow J/\psi \bar{K}^{*0} \text{ and } B^0 \rightarrow J/\psi \rho^0 \text{ (per ora trascurabili rispetto } 2\beta_s)$$

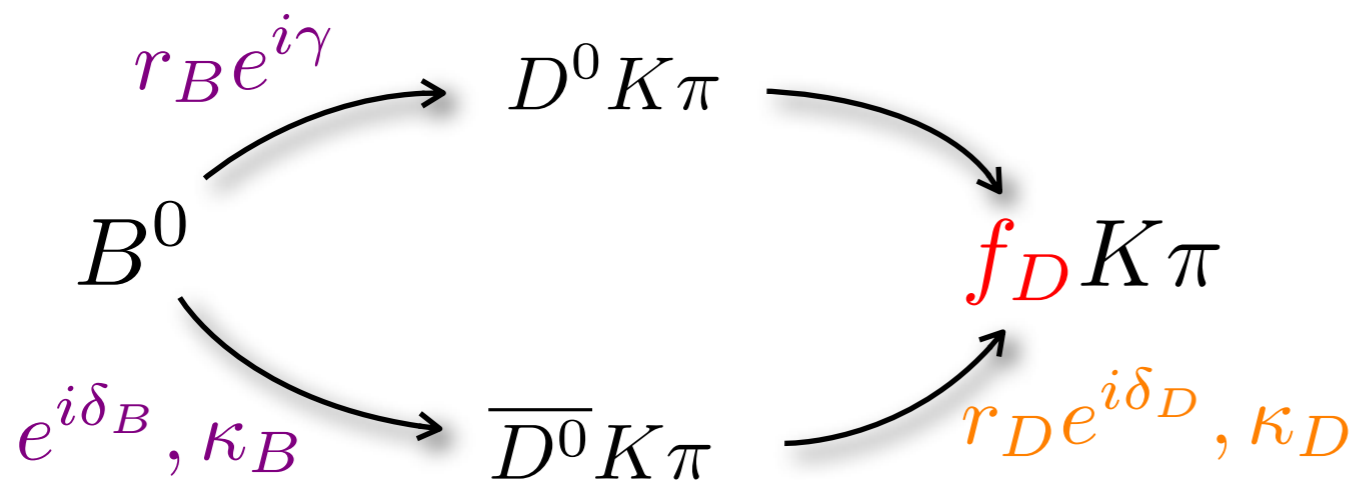
[JHEP 11 \(2015\) 082](#)

[PLB 742 \(2015\) 38](#)



