



Hadron spectroscopy at LHCb

Roberta Cardinale

Università di Genova e INFN Genova

IFAE 2017
Trieste, 19-21 Aprile 2017

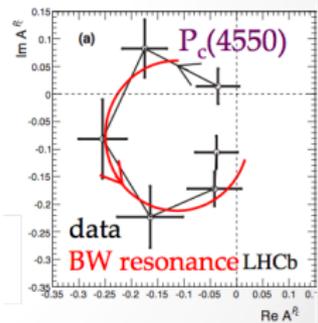
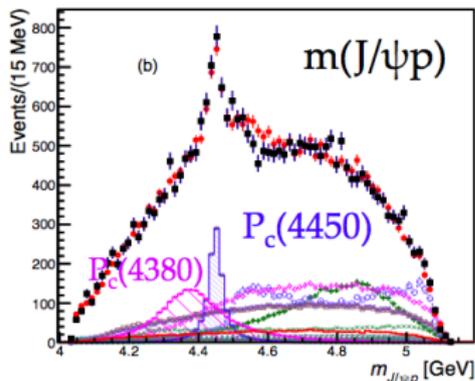
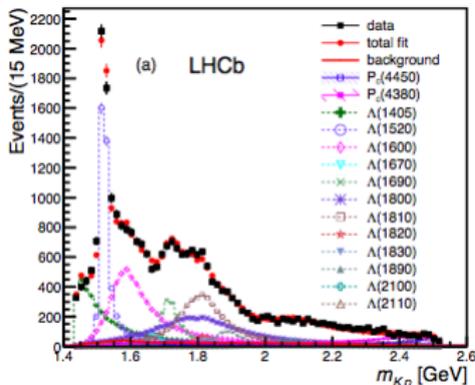
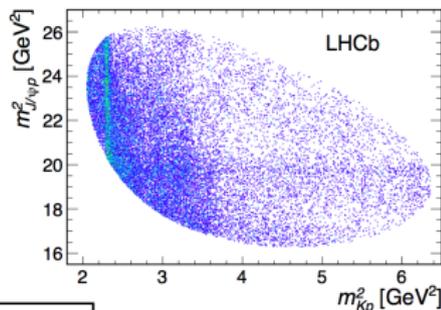
Sommario

- Ricerca di pentaquarks
 - Risonanze esotiche barioniche nel decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$
[PRL 115 (2015) 072001, PRL 117 082002 (2016)]
 - e nel decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ [PRL 117 082003 (2016)]
 - Osservazione del decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c(1,2)} p K^-$
[LHCb-PAPER-2017-011, in preparazione]
 - Osservazione del decadimento $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ [arXiv: 1701.05274]
- Osservazione di cinque stati stretti Ω_c^0 che decadono in $\Xi_c^+ K^-$
[arXiv:1703.04639, accettato da PRL]

Risonanze esotiche barioniche nel decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$
[PRL 115 (2015) 072001, PRL 117 082002 (2016)] e nel decadimento
 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ [PRL 117 082003 (2016)]

$\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$ [PRL 115 (2015) 072001]

- Dalitz plot con peculiarità insolite: picco stretto non atteso nella massa invariante $m_{J/\psi p}$ a 19.5 GeV^2
- Fit alle ampiezze in sei dimensioni con due canali che interferiscono: $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*$ e $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ K^-$
- Richiesti due stati esotici con parità opposta per avere un fit di buona qualità



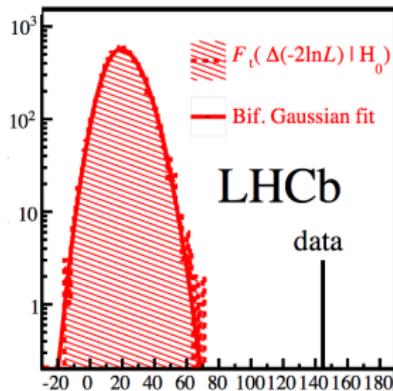
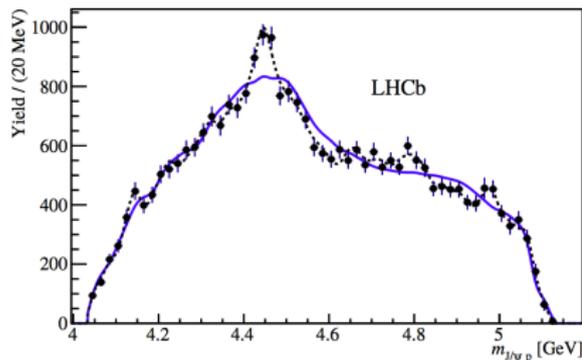
	$P_c(4380)^+$	$P_c(4450)^+$
J^P	$\frac{3}{2}^-$	$\frac{5}{2}^+$
Mass [MeV/c ²]	$4380 \pm 8 \pm 29$	$4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$
Width [MeV/c ²]	$205 \pm 18 \pm 86$	$39 \pm 5 \pm 19$

- $P_c(4380) : 9\sigma$, $P_c(4450) : 12\sigma$
- Minimo contenuto di quark: $c\bar{c}uud$

Analisi “model independent” $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$

