

IFAE 2023  
Catania, 12 - 14 aprile

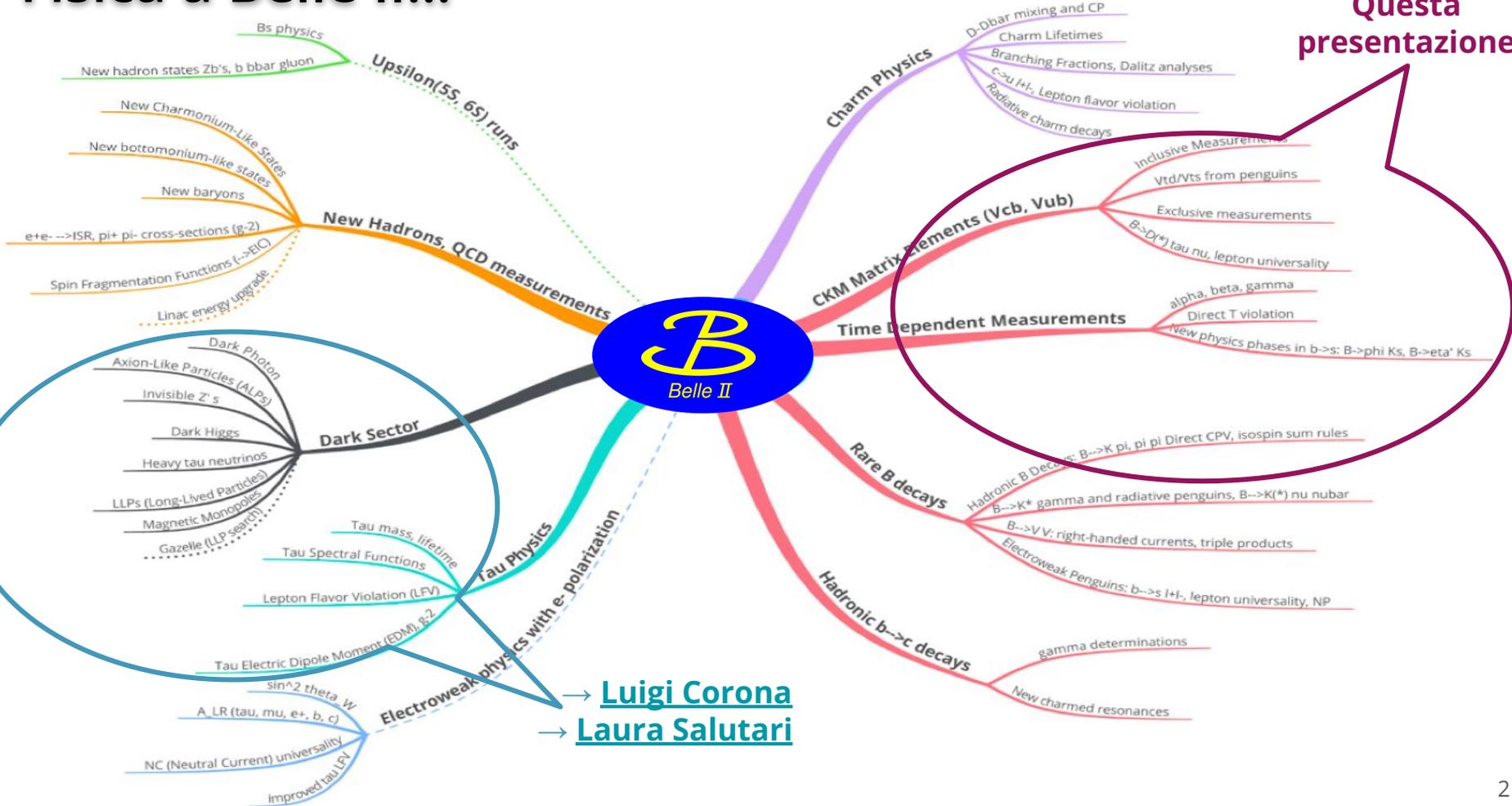
# Risultati recenti nella fisica del sapore a Belle II

Stefano Moneta  
(per la collaborazione Belle II)



# Fisica a Belle II...

Questa  
presentazione

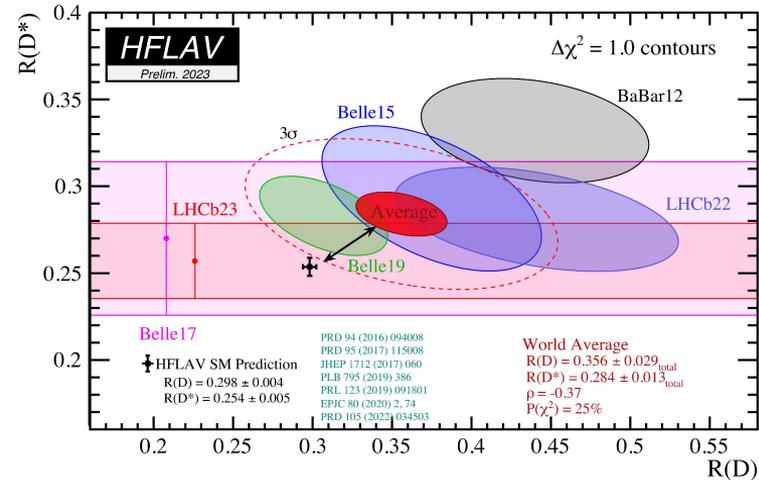
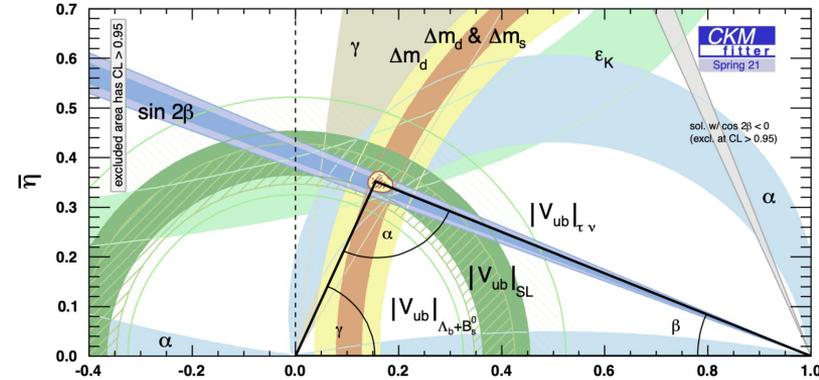


# Fisica del sapore (pesante)

Misure di precisione del Modello Standard (MS), nel settore dei quark con sapore  $b$  e  $c$  per la ricerca indiretta di nuova fisica.

