

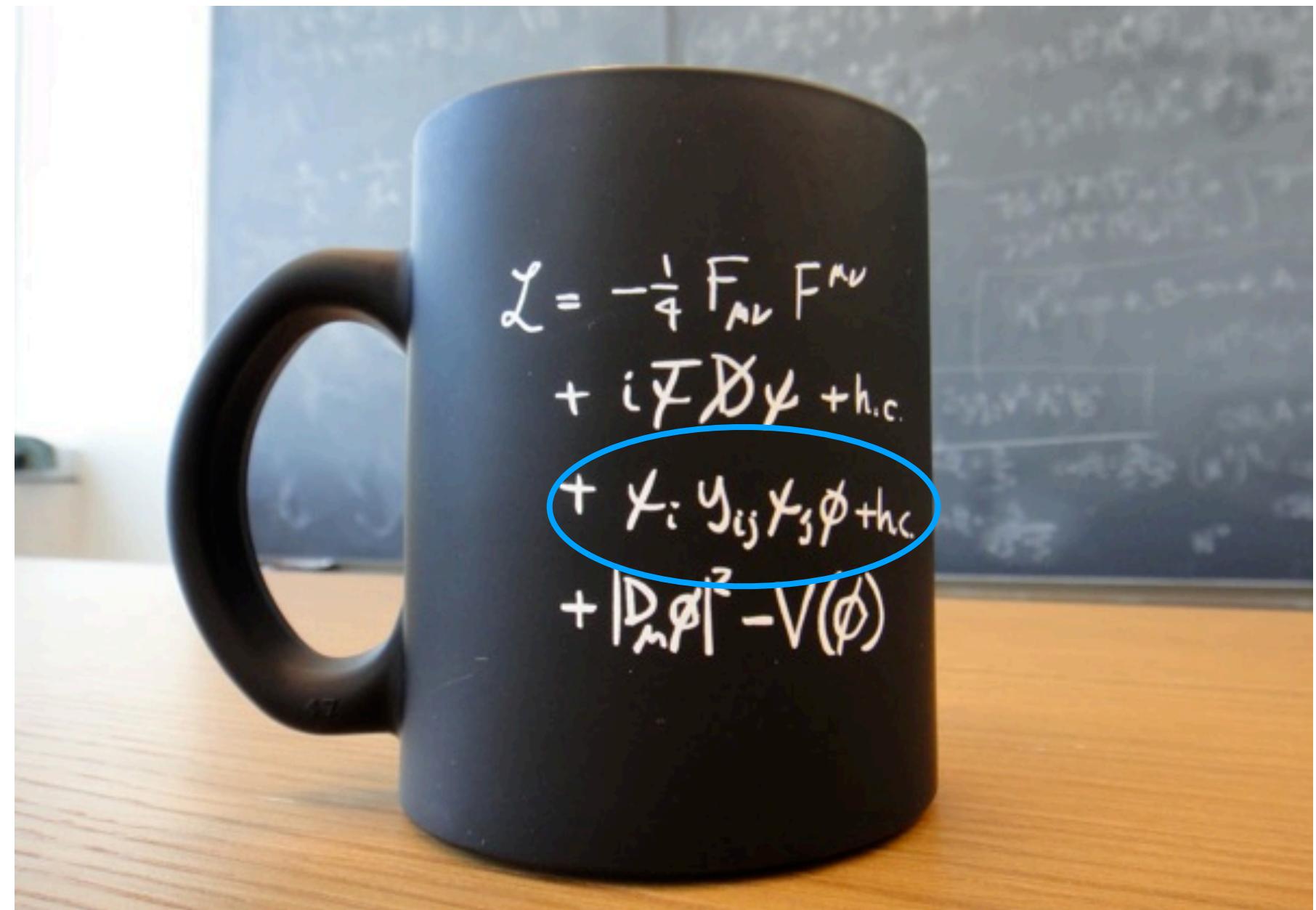
Misure dell'angolo Gamma a LHCb



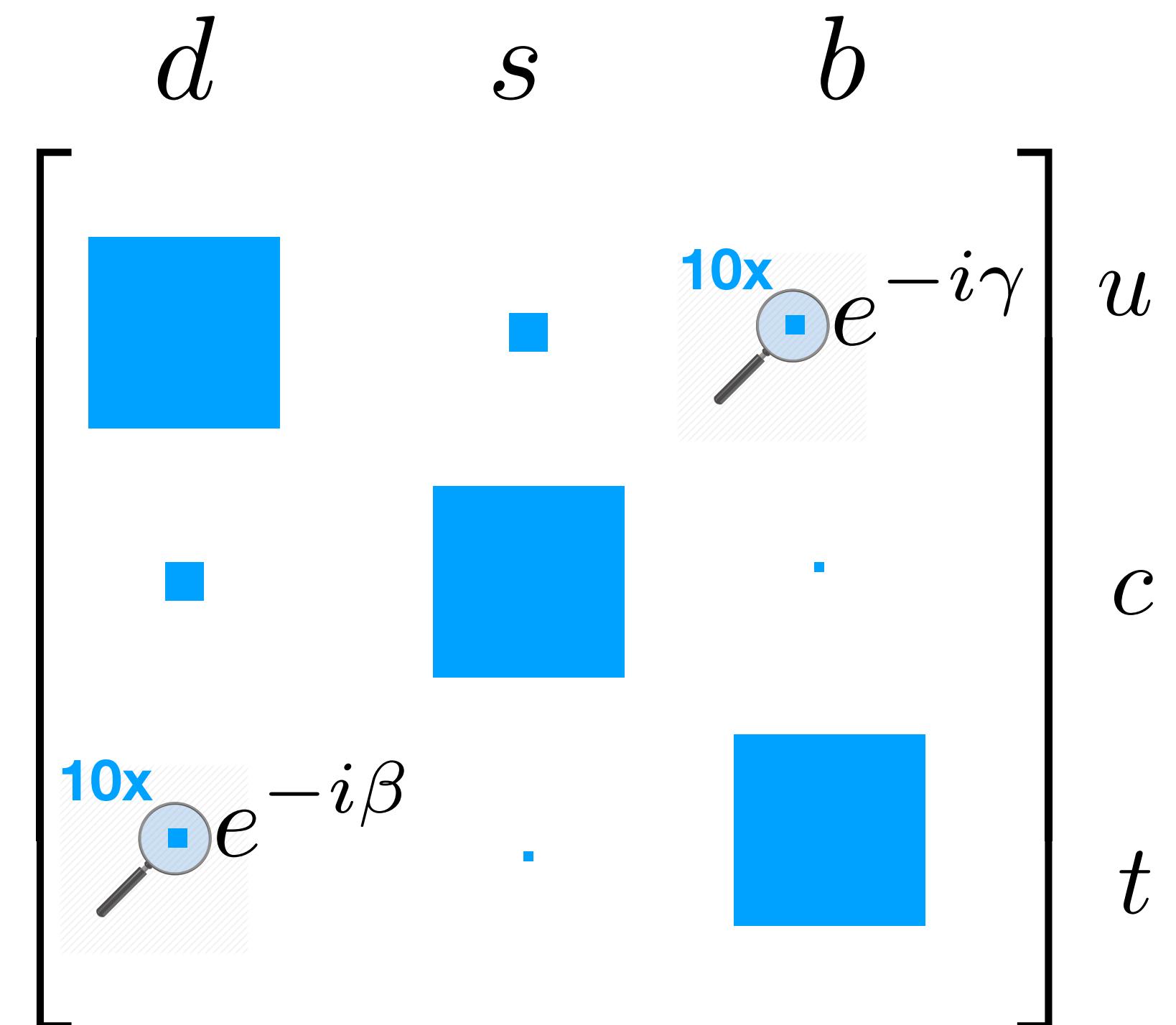
Michele Veronesi
IFAE 2019



Matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)