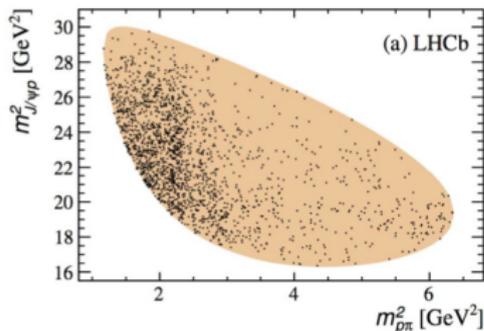
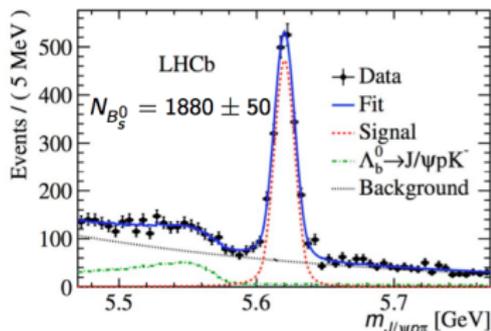
[PRL 117, 082002 (2016)]

- Il fit alle ampiezze dipende da assunzioni sulle risonanze Λ^*
- La spettroscopia degli stati Λ^* è complessa e non completamente compresa
- È possibile effettuare un test che non dipende dal modello
- Espandere la distribuzione angolare in bins di m_{Kp} utilizzando i polinomi di Legendre
- Le risonanze pK contribuiscono a momenti angolari $L_{\max} \leq 2J_{\max}$ dove J_{\max} è lo spin della risonanza: $L_{\max}(m_{pK})$
- considerando solo gli stati Λ^* : descrizione non adeguata della massa $m_{J/\psi p}$
- L'ipotesi che i dati possano essere descritti da riflessioni di strutture Kp è escluso a 9σ !



Ricerca di esotici in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ [PRL 117, 082003 (2016)]

- Osservare gli stessi stati P_c^+ in un diverso modo di decadimento può rafforzare l'idea che si tratti di stati genuini e non di effetti cinematici [arXiv:1512.01959]
- Nessuna peculiarità evidente nel Dalitz plot: necessaria analisi ad ampiezze

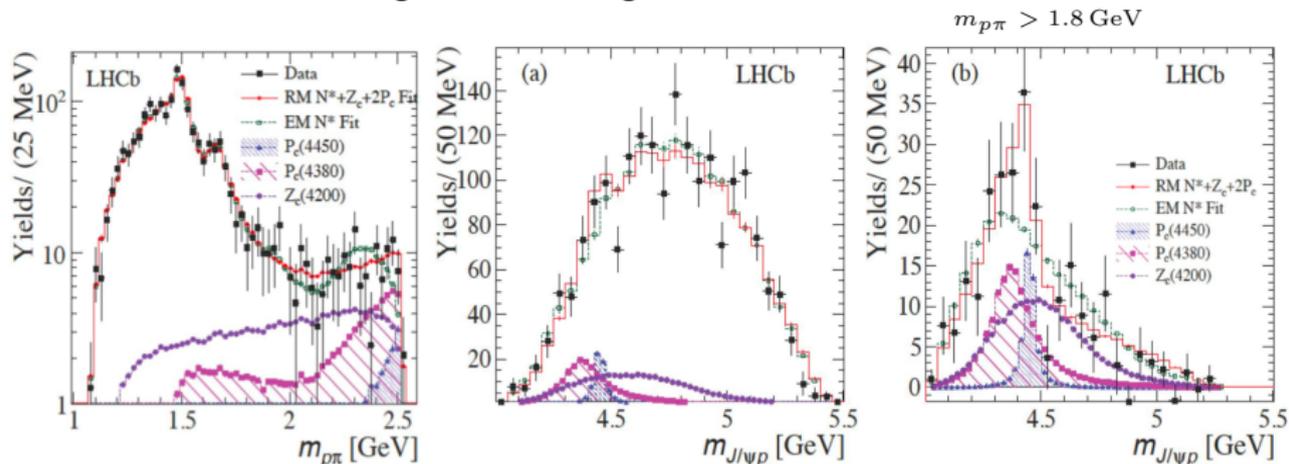


- Fit alle ampiezze a sei dimensioni: dinamica più complicata
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi N^*$
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow P_c^+ \pi^-$
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow Z_c^-(4200) p$ [PRD 90 (2014) 112009]

- Campione di dati limitato (decadimento Cabibbo soppresso con una statistica 10 volte più bassa): parametri stati P_c e $Z_c^-(4200)$ fissati

Amplitude fits of $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p \pi^-$ [PRL 117, 082003 (2016)]

- Il modello di ampiezza senza le ampiezze degli stati P_c or Z_c può apparire adeguato in alcune proiezioni di massa invariante, ma componenti esotiche sono richieste per avere un buon fit in tutte le regioni
- La significatività combinata dei tre stati esotici insieme è più di 3σ : evidenza di stati esotici. I contributi singoli non sono significativi.



I dati dei decadimenti $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p \pi^-$ sono consistenti con i rate di produzione degli stati $P_c(4380)^+, P_c(4450)^+$ al livello atteso dalla misura del decadimento $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ tenendo conto della soppressione di Cabibbo

Osservazione del decadimento $\Lambda_b \rightarrow \chi_{c(1,2)} p K^-$ e misura della massa della Λ_b^0

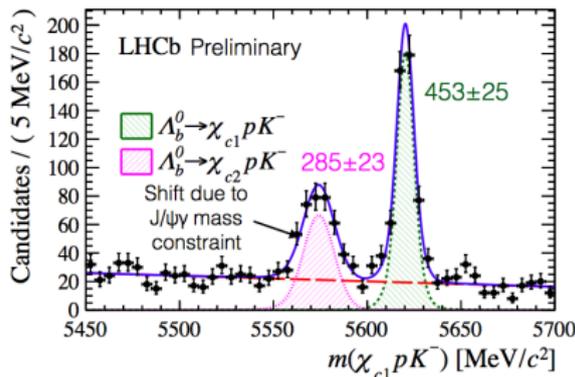
[LHCb-PAPER-2017-011, in preparazione]

