

LHCb实验上粲重子的研究

童星昱

北京大学

第十届XYZ粒子研讨会

湖南 长沙

2025年4月13日

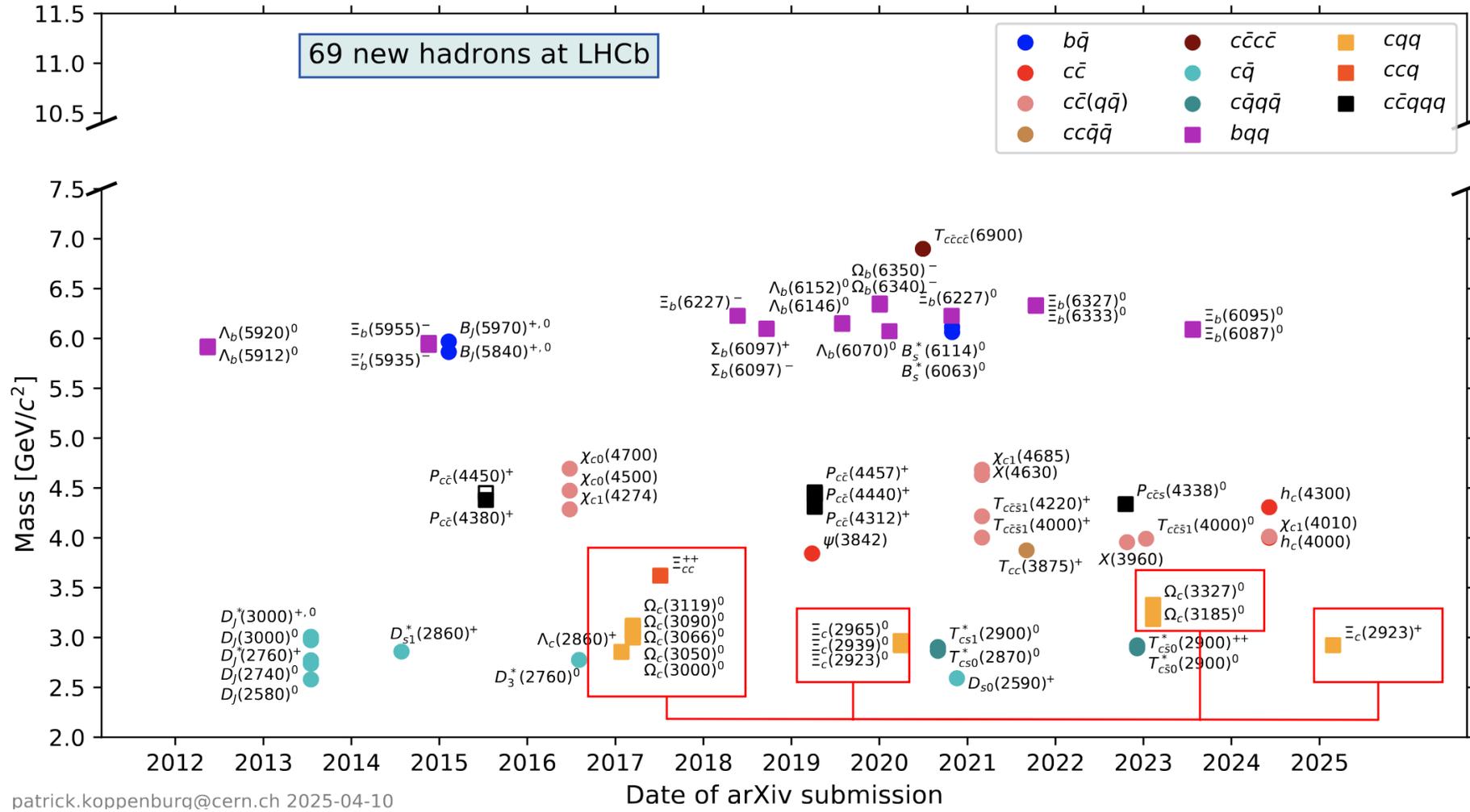


- 简介
- Ξ_c 及其激发态
- Ω_c 及其激发态
- 双粲重子
- 总结和展望

研究粲重子谱的意义

- 检验QCD理论模型：
 - 在低能标区的非微扰特性(格点QCD、有效理论等)- 实验数据作为关键输入
 - 粲夸克的质量(~ 1 GeV)能否适用重夸克对称性
- 理解重子形成与强子化机制
- 探索奇特强子与多夸克态
 - 五夸克态
 - 强子分子态与阈值效应

