

Ricerche di violazione di CP in barioni con beauty a LHCb

Daniele Marangotto

Sezione INFN di Milano e Università degli Studi di Milano
IFAE 2017, Trieste, 21 aprile



Introduzione

- L'**antimateria** non è un semplice “**negativo**” della **materia**, ma si comporta in modo leggermente diverso...
- Le leggi della fisica non sono invarianti per **simmetria CP**, ossia **riflessioni** (parità P) in cui le particelle sono sostituite dai propri **anti-partner** (coniugazione di carica C).
- La **violazione** di CP (CPV), osservata nei mesoni strani e beauty, ad oggi è **descritta con successo** nel modello standard (MS) dal meccanismo CKM
- **Troppo modesta** per giustificare l'**asimmetria materia-antimateria** osservata nell'universo (bariogenesi)
- Ulteriori differenze nel comportamento di materia e antimateria potrebbero provenire da **fisica oltre il modello standard**

Introduzione

- **Numerose ricerche** di CPV eseguite nei decadimenti di **mesoni**
- Tuttavia, la materia visibile del nostro universo è costituita quasi interamente da **barioni**, nelle cui transizioni **manca** ancora un'osservazione di **CPV**
- **Pochi studi** di CPV fatti sinora in decadimenti di barioni
- Questa presentazione si focalizzerà sulle **ricerche di CPV** nei **barioni beauty** effettuati dalla collaborazione **LHCb**
- Significativa produzione di barioni beauty a LHCb

$$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X, 7 \text{ TeV}, 2 < \eta < 5) \approx 72 \mu\text{b} \quad f(b \rightarrow \Lambda_b^0) \sim 13\%$$

- Analisi basate sui dati registrati durante la **prima presa dati** di LHC (2011-12, 3 fb^{-1} a $\sqrt{s} = 7/8 \text{ TeV}$)
- **POSTER**: Proposta di ricerca di CPV tramite misura di **momento di dipolo elettrico** di barioni charm e strani ad LHC

Asimmetria diretta di CP

- CPV cercata confrontando un dato processo (e.g. $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-$) col suo CP-trasformato (e.g. $\bar{\Lambda}_b^0 \rightarrow \bar{p}K^+ \mu^- \mu^+$, $CP(\vec{p}_i) = -\vec{p}_i$)
- Asimmetria diretta: si confronta il numero di decadimenti fra i due processi CP-coniugati
- Sensibile sia a CPV che a componenti sperimentali

$$\mathcal{A}_{\text{raw}} \equiv \frac{N(\Lambda_b^0) - N(\bar{\Lambda}_b^0)}{N(\Lambda_b^0) + N(\bar{\Lambda}_b^0)} = \mathcal{A}_{CP} + \mathcal{A}_{\text{prod}}(\Lambda_b^0) + \mathcal{A}_{\text{det}}(K^-) + \mathcal{A}_{\text{det}}(p)$$

- Sostanzialmente eliminate sfruttando una transizione di controllo (e.g. $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi$) con CPV trascurabile

$$\begin{aligned}\Delta\mathcal{A}_{CP} &\equiv \mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-) - \mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi) \\ &= \mathcal{A}_{\text{raw}}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-) - \mathcal{A}_{\text{raw}}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi)\end{aligned}$$

Asimmetrie di prodotti tripli

- Si considerano **asimmetrie** rispetto **prodotti tripli**

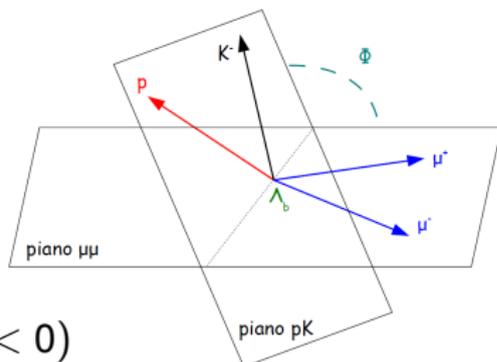
$$C_{\hat{T}} \equiv \vec{p}_{\mu^+} \cdot (\vec{p}_p \times \vec{p}_{K^-})$$

