

# Produzione di Heavy Flavour e Spettroscopia in LHCb

**Daniele Marangotto**

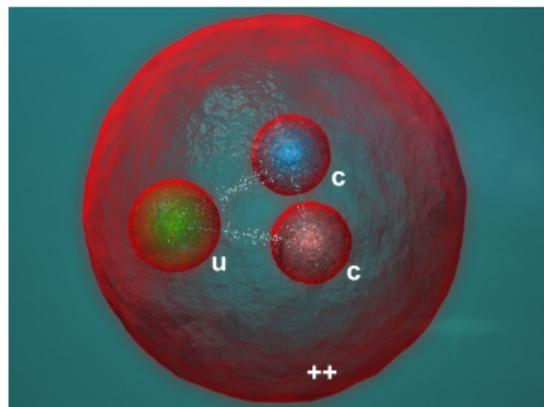
**INFN & Università degli Studi, Milano, Italy**

**Congresso SIF, Mercoledì 15 Settembre 2021**



# Introduzione

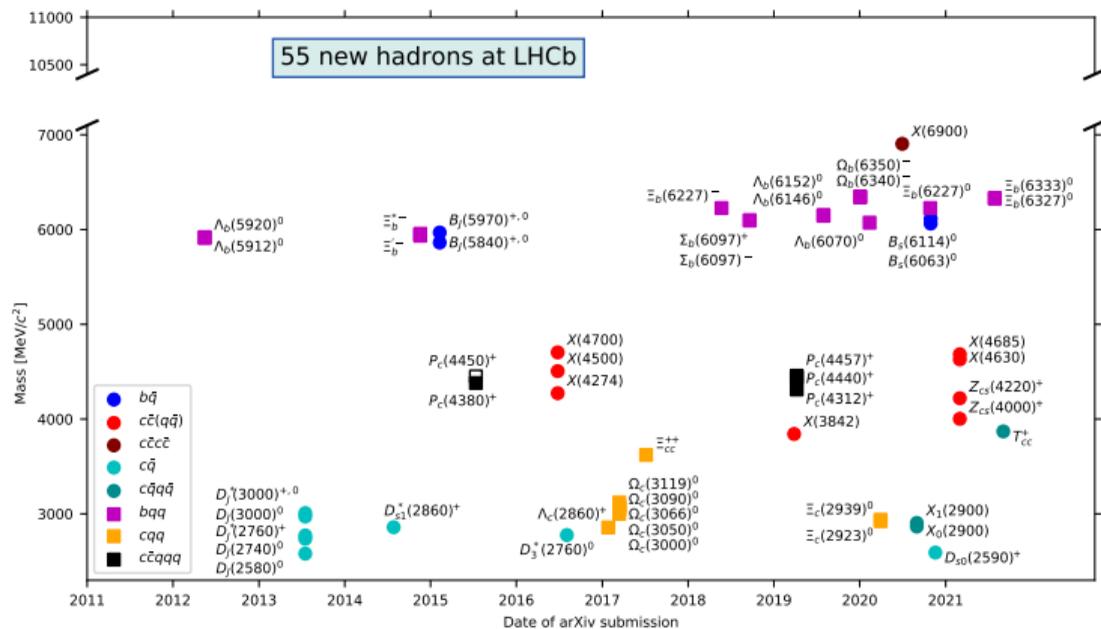
- Lo studio sistematico di adroni contenenti quark pesanti (heavy flavour) dà informazioni su
  - meccanismi di produzione dei quark
  - formazione degli adroni (adronizzazione)
  - struttura interna degli adroni
- Studio tramite misure di
  - Produzione: sezioni d'urto totali o differenziali in funzione della cinematica
  - Spettroscopia: scoperta e studio di stati legati di quark
- Misure importanti per la cromodinamica (QCD), in particolare a bassa energia
  - Discriminazione fra predizioni ottenute in diversi approcci effettivi



# Spettroscopia a LHCb

- LHCb progettato principalmente per studiare decadimenti di adroni pesanti

- Una autentica macchina da scoperta di nuovi adroni!
- Convenzionali (barioni e mesoni)
- Esotici (tetra/pentaquarks)