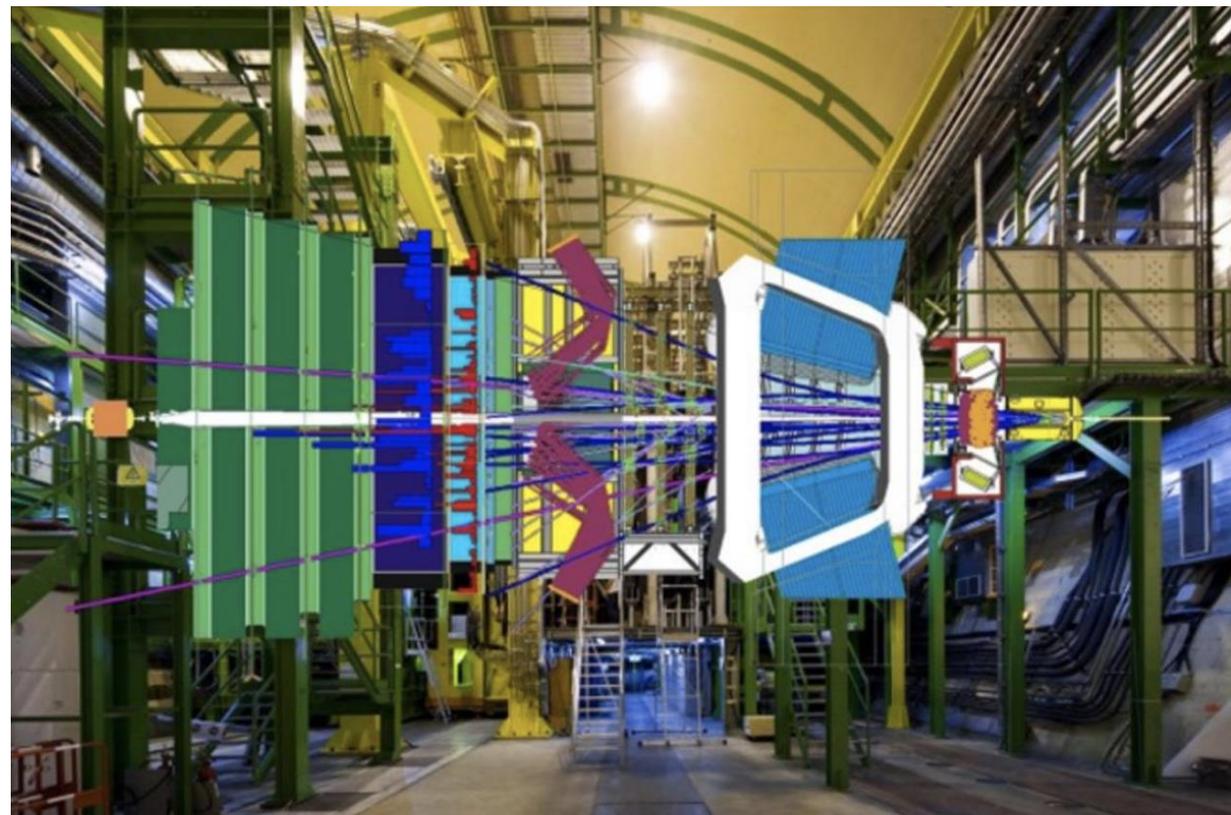
LHCb上发现的粲重子



<https://koppenburg.ch/particles.html>

LHCb探测器

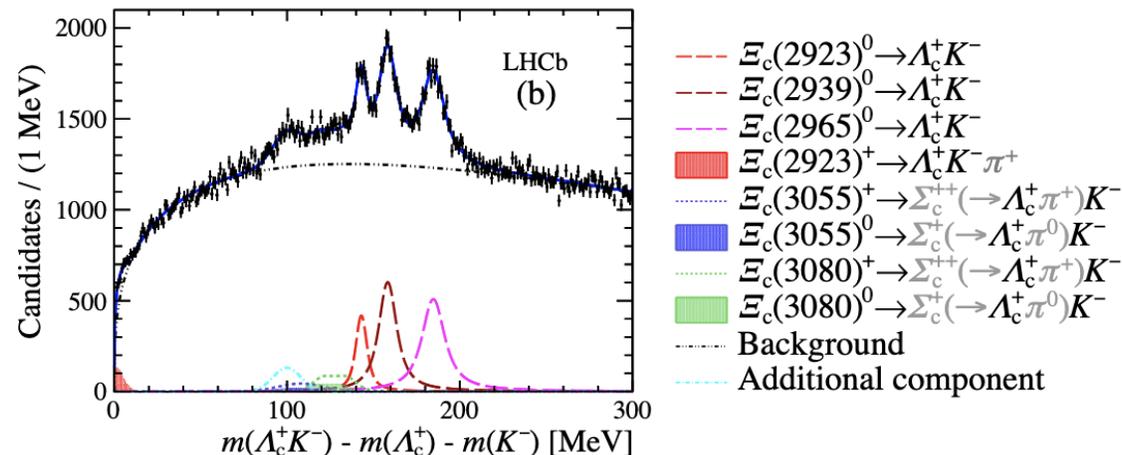
- 单臂前向探测器，专门设计研究粲和底强子
- 研究粲重子谱的两种方法
 - 直接由质子-质子对撞产生
 - ✓ 更大的产生截面
 - 由底强子衰变而来
 - ✓ 更少的本底
 - ✓ 可以进行振幅分析，测量自旋-宇称



[JINST 3 (2008) S08005, JINST 19 (2024) P05065]

$\Lambda_c^+ K^-$ 系统中的 Ξ_c^0 激发态

- $pp \rightarrow \Lambda_c^+ K^- + X$ [PRL 124 (2020) 222001]