$$\bar{C}_{\hat{T}} \equiv \vec{p}_{\mu^-} \cdot (\vec{p}_{\bar{p}} \times \vec{p}_{K^+})$$

$$C_{\hat{T}} \sim \sin \phi$$

$$A_{\hat{T}} \equiv \frac{N_{\Lambda_b^0}(C_{\hat{T}} > 0) - N_{\Lambda_b^0}(C_{\hat{T}} < 0)}{N_{\Lambda_b^0}(C_{\hat{T}} > 0) + N_{\Lambda_b^0}(C_{\hat{T}} < 0)}$$

$$\bar{A}_{\hat{T}} \equiv \frac{N_{\bar{\Lambda}_b^0}(-\bar{C}_{\hat{T}} > 0) - N_{\bar{\Lambda}_b^0}(-\bar{C}_{\hat{T}} < 0)}{N_{\bar{\Lambda}_b^0}(-\bar{C}_{\hat{T}} > 0) + N_{\bar{\Lambda}_b^0}(-\bar{C}_{\hat{T}} < 0)}$$



Asimmetrie di prodotti tripli

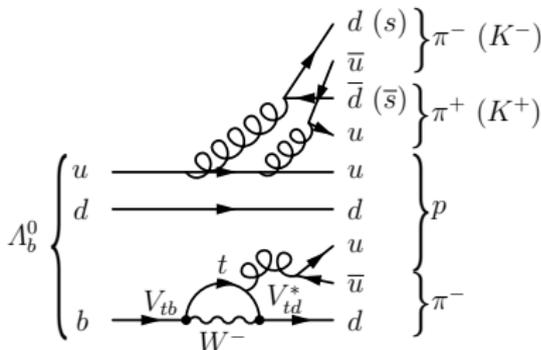
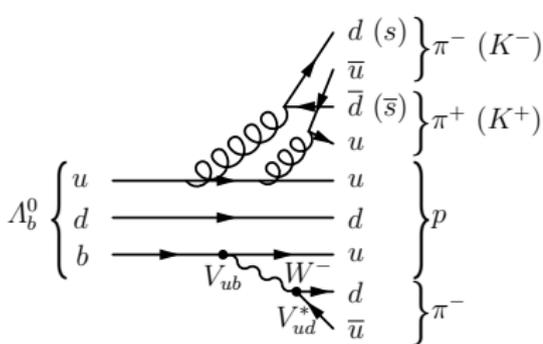
- La differenza fra $A_{\hat{T}}$ e $\bar{A}_{\hat{T}}$ è un'osservabile di CPV

$$a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}} \equiv \frac{1}{2} (A_{\hat{T}} - \bar{A}_{\hat{T}})$$

- Sostanzialmente **indipendente** da asimmetrie di **produzione** e **rivelazione**, non necessita di transizioni di controllo
- Le osservabili \mathcal{A}_{CP} e $a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}$ sono **sensibili** a **distinte sorgenti di CPV**, dipendendo diversamente dall'interferenza delle ampiezze di decadimento

CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-(K^+K^-)$

- Transizioni mediate da ampiezze ad **albero** $b \rightarrow u$ ed a **loop** $b \rightarrow d$
- Sensibili a **CPV da MS**, prodotta dall'interferenza di ampiezze con diverse componenti di CPV (fasi deboli)
- Misurata $a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}$ integrata su tutti gli eventi e in intervalli dello **spazio fasi** di $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$