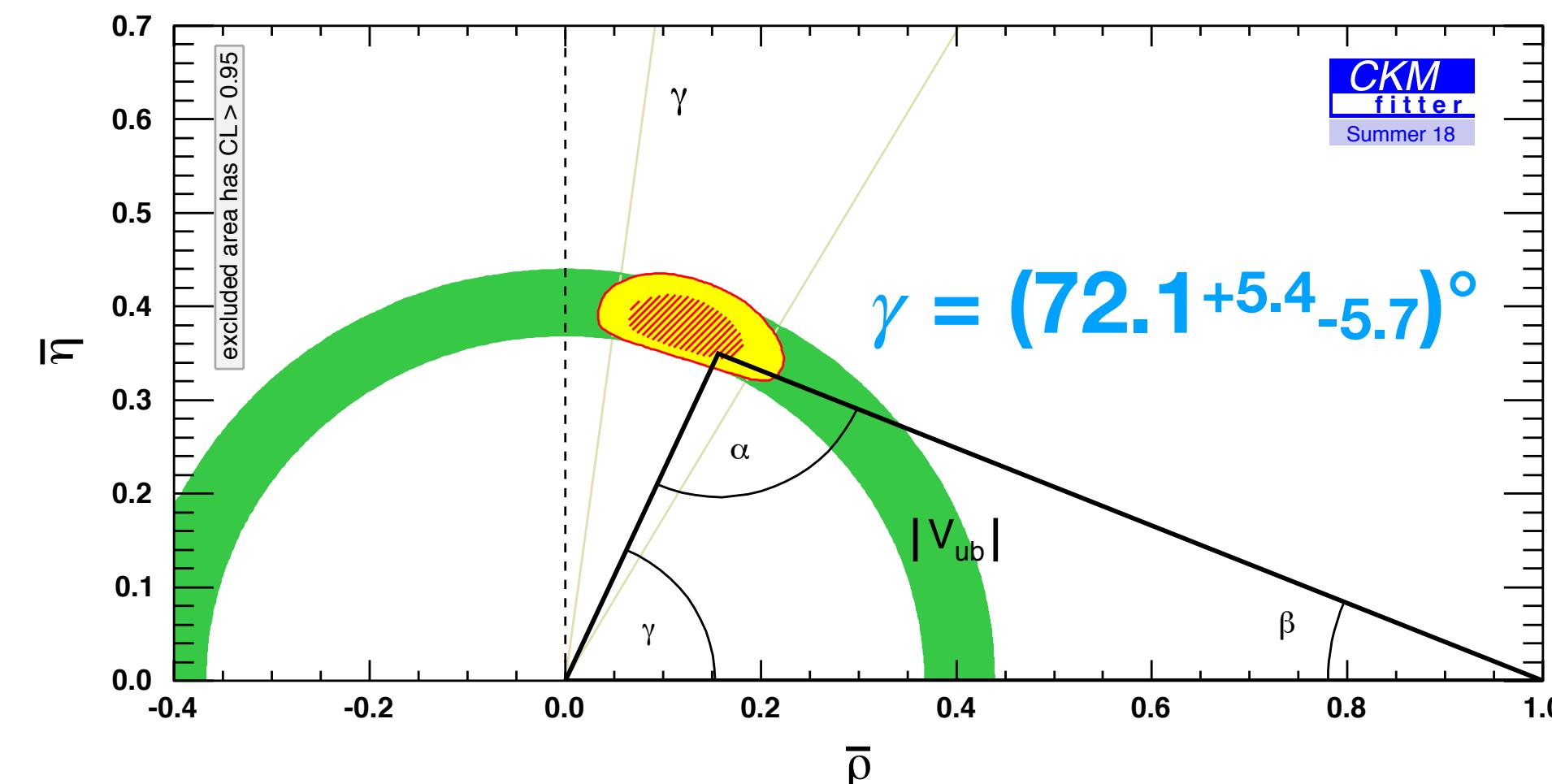
$$V_{\text{CKM}} = V_L^u V_L^{d\dagger} \approx$$



- Origina dalle **interazioni di Yukawa** dei quark nel Modello Standard
- Matrice **unitaria** contenente 3 parametri reali e 1 **fase complessa**

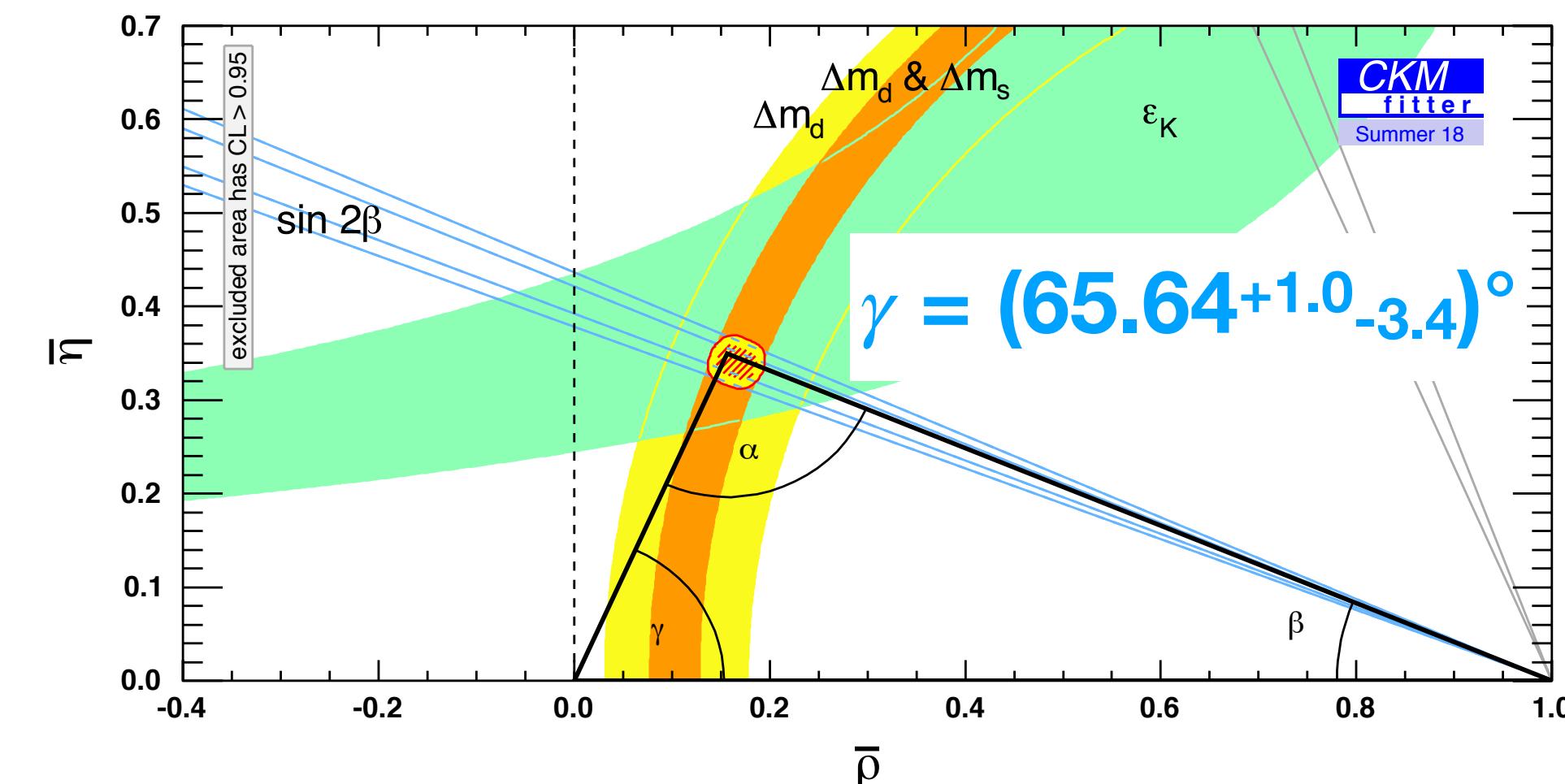
Angolo Gamma del Triangolo Unitario

Misure dirette



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

Misure indirette

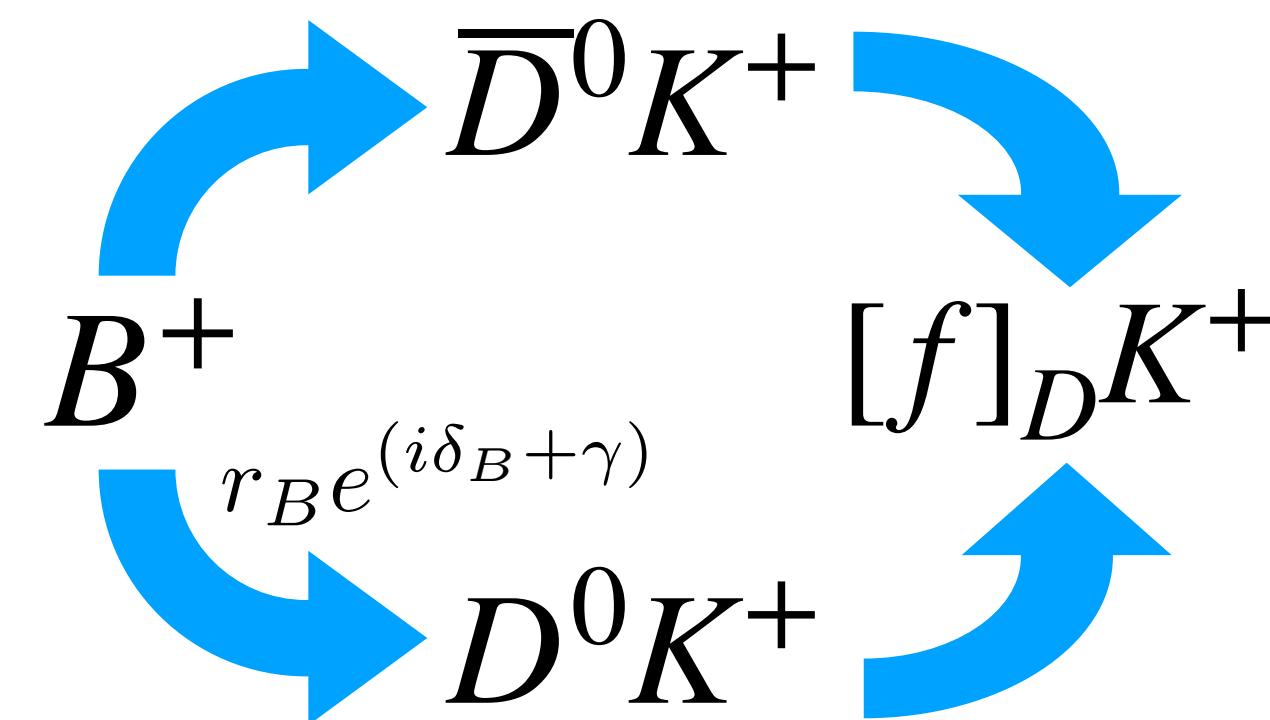


$$\beta = \arg \left[-\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*} \right] \simeq -\arg(V_{td})$$