In questa presentazione alcuni risultati recenti:

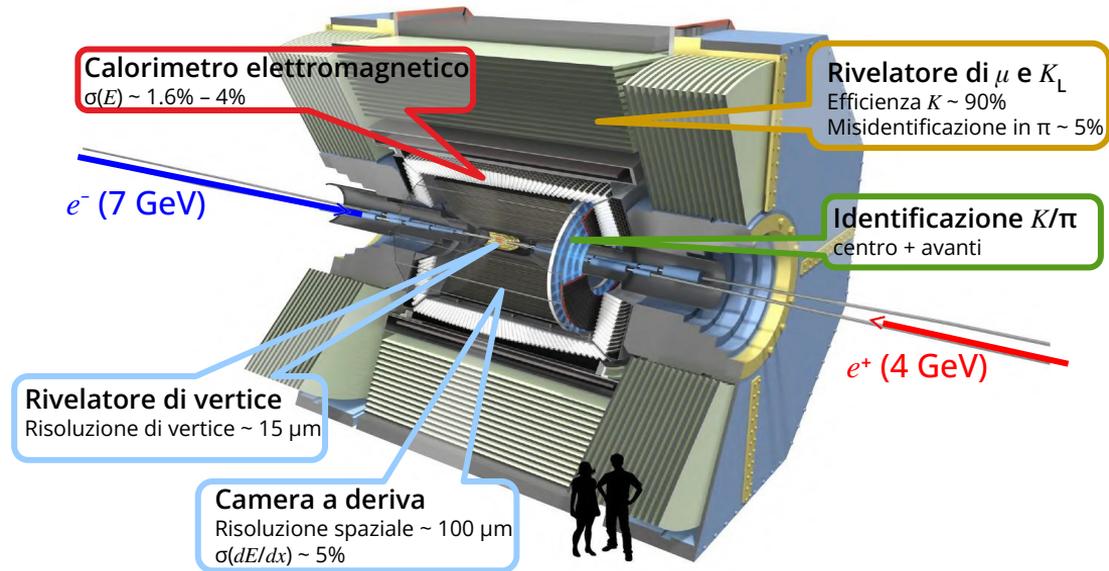
- **Decadimenti adronici dei mesoni  $B$** 
  - violazioni di CP
  - parametri della matrice CKM  $\rightarrow$  triangolo di unitarietà
- **Decadimenti semi-leptonici dei mesoni  $B$** 
  - misure coefficienti  $|V_{xb}|$   $\rightarrow$  inconsistenza tra misure esclusive e inclusive
  - anomalia nel rapporto tra decadimenti  $b \rightarrow c$  semi-tauonici e semi-leptonici  $\rightarrow$  universalità leptonica?



# L'esperimento Belle II

Collisioni  $e^+e^-$  presso l'acceleratore SuperKEKB

- Eccellente **risoluzione di vertice**
  - misure dipendenti dal tempo
- Efficiente ricostruzione di **particelle neutre** ( $\pi^0$ ,  $K_S$ ) e **separazione K/ $\pi$** 
  - decadimenti adronici dei  $B$
- Identificazione di **leptoni**  $e, \mu$ 
  - decadimenti semi-leptonici dei  $B$
- Rivelatore **ermetico** e conoscenza dell'energia iniziale
  - ricostruzione di particelle mancanti ( $\nu$ )



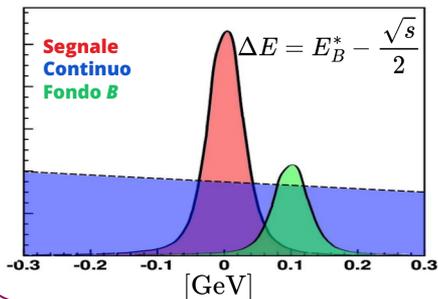
Prima presa dati (03/2019  $\rightarrow$  06/2022):

- Record luminosità istantanea:  $\mathcal{L} = 4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- **362 fb<sup>-1</sup>** risonanza  $\Upsilon(4S) = 10.58 \text{ GeV}$ 
  - $\approx 387$  milioni di  $B\bar{B}$
- **42 fb<sup>-1</sup>** 60 MeV sotto la risonanza
- **19 fb<sup>-1</sup>** scan in energia tra 10.6 e 10.8 GeV
  - campione unico per studio di adroni esotici

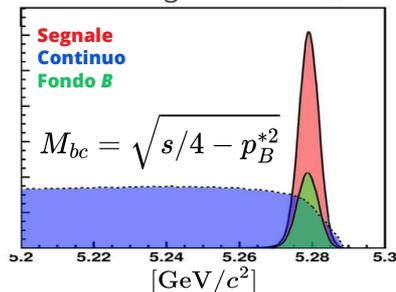
# Selezione del segnale $B\bar{B}$

In una "fabbrica" di mesoni  $B$ , l'energia di ciascun  $B$  nel centro di massa è  $\sqrt{s}/2$

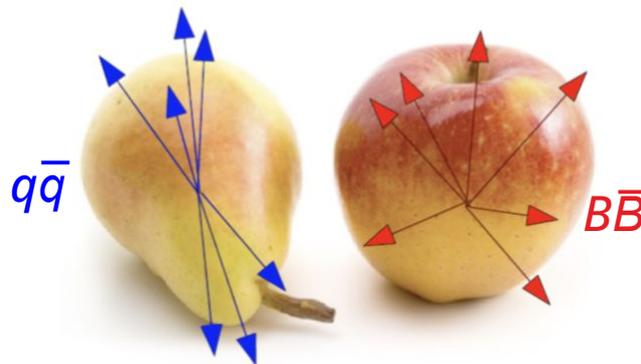
Differenza tra energia ricostruita e nominale