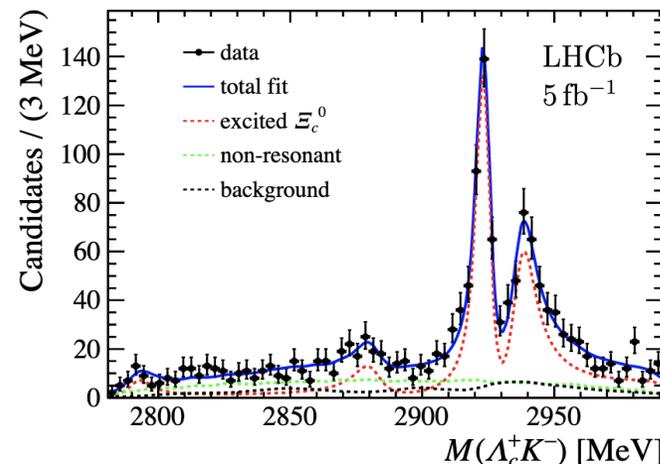
- 新发现 $\Xi_c(2923)^0, \Xi_c(2939)^0$
- $\Xi_c(2965)^0$ 与 $\Xi_c(2970)^0$ 符合, 但是宽度有差别

Resonance	Mass [MeV]	Γ [MeV]
$\Xi_c(2923)^0$	$2923.04 \pm 0.25 \pm 0.20 \pm 0.14$	$7.1 \pm 0.8 \pm 1.8$
$\Xi_c(2939)^0$	$2938.55 \pm 0.21 \pm 0.17 \pm 0.14$	$10.2 \pm 0.8 \pm 1.1$
$\Xi_c(2965)^0$	$2964.88 \pm 0.26 \pm 0.14 \pm 0.14$	$14.1 \pm 0.9 \pm 1.3$

$\Xi_c(2970)^0$ (from Belle) $2970.8 \pm 0.7 \pm 0.2_{-0.4}^{+0.3}$ $30.3 \pm 2.3_{-1.8}^{+1.0}$

[PRD 94 (2016) 052011]

- $B^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^- K^-$ [PRD 108 (2023) 012020]



- 验证了 $\Xi_c(2923)^0, \Xi_c(2939)^0$
- $\Xi_c(2880)^0$ 与 $\Xi_c(2790)^0$ 存在的迹象

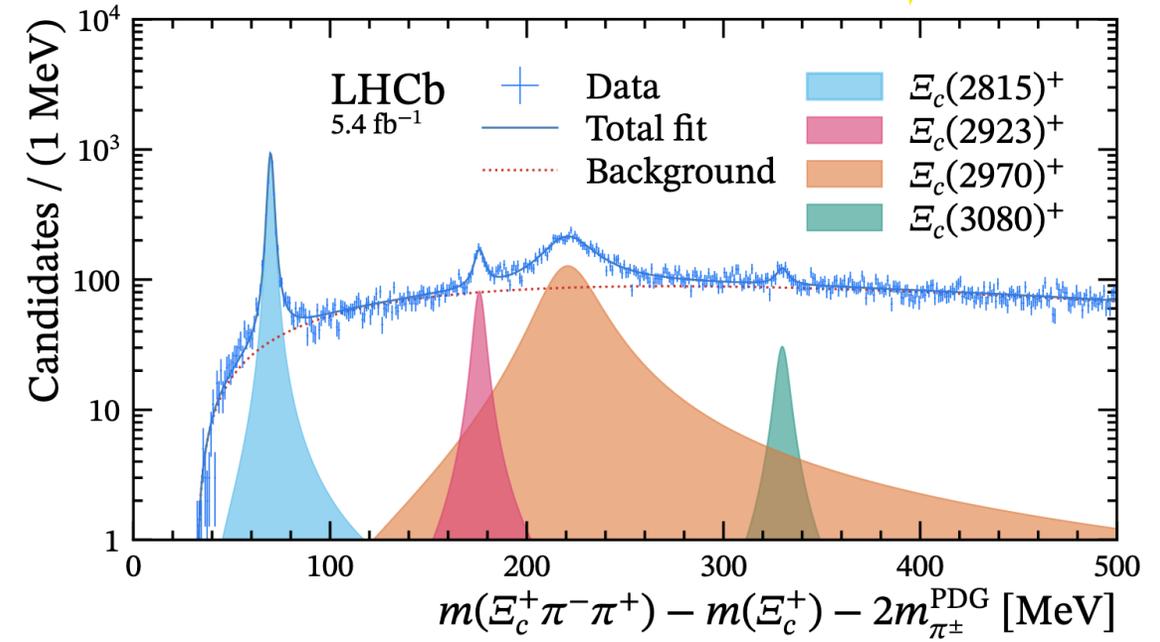
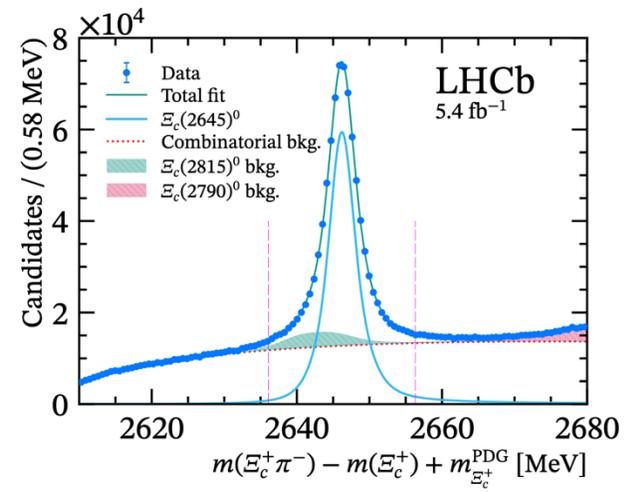
State	Mass (MeV)	Width (MeV)	Significance
$\Xi_c(2880)^0$	$2881.8 \pm 3.1 \pm 8.5$	$12.4 \pm 5.2 \pm 5.8$	3.8σ
$\Xi_c(2923)^0$	$2924.5 \pm 0.4 \pm 1.1$	$4.8 \pm 0.9 \pm 1.5$	$> 10\sigma$
$\Xi_c(2939)^0$	$2938.5 \pm 0.9 \pm 2.3$	$11.0 \pm 1.9 \pm 7.5$	$> 10\sigma$