- Unitarietà rappresentata come **Triangolo Unitario** nel piano complesso
- Gamma (γ) unico angolo determinato in **misure dirette** (no quark top, processi a livello “albero”)
- Confrontato con **misure indirette** (quark top in β e $\Delta m_d \& \Delta m_s$, processi di ordine superiore)

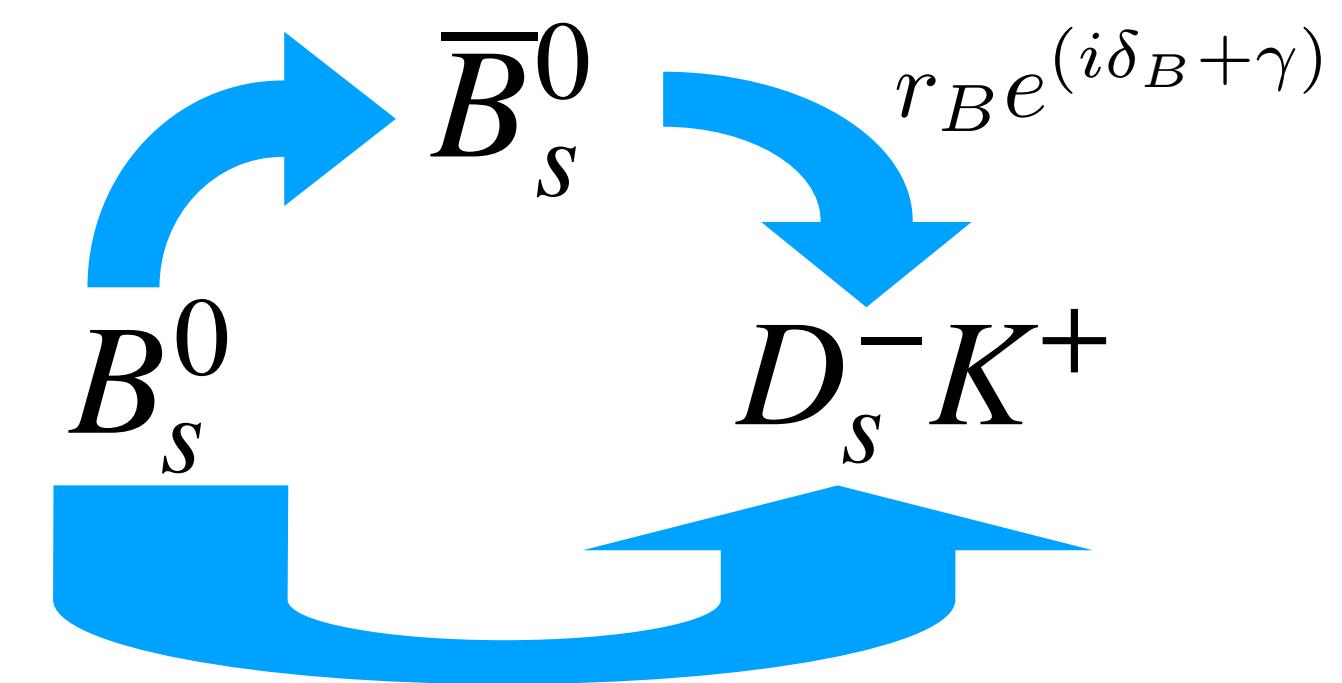
Misure dirette

Integrate nel tempo



vs

Dipendenti dal tempo



- Tasso di decadimento **totale** con D^0 e anti- D^0 nello stesso stato finale f

$$\Gamma(B^\pm \rightarrow DK^\pm) \propto 1 + r_B^2 + 2r_B \cos(\delta_B \pm \gamma)$$

- Tasso di decadimento **differenziale** con oscillazione e decadimento diretto

$$\frac{d\Gamma}{dt}(B_s^0(\bar{B}_s^0) \rightarrow D_s^- K^+) \propto \cosh\left(\frac{\Delta\Gamma_s}{2}\right) + A_f^{\Delta\Gamma} \sinh\left(\frac{\Delta\Gamma_s}{2}\right) \pm C_f \cos(\Delta m_s t) \mp S_f \sin(\Delta m_s t)$$

Interferenza fra due ampiezze di transizione con **differenza di fase forte** (δ) e **debole** (γ)

$$A_1/A_2 = r_B e^{i(\delta_B \pm \gamma)}$$

Osservabili

Integrate nel tempo

- Asimmetria di carica A^f e rapporto fra numero di eventi R^f

$$A^f = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow f]K^-) - \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow f]K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow f]K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow f]K^+)}$$

$$R^f = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow f]K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow f]K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow f]\pi^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow f]\pi^+)}$$

- Rapporto fra ampiezza soppressa (f_{sop}) e favorita (f_{fav})

$$R^\pm = \frac{\Gamma(B^\pm \rightarrow D[\rightarrow f_{\text{sop}}]K^\pm)}{\Gamma(B^\pm \rightarrow D[\rightarrow f_{\text{fav}}]K^\pm)}$$

vs

Dipendenti dal tempo

- Coefficienti delle equazioni di evoluzione temporale

$$C_f = \frac{1 - r_{D_s K}^2}{1 + r_{D_s K}^2} = -C_{\bar{f}},$$

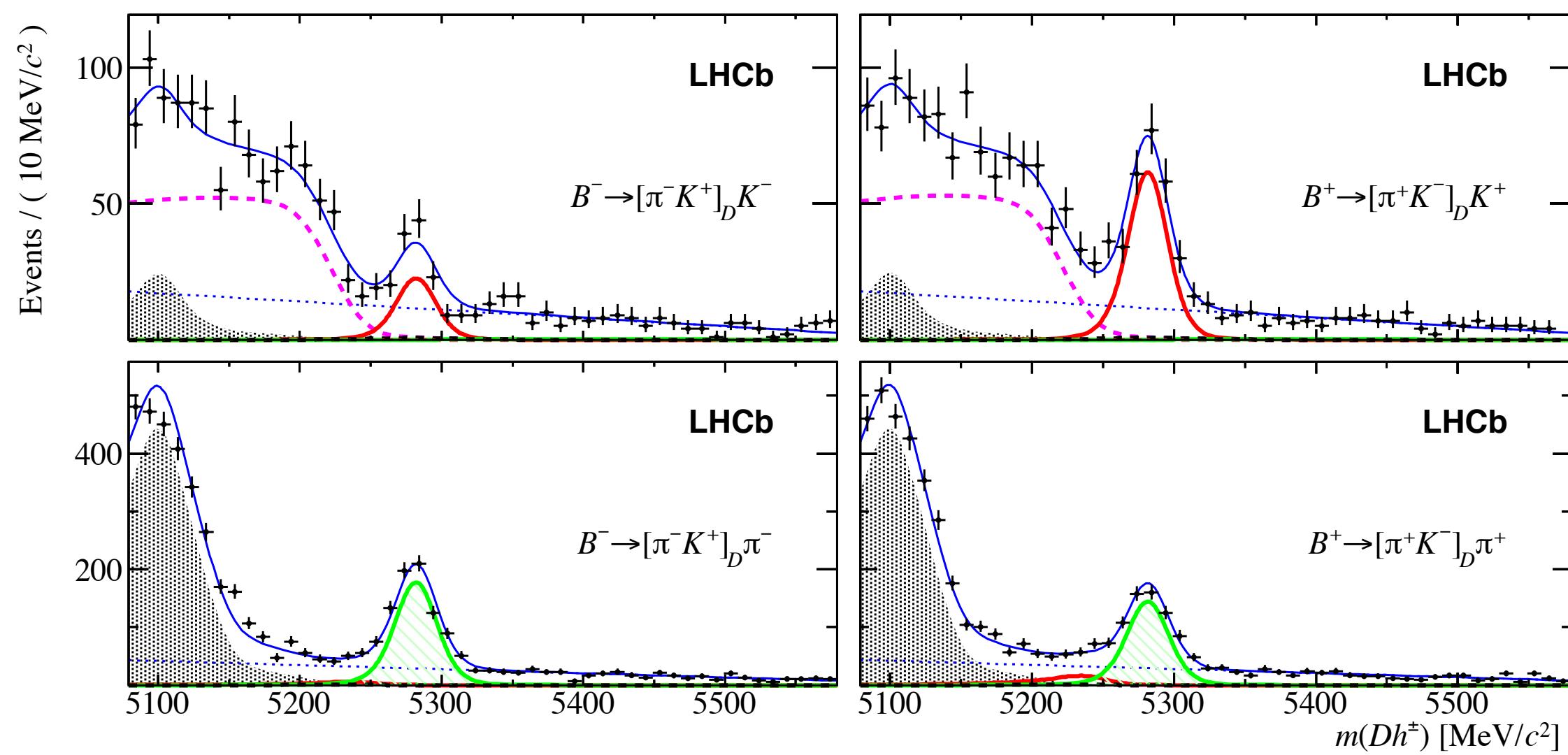
$$A_{f(\bar{f})}^{\Delta\Gamma} = \frac{-2r_{D_s K} \cos(\delta \mp (\gamma - 2\beta_s))}{1 + r_{D_s K}^2}$$

$$S_{f(\bar{f})} = \frac{2r_{D_s K} \sin(\delta \mp (\gamma - 2\beta_s))}{1 + r_{D_s K}^2}$$

