



Decadimenti rari e veramente rari di adroni a LHCb

Gabriele Martelli

Università degli Studi di Perugia e INFN Perugia

A nome della collaborazione LHCb

Catania, 12 – 14 Aprile 2023

Incontri di Fisica delle Alte Energie

- "First observation and branching fraction measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$ decay"
 - Prima osservazione del decadimento
 - [\[arXiv:2212.12574\]](#) Sottomesso il 23 Dicembre 2022 alla rivista **JHEP**

- "Observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$ "
 - Ossevazione di una nuova modalità di decadimento
 - [\[JHEP. 2022, 38 \(2022\)\]](#)

- "Measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda(1520)\mu^+\mu^-$ differential branching fraction"
 - Prima misura della frazione di decadimento differenziale
 - [\[arxiv:2302.08262\]](#) Sottomesso il 16 Febbraio 2023 alla rivista **PRL**

- Ulteriori decadimenti FCNC
 - "Search for rare decays of D^0 mesons into **two muons**"
 - ✓ Ricerca del decadimento, [\[arXiv:2212.11203\]](#) sottomesso il 21 Dicembre 2022 alla rivista **PRL**
 - "Search for $K_{S(L)}^0 \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ decays at LHCb"
 - ✓ Ricerca del decadimento, [\[arXiv:2212.04977\]](#) sottomesso il 09 Dicembre 2022 alla rivista **PRD**

- ▶ Spettrometro a singolo braccio in avanti
- ▶ Pseudorapidità coperta: $2 < \eta < 5$

Vertex Locator

- Ricostruzione dei vertici di decadimento
- Risoluzione sul tempo di decadimento: 45 fs
- Risoluzione sul punto di interazione: 20 μm

Dipole Magnet

- Forza di deflessione: 4 Tm

Stazioni di tracking TT e OT

- Risoluzione sul momento $\Delta p/p = 0.5\% - 1.0\%$
(5 GeV/c – 100 GeV/c)

Rivelatori RICH

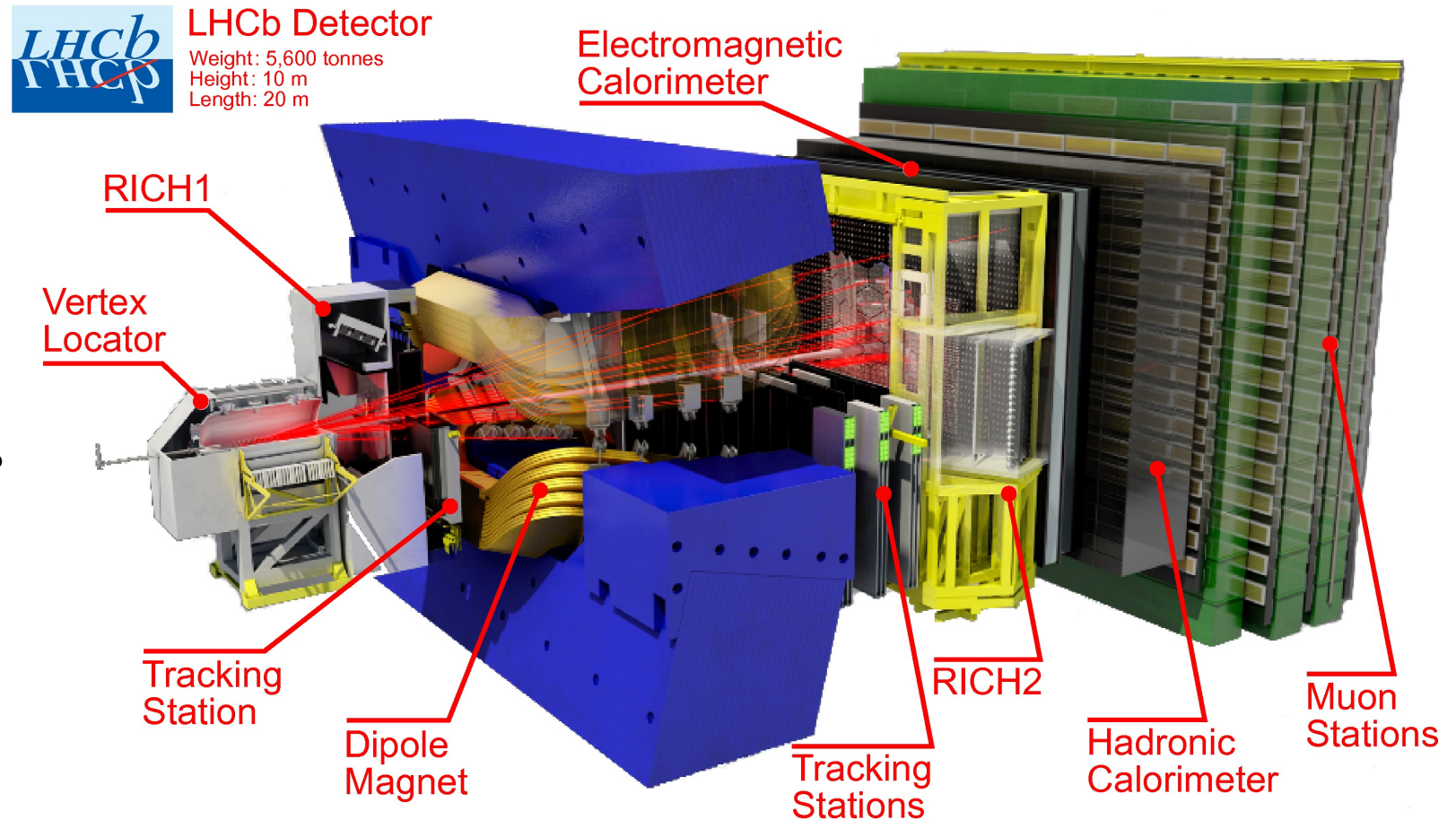
- Efficienza di separazione $\epsilon(K \rightarrow K) \sim 95\%$
mis-ID $\epsilon(\pi \rightarrow K) \sim 5\%$