- Presenterò una selezione dei risultati più recenti di LHCb su heavy flavour e spettroscopia

## Produzione

- $J/\psi$  in collisioni  $pp$  a  $\sqrt{s} = 5\text{TeV}$
- $\chi_{c1}(3872)$  in collisioni  $pp$  a  $\sqrt{s} = 8, 13\text{TeV}$

## Adroni convenzionali

- Osservazione di nuovi stati eccitati di  $B_s^0, \Xi_b^0, D_s^+$

## Tetraquarks

- Osservazione di nuovi stati in  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$  e  $D^0 D^0 \pi^+$

## Pentaquarks

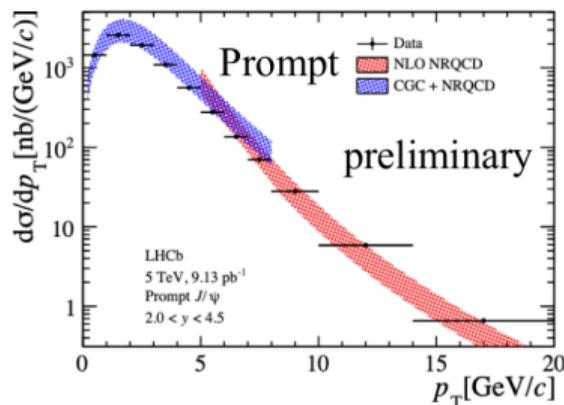
- Evidenze di nuovi stati in  $B_s^0 \rightarrow p \bar{p} J/\psi$  e  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$

# Produzione di $J/\psi$ in collisioni $pp$ a $\sqrt{s} = 5\text{TeV}$

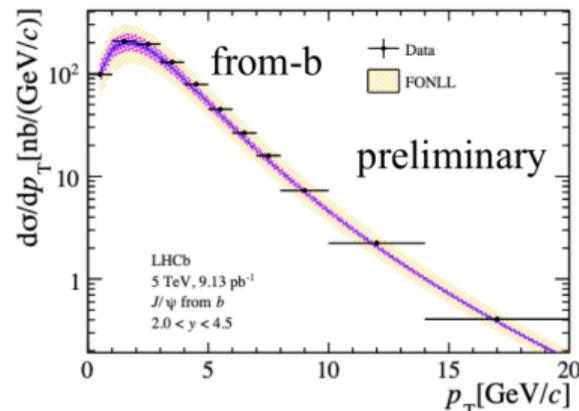
arXiv:2109.00220, submitted to JHEP

- Misure di sezione d'urto di produzione  $J/\psi$  a  $\sqrt{s} = 5\text{TeV}$
- Sia prompt da collisioni  $pp$  che da decadimenti beauty
- Sezioni d'urto integrate e differenziali in  $p_T$ :
  - $\sigma_{\text{prompt}} = 8.154 \pm 0.010 \pm 0.283 \mu\text{b}$ ;  $\sigma_{\text{from-}b} = 0.820 \pm 0.002 \pm 0.034 \mu\text{b}$

- Buon accordo con predizioni in entrambi i campioni
- Interessante per QCD perturbativa e non



NLO NRQCD: [Phys. ReV Lett. 106, 042002](#)  
Color Glass Condensate (CGC): [Phys. Rev. Lett. 113,192301](#)

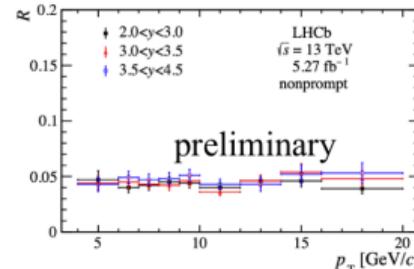
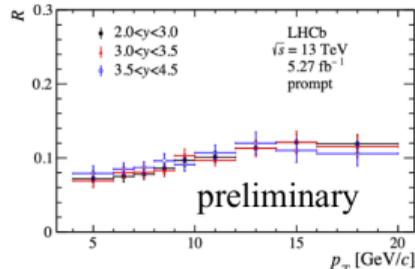
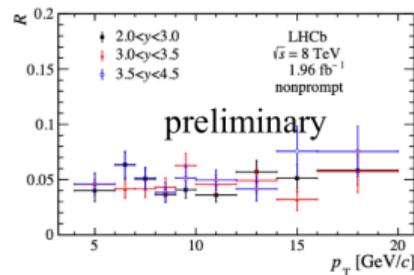
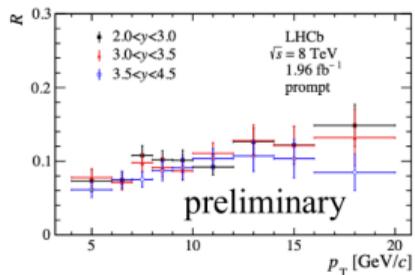