Necessaria conoscenza delle **asimmetrie di produzione** dei B e **ricostruzione** dei K e π

Requisiti sperimentali

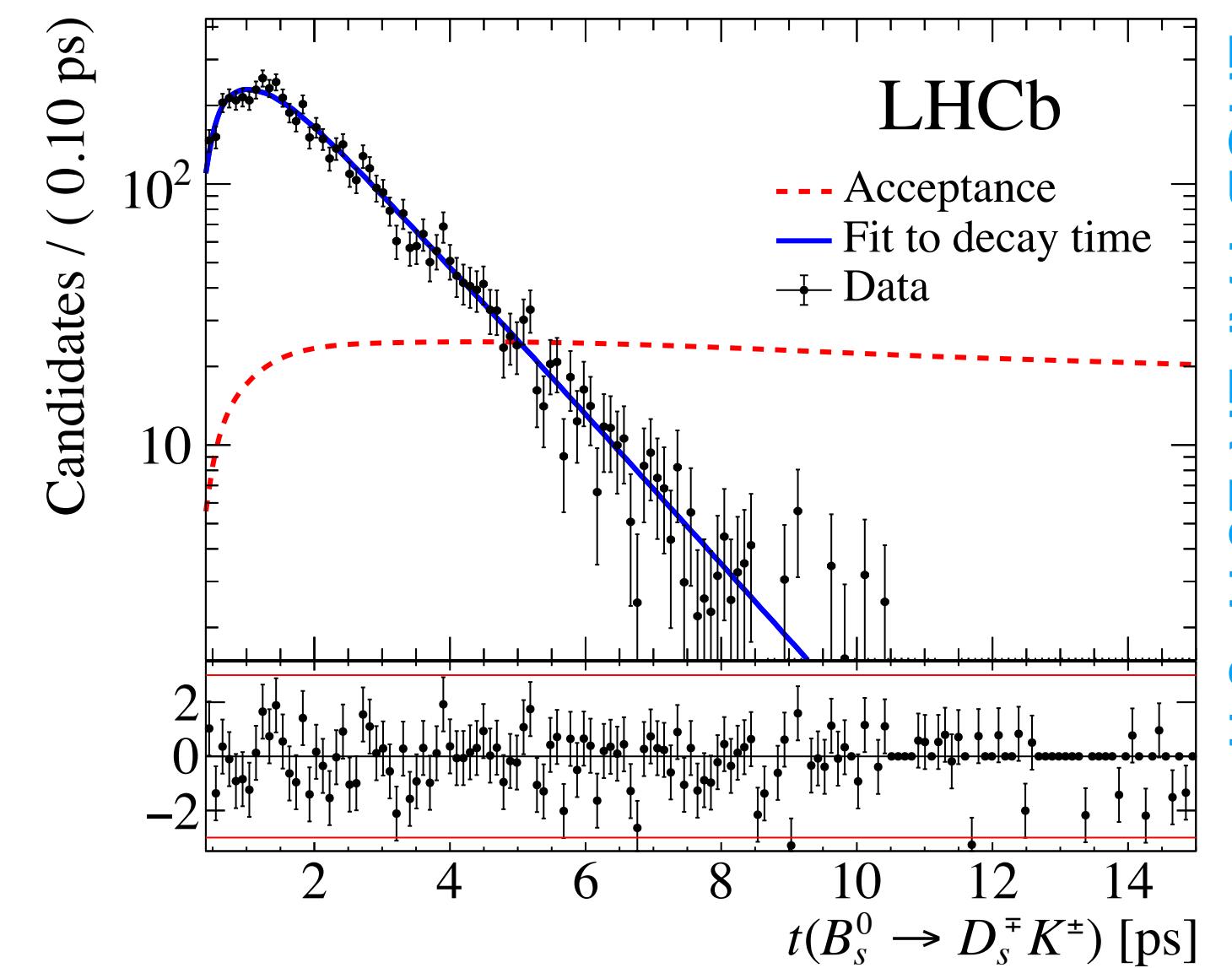
Integrate nel tempo



vs

LHCb-PAPER-2016-003

Dipendenti dal tempo



LHCb-PAPER-2017-047

- Risoluzione in massa invariante
- Identificazione di K e π
- Descrizione dei fondi ed efficienze di ricostruzione

- Risoluzione temporale (oscillazioni dei B^0_s)
- Identificazione del sapore (B^0 o anti B^0 ?)
- Descrizione dell'accettanza temporale (efficienza di ricostruzione nel tempo)

Decadimenti puramente **adronici**: eccellente **identificazione di particelle** e ricostruzione di **vertici secondari**