Osservazione del decadimento $\Lambda_b \rightarrow \chi_{c(1,2)} p K^-$

[LHCb-PAPER-2017-011, in preparation]

- $P_c(4450)^+$ è vicino alla soglia $\chi_{c1} p$
- Compatibile con effetti di rescattering [PLB 751 (2015) 59, PRD 91 (2015) 071502 (R)]
- Studio del sistema $\chi_{c1} p$ può aiutare a capire i pentaquark osservati: effetti di rescattering non spiegherebbero un picco nella massa $\chi_{c1} p$
- Ricostruito in $\chi_{c(1,2)} \rightarrow J/\psi \gamma$ con il vincolo della massa $J/\psi \gamma$ alla massa della χ_{c1}
- Osservati: $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-$ (29σ) e $\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p K^-$ (17σ)
- Misura dei branching ratios rispetto al canale $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$
- Usando entrambi i modi di decadimento: misura della massa della Λ_b^0 :
 $m(\Lambda_b^0) = 5619.44 \pm 0.28 \pm 0.25 \text{ MeV}/c^2$

● Dati: 3 fb^{-1}



$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)} = 0.242 \pm 0.014 \pm 0.013 \pm 0.009$$

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p K^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-)} = 0.248 \pm 0.020 \pm 0.014 \pm 0.009$$

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c2} p K^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \chi_{c1} p K^-)} = 1.02 \pm 0.10 \pm 0.02 \pm 0.05$$

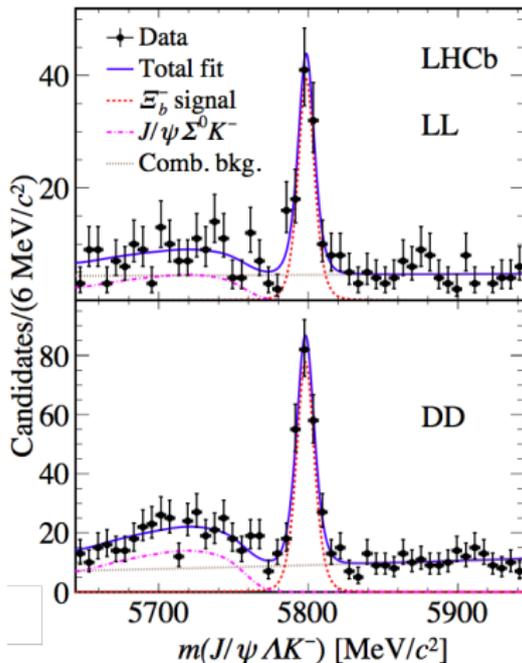
Osservazione del decadimento $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$ [arXiv: 1701.05274]

Osservazione del decadimento $\Xi_b^- \rightarrow J/\psi \Lambda K^-$

[arXiv: 1701.05274]

- Dopo l'osservazione dei due stati di pentaquark con charm nascosto è in corso la ricerca di altri stati simili
- Suggesto di ricercare stati con stranezza ($udsc\bar{c}$) nel sistema $J/\psi\Lambda$: atteso uno stato con massa 4650 MeV e una larghezza dell'ordine di 10 MeV [PRC 93 (2016) 065203]
- Λ può decadere all'interno (LL) o all'esterno del rivelatore di vertice (DD)
- ~ 300 candidati nel Run1 (3 fb^{-1})
- Misura del rate di produzione rispetto al decadimento $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda$ ($p_T < 25\text{ GeV}/c$ e $2.0 < y < 4.5$):

$$\frac{f_{\Xi_b^-}}{f_{\Lambda_b^0}} \frac{\mathcal{B}(\Xi_b^- \rightarrow J/\psi\Lambda K^-)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda)} = (4.19 \pm 0.29(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst})) \times 10^{-2}$$