Calorimetri (ECAL, HCAL)

- Identificazione e misura energetica di e/γ
- $\Delta E/E = 1\% \oplus 10\%/\sqrt{E}$ (GeV)

Stazioni muoniche

- Efficienza di identificazione $\epsilon(\mu \rightarrow \mu) \sim 97\%$, mis-ID $\epsilon(\pi \rightarrow \mu) \sim 1-3\%$



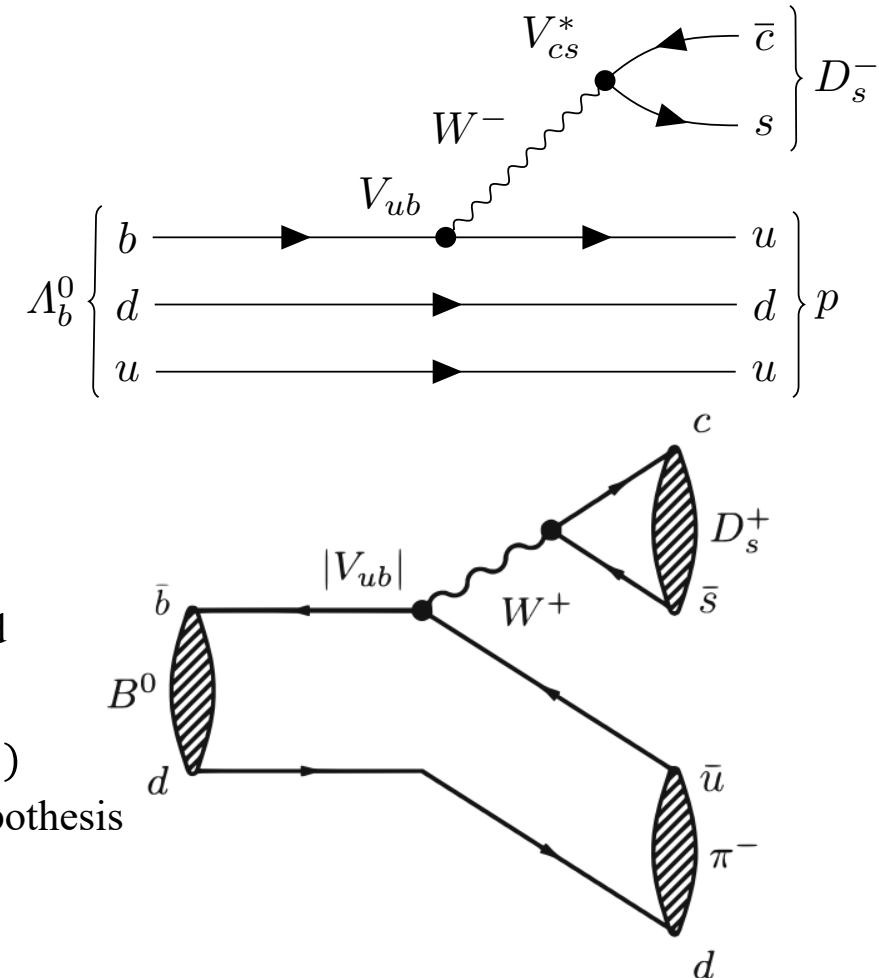
[JINST 3 (2008) S08005]