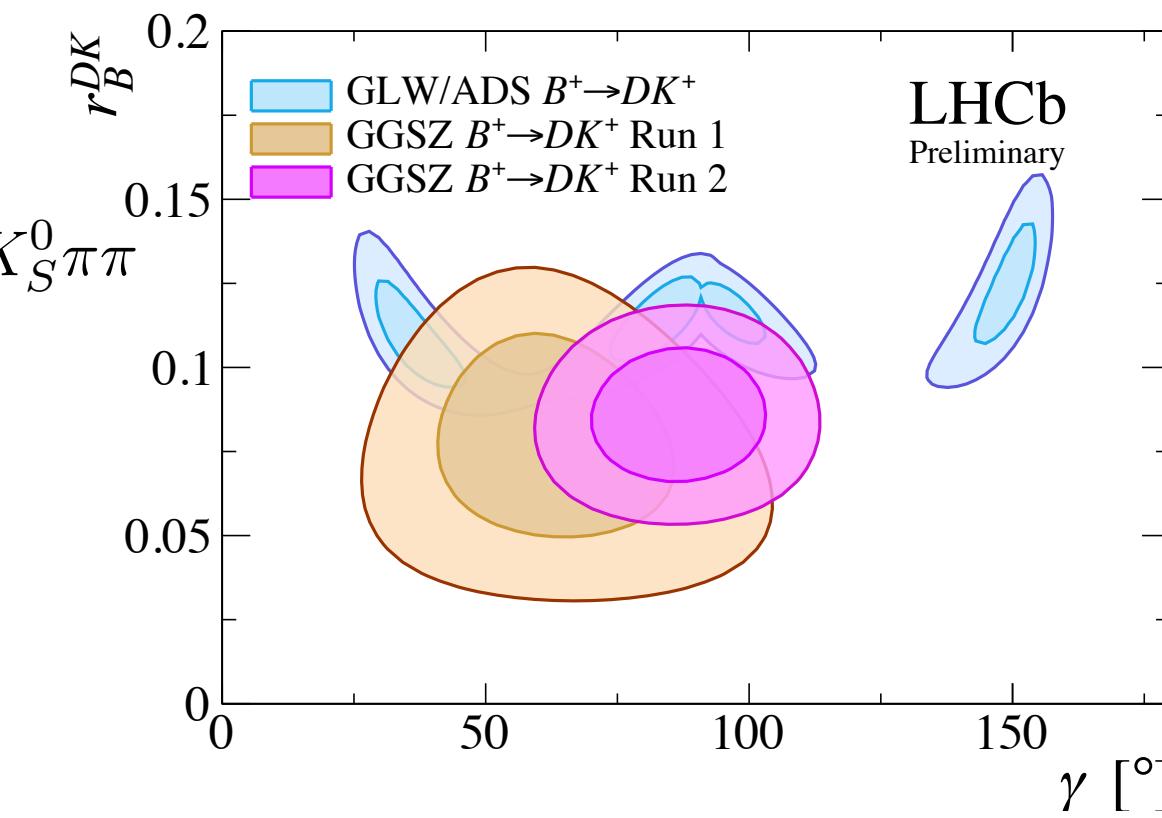
Interpretazione dei risultati

Integrate nel tempo

GLW : $D^0 \rightarrow KK, \pi\pi$

ADS : $D^0 \rightarrow K\pi$

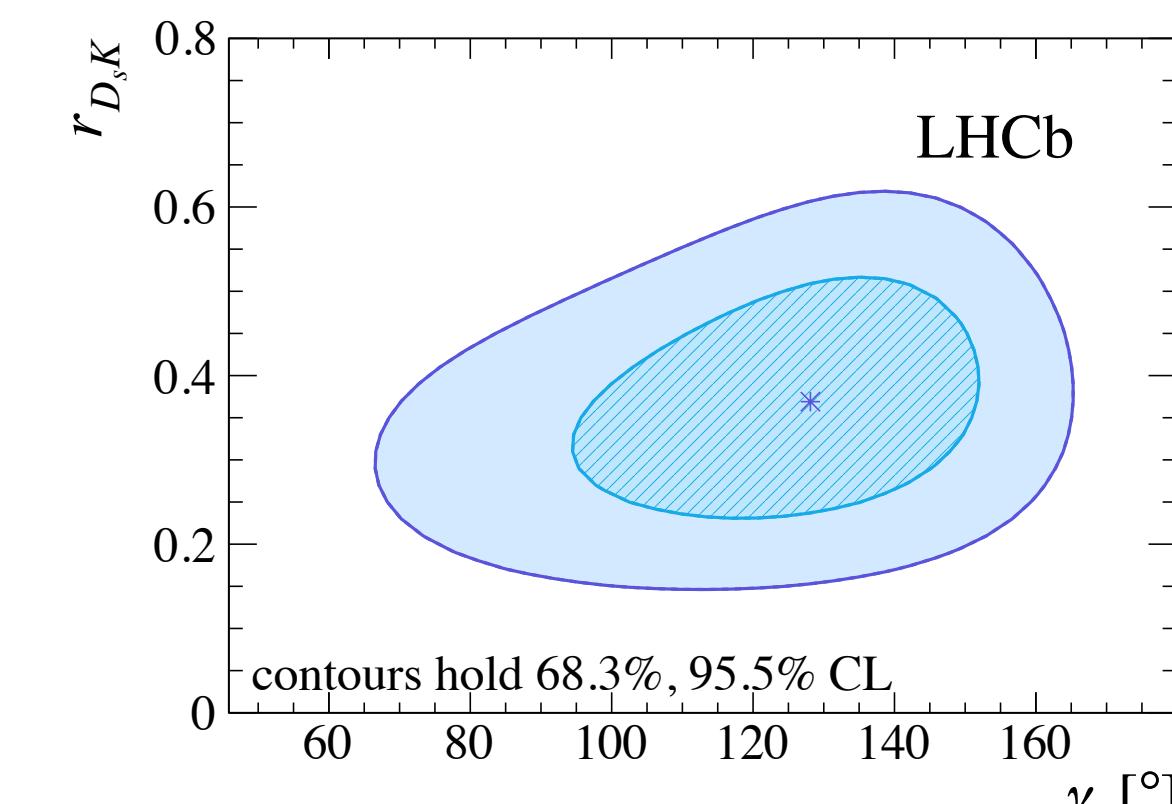
GGSZ : $D^0 \rightarrow K_S^0 KK, K_S^0 \pi\pi$



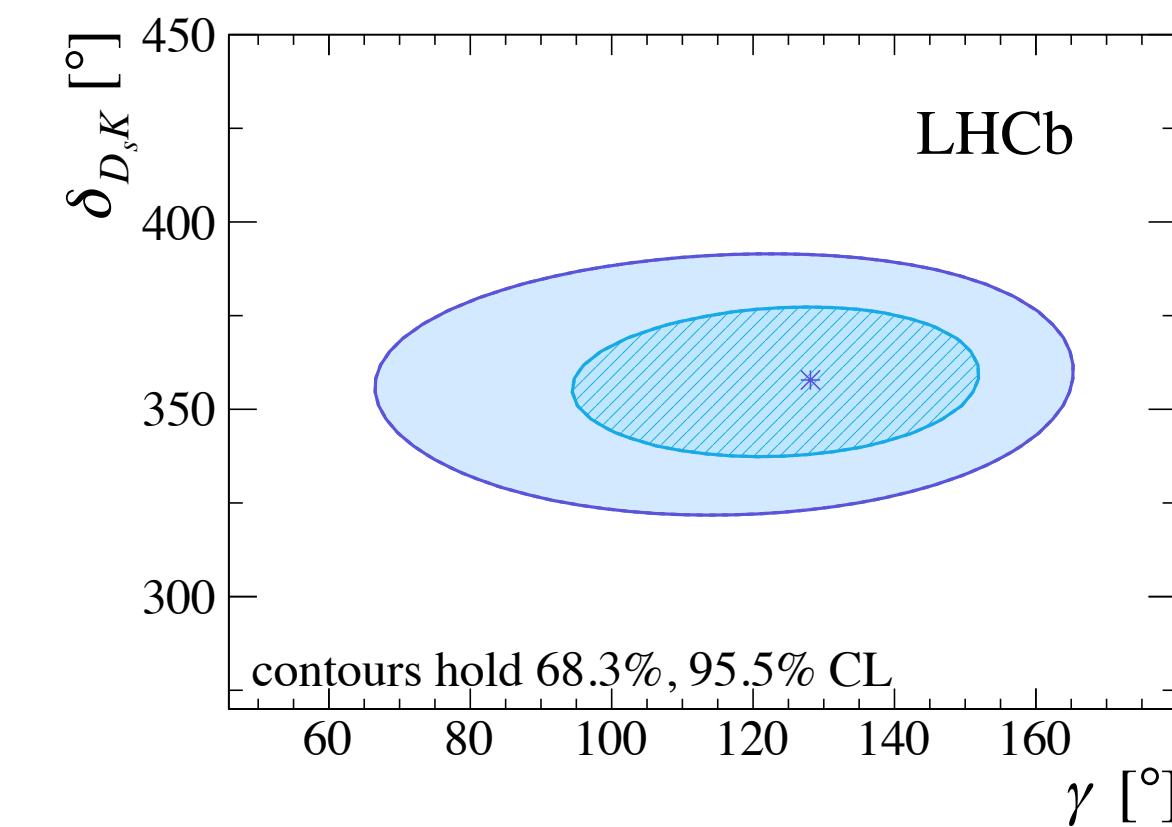
LHCb-CONF-2018-002

vs

Dipendenti dal tempo

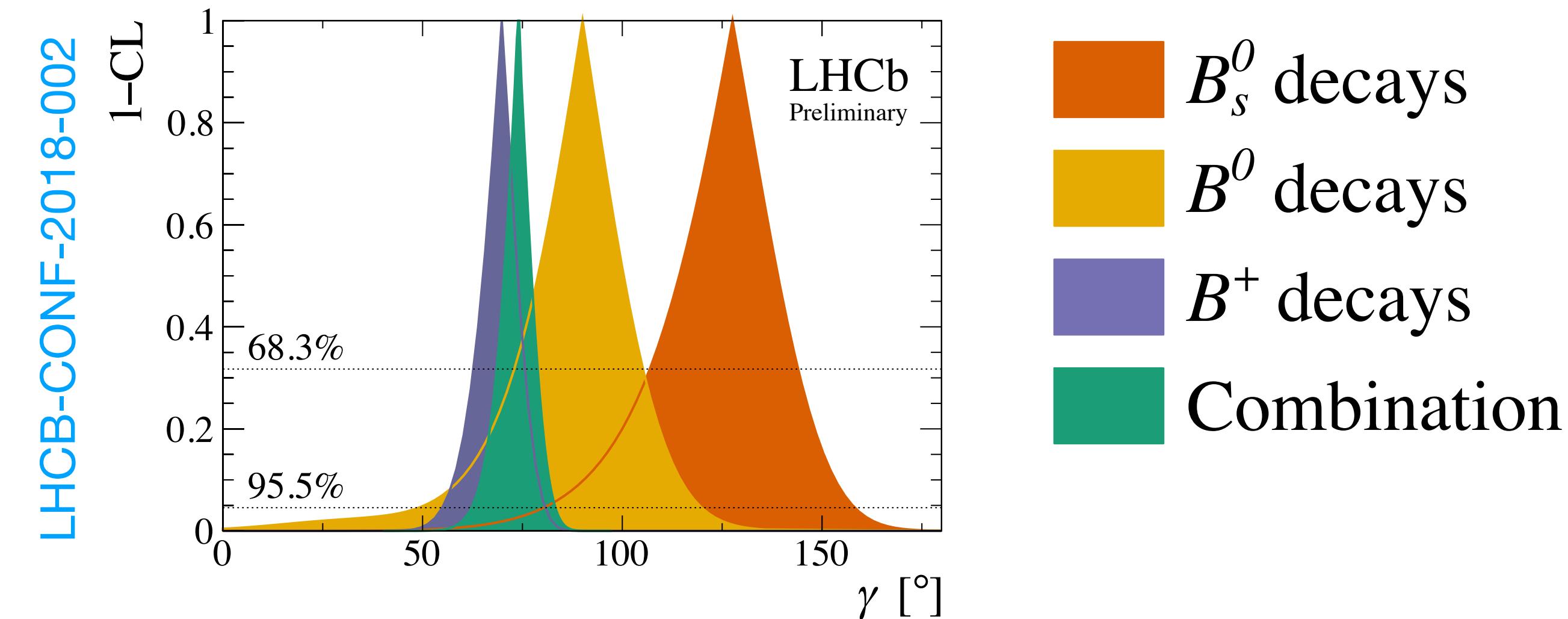


LHCb-PAPER-2017-047



Rapporto tra ampiezze di decadimento (r_B), differenza di fase forte (δ_B) e debole (γ) misurabili nei dati