FONLL: [JHEP 10 \(2012\) 137](#)  
[EPJC 75 \(2015\) 610](#)

# Produzione di $\chi_{c1}(3872)$ in collisioni $pp$ a $\sqrt{s} = 8, 13$ TeV

LHCb-PAPER-2021-026, in preparation

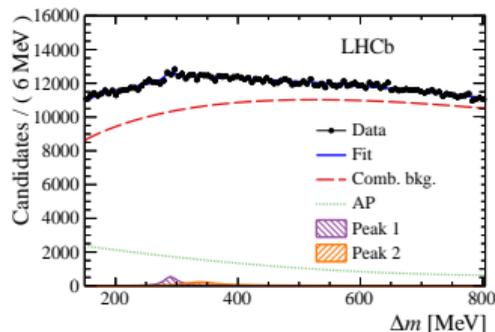
- Struttura del mesone esotico  $\chi_{c1}(3872)$  non ancora chiarita
- Produzione dipendente dalla molteplicità suggerisce struttura di tetraquark compatto
- Misura differenziale di sezione d'urto  $pp \rightarrow \chi_{c1}(3872)X$  rispetto alla produzione di  $\psi(2S)$
- Sia prompt da collisioni  $pp$  che da decadimenti beauty (nonprompt)
- Dati 2012 (8 TeV) e 2015-18 (13 TeV)
- Incremento del rateo prompt ad alto  $p_T$  visibile, piatto per nonprompt



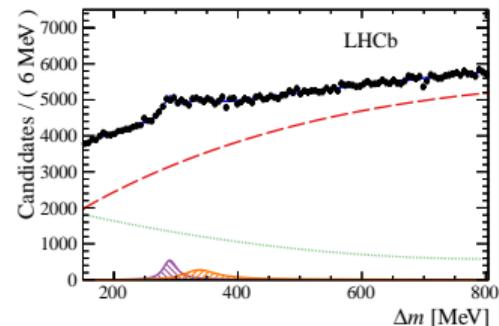
# Osservazione di stati $B_s^0$ eccitati in $B^+ K^-$

Eur. Phys. J. C 81 (2021) 7, 601

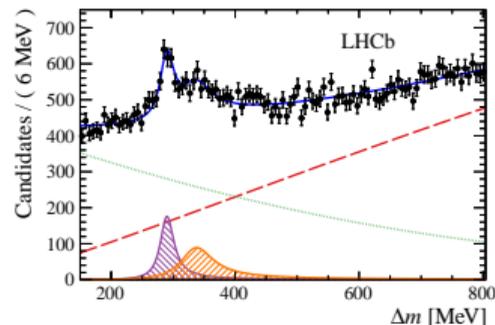
- Osservato eccesso nello spettro di massa  $m(B^+ K^-)$
- Fit simultaneo per due picchi in intervalli di  $p_T(K^-)$
- Significatività locale oltre  $5\sigma$  per entrambi
  - $20\sigma$  per picco principale vs fondo
  - $7.7\sigma$  per doppio picco vs singolo
- Consistenti con risonanze  $B_s$  spin-2