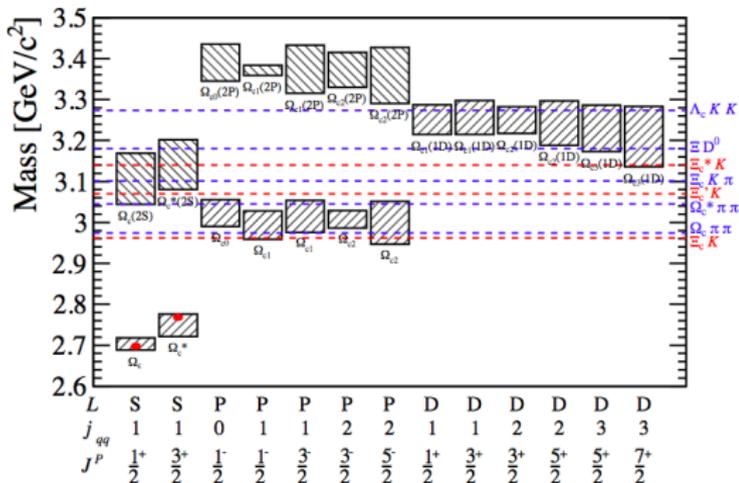


Osservazione di cinque stati stretti Ω_c^0 che decadono in $\Xi_c^+ K^-$

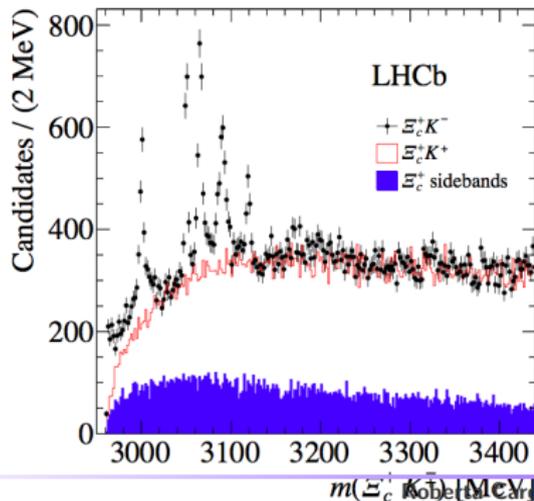
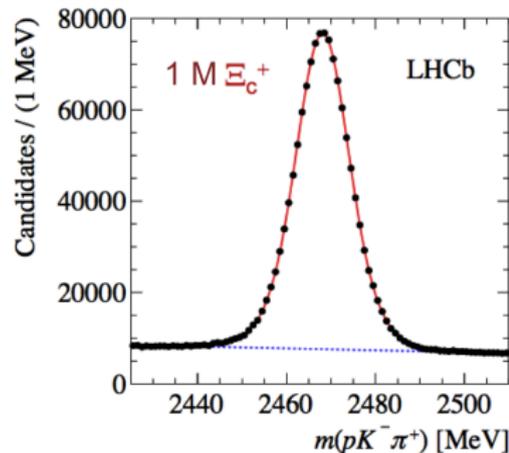
[arXiv:1703:04639, accettato da PRL]

Stati Ω_c^0 eccitati

- Spettroscopia di barioni contenenti un quark charm è intricata e difficile
- Predizioni dello spettro usando HQET: misure precise delle proprietà degli adroni pesanti eccitati per testare la validità di HQET
- Solo due stati fondamentali sono noti:
 $\Omega_c^0 (J^P = 1/2^+)$ e
 $\Omega_c^0(2770) (J^P = 3/2^+)$
- Decadimenti negli stati finali $\Omega_c^0 \pi^0$ e $\Omega_c^{*0} \pi^0$ sono soppressi da violazione di isospin
- $\Xi_c K$ è la soglia adronica più bassa

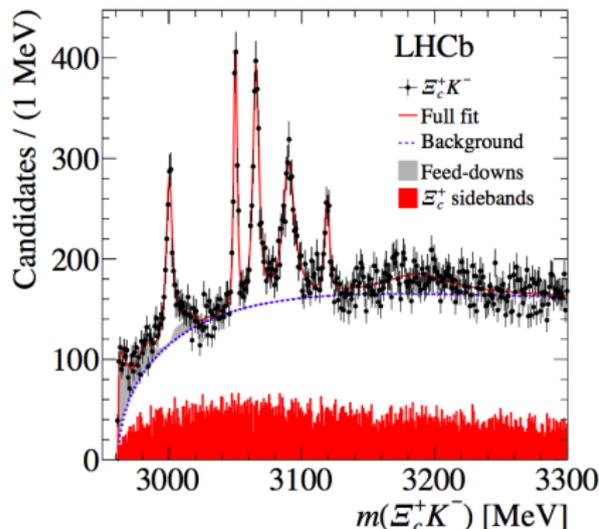


- $\Xi_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$: decadimento $c \rightarrow d$ Cabibbo soppresso
- Senza iperoni nello stato finale (che tendono a decadere fuori dal rivelatore di vertici)
- Dati: 1.0 fb^{-1} (7 TeV) + 2.0 fb^{-1} (8 TeV) + 0.3 fb^{-1} (13 TeV)
- Trigger dedicato per i dati a 13 TeV
- Selezione multivariata basata sui dati: 83% purezza di segnale



- candidati Ξ_c^+ combinati con kaoni di carica opposta
- 5 picchi stretti nello spettro di massa $\Xi_c^+ K^-$
- Nessun picco nel campione con il segno sbagliato $\Xi_c^+ K^+$
- Nessun picco nella regione delle fasce laterali della massa ricostruita Ξ_c^+

- 6 RBW convolute con Gaussiane (risoluzione 0.7-1.7 MeV)
- 3 feed-downs dovuti a $\Omega_c^0 \rightarrow \Xi_c^+ K^-$ con $\Xi_c^+ \rightarrow \Xi_c^+ \gamma$
- Campione di dati con segno sbagliato per lo studio della parametrizzazione del background combinatorio
- Osservazione di 5 nuovi stati eccitati dell' Ω_c con significatività maggiori di 5σ
- Stato largo potrebbe essere dovuto alla sovrapposizione di diversi stati
- Il contributo dominante all'incertezza sistemica è dovuto a possibile effetti di interferenza tra gli stati
- Lo shift in massa del feed-down dovuta ad una recente misura di massa di Belle [PRD 94 (2016) 052011] ha un effetto significativo solo per i parametri dell' $\Omega_c(3000)^0$