[IJMPA 30 (2015) 1530022]

- ▶ $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$ è un decadimento adronico debole
 - Avviene attraverso una transizione $b \rightarrow u$
 - Descritto da un singolo diagramma di Feynman di ordine principale
- ▶ $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p) \propto |V_{ub}|^2 |V_{cs}|^2 f_{D_s}^2 |a_{NF}|^2 |F_{\Lambda_b^0 \rightarrow p}(m_{D_s}^2)|^2$
 - $|V_{ij}|$ – Elementi di matrice CKM, descrivono le transizioni tra quark $i \rightarrow j$
 - f_{D_s} – Costante di decadimento per il mesone D_s^-
 - $F_{\Lambda_b^0 \rightarrow p}$ – Fattore di forma, descrive la transizione $\Lambda_b^0 \rightarrow p$
 - a_{NF} – Parametro non-fattorizzabile, descrive le interazioni gluoniche tra D_s^- e p

▶ Interesse:

- V_{ub} è l'elemento di matrice CKM con valore assoluto meno ben determinato
 - ✓ Una miglior conoscenza di $|V_{ub}|$ costituirebbe una verifica del Modello Standard
[[Phys. Rev. D 91, 073007](#)]
- Avendo la stessa transizione tree-level, $\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p)$ è molto simile a $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D_s^+ \pi^-)$
 - ✓ $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$ potrebbe portare ad una nuova misura sulla breaking factorisation hypothesis
[[Eur. Phys. J. C81 \(2021\) 314](#)]



► "First observation and branching fraction measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$ decay"

[arXiv:2212.12574] sottomesso alla rivista **JHEP**

- Analisi con i dati raccolti durante il Run2
- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 6 \text{ fb}^{-1}$

► Strategia:

- $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- (\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)$ scelto come canale di normalizzazione
- D_s^- ricostruito come $D_s^- \rightarrow K^- K^+ \pi^-$

$$\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p) = \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-) \frac{N_{\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p}}{N_{\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-}} \frac{\epsilon_{\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-}}{\epsilon_{\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p}} \frac{\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)}{\mathcal{B}(D_s^- \rightarrow K^- K^+ \pi^-)}$$