$0.5 < p_T < 1 \text{ GeV}/c$



$1 < p_T < 2 \text{ GeV}/c$

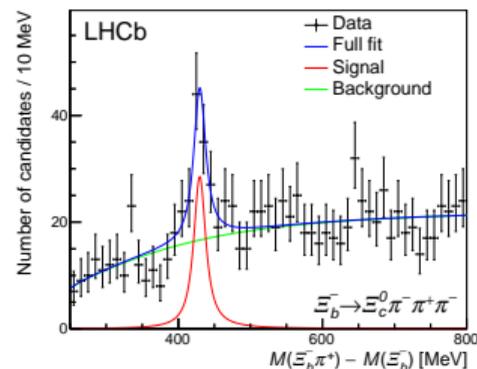
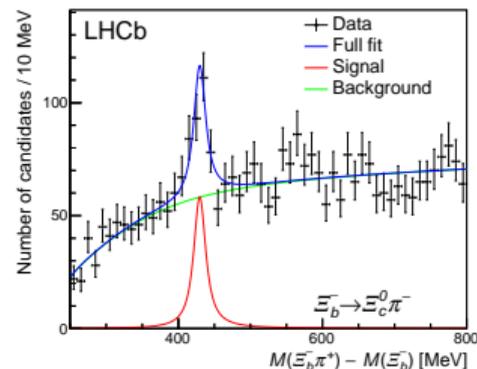


$p_T > 2 \text{ GeV}/c$

# Osservazione di nuovo stato $\Xi_b^0$ eccitato in $\Xi_b^- \pi^+$

Phys. Rev. D 103 (2021) 012004

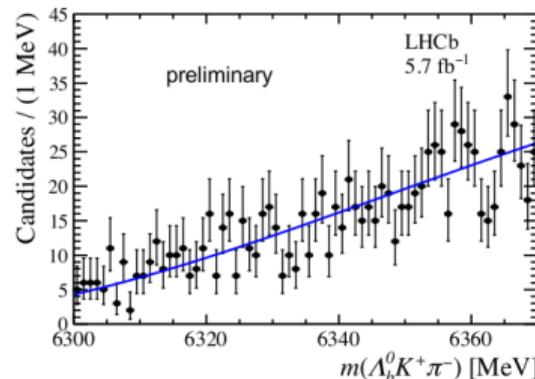
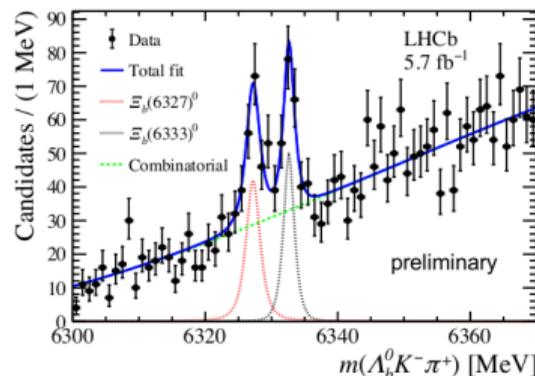
- Picco nello spettro di massa  $\Xi_b^- \pi^+$  ( $10\sigma$ )
  - nuovo stato  $\Xi_b^0(6227)$
  - massa =  $6227.1_{-1.5}^{+1.4} \pm 0.5$  MeV
  - larghezza =  $18.6_{-4.1}^{+5.0} \pm 1.4$  MeV
- Migliorata conoscenza dello stato carico partner di isospin  $\Xi_b^- (6227)$  in  $\Lambda_b^0 K^-$ 
  - massa =  $6227.9 \pm 0.8 \pm 0.5$  MeV
  - larghezza =  $19.9 \pm 2.1 \pm 1.5$  MeV