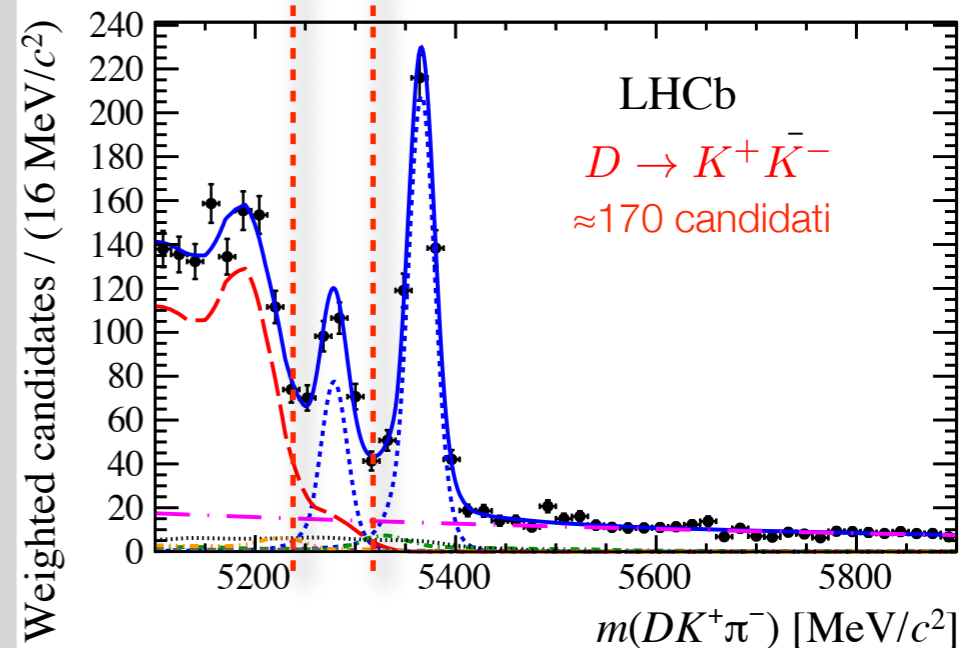
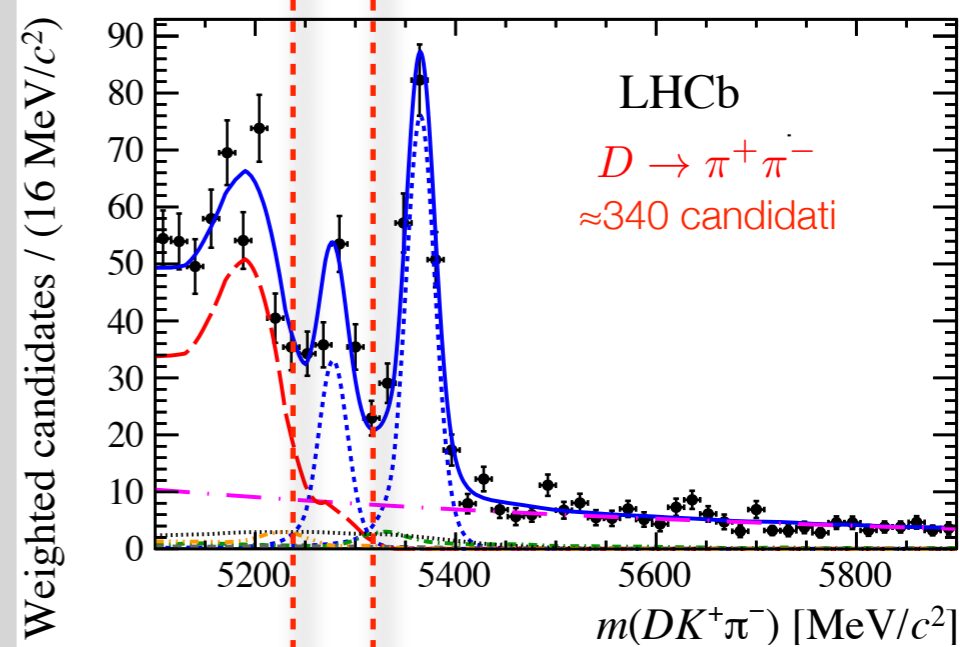
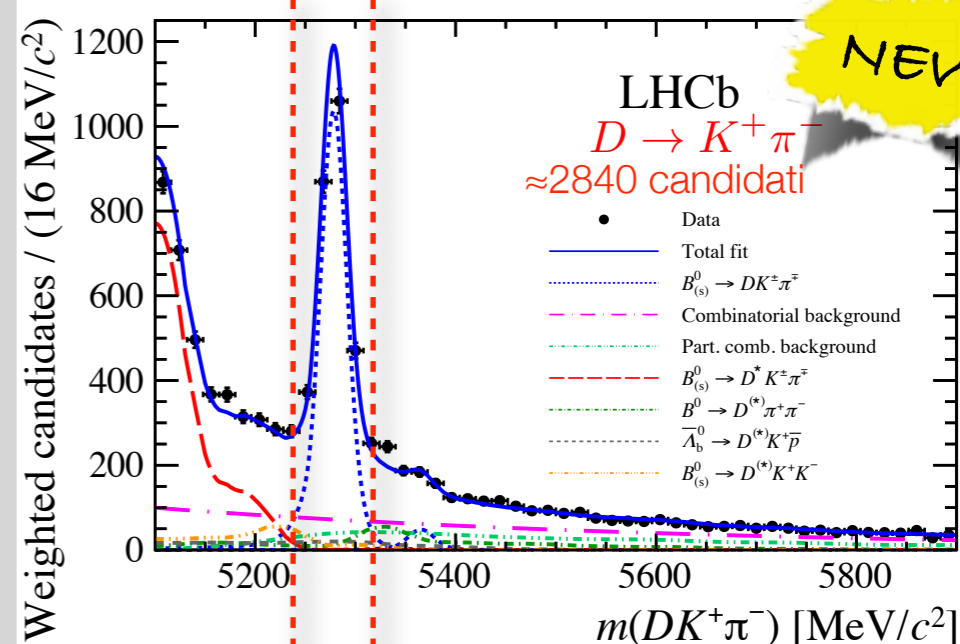
# Misure di $\gamma$