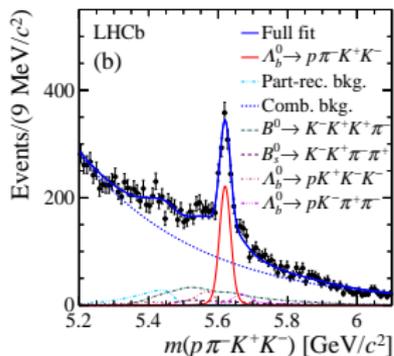
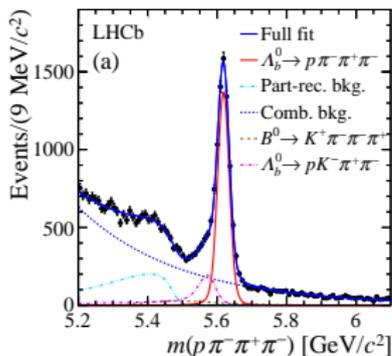


CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-(K^+K^-)$

- Prima osservazione di questi decadimenti

→ 6646 ± 105 eventi $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$

→ 1030 ± 56 eventi $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-K^+K^-$



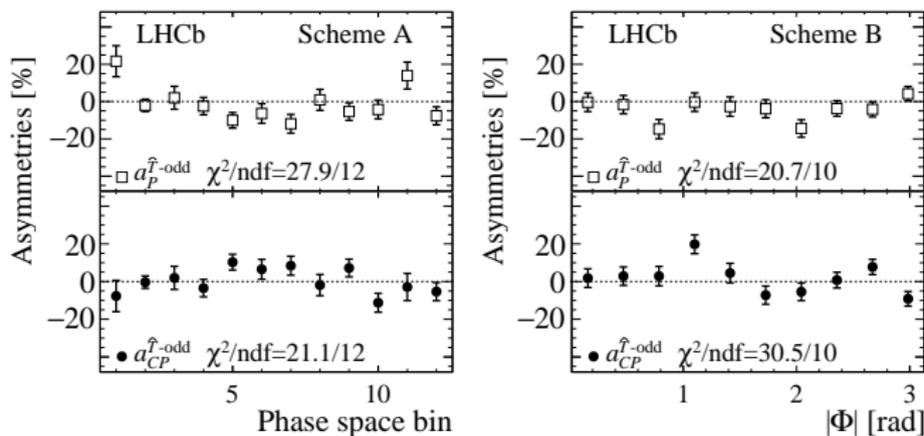
- CPV integrata su tutti gli eventi:

$$a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-) = [+1.15 \pm 1.45 \text{ (stat)} \pm 0.32 \text{ (syst)}] \times 10^{-2}$$

$$a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-K^+K^-) = [-0.93 \pm 4.54 \text{ (stat)} \pm 0.42 \text{ (syst)}] \times 10^{-2}$$

CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-(K^+K^-)$

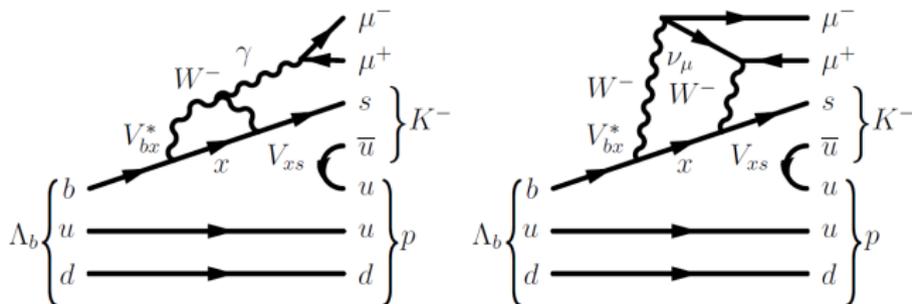
- CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$ misurata in intervalli di spazio fasi con due partizioni indipendenti (12 e 10 intervalli)
- Evidenza di CPV combinata pari a 3.3 deviazioni standard
- Prima evidenza di CPV nei barioni!