# Osservazione di due nuovi stati $\Xi_b^0$ in $\Lambda_b^0 K^- \pi^+$

LHCb-PAPER-2021-025, in preparation

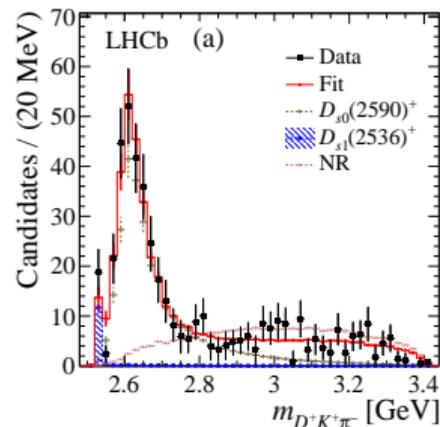
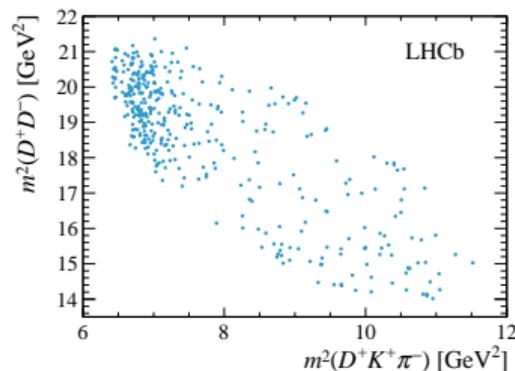
- Dati Run 2 (2015-18) di LHCb
- Due picchi nello spettro di massa  $\Lambda_b^0 K^- \pi^+$
- Nuovi stati  $\Xi_b^0(6327)$ ,  $\Xi_b^0(6333)$ 
  - $m_{\Xi_b^0(6327)} = 6327.28_{-0.21}^{+0.23}(\text{stat}) \pm 0.08(\text{syst}) \pm 0.24(m_{\Lambda_b^0}) \text{ MeV}$
  - $m_{\Xi_b^0(6333)} = 6332.69_{-0.18}^{+0.17}(\text{stat}) \pm 0.03(\text{syst}) \pm 0.22(m_{\Lambda_b^0}) \text{ MeV}$
  - $\Gamma_{\Xi_b^0(6327)} < 2.20(2.56) \text{ MeV}$  at 90(95)% CL
  - $\Gamma_{\Xi_b^0(6333)} < 1.55(1.85) \text{ MeV}$  at 90(95)% CL
- Consistenti con stati  $\Xi_b^0$  spin-1
- Significatività locale oltre  $5\sigma$  per entrambi
  - $9.9\sigma$  per doppio picco vs fondo
  - $5.8\sigma$  per doppio picco vs singolo



# Osservazione di nuovo stato $D_s^+$ eccitato in $B^0 \rightarrow D^+ D^- K^+ \pi^-$

Phys. Rev. Lett. 126 (2021) 122002

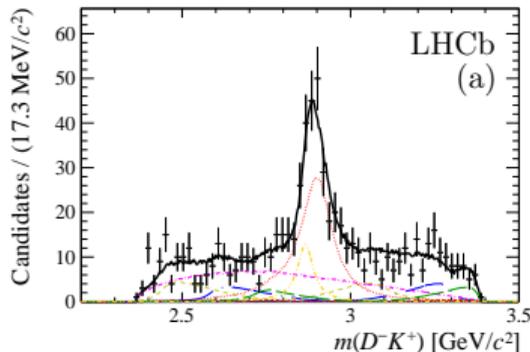
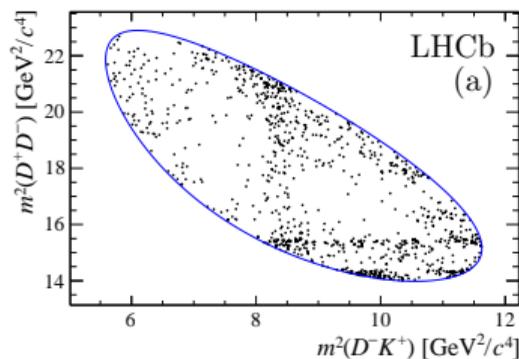
- Studiato il Dalitz plot di  $B^0 \rightarrow D^+ D^- K^+ \pi^-$
- Gruppo di candidati osservati in  $D^+ K^+ \pi^-$  attorno 2.6 GeV
- Caratteristiche del nuovo stato misurate con analisi di ampiezza
  - massa =  $2591 \pm 6 \pm 7$  MeV
  - larghezza =  $89 \pm 16 \pm 12$  MeV
  - miglior fit con spin-parità  $J^P = 0^-$



# Osservazione di tetraquarks in $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$

Phys. Rev. D 102 (2020) 112003; Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 242001