[arXiv:2502.18987]

$\Xi_c^+ \pi^- \pi^+$ 系统中的 Ξ_c^+ 激发态

- $pp \rightarrow X + \Xi_c(2645)^0 (\rightarrow \Xi_c^+ \pi^-) \pi^+$



- 在 $\Xi_c(2645)^0 \pi^+$ 质量谱上发现四个激发态，其中 $\Xi_c(2923)^+$ 为首次发现
- $\Xi_c(2923)^+$ 与其已经发现的同位旋伙伴 $\Xi_c(2923)^0$ 符合
- 首次发现 $\Xi_c(3080)^+ \rightarrow \Xi_c(2645)^0 \pi^+$ 衰变
- $\Xi_c(2970)^+$ 与 $\Lambda_c^+ K^-$ 系统中的 $\Xi_c(2965)^0$ 宽度不同

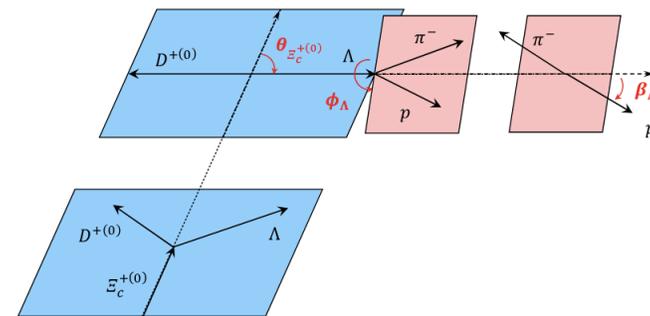
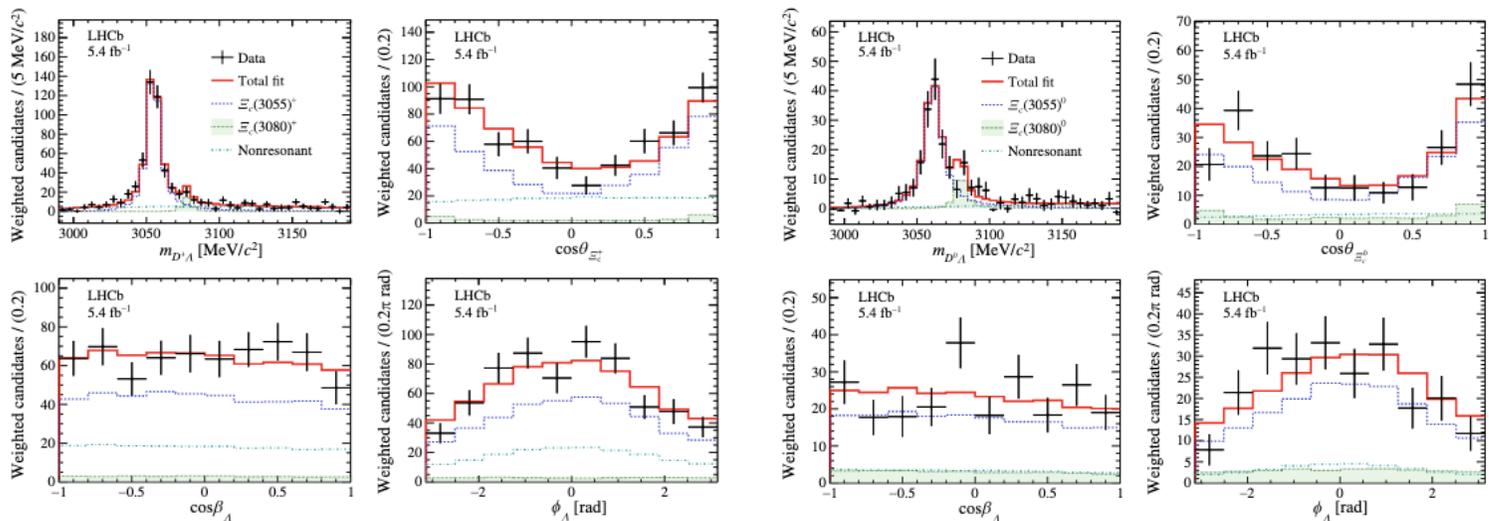
State	Mass (MeV)	Width (MeV)
$\Xi_c(2815)^+$	$2816.65 \pm 0.03 \pm 0.03 \pm 0.23$	$2.07 \pm 0.08 \pm 0.12$
$\Xi_c(2923)^+$	$2922.8 \pm 0.3 \pm 0.5 \pm 0.2$	$5.3 \pm 0.9 \pm 1.4$
$\Xi_c(2970)^+$	$2968.6 \pm 0.5 \pm 0.5 \pm 0.2$	$31.7 \pm 1.7 \pm 1.9$
$\Xi_c(3080)^+$	$3076.8 \pm 0.7 \pm 1.3 \pm 0.2$	$6.8 \pm 2.3 \pm 0.9$