Massa invariante del  $B$  assumendo che abbia l'energia nominale

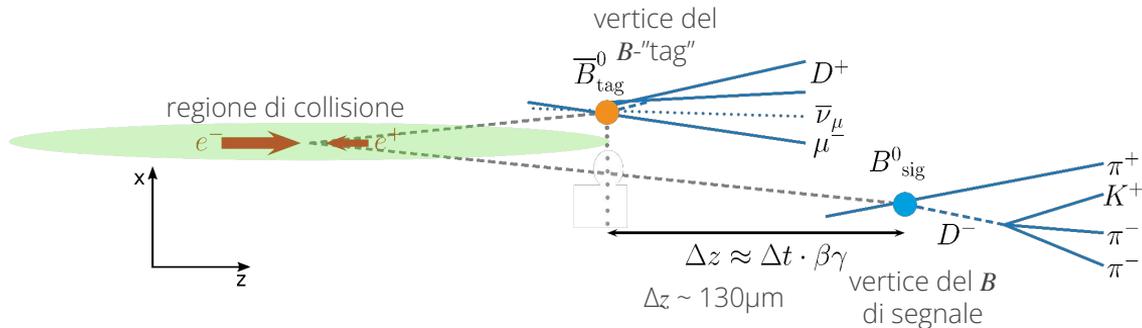


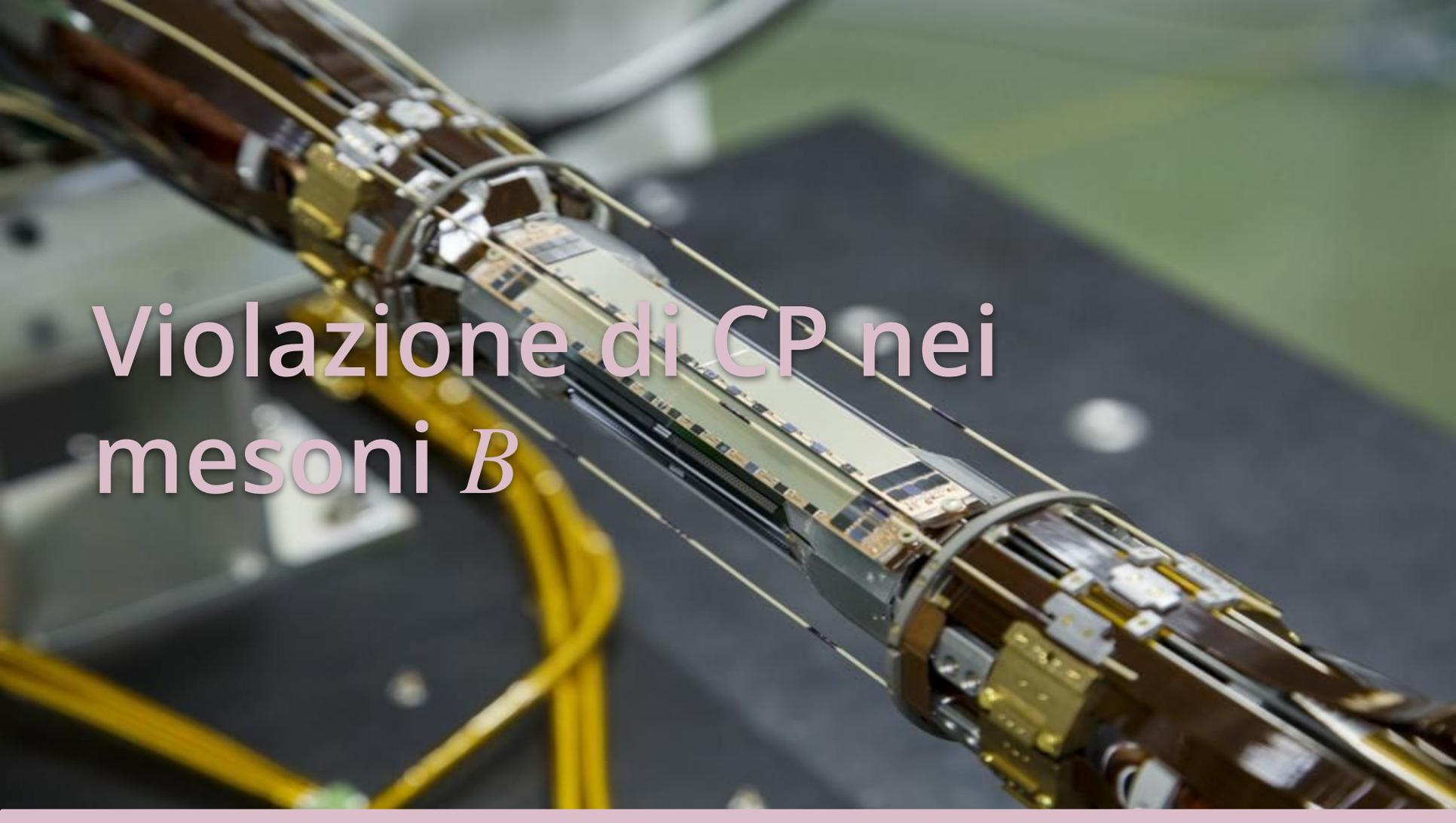
Gli eventi di tipo  $B\bar{B}$  hanno una distribuzione spaziale distinta dai quark leggeri  $q = u, d, s$



Misura della differenza di tempo  $\Delta t$  tra  $B\bar{B}$  prodotti in autostati coerenti

- "Tag" di un  $B$  (che decade in autostato di sapore  $\varepsilon_{\text{tag}} \approx 30\%$ )
- Ricostruzione del secondo  $B$  ("segnale")
- Misura della distanza  $\Delta z$  tra i vertici dei  $B$





Violazione di CP nei  
mesoni  $B$

# Angolo $\beta/\phi_1$ da pinguini adronici

Asimmetria CP dipendente dal tempo:

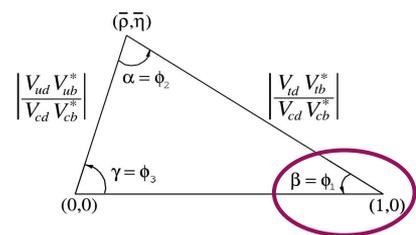
$$\mathcal{A}_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S \sin(\Delta m \Delta t) + A \cos(\Delta m \Delta t)$$

$$S = \pm \sin 2\phi_1$$

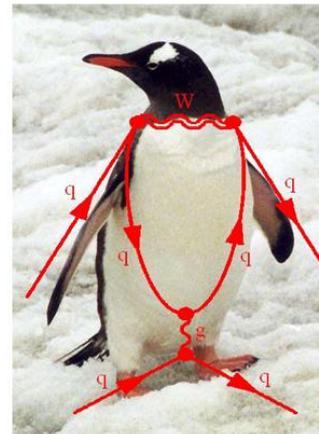
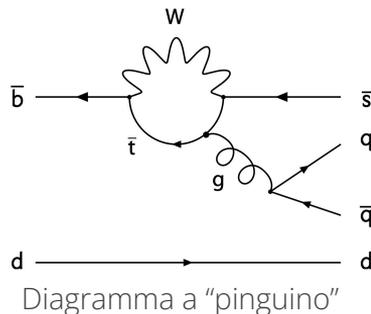
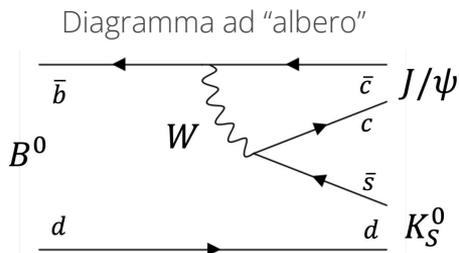
Violazione di CP nell'interferenza tra mescolamento e decadimento

Violazione di CP

$$A = 0$$

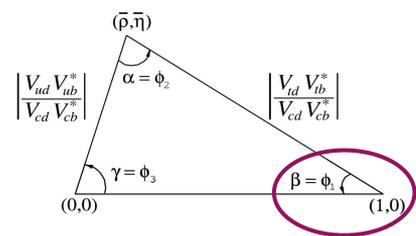


Media mondiale:  
 $\sin 2\phi_1 = 0.699 \pm 0.017$



- Diagrammi a "pinguino"  $b \rightarrow s$  **soppressi nel MS** (BR  $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ )
- Maggiore sensibilità a contributi di **nuova fisica**
- Stati finali completamente adronici con neutri ( $K^0, \pi^0$ )
  - difficili da discriminare rispetto al continuo  $qq$

# Angolo $\beta/\phi_1$ da pinguini adronici: $B^0 \rightarrow \varphi K_S$

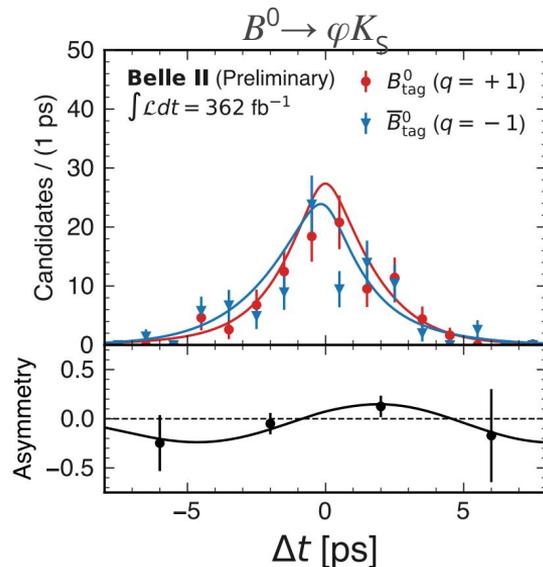
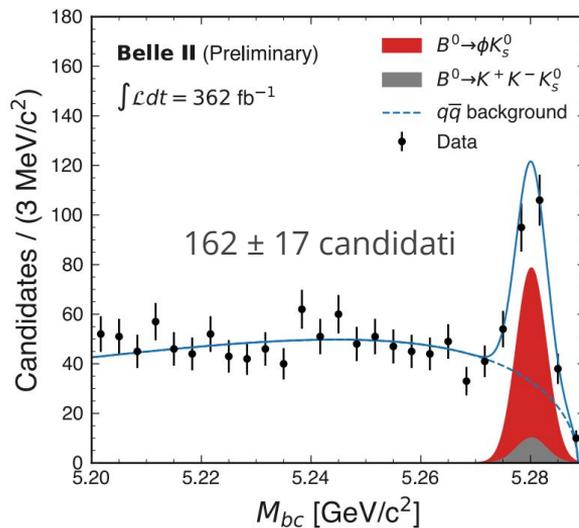