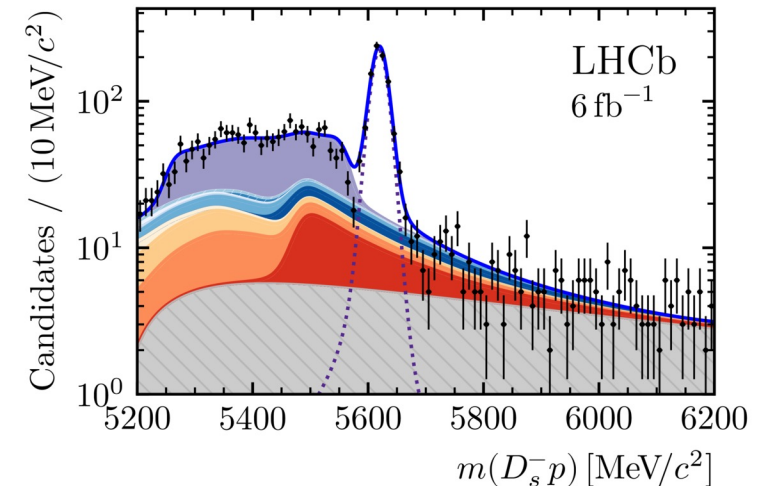
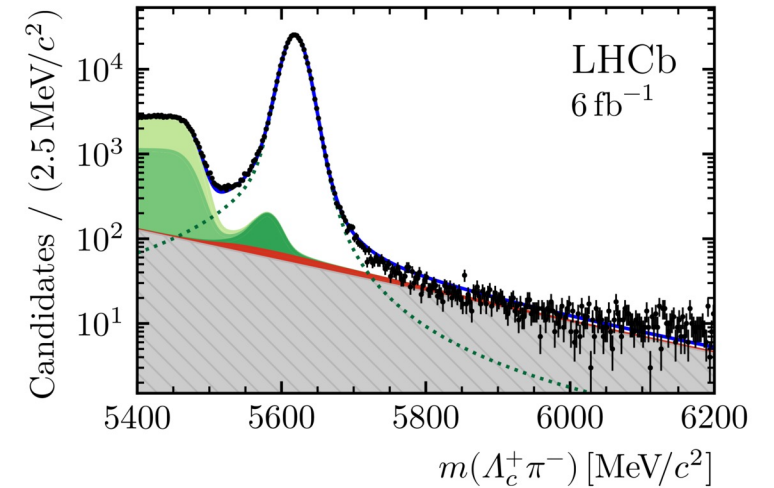
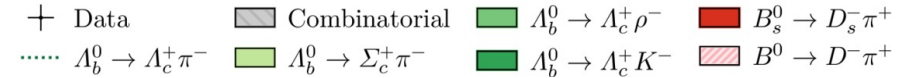
► Risultati:

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-)} = (2.56 \pm 0.10_{stat.} \pm 0.05_{syst.} \pm 0.14_{ext.}) \times 10^{-3}$$

- Frazione di decadimento ottenuta per $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$:

$$\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p) = (12.6 \pm 0.5_{stat.} \pm 0.3_{syst.} \pm 1.2_{ext.}) \times 10^{-6}$$

- Punto di partenza per futuri studi sui decadimenti adronici del Λ_b^0



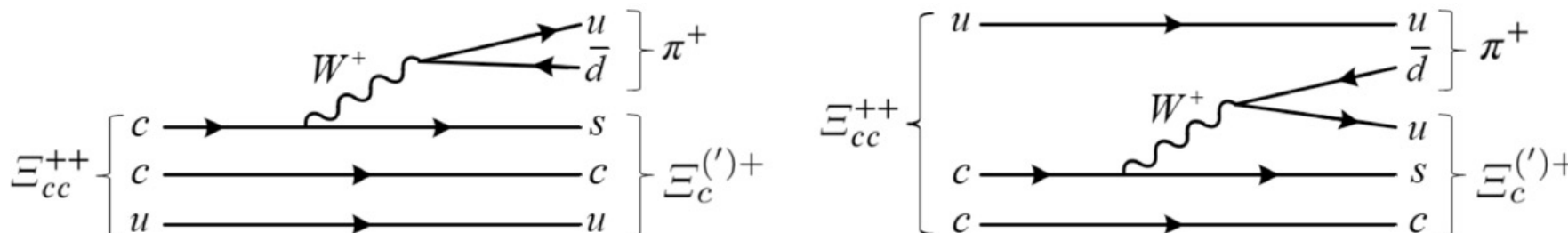
Il decadimento $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$

► L'esistenza dei barioni doubly charmed è prevista all'interno del modello a quark [\[Phys. Lett. 8 \(1964\) 214\]](#)

- Due quark charm assieme a un quark leggero (u, d, s)
- Sistemi ideali per verificare le teorie effettive della QCD

► $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$:

- Barione doubly charmed pesante composto da un quark leggero u
- Ampiezza di decadimento dipendente dall'emissione esterna ed interna del bosone W



► Risultati recenti sulla particella Ξ_{cc}^{++} da parte della collaborazione LHCb:

- "First observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c K^- \pi^+ \pi^-$ " [\[Phys. Rev. Lett. 119, 112001\]](#)
- "First observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ " [\[Phys. Rev. Lett. 121, 162002\]](#)
- "Measurement of the lifetime of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} " [\[Phys. Rev. Lett. 121, 052002\]](#)
- "Measurement of Ξ_{cc}^{++} production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV" [\[Chin. Phys. C44 \(2020\) 022001\]](#)
- "A search for $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow D^+ p K^- \pi^+$ decays" [\[JHEP10 \(2019\) 124\]](#)
- "Precision measurement of the Ξ_{cc}^{++} mass" [\[JHEP02 \(2020\) 049\]](#)