$\Xi_c(3055)$ 的自旋-宇称

[PRL 134 (2025) 081901]



- $\Xi_b^{0(-)} \rightarrow \Xi_c(3055)^{+(0)} (\rightarrow D^{+(0)} \Lambda) \pi^-$

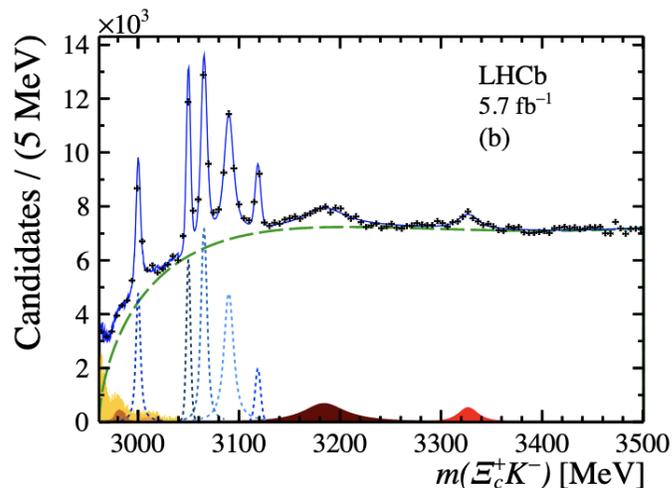


- 首次从 $\Xi_b^{0(-)}$ 衰变中观测到 $\Xi_c(3055)^{+(0)}$
- 首次测得 $\Xi_c(3055)^{+(0)}$ 的自旋-宇称: $J^P = \frac{3}{2}^+$
- 支持 $\Xi_c(3055)$ 为D波激发的味反对称三重态
- $\Xi_b^{0(-)} \rightarrow \Xi_c(3080)^{+(0)} (\rightarrow D^{+(0)} \Lambda) \pi^-$ 的迹象

J^P $\Xi_c(3055)^{+(0)}$	n_σ	α
$1/2^-$	12.9(6.5)	$-0.10 \pm 0.17 (-0.63 \pm 0.28)$
$1/2^+$	11.0(5.5)	$+0.31 \pm 0.13 (+0.32 \pm 0.20)$
$3/2^-$	7.3(3.5)	$+0.18 \pm 0.14 (+0.20 \pm 0.23)$
$5/2^-$	6.5(4.8)	$-0.12 \pm 0.14 (-0.21 \pm 0.23)$
$5/2^+$	9.8(4.8)	$+0.52 \pm 0.14 (+0.30 \pm 0.27)$
$7/2^-$	10.7(6.2)	$+0.41 \pm 0.16 (+0.19 \pm 0.22)$
$7/2^+$	10.9(6.0)	$+0.12 \pm 0.14 (-0.30 \pm 0.25)$

$\Xi_c^+ K^-$ 系统中的 Ω_c^0 激发态

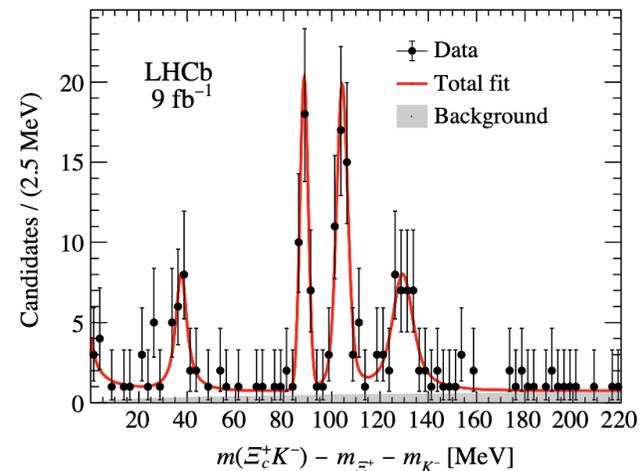
- $pp \rightarrow \Xi_c^+ K^- + X$ [PRL 131 (2023) 131902]