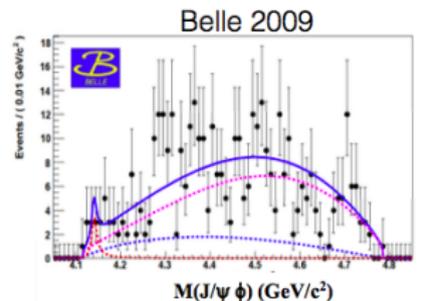
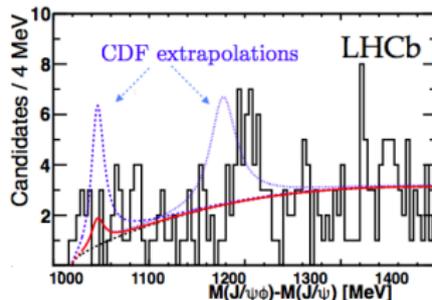
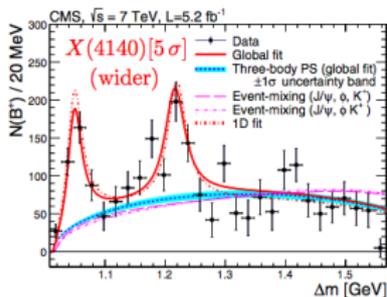
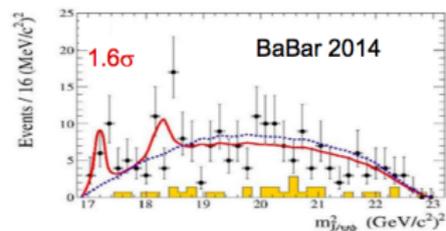
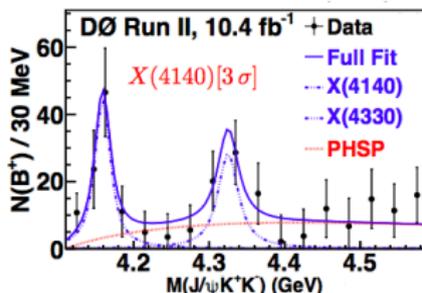
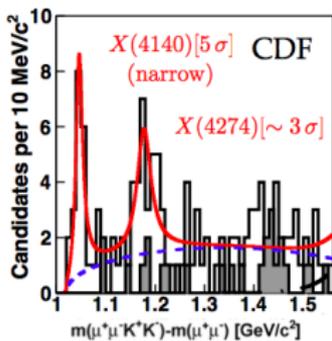
Resonance	Mass (MeV)	Γ (MeV)	Yield	N_σ
$\Omega_c(3000)^0$	$3000.4 \pm 0.2 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$4.5 \pm 0.6 \pm 0.3$	$1300 \pm 100 \pm 80$	20.4
$\Omega_c(3050)^0$	$3050.2 \pm 0.1 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$0.8 \pm 0.2 \pm 0.1$	$970 \pm 60 \pm 20$	20.4
		$< 1.2 \text{ MeV, 95\% CL}$		
$\Omega_c(3066)^0$	$3065.6 \pm 0.1 \pm 0.3^{+0.3}_{-0.5}$	$3.5 \pm 0.4 \pm 0.2$	$1740 \pm 100 \pm 50$	23.9
$\Omega_c(3090)^0$	$3090.2 \pm 0.3 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}$	$8.7 \pm 1.0 \pm 0.8$	$2000 \pm 140 \pm 130$	21.1
$\Omega_c(3119)^0$	$3119.1 \pm 0.3 \pm 0.9^{+0.3}_{-0.5}$	$1.1 \pm 0.8 \pm 0.4$	$480 \pm 70 \pm 30$	10.4
		$< 2.6 \text{ MeV, 95\% CL}$		
$\Omega_c(3188)^0$	$3188 \pm 5 \pm 13$	$60 \pm 15 \pm 11$	$1670 \pm 450 \pm 360$	
$\Omega_c(3066)_{fd}^0$			$700 \pm 40 \pm 140$	
$\Omega_c(3090)_{fd}^0$			$220 \pm 60 \pm 90$	
$\Omega_c(3119)_{fd}^0$			$190 \pm 70 \pm 20$	

Conclusioni

- LHCb ha raccolto un campione enorme di decadimenti di adroni b
- Diversi adroni esotici possono essere studiati utilizzando analisi ad ampiezze
- Dalla prima osservazione degli stati di pentaquarks:
 - evidenza chiara di questi stati in un modo “model independent”
 - lo studio del decadimento $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p \pi$ è consistente con le osservazioni nel canale $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$
 - sono stati osservati altri decadimenti che possono essere usati per ulteriori ricerche di pentaquarks
- 5 picchi stretti osservati in $\Xi_c^+ K^-$
 - questi stati sono probabilmente stati 1P e 2S
 - la determinazione dei loro numeri quantici da decadimenti dell' Ω_b potrebbe essere possibile
 - Nessuno dei modelli teorici prevede esattamente lo splitting di massa che è stato misurato
 - La ricerca di altri modi di decadimento è in corso
- Risultati anche di spettroscopia “convenzionale (stati eccitati in $\Lambda_c \rightarrow D^0 p$ [arXiv:1701.07873], $D^{**} \rightarrow D \pi$ [arXiv:1608.01289], ...)
- I dati di Run2 sono già disponibili per essere analizzati!