► **"Observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$ "**

[JHEP. 2022, 38 (2022)]

- Analisi con i dati raccolti durante il Run2
- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 5.4 \text{ fb}^{-1}$

► **Strategia:**

- $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ scelto come **canale di normalizzazione**
- Ricostruzione parziale del **segnale**, fotone mancante da $\Xi_c'^+ \rightarrow \Xi_c^+ \gamma$
- Barione Ξ_c^+ ricostruito come $\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$

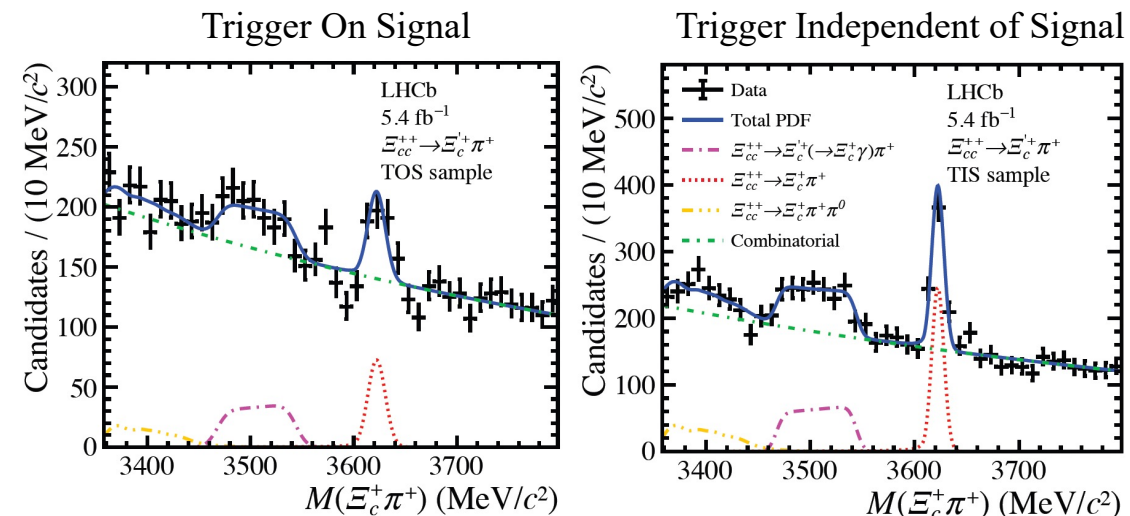
$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+)} = \frac{N_{\Xi_c'^+}}{N_{\Xi_c^+}} \times \frac{\epsilon_{\Xi_c^+}}{\epsilon_{\Xi_c'^+}}$$

► **Risultati:**

- Frazione di decadimento relativa misurata:

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+)} = 1.41 \pm 0.17_{stat.} \pm 0.10_{syst.}$$

- Risultato in disaccordo con le attuali predizioni teoriche [Phys. Rev. D 96, 113006]
 - ✓ Può essere usato come punto di partenza per future analisi



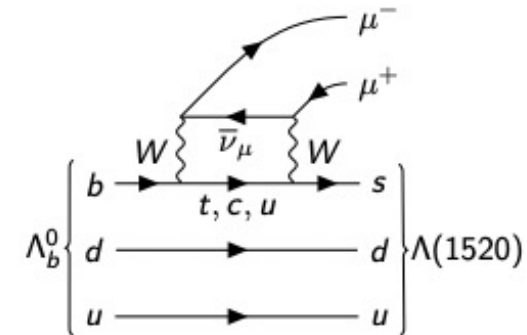
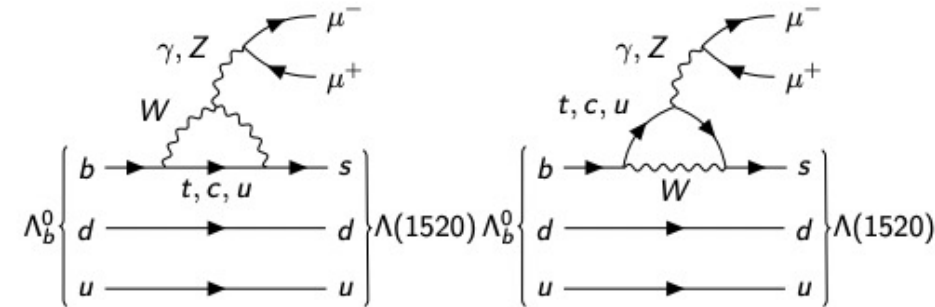
Category	$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$	$\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$	$N_{\Xi_c'^+}/N_{\Xi_c^+}$
TOS	262 ± 53	159 ± 32	1.64 ± 0.39
TIS	494 ± 63	379 ± 32	1.30 ± 0.18