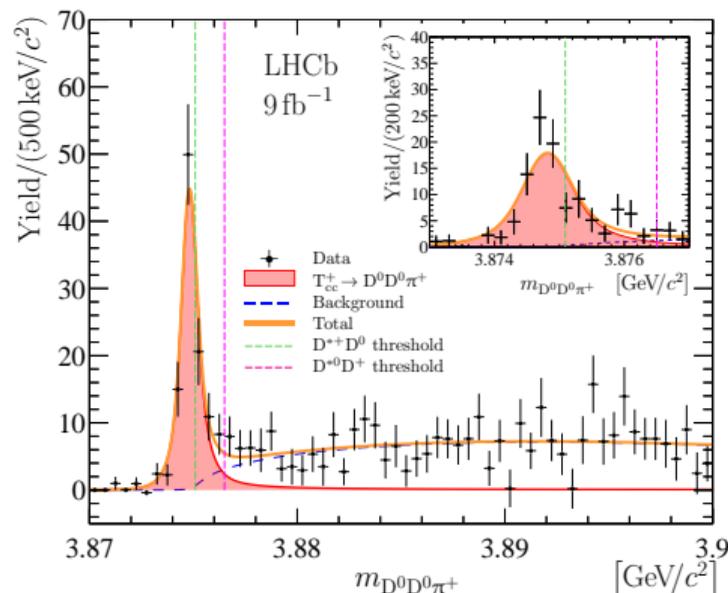
- Analisi di ampiezza di  $B^+ \rightarrow D^+ D^- K^+$
- Picco nello spettro di massa  $D^- K^+$ : nuovi stati  $\bar{c}ud\bar{s}$   $X_0(2900)$ ,  $X_1(2900)$ 
  - $m_{X_0(2900)} = 2866 \pm 7 \pm 2 \text{ MeV}$
  - $m_{X_1(2900)} = 2904 \pm 5 \pm 1 \text{ MeV}$
  - $\Gamma_{X_0(2900)} = 57 \pm 12 \pm 4 \text{ MeV}$
  - $\Gamma_{X_1(2900)} = 110 \pm 11 \pm 4 \text{ MeV}$
- Necessità di introdurre un nuovo stato  $c\bar{c}$  di spin zero  $\chi_{c0}(3930)$  in prossimità di  $\chi_{c2}(3930)$



# Osservazione di tetraquark $T_{cc}^+$ in $D^0 D^0 \pi^+$

arXiv:2109.01038; arXiv:2109.01056

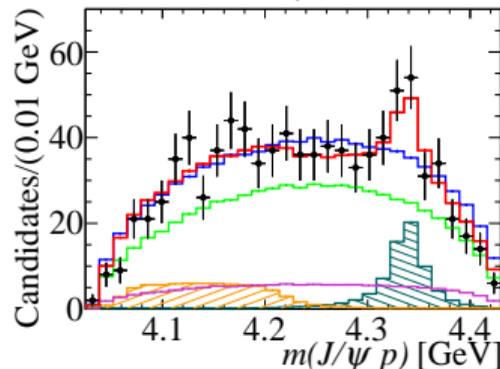
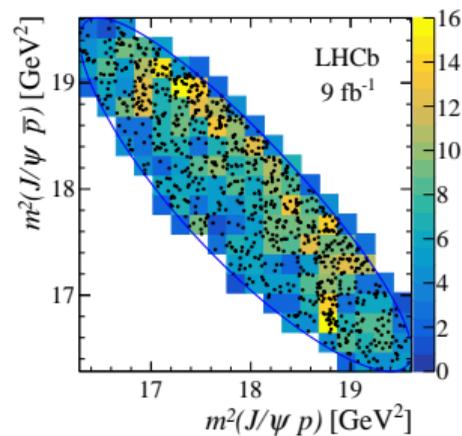
- Picco stretto osservato nello spettro di massa  $D^0 D^0 \pi^+$
- Interpretato come stato doppio-charm  $cc\bar{u}d$   $T_{cc}^+$
- $m_{T_{cc}^+} - m_{D^{*+}} - m_{D^0} = -273 \pm 61 \pm 5_{-14}^{+11}$  keV
- $\Gamma_{T_{cc}^+} = 410 \pm 65 \pm 43_{-38}^{+18}$  keV
- Significatività del picco di  $21.7\sigma$
- Significatività per l'ipotesi di picco sotto-soglia di  $4.3\sigma$
- Vicino alla soglia  $D^{*+} D^0$ , stato molecolare?