- Angolo CKM  $\gamma \equiv [-(V_{ud}V_{ub}^*)/(V_{cd}V_{cb}^*)]$
- Può essere determinato dall'interferenza tra due ampiezze  $B^+ \rightarrow D^0 X_{s,d}^+$  e  $B^+ \rightarrow \overline{D^0} X_{s,d}^+$  (e decadimenti c.c.), oppure  $B^0 \rightarrow D^0 K^+ \pi^-$  e  $B^0 \rightarrow \overline{D^0} K^+ \pi^-$  (e c.c.) selezionando uno stato finale accessibile ad entrambi (processi "tree level")



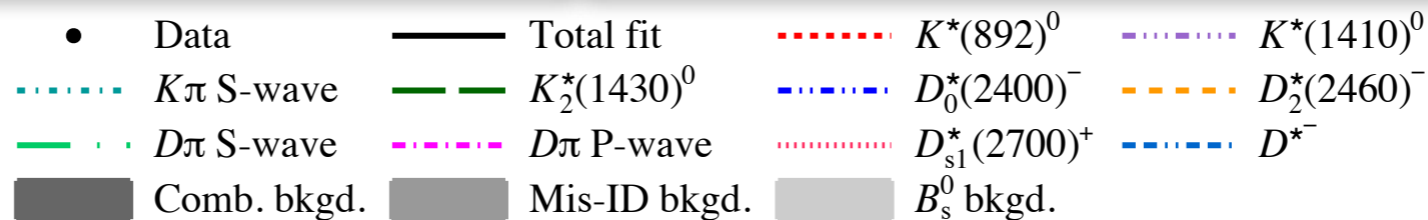
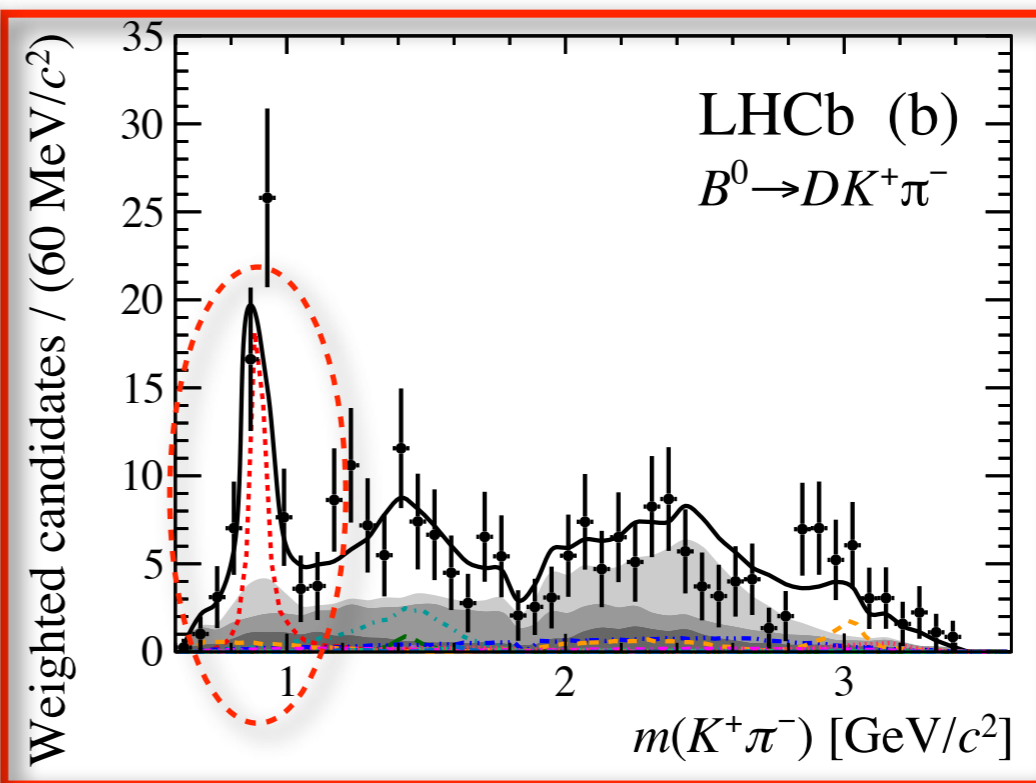
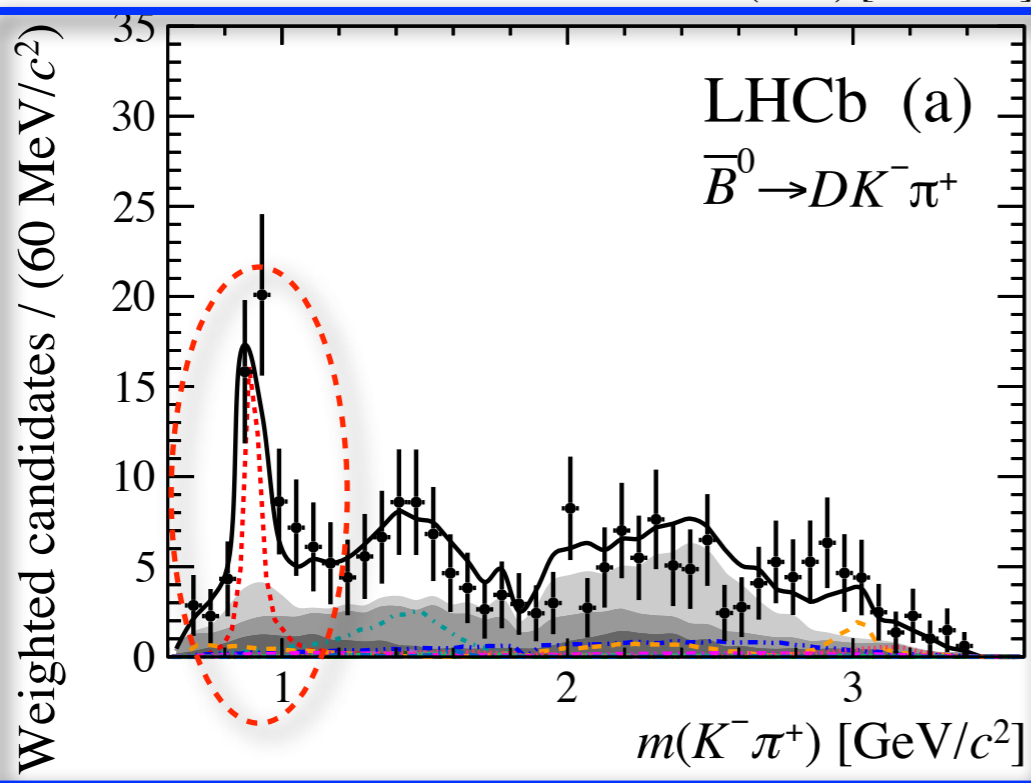
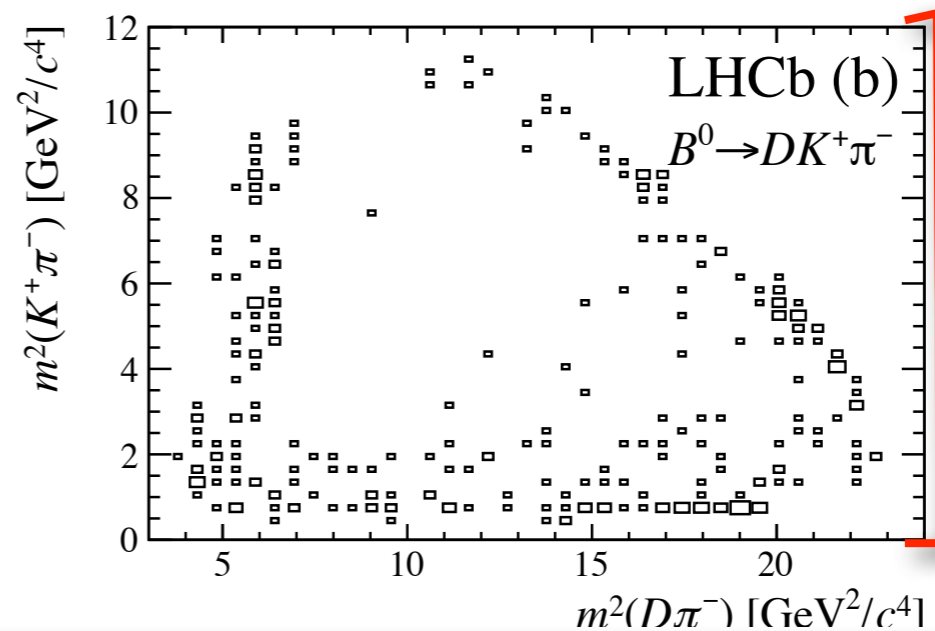
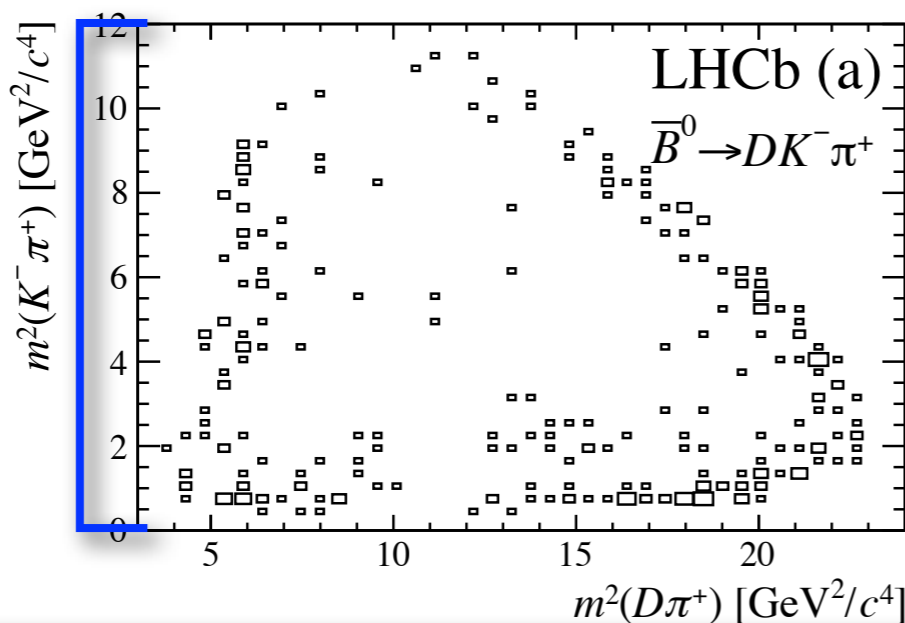
- Prima analisi del  $B^0 \rightarrow DK^+ \pi^-$  Dalitz-plot  
Nuova strategia per misurare  $\gamma$  dall'interferenza delle risonanze nel Dalitz-plot (sfortunatamente la statistica è bassa)