Combinazione

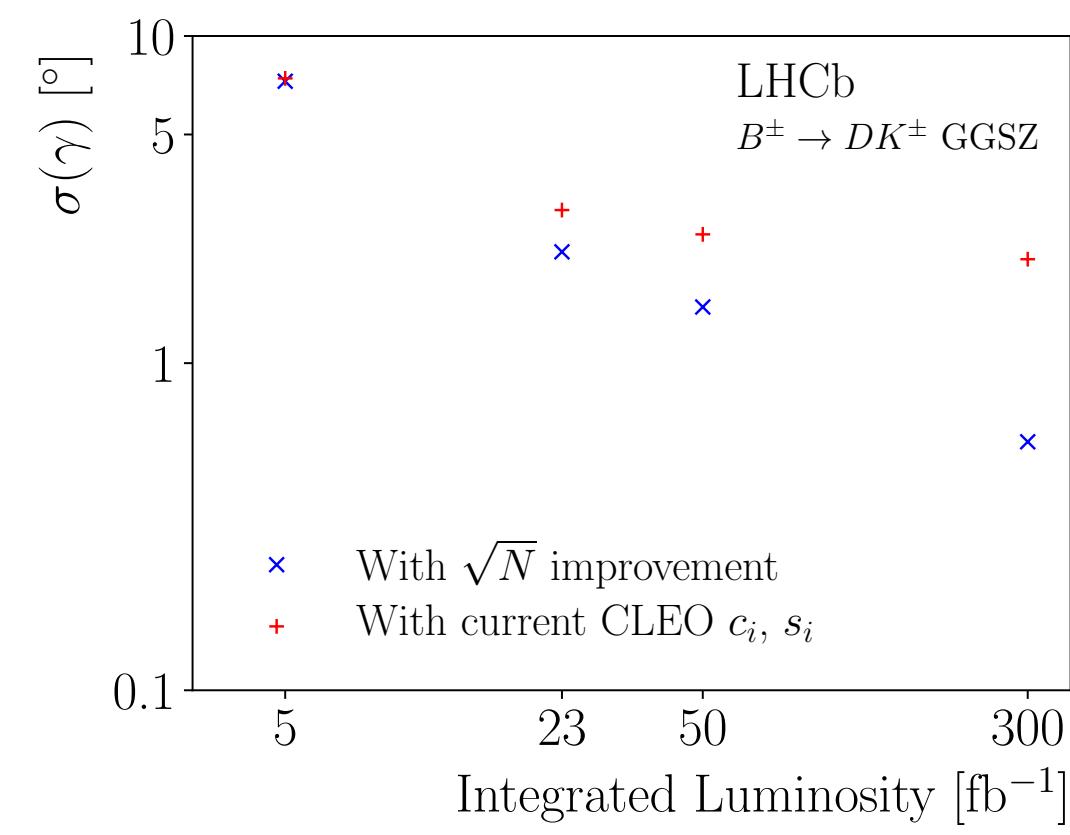
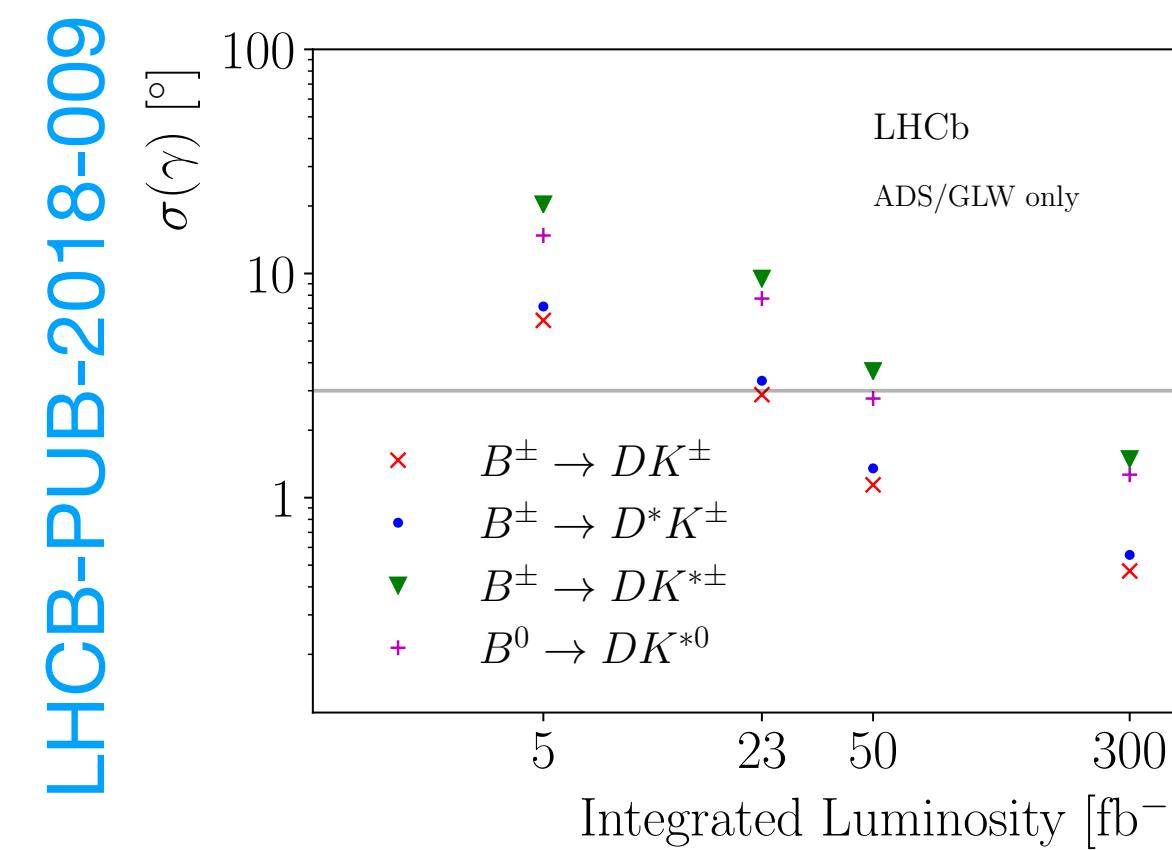


$$\gamma = (74.0^{+5.0}_{-5.8})^\circ \quad (68.3\% \text{CL})$$

- Include 14 misure integrate nel tempo e 2 dipendenti dal tempo
- Combina 98 osservabili e 14 parametri ausiliari
- Estrae 13 parametri adronici (rapporti fra ampiezze r_B e differenze di fase forte δ_B) e 1 differenza di fase debole (γ)