LHCb collaboration, *Probing matter-antimatter asymmetries in beauty baryon decays*, Nature Physics 13 (2017) 391-396, [arXiv:1609.05216](https://arxiv.org/abs/1609.05216)

CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-$

- Transizione di **corrente neutra** con **cambio di sapore** $b \rightarrow s$
- Soppressa nel MS, **molto sensibile** a **nuova fisica** perché nuove particelle potrebbero partecipare nei diagrammi a loop
- **CPV** prevista dal meccanismo CKM **limitata**: ampiezze di CPV sopresse rispetto quelle che conservano CP
- Prima osservazione con 600 ± 44 eventi

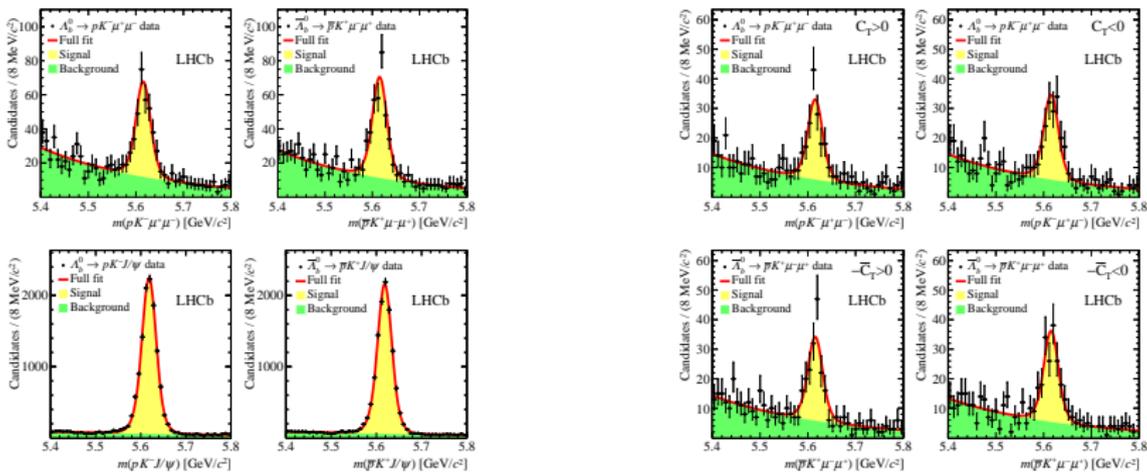


CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-$

- Misurate $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ rispetto $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi$ e $a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}$

$$\Delta\mathcal{A}_{CP} = [-3.5 \pm 5.0 \text{ (stat)} \pm 0.2 \text{ (syst)}] \times 10^{-2}$$

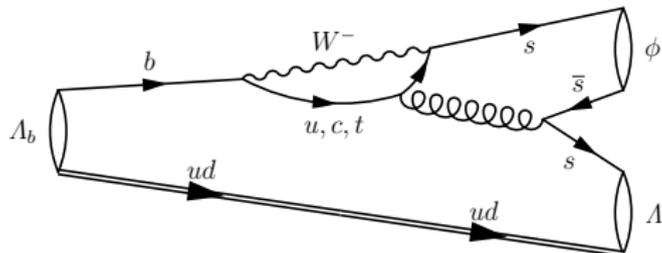
$$a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}} = [+1.2 \pm 5.0 \text{ (stat)} \pm 0.7 \text{ (syst)}] \times 10^{-2}$$



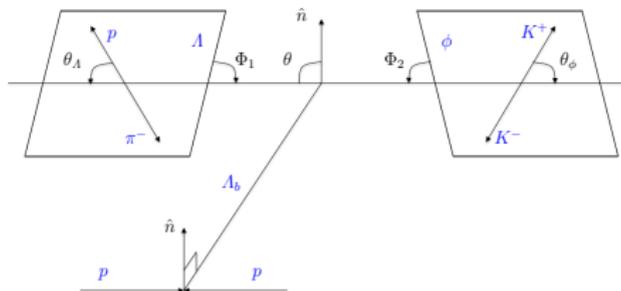
LHCb collaboration, *Observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- \mu^+ \mu^-$ and a search for CP violation*, submitted to JHEP, [arXiv:1703.00256](https://arxiv.org/abs/1703.00256)

CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda \phi$

- Transizione $b \rightarrow s$ proibita a livello albero nel MS
- CPV soppressa nel MS, sensibile a CPV da nuova fisica
- Prima osservazione con significatività di 5.9σ
- Misurate asimmetrie analoghe a quelle di prodotti tripli



CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\phi$



- Definite asimmetrie $A_{\Lambda,\phi}^{C,S}$ rispetto agli angoli $\cos \phi_{1,2}$, $\sin \phi_{1,2}$

$$A_{\Lambda}^C = -0.22 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.06 \text{ (syst)}$$

$$A_{\Lambda}^S = +0.13 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (syst)}$$

$$A_{\phi}^C = -0.01 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)}$$

$$A_{\phi}^S = -0.07 \pm 0.12 \text{ (stat)} \pm 0.01 \text{ (syst)}$$

LHCb collaboration, *Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\phi$ decay*, Physics Letters B **759** (2016) 282-292, [arXiv:1603.00413](https://arxiv.org/abs/1603.00413)

CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ \pi^- (K^-)$

- Transizioni mediate da ampiezze ad **albero** $b \rightarrow u$ ed a **loop** $b \rightarrow d$
- Sensibili a **CPV da MS** prodotta dall'interferenza di ampiezze
- Prima osservazione di questi decadimenti
- 97 ± 14 eventi $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ \pi^-$
- 185 ± 15 eventi $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$
- Misurata $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ rispetto al decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ (\Lambda\pi^+) \pi^-$

$$\mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ \pi^-) = -0.53 \pm 0.23 \text{ (stat)} \pm 0.11 \text{ (syst)}$$

$$\mathcal{A}_{CP}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-) = -0.28 \pm 0.10 \text{ (stat)} \pm 0.07 \text{ (syst)}$$

- Compatibili con simmetria **CP entro 3σ**

LHCb collaboration, *Observations of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ \pi^-$ and $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda K^+ K^-$ decays and searches for other Λ_b^0 and Ξ_b decays to $\Lambda h^+ h^-$ final states*, JHEP **05** (2016) 81, [arXiv:1603.00413](https://arxiv.org/abs/1603.00413)

Ricerche precedenti

- CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi J/\psi$: misurata $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ rispetto $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi$ su 2102 ± 61 eventi

$$\Delta\mathcal{A}_{CP} = [+5.7 \pm 2.3 \text{ (stat)} \pm 1.2 \text{ (syst)}] \times 10^{-2}$$

- Compatibile con simmetria CP a 2.2σ . Nessuna asimmetria significativa osservata nello spazio fasi
- CPV in $\Lambda_b^0 \rightarrow K_s^0 p\pi^-$: misurata $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ rispetto $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ (\rightarrow pK_s^0)\pi^-$ su 106 ± 25 eventi