LHCb-PAPER-2015-059



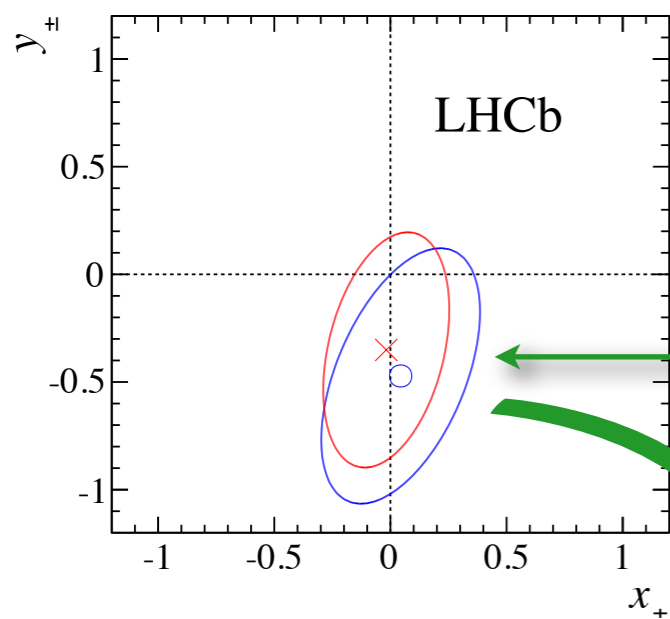
# $\gamma$ con $B^0 \rightarrow DK^+ \pi^-$