Proiezioni

Integrate nel tempo



vs

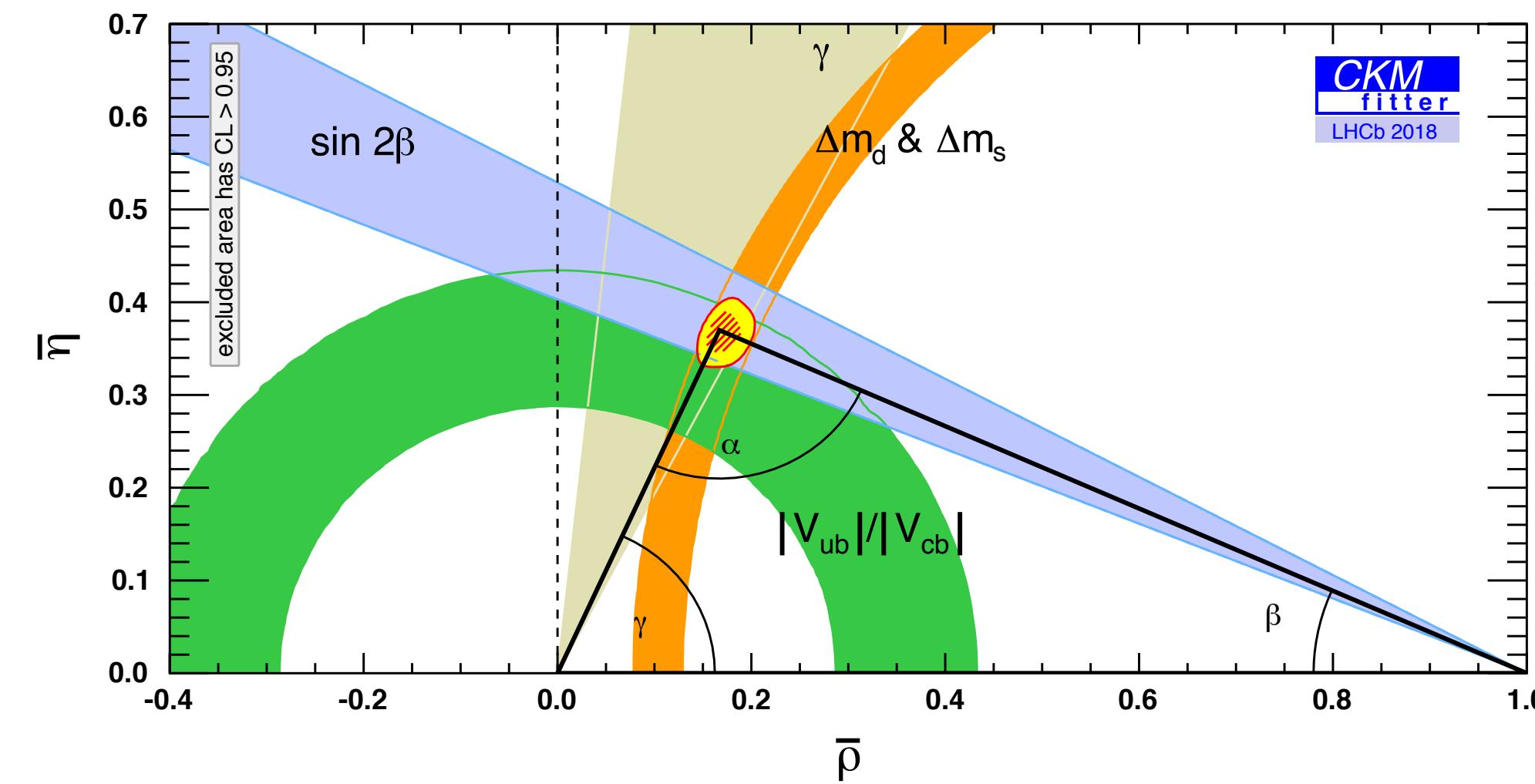
Dipendenti dal tempo

- $B_s^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm$
- Parameters Run 1 23 fb^{-1} 50 fb^{-1} 300 fb^{-1} 23 fb^{-1} 50 fb^{-1} 300 fb^{-1}
- $S_f, S_{\bar{f}}$ 0.20 0.043 0.027 0.011 0.02 0.0041 0.0026 0.0010
- $A_f^{\Delta\Gamma}, A_{\bar{f}}^{\Delta\Gamma}$ 0.28 0.065 0.039 0.016 – – –
- C_f 0.14 0.030 0.017 0.007 – – –
- $\sigma(\gamma, B^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm)[^\circ] = 20^\circ(\text{Run1}), 4^\circ(23\text{fb}^{-1}), 2.5^\circ(50\text{fb}^{-1}), 1^\circ(300\text{fb}^{-1})$
- $$S_{f(\bar{f})} = \frac{2r_{D_s K} \sin(\delta \mp (\gamma - 2\beta_s))}{1 + r_{D_s K}^2} \quad A_{f(\bar{f})}^{\Delta\Gamma} = \frac{-2r_{D_s K} \cos(\delta \mp (\gamma - 2\beta_s))}{1 + r_{D_s K}^2}$$

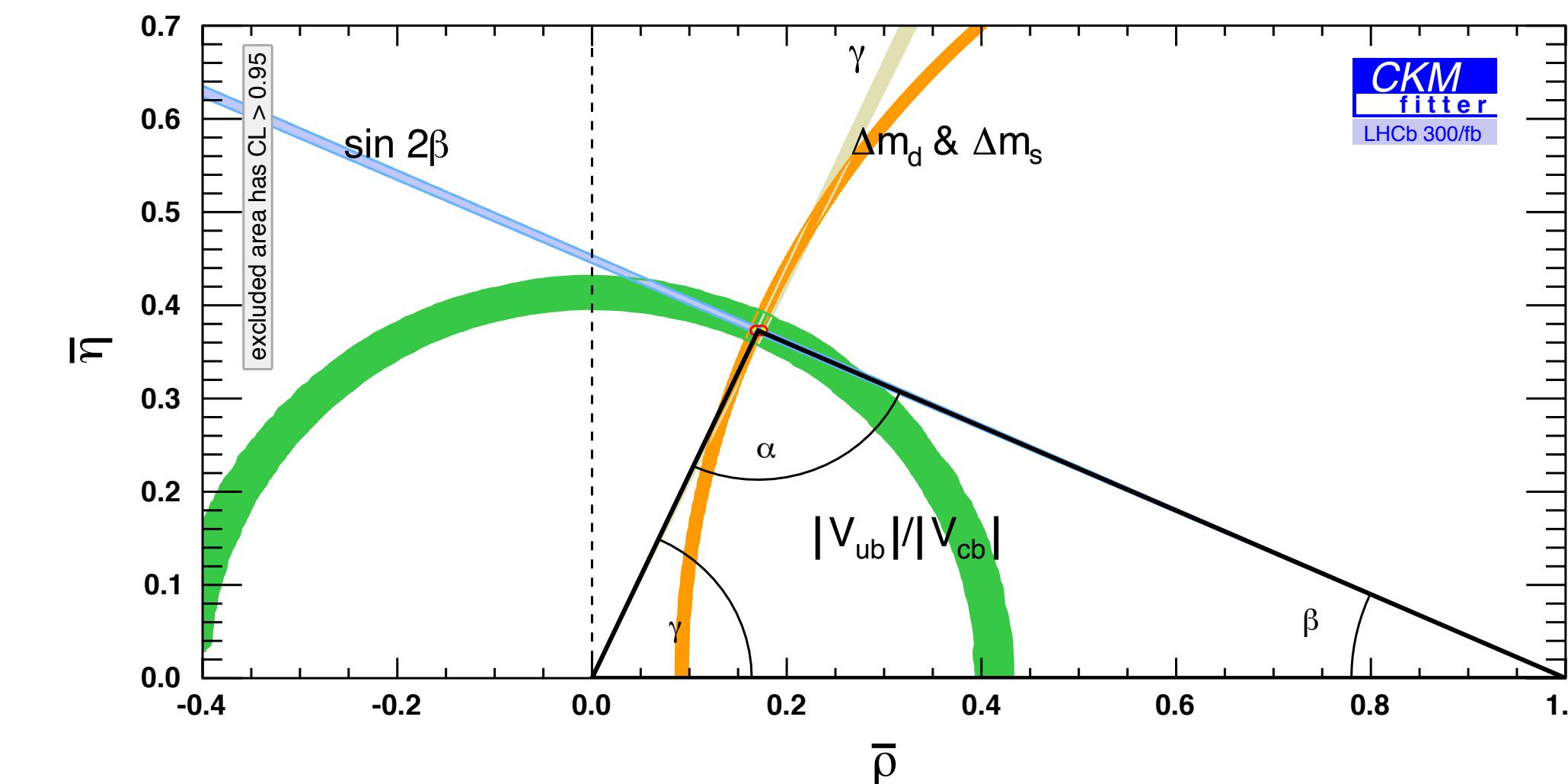
- $\sigma(\gamma) \sim 20^\circ$ dipendenti dal tempo (3fb^{-1} Run1), $\sim 10^\circ$ integrate nel tempo ($2/5\text{ fb}^{-1}$ Run2)
- Statistica Run2 $\sim 3x$ Run1 ($\sim 2x$ produzione dei B, $\sim 2x$ efficienza di ricostruzione)
- $\sigma(\gamma) \sim 1^\circ$ con 50fb^{-1} (Run3) , $<1^\circ$ con 300fb^{-1} (alta-luminosità) su singola misura
 - $\sigma(\phi_s) \sim 0.02$ rad con $B_s \rightarrow D_s K$ teoricamente pulita (no diagrammi pinguino)

Conclusioni

LHCb Oggi



LHCb 300fb⁻¹



LHCb-PUB-2018-009

- Determinazione di γ ad LHCb da diversi **stati finali** e **specie** di B (B^+ , B^0 , B^0_s)
 - $\delta\gamma/\gamma < 10^{-7}$ teorica su misure dirette di γ senza nuova fisica a **livello albero**
- Approcci complementari: **integriti** vs. **dipendenti nel tempo**
- Misure dirette ad oggi meno precise di determinazione indiretta:
combinazione ($\sim 5^\circ$) & **alta-luminosità** ($< 1^\circ$)

Grazie per l'attenzione!

Backup

Input esterni (ADS/GLW)

$$A_{\text{ADS}}^{\pi K} = \frac{2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \sin(\delta_B^{DK} + \delta_D^{K\pi}) \sin \gamma}{(r_B^{DK})^2 + (r_D^{K\pi})^2 + 2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \cos(\delta_B^{DK} + \delta_D^{K\pi}) \cos \gamma},$$

$$A_{CP}^{KK} = \frac{2r_B^{DK} \sin \delta_B^{DK} \sin \gamma}{1 + (r_B^{DK})^2 + 2r_B^{DK} \cos \delta_B^{DK} \cos \gamma} + A_{CP}^{\text{dir}}(KK),$$

$$A_{CP}^{\pi\pi} = \frac{2r_B^{DK} \sin \delta_B^{DK} \sin \gamma}{1 + (r_B^{DK})^2 + 2r_B^{DK} \cos \delta_B^{DK} \cos \gamma} + A_{CP}^{\text{dir}}(\pi\pi),$$

$$A_{\text{fav}}^{K\pi} = \frac{2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \sin(\delta_B^{DK} - \delta_D^{K\pi}) \sin \gamma}{1 + (r_B^{DK} r_D^{K\pi})^2 + 2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \cos(\delta_B^{DK} - \delta_D^{K\pi}) \cos \gamma},$$

$$R_{\text{ADS}}^{\pi K} = \frac{(r_B^{DK})^2 + (r_D^{K\pi})^2 + 2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \cos(\delta_B^{DK} + \delta_D^{K\pi}) \cos \gamma}{1 + (r_B^{DK} r_D^{K\pi})^2 + 2r_B^{DK} r_D^{K\pi} \cos(\delta_B^{DK} - \delta_D^{K\pi}) \cos \gamma},$$

$$R_{CP}^{KK} = 1 + (r_B^{DK})^2 + 2r_B^{DK} \cos(\delta_B^{DK}) \cos(\gamma),$$

$$R_{CP}^{\pi\pi} = 1 + (r_B^{DK})^2 + 2r_B^{DK} \cos(\delta_B^{DK}) \cos(\gamma).$$

r_D, δ_D da CLEO/
BESIII

Input esterni (GGSZ)