$$B^0 \rightarrow \varphi K_S$$

- Angolo di elicità  $\cos\theta_H$  per discriminare  $B \rightarrow \varphi(\rightarrow K^+K^-)K_S$  dal decadimento non risonante  $B^0 \rightarrow K^+K^-K_S$  (con CP opposta)
- Validazione sui dati con  $B^+ \rightarrow \varphi K^+$  (asimmetria nulla)

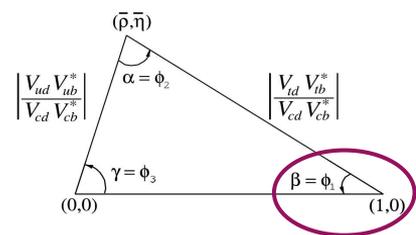
$$A_{CP} = 0.31 \pm 0.20^{+0.05}_{-0.06}$$

$$S_{CP} = 0.54 \pm 0.26^{+0.06}_{-0.08}$$



- $A_{CP}$  competitivo con la media mondiale nel canale  $\varphi K_S$

# Angolo $\beta/\phi_1$ da pinguini adronici: $B^0 \rightarrow K_S \pi^0$



$$B^0 \rightarrow K_S \pi^0$$

- Richiede un'ottima ricostruzione dei neutri
- Complessa ricostruzione del vertice
  - estrapolazione della direzione di volo del  $K_S$
- Validazione sui dati con  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ , ricostruendo solo il vertice del  $K_S$

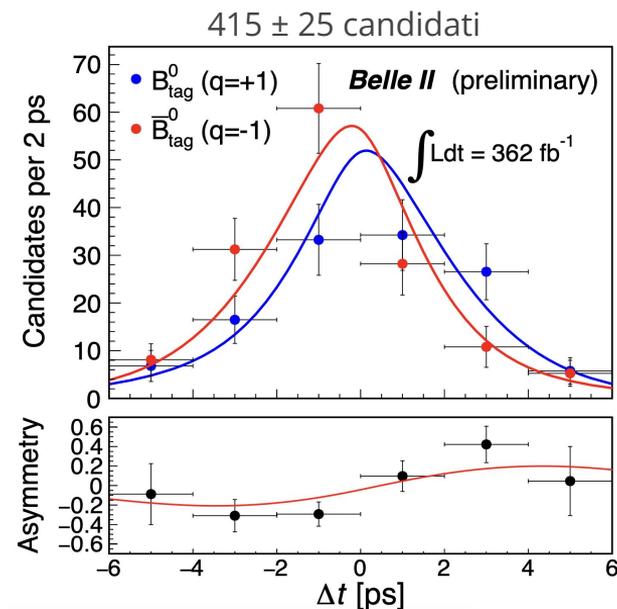
$$A_{CP} = 0.04 \pm 0.15 \pm 0.05$$

$$S_{CP} = 0.75^{+0.20}_{-0.23} \pm 0.04$$

- Misura **competitiva** con la media mondiale (nonostante statistica inferiore alle precedenti)

$$\text{HFLAV } B \rightarrow K_S \pi^0: \quad A_{CP} = -0.01 \pm 0.10$$

$$S_{CP} = 0.57 \pm 0.17$$



# Somma degli isospin $B \rightarrow K\pi$

- Regola della somma degli isospin:

$$I_{K\pi} = \mathcal{A}_{K^+\pi^-} + \mathcal{A}_{K^0\pi^+} \cdot \frac{\mathcal{B}_{K^0\pi^+} \tau_{B^0}}{\mathcal{B}_{K^+\pi^-} \tau_{B^+}} - 2\mathcal{A}_{K^+\pi^0} \cdot \frac{\mathcal{B}_{K^+\pi^0} \tau_{B^0}}{\mathcal{B}_{K^+\pi^-} \tau_{B^+}} - 2\mathcal{A}_{K^0\pi^0} \cdot \frac{\mathcal{B}_{K^0\pi^0}}{\mathcal{B}_{K^+\pi^-}} \approx 0$$

- precisione teorica  $< 1\%$ , precisione sperimentale  $\mathcal{O}(10\%) \rightarrow$  dominata da  $\mathcal{A}(K^0\pi^0)$
- Tutti gli stati finali misurati a Belle II:  $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$ ,  $B^+ \rightarrow K_s^-\pi^+$ ,  $B^+ \rightarrow K^+\pi^0$ ,  $B^0 \rightarrow K_s^-\pi^0$ 
  - rapporti di decadimento e asimmetrie CP **competitivi** con la media mondiale
  - per  $B^0 \rightarrow K_s^-\pi^0$ : combinazione con misura [dipendente dal tempo](#)  $\Rightarrow$  **miglior risultato assoluto**

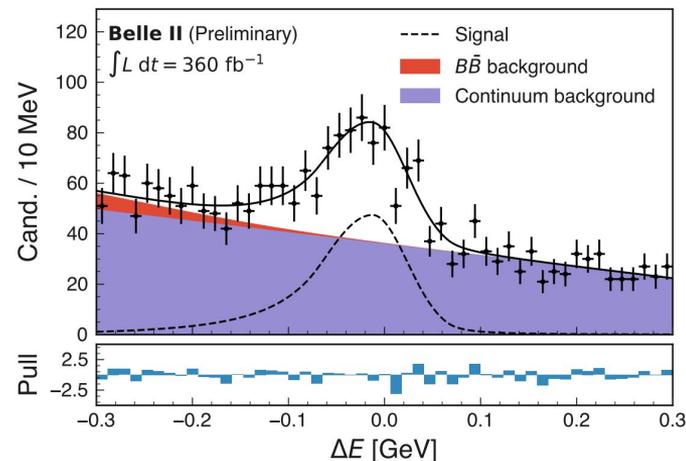
$$\mathcal{A}_{K^0\pi^0} = -0.01 \pm 0.12 \pm 0.05$$