- 新发现 $\Omega_c(3185)^0, \Omega_c(3327)^0$

Resonance	m (MeV)	Γ (MeV)
$\Omega_c(3000)^0$	$3000.44 \pm 0.07^{+0.07}_{-0.13} \pm 0.23$	$3.83 \pm 0.23^{+1.59}_{-0.29}$
$\Omega_c(3050)^0$	$3050.18 \pm 0.04^{+0.06}_{-0.07} \pm 0.23$	$0.67 \pm 0.17^{+0.64}_{-0.72}$
		< 1.8 MeV, 95% C.L.
$\Omega_c(3065)^0$	$3065.63 \pm 0.06^{+0.06}_{-0.06} \pm 0.23$	$3.79 \pm 0.20^{+0.38}_{-0.47}$
$\Omega_c(3090)^0$	$3090.16 \pm 0.11^{+0.06}_{-0.10} \pm 0.23$	$8.48 \pm 0.44^{+0.61}_{-1.62}$
$\Omega_c(3119)^0$	$3118.98 \pm 0.12^{+0.09}_{-0.23} \pm 0.23$	$0.60 \pm 0.63^{+0.90}_{-1.05}$
		< 2.5 MeV, 95% C.L.
$\Omega_c(3185)^0$	$3185.1 \pm 1.7^{+7.4}_{-0.9} \pm 0.2$	$50 \pm 7^{+10}_{-20}$
$\Omega_c(3327)^0$	$3327.1 \pm 1.2^{+0.1}_{-1.3} \pm 0.2$	$20 \pm 5^{+13}_{-1}$

- $\Omega_b^- \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^-$ [PRD 104 (2021) L091102]



- 在 Ω_b^- 衰变中发现4个 Ω_c^0 激发态
- 没有发现 $\Omega_c(3119)^0$

State	Mass (MeV)	Width (MeV)	Significance
$\Omega_c^0(3000)^0$	$2999.2 \pm 0.9 \pm 0.9 \pm 0.2$	$4.8 \pm 2.1 \pm 2.5$	6.2σ
$\Omega_c^0(3050)^0$	$3050.1 \pm 0.3 \pm 0.2 \pm 0.2$	< 1.6, 95% CL	9.9σ
$\Omega_c^0(3065)^0$	$3065.9 \pm 0.4 \pm 0.4 \pm 0.2$	$1.7 \pm 1.0 \pm 0.5$	11.9σ
$\Omega_c^0(3090)^0$	$3091.0 \pm 1.1 \pm 1.0 \pm 0.2$	$7.4 \pm 3.1 \pm 2.8$	7.8σ

Ξ_c 与 Ω_c 比较

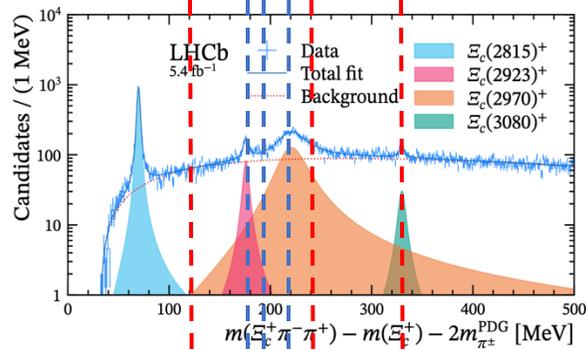
- 相近的质量差:

$$m(\Omega_c(3050)^0) - m(\Xi_c(2923)^0) \simeq 125 \text{ MeV},$$

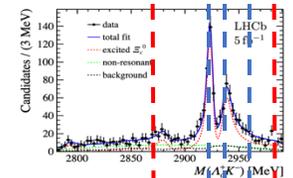
$$m(\Omega_c(3065)^0) - m(\Xi_c(2939)^0) \simeq 125 \text{ MeV},$$

$$m(\Omega_c(3090)^0) - m(\Xi_c(2965)^0) \simeq 125 \text{ MeV}.$$

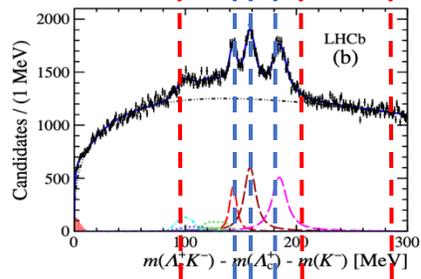
- $\Xi_c(2880)^0$ 是否和 $\Omega_c(3000)^0$ 对应?
- $\Omega_c(3185)^0$ 对应 $\Xi_c(3055)^0$ 还是 $\Xi_c(3080)^0$?
- $\Omega_c(3119)^0$ 对应的态去哪了?



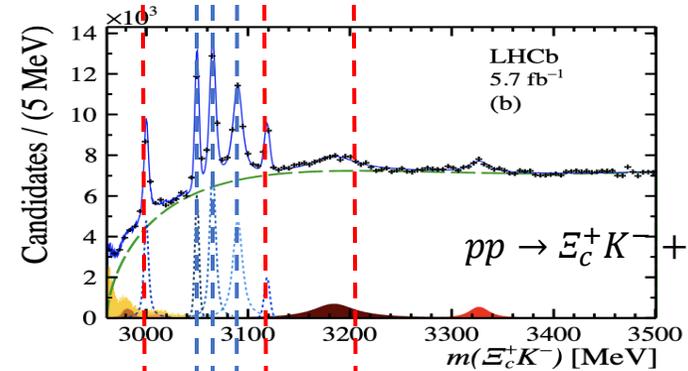
$pp \rightarrow \Xi_c^+ \pi^- \pi^+ + X$