# Evidenza di pentaquark in $B_s^0 \rightarrow p\bar{p}J/\psi$

arXiv:2108.04720, submitted to PRL

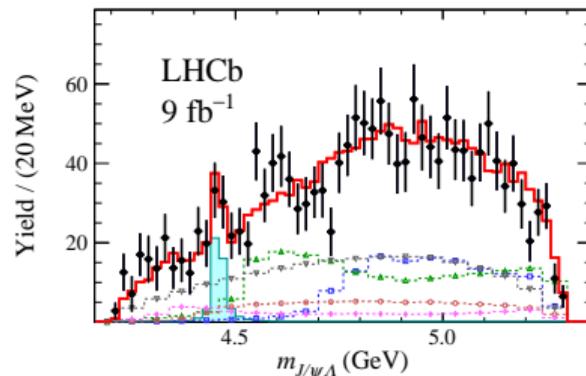
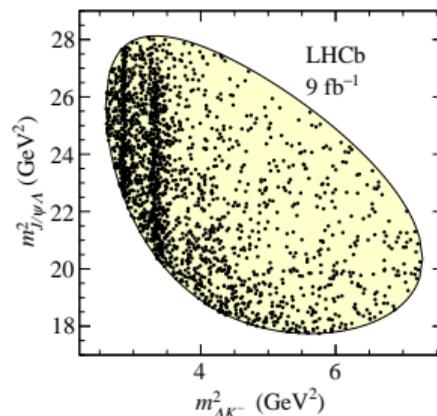
- Analisi di ampiezza del decadimento  $B_s^0 \rightarrow p\bar{p}J/\psi$  senza distinzione  $B_s^0 - \bar{B}_s^0$
- Evidenza di stato pentaquark  $c\bar{c}uud$ 
  - Contributi  $P_c^+ \rightarrow J/\psi p$ ,  $P_c^- \rightarrow J/\psi \bar{p}$
  - massa =  $4337_{-4}^{+7} \pm 2$  MeV
  - larghezza =  $29_{-12}^{+26} \pm 14$  MeV
- Significatività  $3.1 - 3.7\sigma$ , a seconda della spin-parità assegnata
  - $J^P$  indistinguibile con i dati disponibili
- Analisi non conferma stati  $P_c$  osservati in  $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi pK^-$



# Evidenza di pentaquark in $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$

Sci. Bull. 66 (2021) 1278-1287

- Analisi di ampiezza del decadimento  $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$
- Prima evidenza di stato pentaquark  $c\bar{c}uds$  con stranezza  $P_{cs}^0(4459)$ , nello spettro di massa  $J/\psi \Lambda$ 
  - massa =  $4458.8 \pm 2.9_{-1.1}^{+4.7}$  MeV
  - larghezza =  $17.3 \pm 6.5_{-5.7}^{+8.0}$  MeV
- Significatività  $3.1\sigma$
- Massa leggermente inferiore alla soglia  $\Xi_c \bar{D}^*$ , stato molecolare?



# Conclusioni

- Presentata selezione degli ultimi risultati di LHCb riguardo heavy flavour e spettroscopia
  - Misure di produzione di adroni charm
  - Osservazione di nuovi stati convenzionali e di tetraquark
  - Evidenza di stati pentaquark  $P_C$ ,  $P_{CS}$
- Integrano l'impressionante serie di adroni scoperti a LHCb
- Mole di informazione a disposizione della comunità teorica
- E il trend è in crescita... nuovi adroni pronti alla raccolta?



Download from  
Dreamstime.com

25220215  
Tai Kian Yang | Dreamstime.com

# Grazie per la vostra attenzione!



daniele.marangotto@unimi.it