- Nuova fisica oltre il MS può essere esplorata studiando le transizioni FCNC $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$
 - Descritte da diagrammi a loop elettrodeboli
 - Possono contenere un contributo importante di nuova fisica [\[arXiv:1802.09404\]](https://arxiv.org/abs/1802.09404)

- I decadimenti dei barioni B offrono molte osservabili da misurare:
 - Frazioni di decadimento
 - Distribuzioni angolari
 - Test sulla Lepton Flavor Universality (LFU)

- Risultati recenti da parte della collaborazione LHCb:
 - "Differential branching fraction and angular analysis of $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda\mu^+\mu^-$ decays" [\[JHEP 09 \(2018\) 145\]](https://arxiv.org/abs/1802.09404)
 - "Observation of the decay $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\mu^+\mu^-$ and search for CP violation" [\[JHEP 06 \(2017\) 108\]](https://arxiv.org/abs/1706.02622)
 - "Test of lepton universality using $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^-\ell^+\ell^-$ decays" [\[JHEP 05 \(2020\) 040\]](https://arxiv.org/abs/1909.01281)

- Assieme al suo stato fondamentale Λ , lo stato eccitato $\Lambda(1520)$ è di particolare interesse per nuova fisica
- Rispetto a Λ , avente parità di spin $J^P = (1/2)^-$, lo stato eccitato $\Lambda(1520)$ ha parità di spin $J^P = (3/2)^-$
 - Può contenere informazioni complementari su potenziali effetti di nuova fisica nelle transizioni $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ [\[Phys. Rev. D103 \(2021\) 074505\]](https://arxiv.org/abs/2103.07450)



► "Measurement of the $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda(1520)\mu^+\mu^-$ differential branching fraction"

[[arxiv:2302.08262](https://arxiv.org/abs/2302.08262)] sottomesso alla rivista PRL

- Analisi con i dati raccolti durante i Run1 e 2
- $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ TeV, $\mathcal{L} = 9.0 \text{ fb}^{-1}$

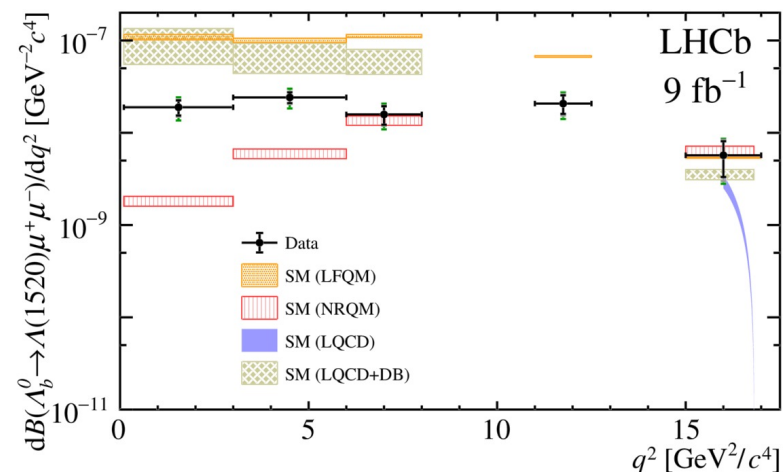
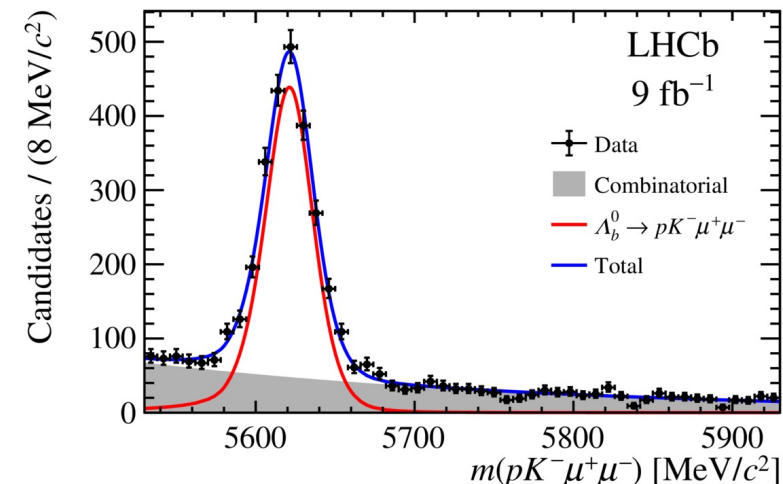
► Strategia:

- Analisi sviluppata in intervalli di q^2
- $\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi$ scelto come canale di normalizzazione
- $\Lambda(1520)$ ricostruito come $\Lambda(1520) \rightarrow pK^-$

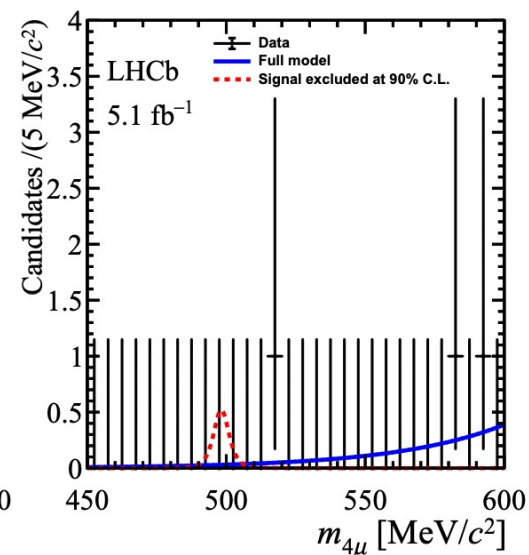
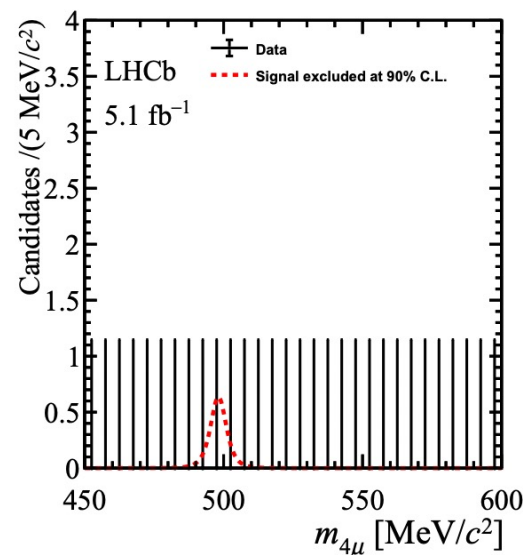
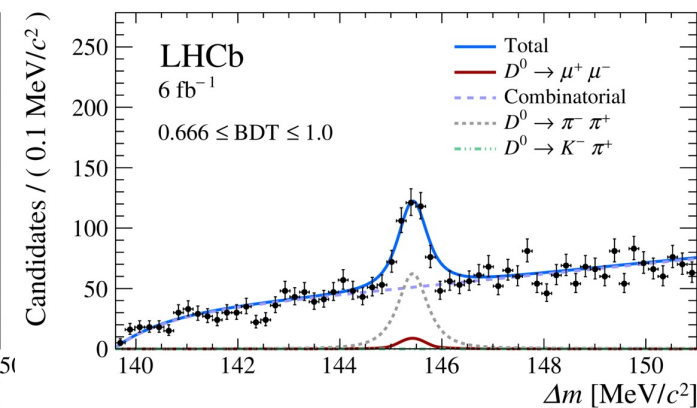
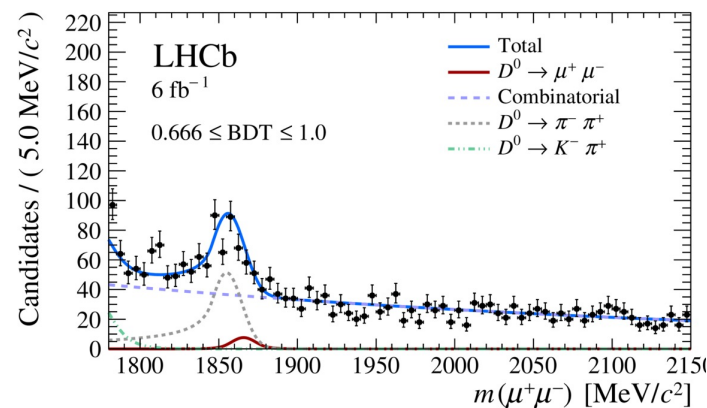
$$\left[\frac{d\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda(1520)\mu^+\mu^-)}{dq^2} \right]_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} = \frac{1}{(q_{\max}^2 - q_{\min}^2)} \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow pK^- J/\psi)\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(\Lambda(1520) \rightarrow pK^-)} \times \frac{N_{\Lambda(1520)\mu^+\mu^-}}{N_{pK^- J/\psi}} \frac{\varepsilon_{pK^- J/\psi}}{\varepsilon_{\Lambda(1520)\mu^+\mu^-}}$$