Media mondiale:  
 $0.0 \pm 0.13$

- Combinando tutti gli stati finali  $B \rightarrow K\pi$  misurati a Belle II:

$$I_{K\pi} = -0.03 \pm 0.13 \pm 0.05$$

Media mondiale:  
 $0.13 \pm 0.11$

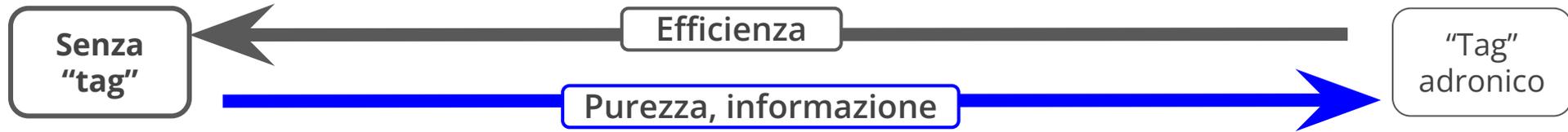




# Decadimenti $B$ semi-leptonici

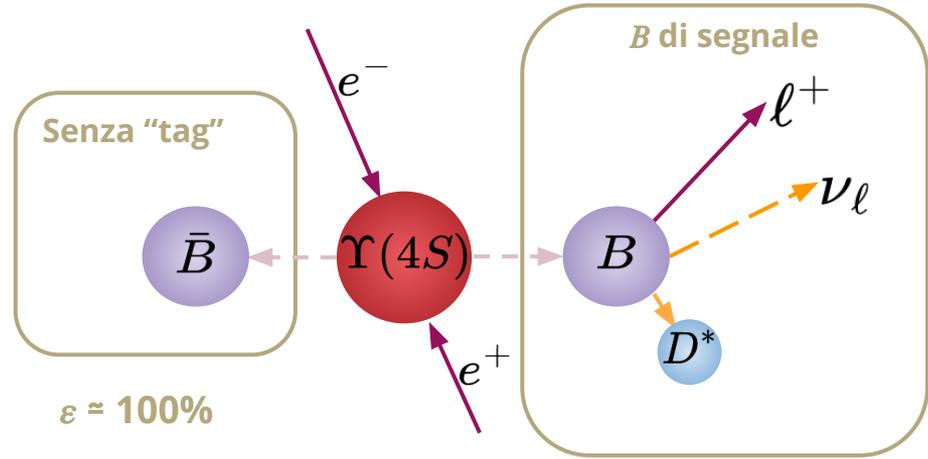
# Ricostruzione dei mesoni $B$ senza "tag"

I decadimenti semi-leptonici hanno  $\geq 1$  neutrini nello stato finale.



Si seleziona soltanto il candidato  $B$  di segnale, ignorando l'altro  $B$  ("senza tag")

- Ricostruzione della cinematica inaccurata, ma alta efficienza



# Ricostruzione dei mesoni $B$ con "tag"

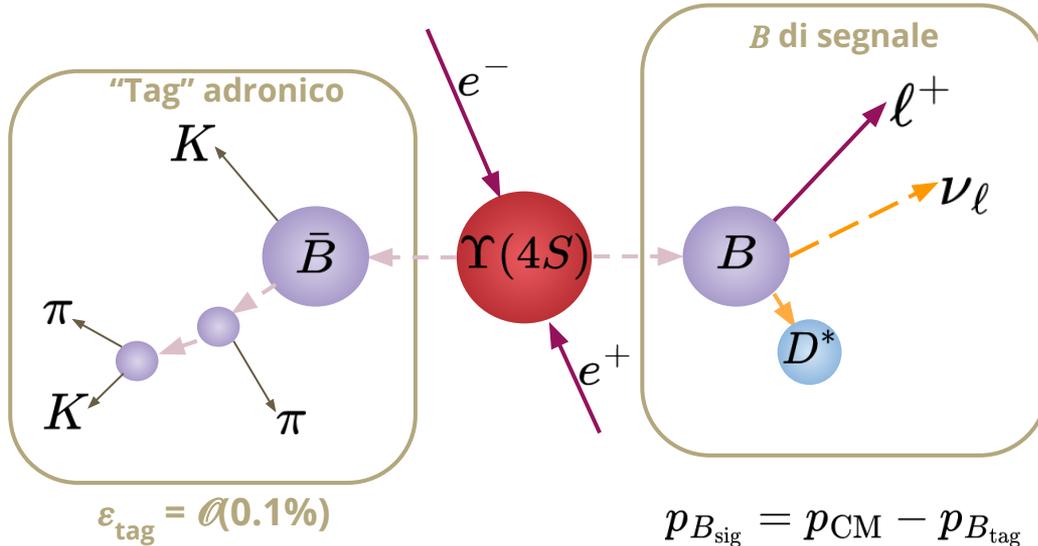
I decadimenti semi-leptonici hanno  $\geq 1$  neutrini nello stato finale.

Senza "tag"

Efficienza

"Tag" adronico

Purezza, informazione



La cinematica del  $B$  di segnale può essere ricavata ricostruendo completamente l'altro candidato  $B$  ("tag")

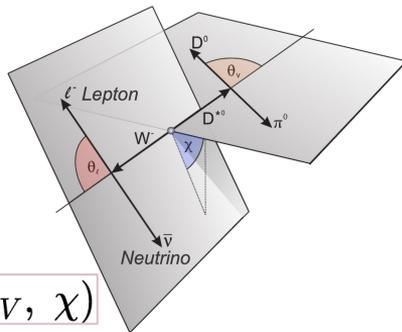
- $B_{\text{tag}}$  in decadimento adronico  $\rightarrow$  ottima ricostruzione ma bassa efficienza  $\epsilon_{\text{tag}} = \mathcal{O}(0.1\%)$

[Comput Softw Big Sci 3, 6 \(2019\)](#)

# Misura di $|V_{cb}|$ da $B^0 \rightarrow D^* \ell \nu$ senza "tag"

Estrazione del numero di eventi di segnale in bin di 4 parametri cinematici:

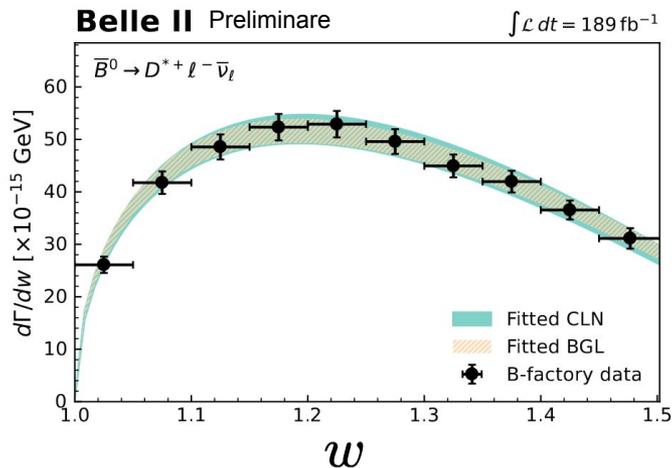
- Parametro di rinculo del  $D^*$ :  $w$
- 3 angoli di elicità:  $\theta_\ell, \theta_V, \chi$



$$\Gamma \propto |V_{cb}|^2 F^2(w, \cos \theta_\ell, \cos \theta_V, \chi)$$

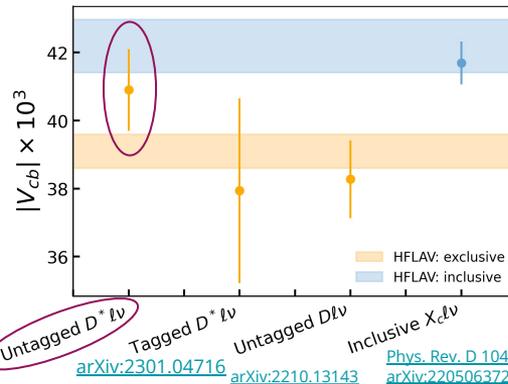
- Pur non ricostruendo il "tag", occorre stimare la direzione di volo del  $B_{\text{sig}}$ 
  - si sfrutta la cinematica del decadimento con un neutrino e informazione sul resto dell'evento