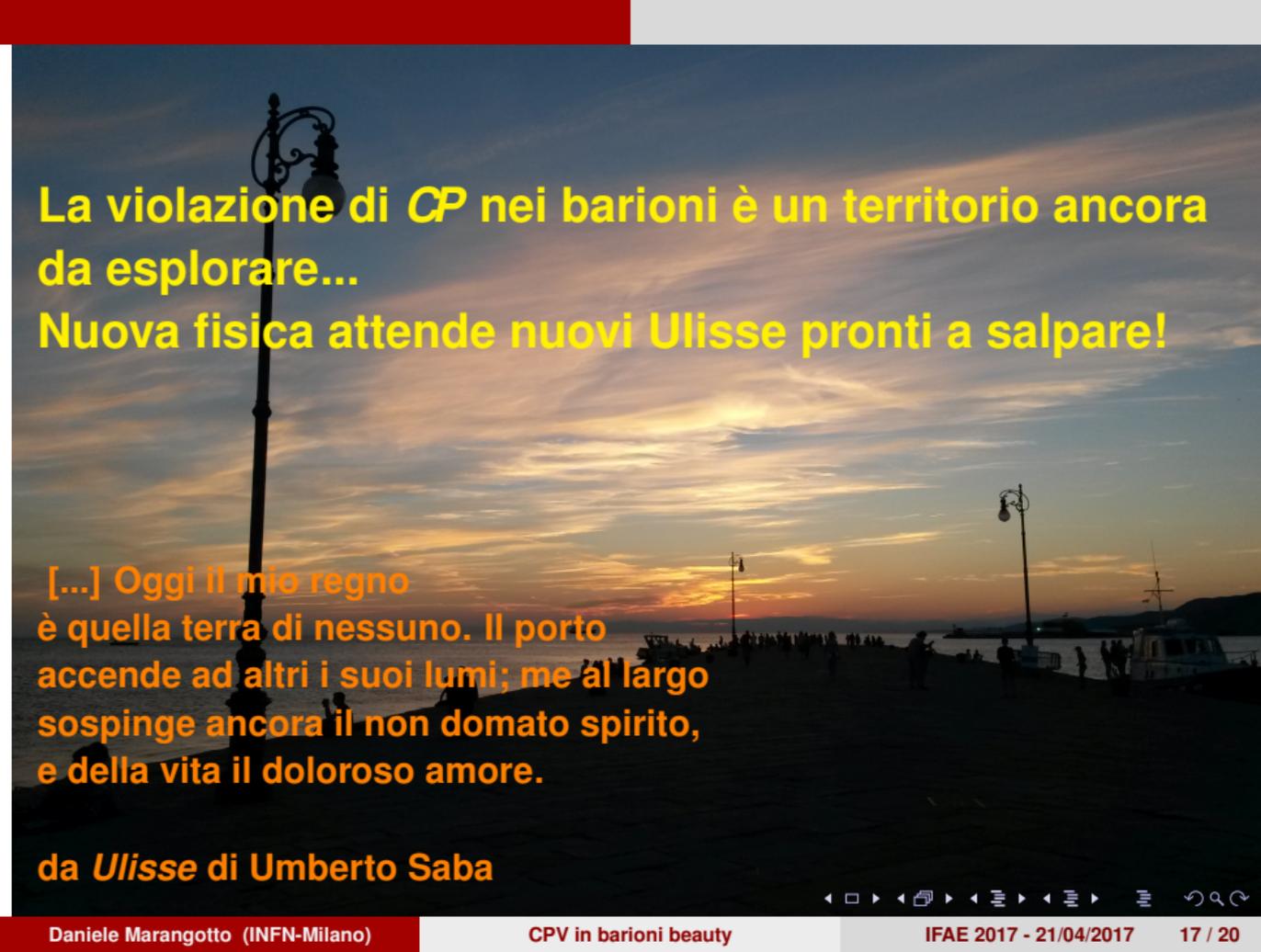
$$\mathcal{A}_{CP} = +0.22 \pm 0.13 \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)}$$

LHCb collaboration, *Observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi J/\psi$ decay*, JHEP **07** (2014) 103, [arXiv:1406.0755](https://arxiv.org/abs/1406.0755)

LHCb collaboration, *Searches for Λ_b^0 and Ξ_b decays to $K_s^0 p\pi^-$ and $K_s^0 pK^-$ final states with first observation of the $\Lambda_b^0 \rightarrow K_s^0 p\pi^-$ decay*, JHEP **04** (2014) 087, [arXiv:1402.0770](https://arxiv.org/abs/1402.0770)

Prospettive

- **Prima presa dati**: ottenuta **evidenza di CPV** a 3.3σ in $\Lambda_b^0 \rightarrow p\pi^-\pi^+\pi^-$, altri risultati compatibili con simmetria CP
- **Seconda presa dati** di LHC in corso, **registrati** 2 fb^{-1} a $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, **attesi** 8 fb^{-1} entro fine 2018.
- Sezione d'urto beauty raddoppiata a $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ rispetto a 7 TeV
 - **Eventi** beauty previsti $\times 6.7$ a fine 2018 rispetto prima presa dati
 - **Incertezze** statistiche $\div 2.6$ e **nuovi decadimenti** analizzabili
- L'osservazione di CPV nei barioni potrebbe essere a portata di mano...
- E nel caso, il solito dilemma: **nuova fisica** o il buon vecchio **modello standard**?