► Risultati:

- Dati confrontati con differenti previsioni del MS
- Per $q^2 > 15.0 \text{ GeV}^2/c^4$ dati consistenti con la teoria
 - ✓ Predizioni con bassa dipendenza dal modello
- Necessarie revisitazioni dei calcoli teorici a bassi valori di q^2



- Decadimenti FCNC con $\mathcal{B} \sim \mathcal{O}(10^{-14}) - \mathcal{O}(10^{-12})$
[\[PRD 66, 014009 \(2002\)\]](#)
[\[EPJC 73, 2678 \(2013\)\]](#)
- Elemento chiave per lo studio di nuova fisica oltre il MS
- **"Search for rare decays of D^0 mesons into two muons"**
[\[arXiv:2212.11203\]](#) sottomesso alla rivista **PRL**
 - Analisi con i dati raccolti durante i Run1 e 2
 - $\sqrt{s} = 7, 8, 13 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 9.0 \text{ fb}^{-1}$
 - $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 2.9 \times 10^{-9}$ al 90% CL
 - Ad oggi il limite più stringente sulla fisica FCNC del charm
- **"Search for $K_{S(L)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ decays at LHCb"**
[\[arXiv:2212.04977\]](#) sottomesso alla rivista **PRD**
 - Analisi con i dati raccolti durante il Run2
 - $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$, $\mathcal{L} = 5.1 \text{ fb}^{-1}$
 - $\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-) < 5.1 \times 10^{-12}$
 - $\mathcal{B}(K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-) < 2.3 \times 10^{-9}$
 - Limiti misurati per la prima volta al 90% CL



► Sono stati presentati risultati recenti per i decadimenti rari e veramente rari di adroni a LHCb:

- $\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p$ - Prima osservazione e misura della frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p) = (12.6 \pm 0.5_{stat.} \pm 0.3_{syst.} \pm 1.2_{ext.}) \times 10^{-6}$$

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow D_s^- p)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^-)} = (2.56 \pm 0.10_{stat.} \pm 0.05_{syst.} \pm 0.14_{ext.}) \times 10^{-3}$$

- $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+$ - Osservata una nuova modalità di decadimento con misura della frazione di decadimento relativa:

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c'^+ \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+)} = 1.41 \pm 0.17_{stat.} \pm 0.10_{syst.}$$

- $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda(1520) \mu^+ \mu^-$ - Misurato per la prima volta la frazione di decadimento differenziale

- ✓ Risultati sperimentali consistenti con la teoria ad alto q^2
- ✓ Necessarie rivisitazioni dei calcoli teorici per $q^2 < 15.0 \text{ GeV}^2/c^4$

- Nuovi limiti per alcuni decadimenti FCNC:

- ✓ $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 2.9 \times 10^{-9}$ al 90% CL, ad oggi il limite più stringente sulla fisica FCNC del charm
- ✓ $\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-) < 5.1 \times 10^{-12}$ e $\mathcal{B}(K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-) < 2.3 \times 10^{-9}$, limiti misurati per la prima volta al 90% CL

A nome della collaborazione LHCb
vi ringrazio per la vostra attenzione