LQCD per normalizzazione a basso  $w$  [Phys. Rev. D 89, 114504](https://arxiv.org/abs/114504)



$$|V_{cb}|_{\text{BGL}} = (40.9 \pm 0.3_{\text{stat}} \pm 1.0_{\text{sist}} \pm 0.6_{\text{teor}}) \times 10^{-3}$$

Misure di  $|V_{cb}|$  a Belle II  
(inclusivo + esclusivo)



Risultato in **accordo** con le medie mondiali inclusiva ed esclusiva

[arXiv:2301.04716](https://arxiv.org/abs/2301.04716) [arXiv:2210.13143](https://arxiv.org/abs/2210.13143) [Phys. Rev. D 104, 112011, arXiv:220506372](https://arxiv.org/abs/220506372)

# $R(X_{e/\mu})$ inclusivo, con "tag" adronico

- Prima misura del rapporto tra decadimenti semi-leptonici inclusivi
- Verifica dell'universalità leptonica  $e/\mu$

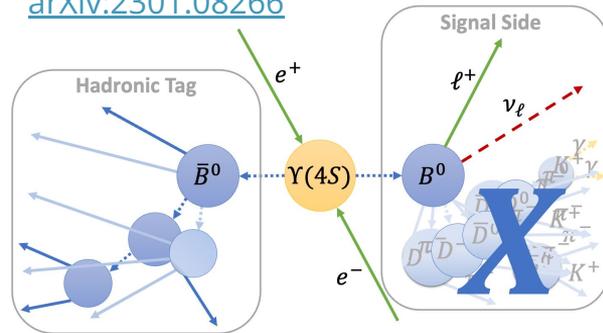
$$R(X_{e/\mu}) = \frac{\text{Br}(B \rightarrow X e \nu)}{\text{Br}(B \rightarrow X \mu \nu)}$$

- Estrazione del segnale dall'impulso del leptone nel sistema del  $B_{\text{sig}}$
- Fondi stimati dai dati:
  - campione di controllo con coppie  $B\bar{B}$  aventi stesso sapore

$$R(X_{e/\mu}) = 1.033 \pm 0.010(\text{stat}) \pm 0.019(\text{syst})$$

- Le principali sistematiche si cancellano nel rapporto
  - quella dominante è l'identificazione dei leptoni
- Miglior verifica dell'universalità  $e/\mu$  nei decadimenti dei  $B$

arXiv:2301.08266



# Sommario



Belle II sta assumendo un ruolo di primo piano nella fisica del sapore pesante, esplorando canali difficilmente accessibili da altri esperimenti.

Molti dei risultati preliminari sono **competitivi** con le rispettive medie mondiali.

- Verifica del meccanismo CKM nei decadimenti adronici dei  $B$
- $|V_{cb}|$  e universalità leptonica nei decadimenti semi-leptonici dei  $B$

20+ risultati nuovi di fisica del sapore nell'ultimo anno (elenco parziale dei più recenti):

- Misura dell'angolo  $\phi_3$  ([metodo GLW](#), [metodo GLS](#))
- Violazione di CP dipendente dal tempo in  $B \rightarrow K_S K_S K_S$
- Test dell'universalità leptonica nelle asimmetrie angolari di  $B \rightarrow D^* \ell \nu$
- Nuovo metodo per l'identificazione dei mesoni neutri con sapore  $c$  [arXiv:2304.02042](#)
- Misura della vita media e della frequenza di oscillazione dei mesoni  $B^0$  [arXiv:2304.02042](#)
- Misura del rapporto di decadimento e dell'asimmetria CP in  $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$  [arXiv:2304.02042](#)
- Misura della vita media dei barioni  $\Omega_c$  ([PRD 107, L031103](#)) e  $\Lambda_c$  ([PRL 130, 071802](#))

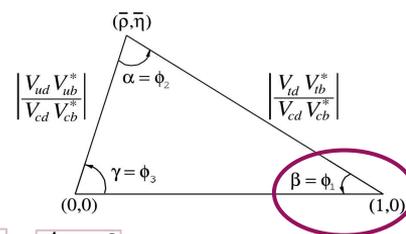
# Grazie per l'attenzione!



# Appendice



# Angolo $\beta/\phi_1$ da pinguini adronici: $B \rightarrow K_S K_S K_S$



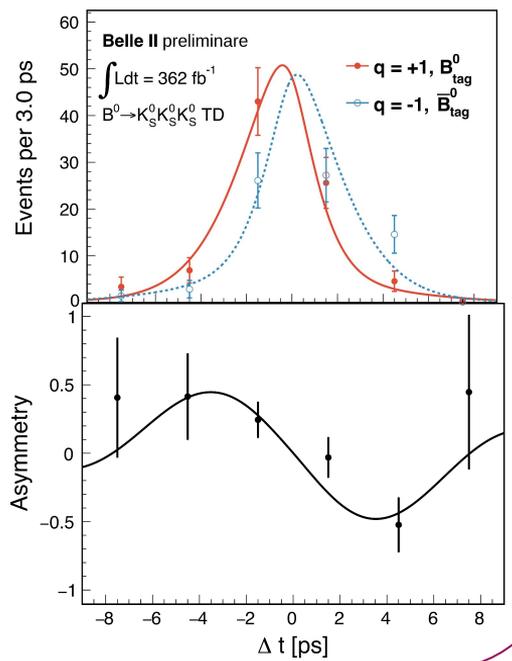
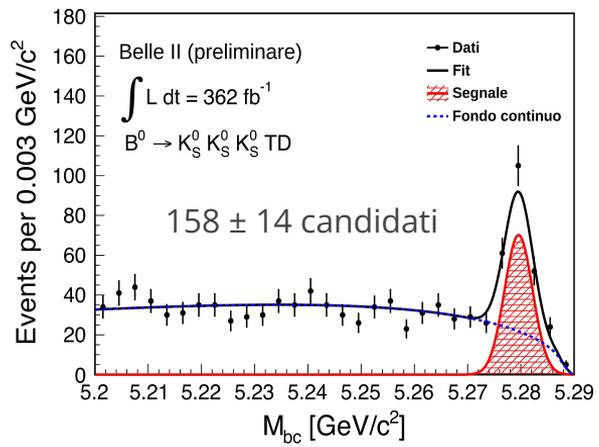
$$S = \pm \sin 2\phi_1 \quad A = 0$$

## $B \rightarrow K_S K_S K_S$

- Simile a  $B \rightarrow \varphi K_S$  ma senza fondi con CP opposta
- Complessa ricostruzione del vertice di segnale
  - estrapolazione dalla direzione di volo dei  $K_S$  (che decadono fuori dal rivelatore di vertice)
- Validazione sui dati con  $B^+ \rightarrow K_S K_S K^+$ 