A sunset over a harbor with silhouettes of people and street lamps. The sky is filled with soft, golden light from the setting sun, creating a dramatic backdrop for the scene. In the foreground, several ornate street lamps are silhouetted against the bright sky. A group of people is gathered on a promenade or pier, looking out towards the water. A boat is visible in the distance on the right side of the frame. The overall mood is serene and contemplative.

La violazione di **CP** nei barioni è un territorio ancora da esplorare...
Nuova fisica attende nuovi Ulisse pronti a salpare!

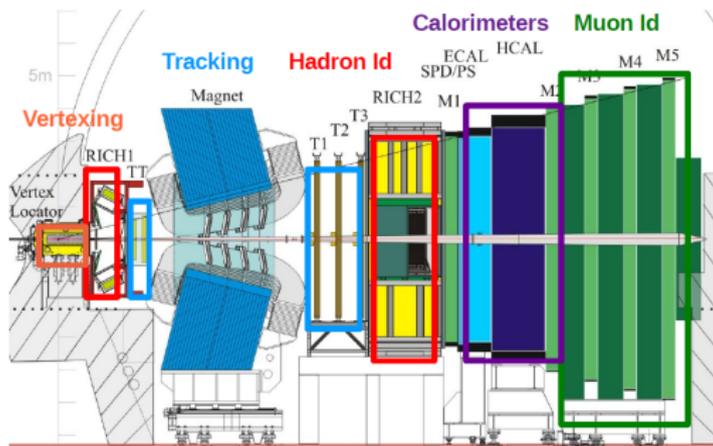
[...] Oggi il mio regno
è quella terra di nessuno. Il porto
accende ad altri i suoi lumi; me al largo
sospinge ancora il non domato spirito,
e della vita il doloroso amore.

da *Ulisse* di Umberto Saba

Diapositive extra

Esperimento LHCb

- Progettato per studiare particelle beauty e charm in collisioni pp
- Punti di forza: ricostruzione vertici decadimento, tracciatura e identificazione particelle
- Significativa produzione di barioni beauty $f(b \rightarrow \Lambda_b^0) \sim 13\%$



Osservabili di CPV

- Le osservabili \mathcal{A}_{CP} e $a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}}$ sono **sensibili a distinte sorgenti di CPV**, dipendendo diversamente dall'interferenza delle ampiezze di decadimento
- Originano rispettivamente dall'**interferenza di ampiezze \hat{T} -even** $\leftrightarrow \hat{T}$ -even e \hat{T} -even $\leftrightarrow \hat{T}$ -odd (hep-ph/1508.03054)
- \hat{T} operatore di inversione di moto, agente come

$$\hat{T}(\vec{p}) = -\vec{p} \quad \hat{T}(\vec{s}) = -\vec{s}$$

ma senza invertire stati iniziale e finale, a differenza di T

- Dipendono rispettivamente da differenze di fasi forti CP -pari $\delta_e^1 - \delta_e^2$, $\delta_e^1 - \delta_o^1$ e differenze di fasi deboli CP -dispari $\phi_e^1 - \phi_e^2$, $\phi_e^1 - \phi_o^1$ come

$$\mathcal{A}_{CP} \propto \sin(\delta_e^1 - \delta_e^2) \sin(\phi_e^1 - \phi_e^2) \quad a_{CP}^{\hat{T}\text{-odd}} \propto \cos(\delta_e^1 - \delta_o^1) \sin(\phi_e^1 - \phi_o^1)$$