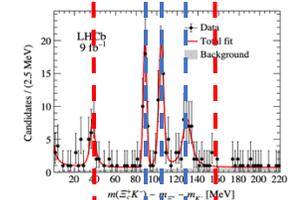
$B^- \rightarrow \Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^- K^-$



$pp \rightarrow \Xi_c^+ K^- + X$



$pp \rightarrow \Xi_c^+ K^- + X$



$\Omega_b^- \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^-$

双粲重子 Ξ_{cc}^{++}

- 2017年由LHCb实验发现
- 已经发现3个衰变道

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+)} = 0.35 \pm 0.09(\text{stat}) \pm 0.03(\text{syst}) \pm 0.17(\text{ext}),$$

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

- 新衰变道: $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \pi^+$

- 分支比测量

$$\frac{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \pi^+)}{\mathcal{B}(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+)} = 1.37 \pm 0.18(\text{stat}) \pm 0.09(\text{syst}) \pm 0.35(\text{ext}),$$

- 分支比略大于 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$, 然而 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^0 \pi^+ \pi^+$ 没有在 $\Xi_c^0 \pi^+$ 质量谱观测到显著的共振态



[\[arXiv:2504.05063\]](https://arxiv.org/abs/2504.05063)

DOUBLY CHARMED BARYONS
($C=+2$)
 $\Xi_{cc}^{++} = ucc, \Xi_{cc}^+ = dcc, \Omega_{cc}^+ = scc$

<https://pdglive.lbl.gov>

PDGID: 5068 JSON (beta) INSPIRE Q

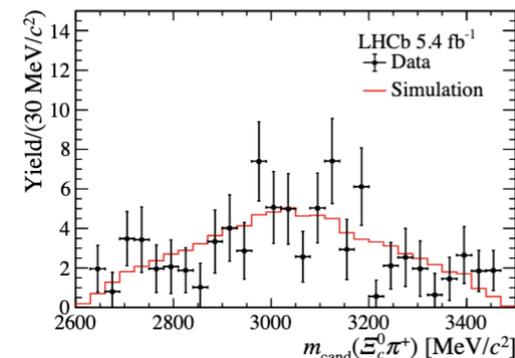
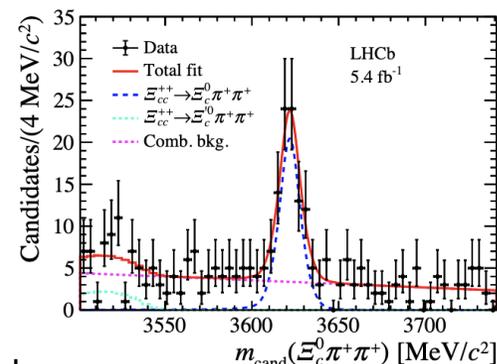
Ξ_{cc}^{++} $I(J^P) = ?(??)$

Ξ_{cc}^{++} MASS $3621.6 \pm 0.4 \text{ MeV}$

Ξ_{cc}^{++} MEAN LIFE $(2.56 \pm 0.27) \times 10^{-13} \text{ s}$

Ξ_{cc}^{++} DECAY MODES

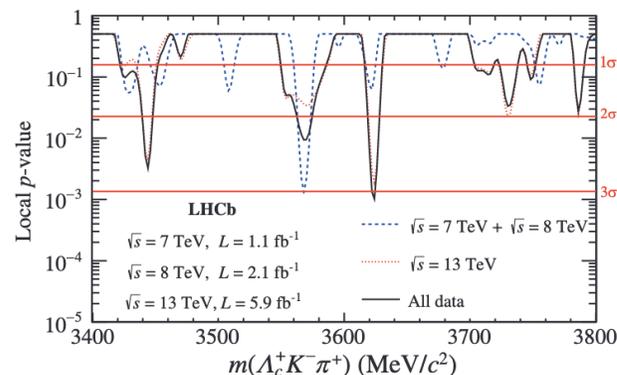
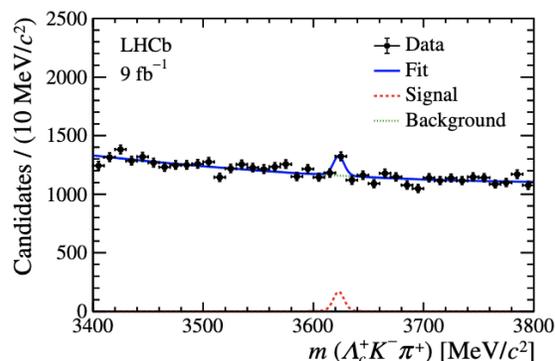
Mode	Fraction (Γ_i / Γ)	Scale Factor/ Conf. Level	P(MeV/c)
Γ_1 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$	DEFINED AS 1		880
Γ_2 $\Xi_c^+ \pi^+, \Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$	0.0022 ± 0.0006		
Γ_3 $\Xi_c^+ \pi^+, \Xi_c^+ \rightarrow \Xi_c^+ \gamma, \Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$	0.0031 ± 0.0010		
Γ_4 $D^+ p K^- \pi^+$	< 0.017	CL=90%	562