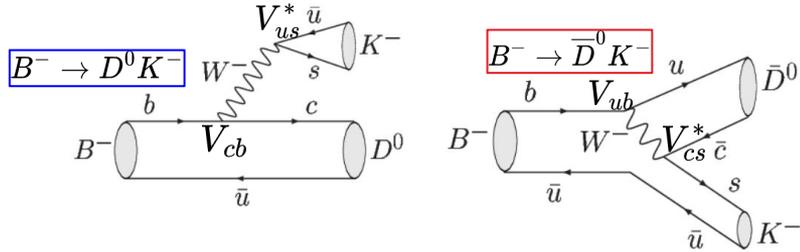
$$A_{CP} = 0.07^{+0.15}_{-0.20} \pm 0.02$$

$$S_{CP} = -1.37^{+0.35}_{-0.45} \pm 0.03$$
- Misura in linea con le più precise determinazioni di  $A$  in  $K_S K_S K_S$

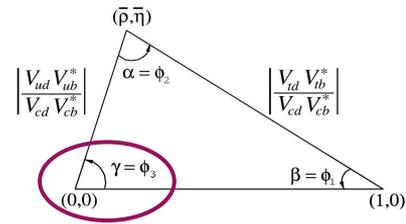


# Misure recenti CKM: verso l'angolo $\gamma/\phi_3$

$\phi_3$  è la fase tra le transizioni  $b \rightarrow u$  (soppressa) e  $b \rightarrow c$  (favorita)

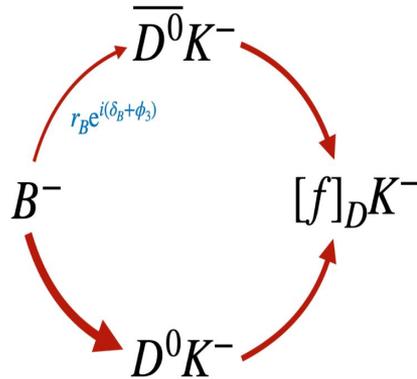


$$\frac{A(B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^-)_{\text{sop.}}}{A(B^- \rightarrow D^0 K^-)_{\text{fav.}}} = r_B e^{i(\delta_B - \phi_3)}$$

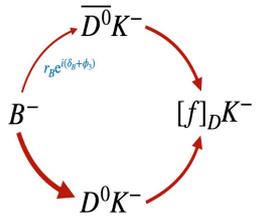
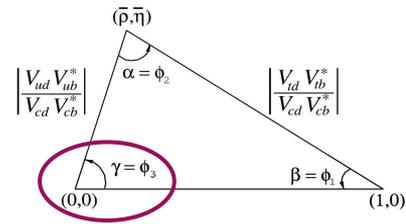


Media mondiale:  
 $\phi_3 = (71.1^{+4.6}_{-5.3})^\circ$

$\phi_3$  può essere misurata nell'interferenza tra i decadimenti  $b \rightarrow u$  e  $b \rightarrow c$  in uno stato finale comune  $f_D$

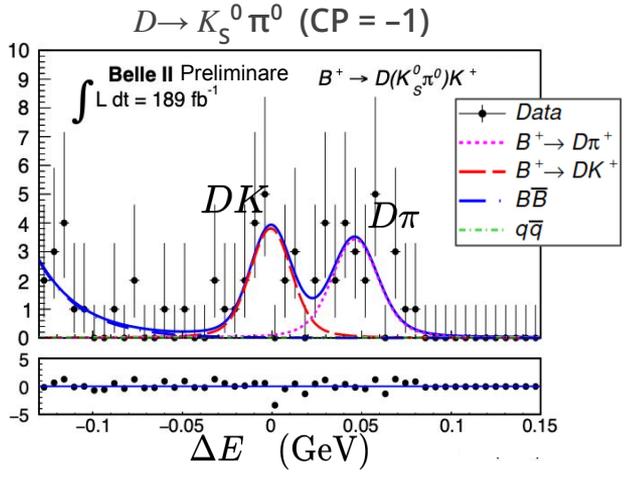
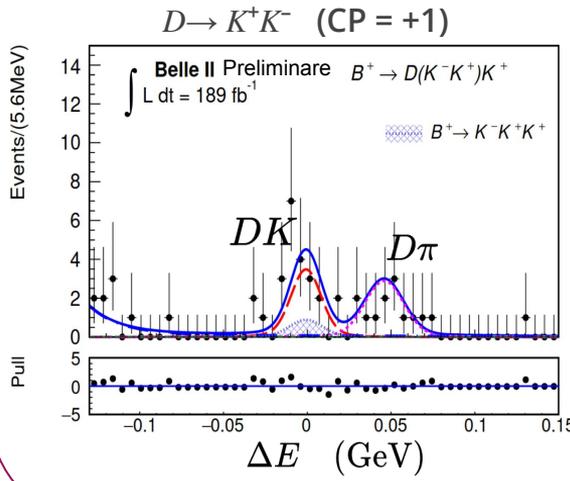


# Misure recenti CKM: verso l'angolo $\gamma/\phi_3$



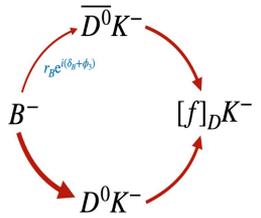
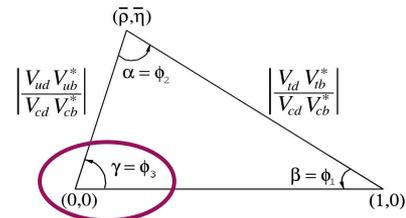
Belle + Belle II  
(711 fb<sup>-1</sup> + 189 fb<sup>-1</sup>)

Metodo GLW: decadimento del  $D$  in autostati di CP



- Misura dell'asimmetria  $\mathcal{A}_{CP}$  (integrata nel tempo) per ciascun autostato
- $\mathcal{A}_{CP+} = (12.5 \pm 5.8 \pm 1.4)\%$
- $\mathcal{A}_{CP-} = (-16.7 \pm 5.7 \pm 0.6)\%$
- Risultati in accordo con le previsioni del MS
- Miglior misura di  $\mathcal{A}_{CP}$  per CP = -1

# Misure recenti CKM: verso l'angolo $\gamma/\phi_3$

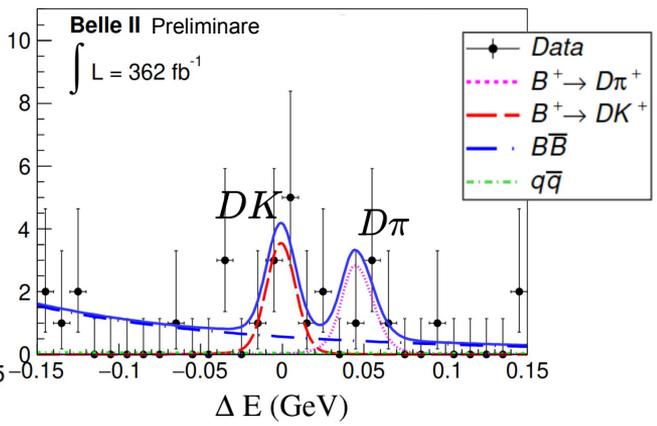
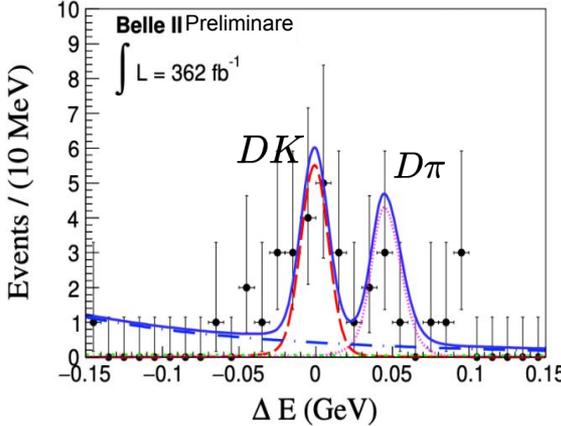