LHCb-PAPER-2018-017

$$N_{\pm i}^+ = h_{B^+} \left[F_{\mp i} + (x_+^2 + y_+^2) F_{\pm i} + 2\sqrt{F_i F_{-i}} (x_+ c_{\pm i} - y_+ s_{\pm i}) \right],$$
$$N_{\pm i}^- = h_{B^-} \left[F_{\pm i} + (x_-^2 + y_-^2) F_{\mp i} + 2\sqrt{F_i F_{-i}} (x_- c_{\pm i} + y_- s_{\pm i}) \right],$$

LHCb-CONF-2018-002

$$x_- = r_B^{DK} \cos(\delta_B^{DK} - \gamma),$$
$$y_- = r_B^{DK} \sin(\delta_B^{DK} - \gamma),$$
$$x_+ = r_B^{DK} \cos(\delta_B^{DK} + \gamma),$$
$$y_+ = r_B^{DK} \sin(\delta_B^{DK} + \gamma).$$

c_i, s_i da CLEO/
BESIII
(medie pesate
sulle ampiezze di
 $\cos(\delta_D)$ e $\sin(\delta_D)$
nel bin- i nel piano
di Dalitz)

Sistematiche (ADS/GLW)

LHCb-PAPER-2017-021

[%]	$A_K^{K\pi}$	A_π^{KK}	A_K^{KK}	$A_\pi^{\pi\pi}$	$A_K^{\pi\pi}$	R^{KK}	$R^{\pi\pi}$	$R_{K/\pi}^{K\pi}$
<i>PID</i>	6.0	4.3	2.0	2.7	10.3	13.8	18.8	0.0
<i>Bkg rate</i>	7.5	1.8	10.2	4.1	18.9	68.7	46.0	0.0
<i>Bkg func</i>	7.6	0.4	4.2	0.4	7.2	9.5	16.7	0.0
<i>Sig func</i>	11.1	0.9	0.8	0.9	14.3	7.9	20.9	0.0
<i>Sim</i>	7.1	0.5	0.2	0.4	5.6	3.5	7.6	174.2
<i>Asym</i>	37.4	52.7	3.7	31.2	2.3	0.1	0.1	0.0
Total	41.5	52.9	11.9	31.6	27.5	71.2	56.9	174.2

% incertezza
statistica

Sistematiche (GGSZ)

LHCb-PAPER-2018-017

Source	x_-	y_-	x_+	y_+
Statistical	1.7	2.2	1.9	1.9
Strong phase measurements	0.4	1.1	0.4	0.9
Efficiency corrections	0.6	0.2	0.6	0.1
Mass fit PDFs	0.2	0.3	0.2	0.3
Different mis-ID shape over Dalitz plot	0.2	0.1	0.1	0.1
Different low mass shape over Dalitz plot	0.1	0.2	0.1	0.1
Uncertainty on $B_s^0 \rightarrow \bar{D}^0\pi^+K^-$ yield	0.1	0.1	0.1	0.1
Bias correction	0.1	0.1	0.1	0.1
Bin migration	0.1	0.1	0.1	0.1
$K^0 CP$ violation and material interaction	0.1	0.2	0.1	0.1
Total experimental systematic uncertainty	0.7	0.5	0.7	0.4

$\times 10^{-2}$

Prestazioni (dipendenti dal tempo)

Identificazione del sapore

$B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$	$\varepsilon_{\text{tag}} [\%]$	$\varepsilon_{\text{eff}} [\%]$
OS only	12.94 ± 0.11	1.41 ± 0.11
SS only	39.70 ± 0.16	1.29 ± 0.13
Both OS and SS	24.21 ± 0.14	3.10 ± 0.18
Total	76.85 ± 0.24	5.80 ± 0.25

LHCb-PAPER-2017-047

$$\sigma_{\text{stat.}} \propto 1/(\epsilon_{\text{eff}} N)^{1/2}$$

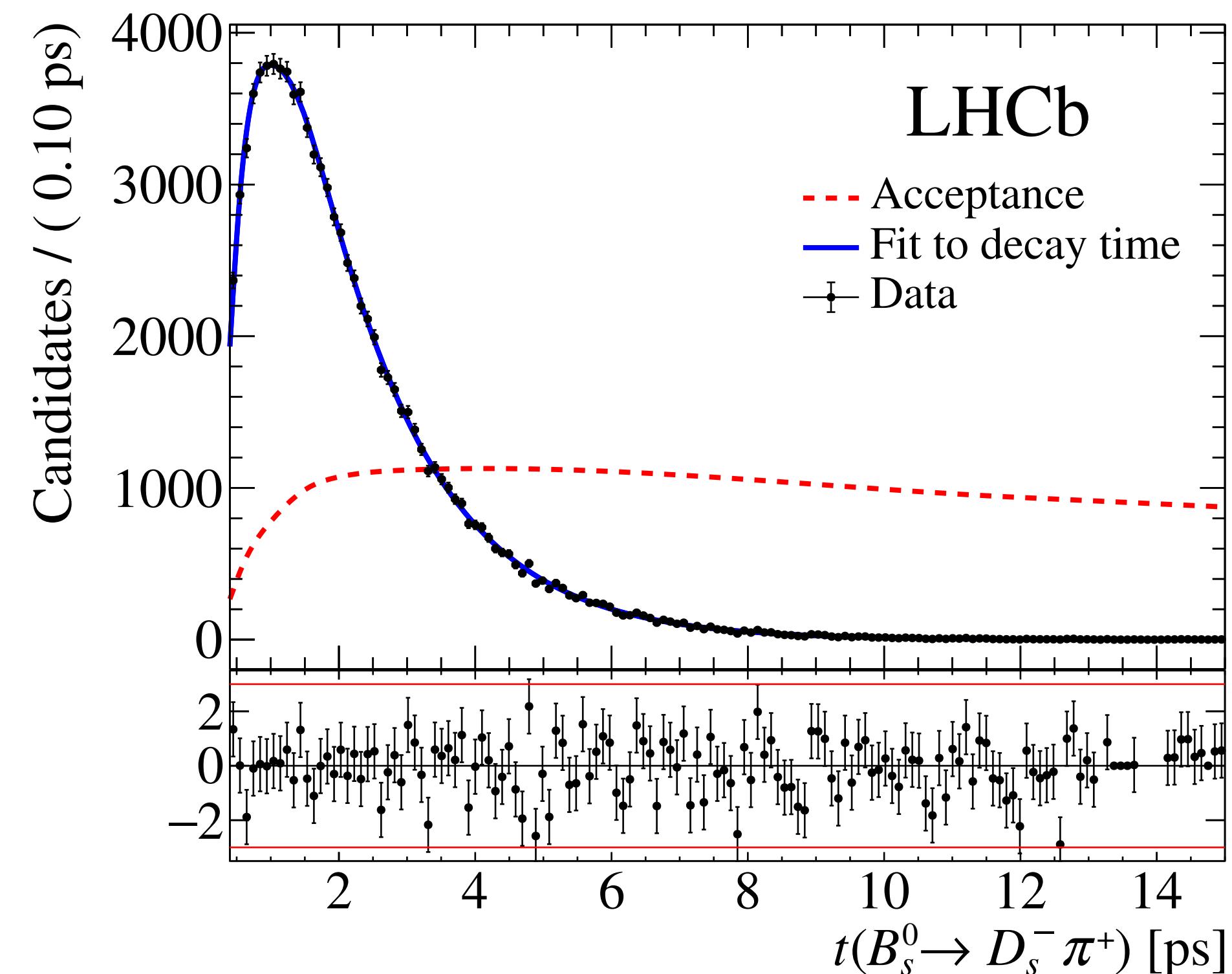
Risoluzione Temporale

$$\langle \sigma_t \rangle = (54.9 \pm 0.4) \text{ fs}$$

LHCb-PAPER-2018-009

$$D \propto \exp(-\sigma_t^2 \Delta m^2 / 2)$$

Accettanza



Da canale di
controllo
 $B_s \rightarrow D_s \pi$

Sistematiche (dipendenti dal tempo)

LHCb-PAPER-2017-047

Source	C_f	$A_f^{\Delta\Gamma}$	$A_{\bar{f}}^{\Delta\Gamma}$	S_f	$S_{\bar{f}}$
Detection asymmetry	0.02	0.28	0.29	0.02	0.02
Δm_s	0.11	0.02	0.02	0.20	0.20
Tagging and scale factor	0.18	0.02	0.02	0.16	0.18
Tagging asymmetry	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02
Correlation among observables	0.20	0.38	0.38	0.20	0.18
Closure test	0.13	0.19	0.19	0.12	0.12
Acceptance, simulation ratio	0.01	0.10	0.10	0.01	0.01
Acceptance data fit, Γ_s , $\Delta\Gamma_s$	0.01	0.18	0.17	0.00	0.00
Total	0.32	0.55	0.55	0.35	0.35

Relative
all'incertezza
statistica