LHCb-PAPER-2015-059



# Misure di $\gamma$

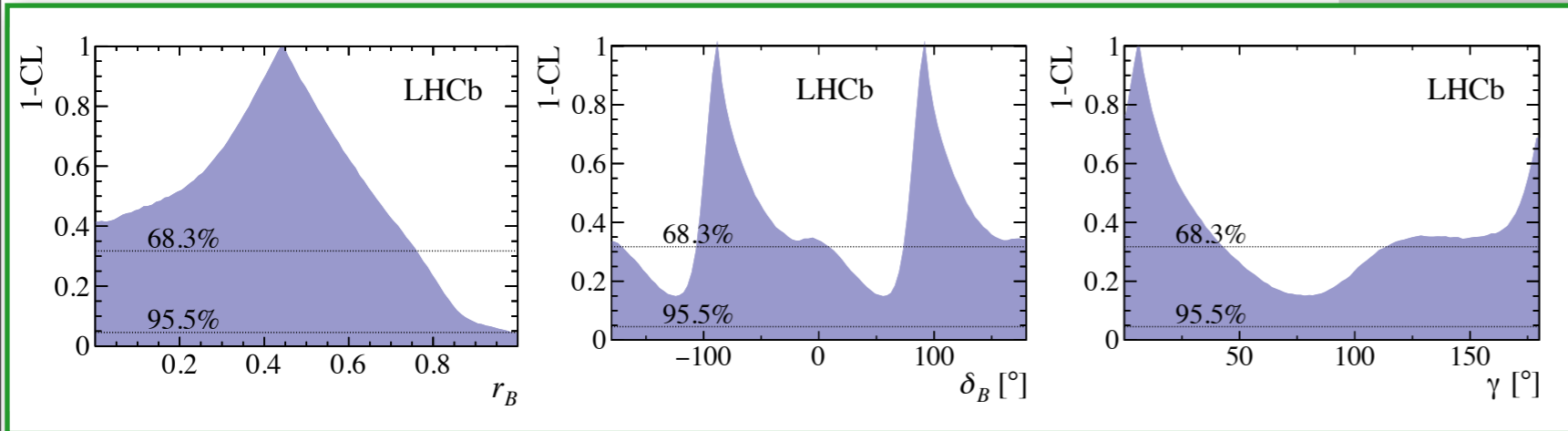
- Dai decadimenti  $B^0 \rightarrow DK^*(892)^0$  sono estratte le asimmetrie di CP:



$$x_{\pm} = r_B \cos(\delta_B \pm \gamma)$$

$$y_{\pm} = r_B \sin(\delta_B \pm \gamma)$$

Nessuna evidenza di CPV



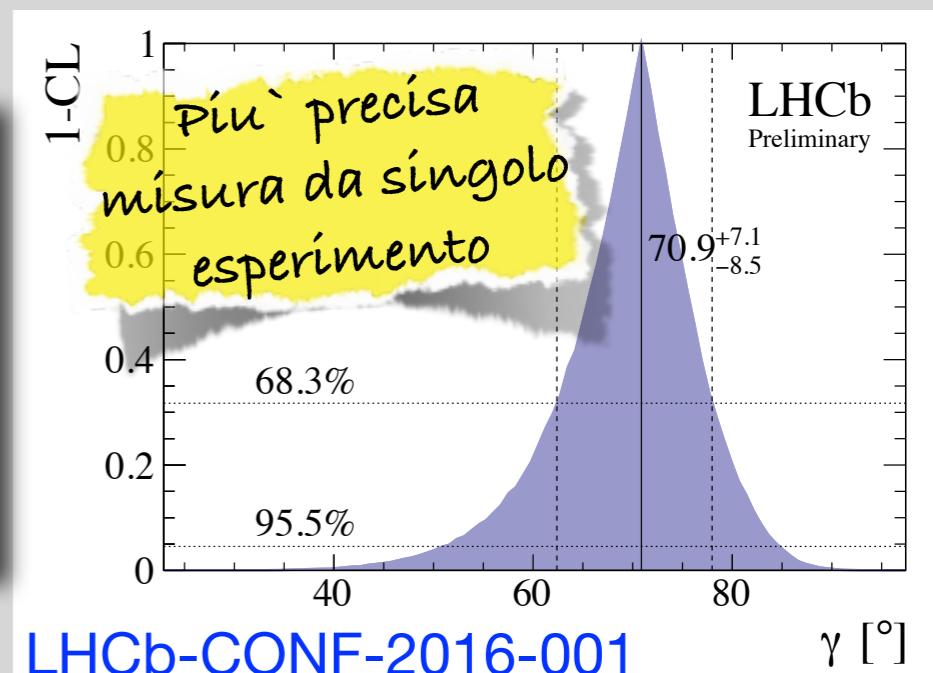
- Nessun valore di  $\gamma$  è escluso al 95% C.L., ma questo è un nuovo metodo, importante per Run-II e oltre