Belle + Belle II  
(711 fb<sup>-1</sup> + 189 fb<sup>-1</sup>)

## Metodo GLS: decadimenti Cabibbo-soppressi del $D$

I  $K$  hanno lo stesso segno  
 $B^- \rightarrow D(\rightarrow K_S^0 K^- \pi^+) K^-$

I  $K$  hanno segno opposto  
 $B^- \rightarrow D(\rightarrow K_S^0 K^+ \pi^-) K^-$



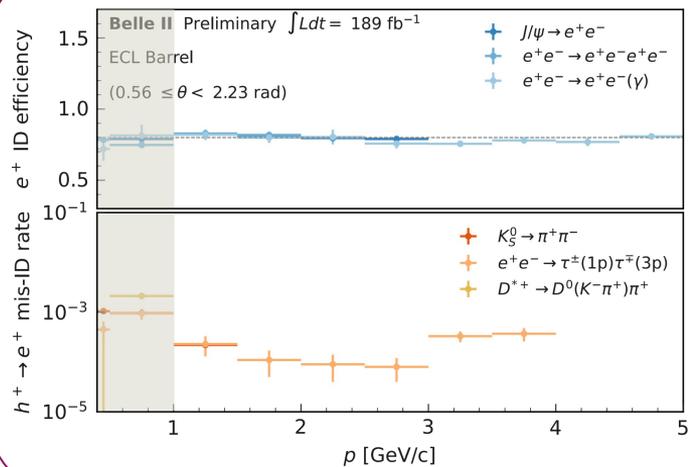
- Misure ripetute separatamente nell'intero spazio delle fasi del  $D$  e per la risonanza  $K^*K$
- Includendo  $B \rightarrow D\pi$ , sono accessibili 4 asimmetrie e 3 rapporti di decadimento
- Risultati non competitivi, pur essendo le misure più precise ottenute con questo approccio

# Identificazione dei leptoni

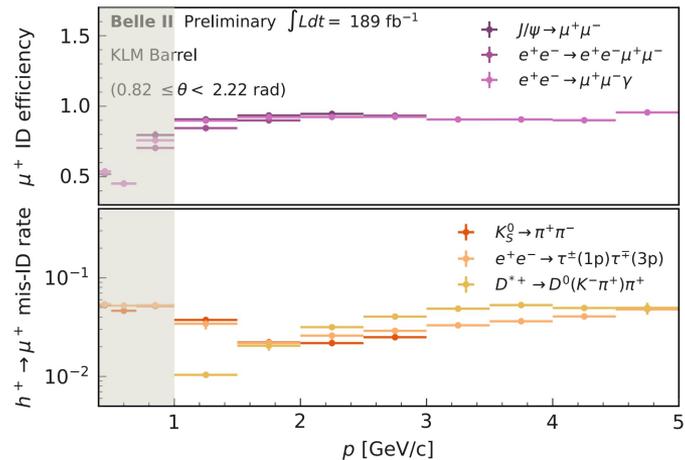
Efficienza e probabilità di misidentificazione misurate sui dati in diversi canali di controllo

[BELLE2-CONF-PH-2022-003](#)

## Elettroni



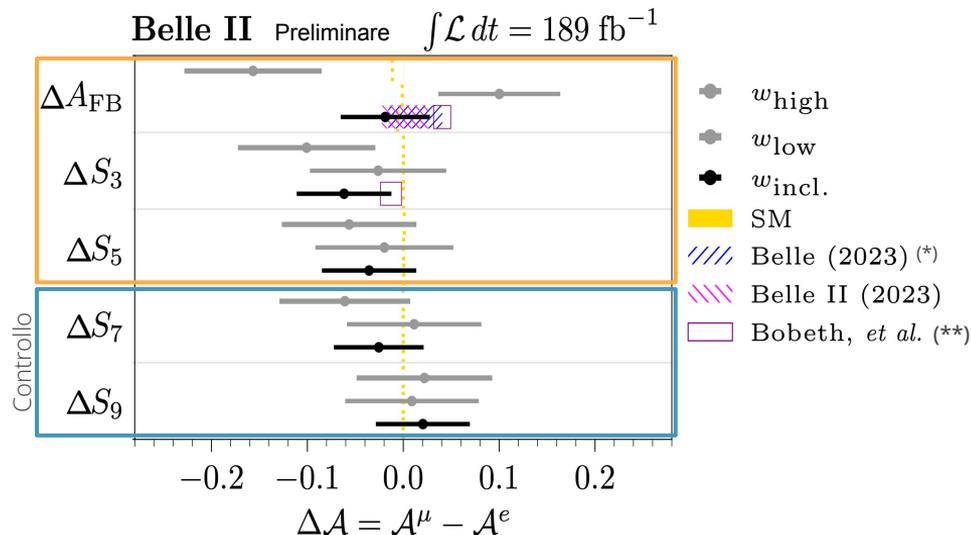
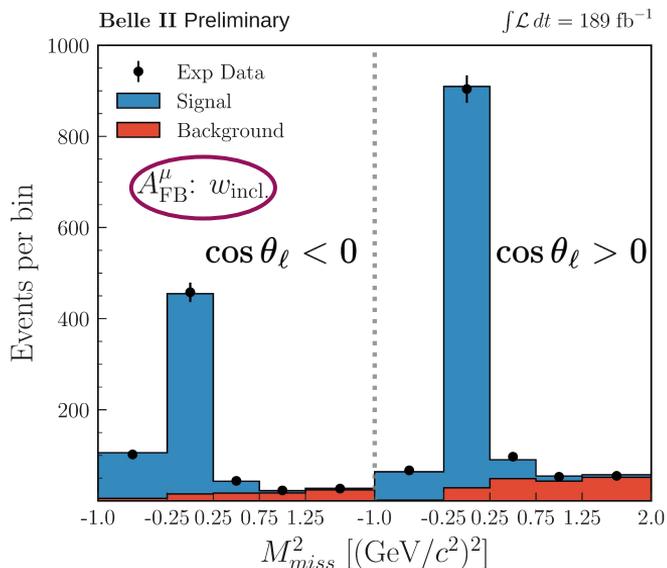
## Muoni



# Asimmetrie angolari in $B^0 \rightarrow D^* \ell \nu$ con "tag" adronico

Misura delle asimmetrie per 5 diversi osservabili angolari, e verifica dell'universalità leptonica nella differenza tra  $e$  e  $\mu$

- "Massa mancante"  $M_{\text{miss}}^2$  per separare i fondi  $\rightarrow$  principalmente  $D^{**} \ell \nu$
- Asimmetrie calcolate in tre diverse regioni cinematiche (parametro di rinculo  $w$ )



- Incertezza statistica **dominante**
- $\Delta A_{\text{FB}}, \Delta S_3, \Delta S_5$  sono sensibili a contributi di nuova fisica
- Nessuna evidenza di violazione dell'universalità leptonica

(\*) [arXiv:2301.07529](https://arxiv.org/abs/2301.07529)

(\*\*) [Eur. Phys. J. C 81, 984 \(2021\)](https://arxiv.org/abs/2108.08854) calcolato in un intervallo ridotto  $w \in [1, 1.5]$