Spare slides

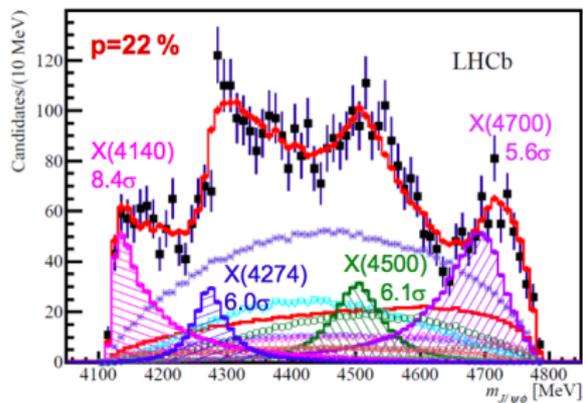
Puzzling $X(4140) \rightarrow J/\psi\phi$



- $X(4140) \rightarrow J/\psi\phi$ rivendicato da CDF per primo nei decadimenti $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K$
- Visto da alcuni esperimenti, ma non da altri
- Situazione decisamente confusa

Osservazione di strutture esotiche nel decadimento $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ [PRL 118 (2017) 022003]

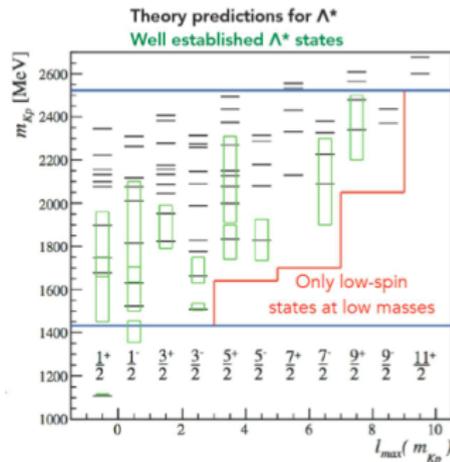
- Analisi ad ampiezza necessaria per dimostrare che i picchi $X \rightarrow J/\psi\phi$ non sono dovuti a riflessioni degli stati eccitati dei kaoni (K^*) che interferiscono
- Fit con solo le risonanze ϕK non descrive i dati in maniera ottimale
- Si osservano quattro strutture nella massa $J/\psi\phi$ ognuna con una significatività maggiore di 5σ
- Per $X(4140)$ [1^{++}] è preferita l'interpretazione come cuspidi $D_s^+ D_s^{*-}$, ma è anche possibile un'interpretazione come risonanza.
- Il valore di massa è consistente mentre la larghezza è maggiore rispetto alle misure precedenti
- Confermata l'esistenza dello stato $X(4274)$ [1^{++}] visto da CDF
- Strutture significative a masse elevate, descritte da due nuove risonanze (0^{++}): $X(4500)$ and $X(4700)$



Analisi “model independent” di $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$

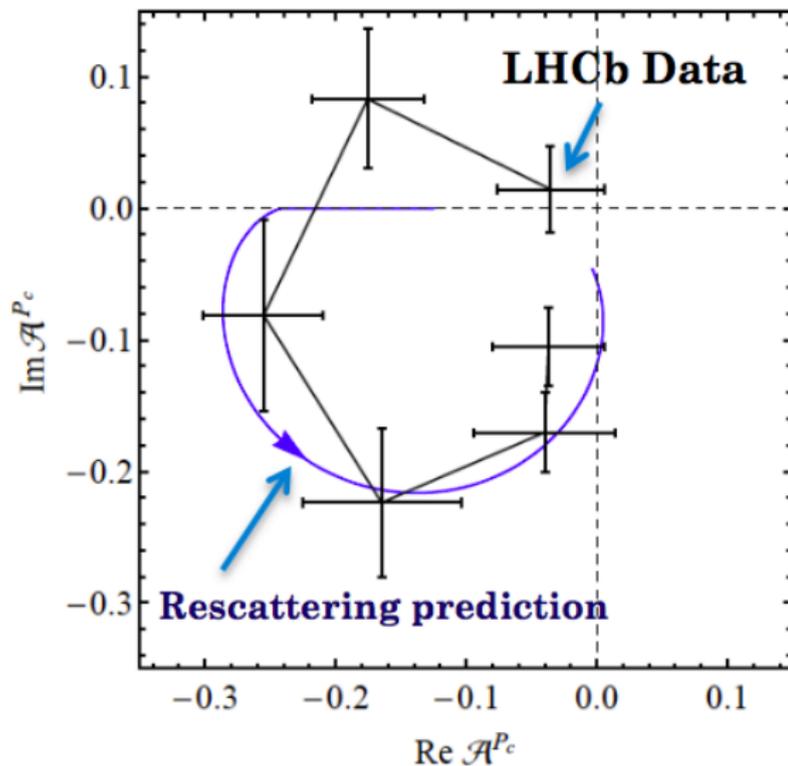
[PRL 117, 082002 (2016)]

- La spettroscopia degli stati Λ^* è complessa e non completamente capita
- Elevata densità di stati con elevate larghezze
- La componente NR $K^- p$ può avere una dipendenza dalla massa non banale
- Ipotesi: i dati possono essere spiegati dalla massa m_{pK} e dalla struttura angolare
- Descrivere la distribuzione angolare in ogni bin di massa m_{Kp} con la somma dei polinomi di Legendre $\frac{dN}{d \cos \theta_{\Lambda^*}} = \sum_{l=0}^{l_{max}} \langle P_l^U \rangle P_l(\cos \theta_{\Lambda^*})$ considerando uno spin massimo delle componenti Λ in ogni intervallo di massa invariante Kp