双粲重子 Ξ_{cc}^+ 与 Ω_{cc}^+

- $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ [[SCPMA 63 \(2020\) 221062](#)]

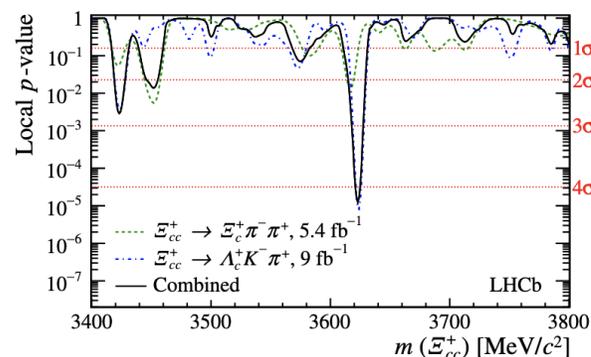
➤ 局部显著度 $\sim 3\sigma$



- $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+ \pi^-$ 与 $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 联合 [[JHEP 12 \(2021\) 107](#)]

➤ 局部显著度 4σ

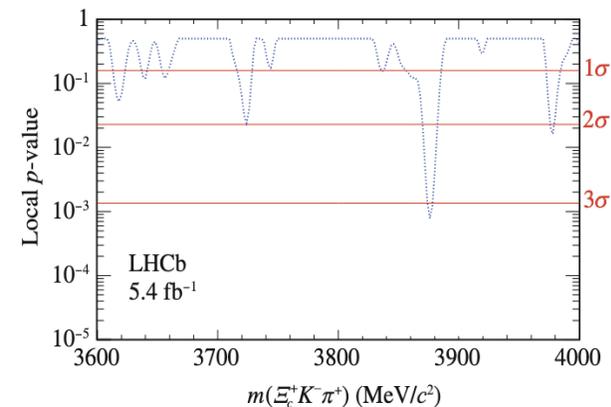
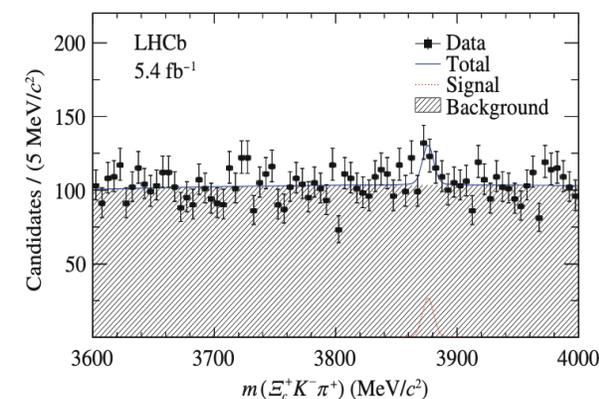
➤ 全局显著度 2.9σ



- $\Omega_{cc}^+ \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^+$ [[SCPMA 64 \(2021\) 101062](#)]

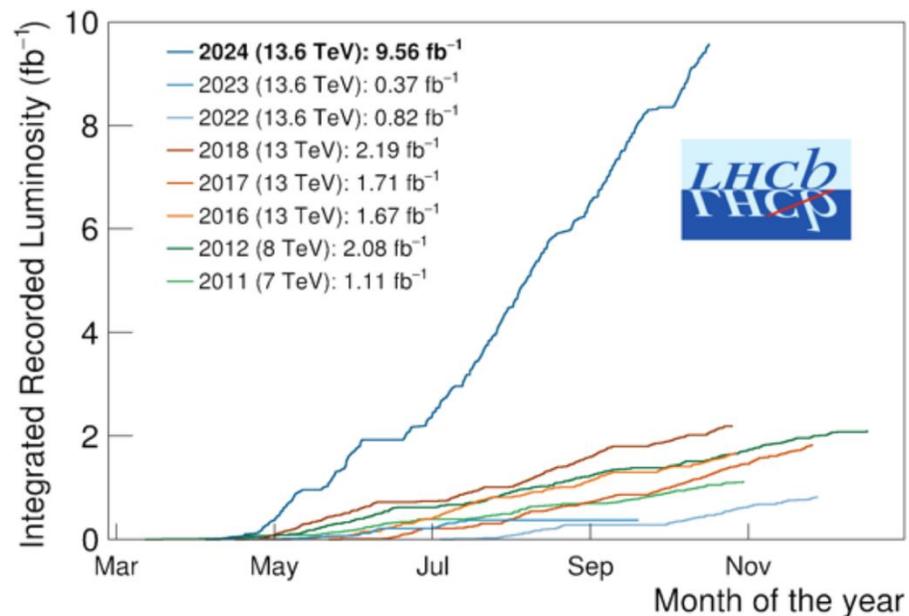
➤ 局部显著度 3.2σ

➤ 全局显著度 1.8σ



总结和展望

- LHCb实验近期在粲重子谱领域取得一系列进展
- LHCb第三期运行取数中，2024年数据的积分亮度已经超过前两期总和
- 更大的统计量能够支持发现更多衰变道和对自旋-宇称量子数的测量



谢谢!