L'incertezza su  $\gamma$  è principalmente statistica  $\Rightarrow$  si trae vantaggio dalla combinazione di diverse misure

Metodi utilizzati (finora):

- ✓ Con decadimenti  $B^0 \rightarrow Dh(hh)$ 
  - $D \rightarrow f_{CP}$  **(GLW)**
  - $D \rightarrow f_{\text{quasi-flavor-specific}}$  **(ADS)**
  - $D \rightarrow 3\text{-body}$  **(GGSZ)**
- ✓ Analisi del tempo di decadimento di  $B_s^0 \rightarrow D_s^- K^+$

Nuova combinazione  $\gamma = 70.9^{+7.1}_{-8.5}$



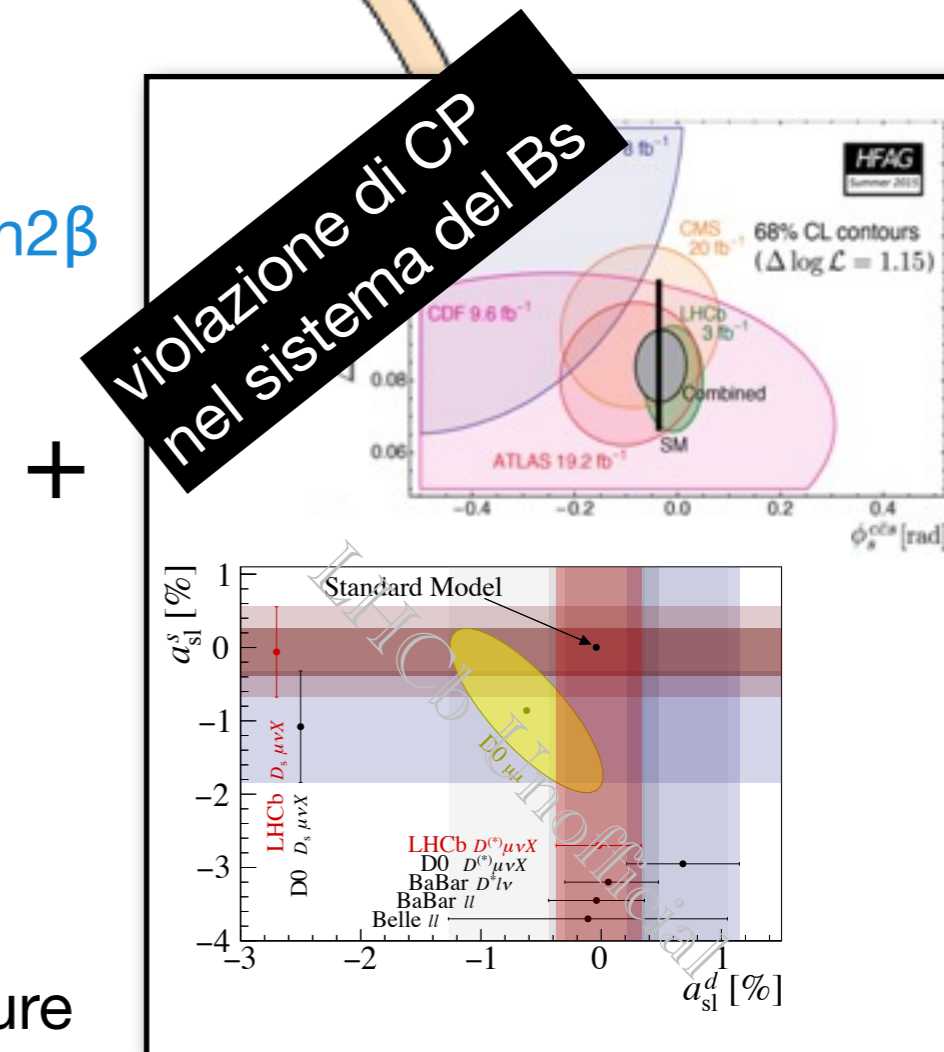
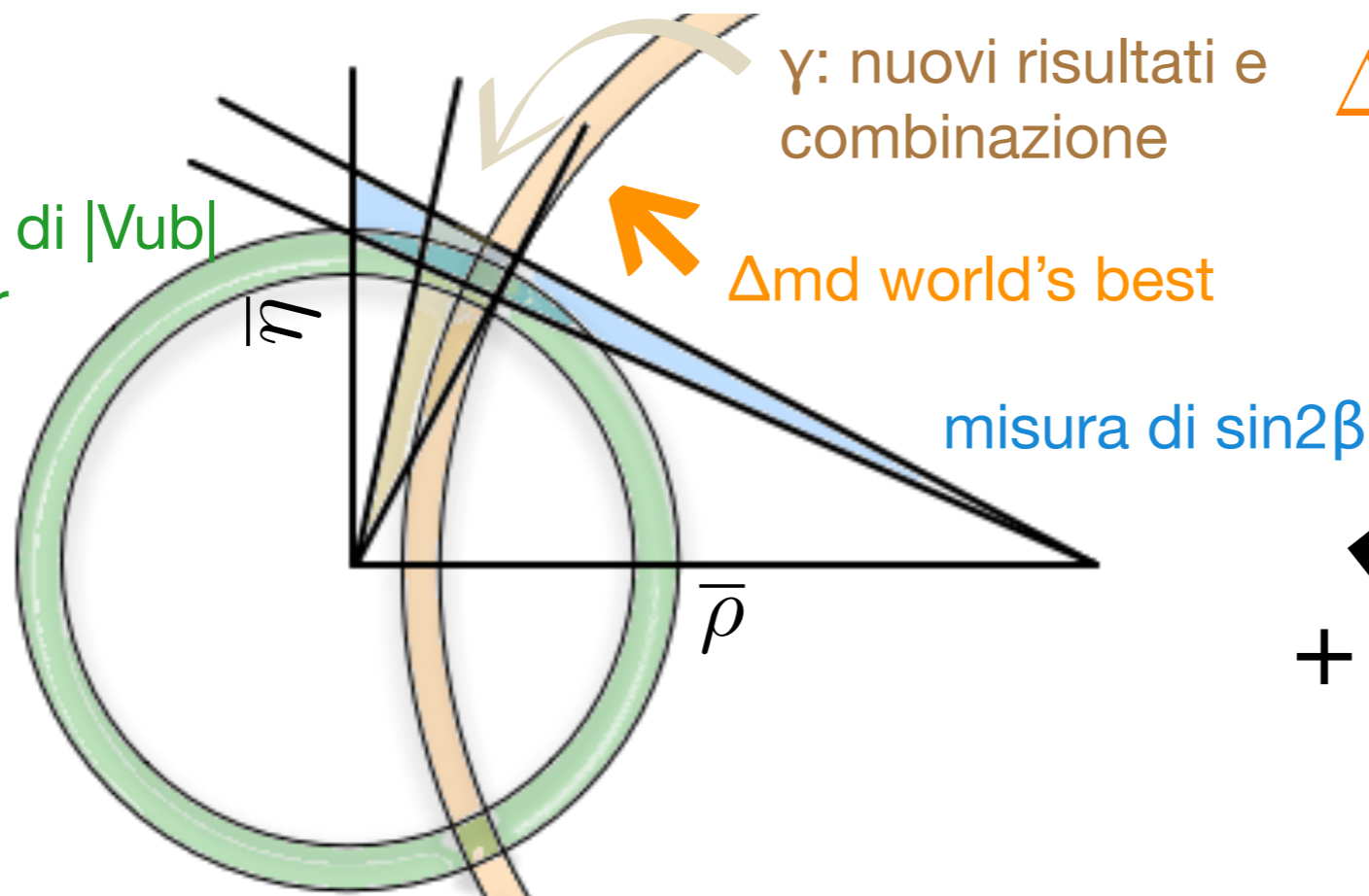
[LHCb-CONF-2016-001](#)

- Altri nuovi risultati: [LHCb-PAPER-2016-003](#)  
[LHCb-PAPER-2016-006](#) [LHCb-PAPER-2016-007](#)

# Conclusioni

- Misure di precisione utilizzando i campioni di LHCb di decadimenti di adroni pesanti moltiplicano i **vincoli complementari alla matrice CKM**

Prima misura di  $|V_{ub}|$  ad un collider adronico



- Statistica del Run-I non ancora completamente sfruttata  $\Rightarrow$  **nuovi risultati in arrivo!**
- LHCb si prepara per la nuova presa dati, e per le misure con la statistica del **Run-II!**

*Grazie per l'attenzione*