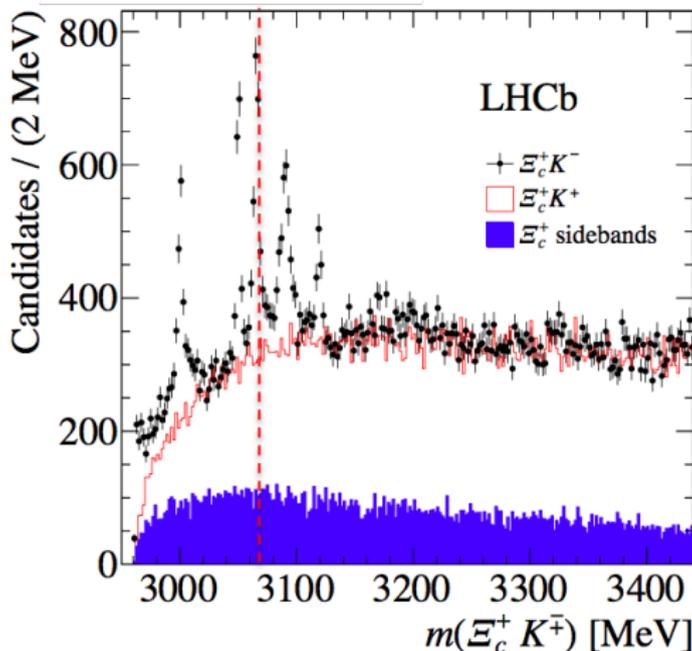


Test della natura esotica del pentaquark

$$P_c(4450)$$



- Stati con masse $M > m(\Xi_c') + m(K)$ possono decadere anche nello stato finale $\Xi_c' K^-$ e appaiono nella massa $\Xi_c' K^-$ come decadimenti parzialmente ricostruiti (i.e. feed-downs)



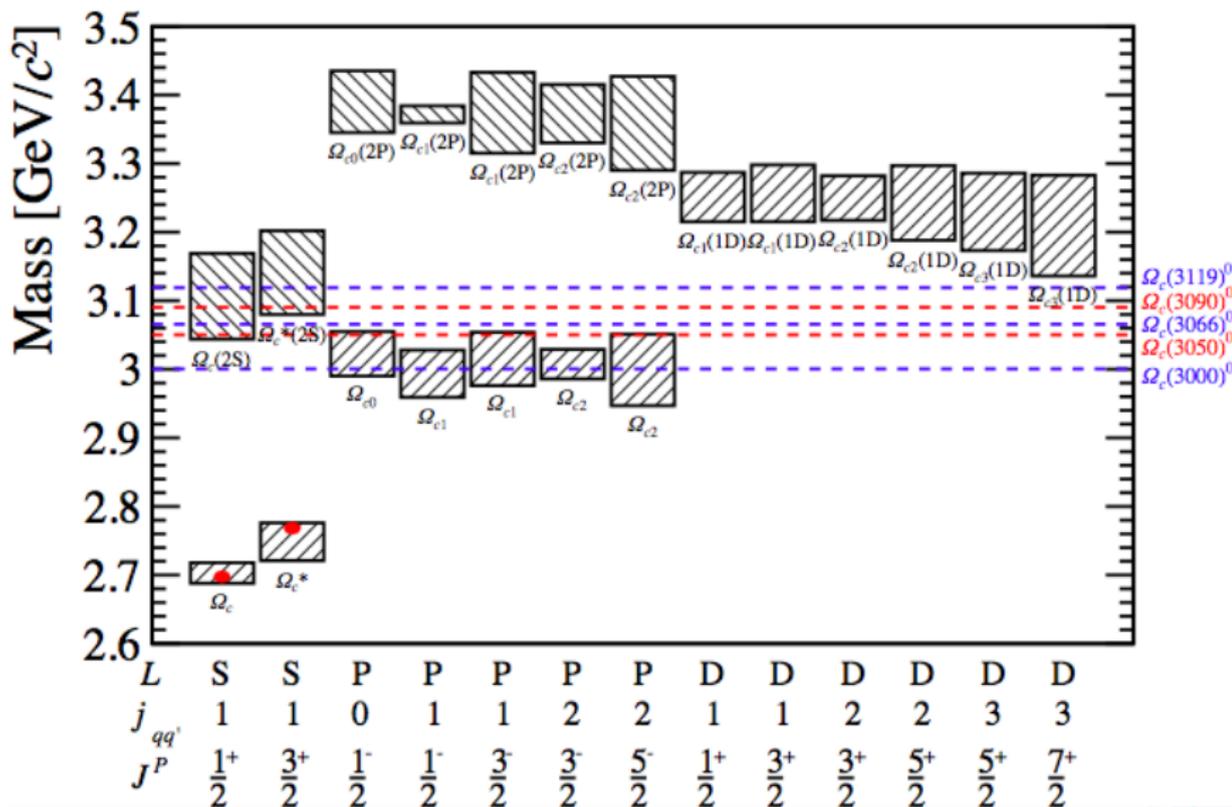
Parametrizzazione del fondo combinatorio per gli stati Ω_c

- Combinazioni con il segno sbagliato di $\Xi_c^+ K^+$ per lo studio della parametrizzazione del fondo combinatorio

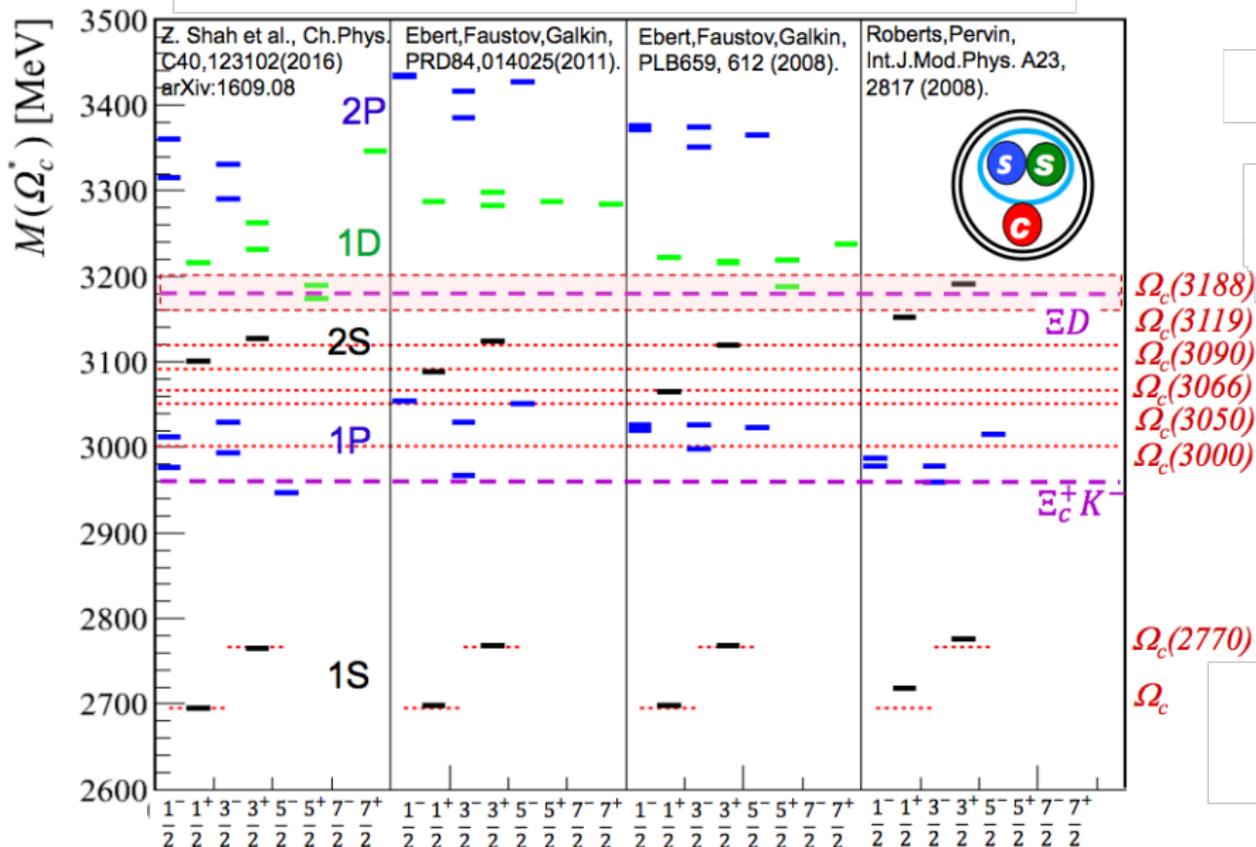
$$B(m) = \begin{cases} P(m)e^{a_1 m + a_2 m^2} & \text{for } m < m_0, \\ P(m)e^{b_0 + b_1 m + b_2 m^2} & \text{for } m > m_0, \end{cases}$$

- $P(m)$ è un fattore di spazio delle fasi a due corpi, m_0 , a e b sono parametri liberi

$$\Omega_c^0$$



$$\Omega_c^0$$



$B_s^0 \pi^-$ spectroscopy [PRL 117 (2016) 152003]

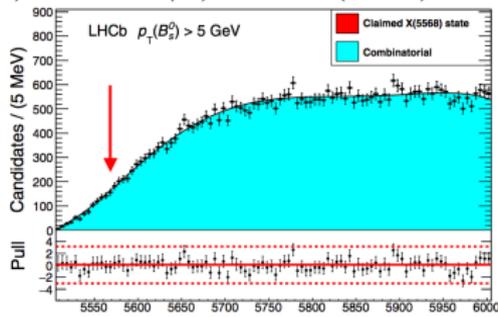
- D0: osservazione (5.1σ) di un candidato tetraquark $X(5568)^+ \rightarrow B_s^0 \pi^+$ con $\sim 5500 B_s^0$ eventi ricostruiti in $J/\psi \phi$ [arXiv:1602.07588].
- Un'elevata frazione dei B_s^0 provengono da $X(5568)^+$

$$\rho_X^{D0} = \frac{\sigma(p\bar{p} \rightarrow X + \text{anything}) \times \mathcal{B}(X \rightarrow B_s^0 \pi)}{\sigma(p\bar{p} \rightarrow B_s^0 + \text{anything})} |_{D0Acc} = (8.6 \pm 1.9 \pm 1.4)\%$$
- A LHCb, è disponibile un campione di B_s^0 ricostruiti come $J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) \phi(\rightarrow K^+ K^-)$ allo stesso modo di D0 ma anche in $D_s^- (\rightarrow K^+ K^- \pi^-) \pi^+$ in 3 fb^{-1}
- Nessuna evidenza di $X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^+$
- Limite superiore sul rapporto di produzione dei B_s^0 per diversi tagli su $p_T(B_s^0)$

$$\rho_X(B_s \ p_T) > 5 \text{ GeV}/c < 0.011 \text{ (0.012) @ 90 (95) \% CL}$$

$$\rho_X(B_s \ p_T) > 10 \text{ GeV}/c < 0.021 \text{ (0.024) @ 90 (95) \% CL}$$

$$\rho_X(B_s \ p_T) > 15 \text{ GeV}/c < 0.018 \text{ (0.020) @ 90 (95) \% CL}$$



$B_s^0 \pi^-$ spectroscopy

