重子和粲重子与实例

崔峻熙
复旦大学

Belle II 中国组冬季学校

2026年11月17日 · 东南大学

目录

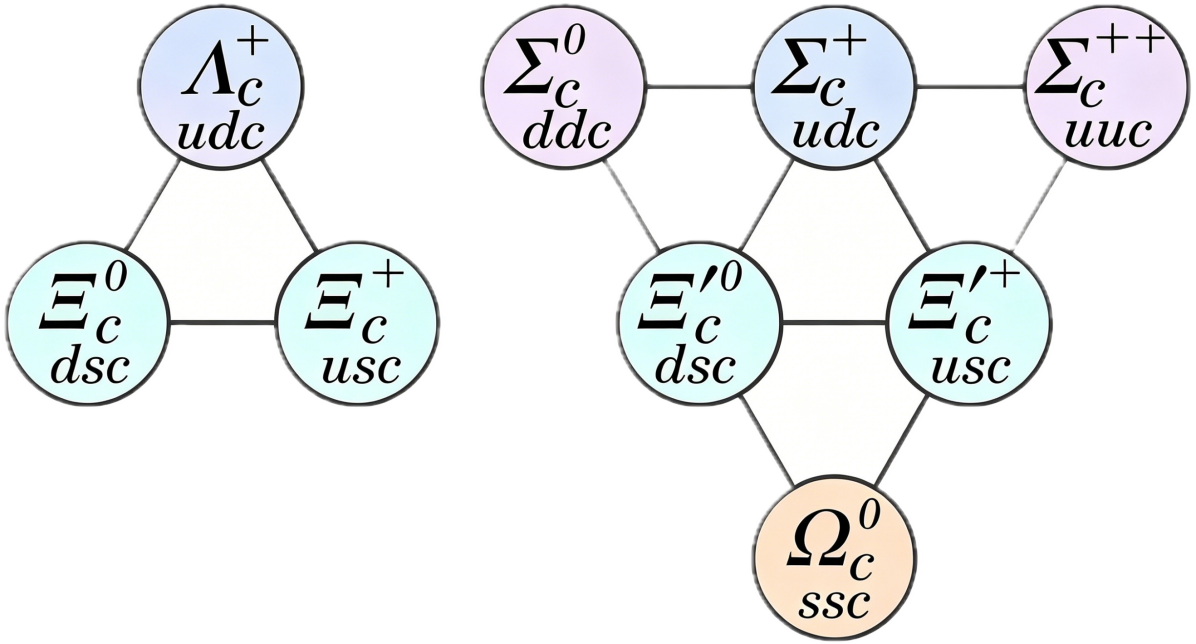
一、引言

二、Belle 和 Belle II 实验上的粲重子和重子研究

三、实例：$\Xi_c^+ \to \Sigma^0 \pi^+ K_S^0$衰变分支比测量

粲重子

粲重子是一类至少含有一个粲夸克的重子



理论报告回顾

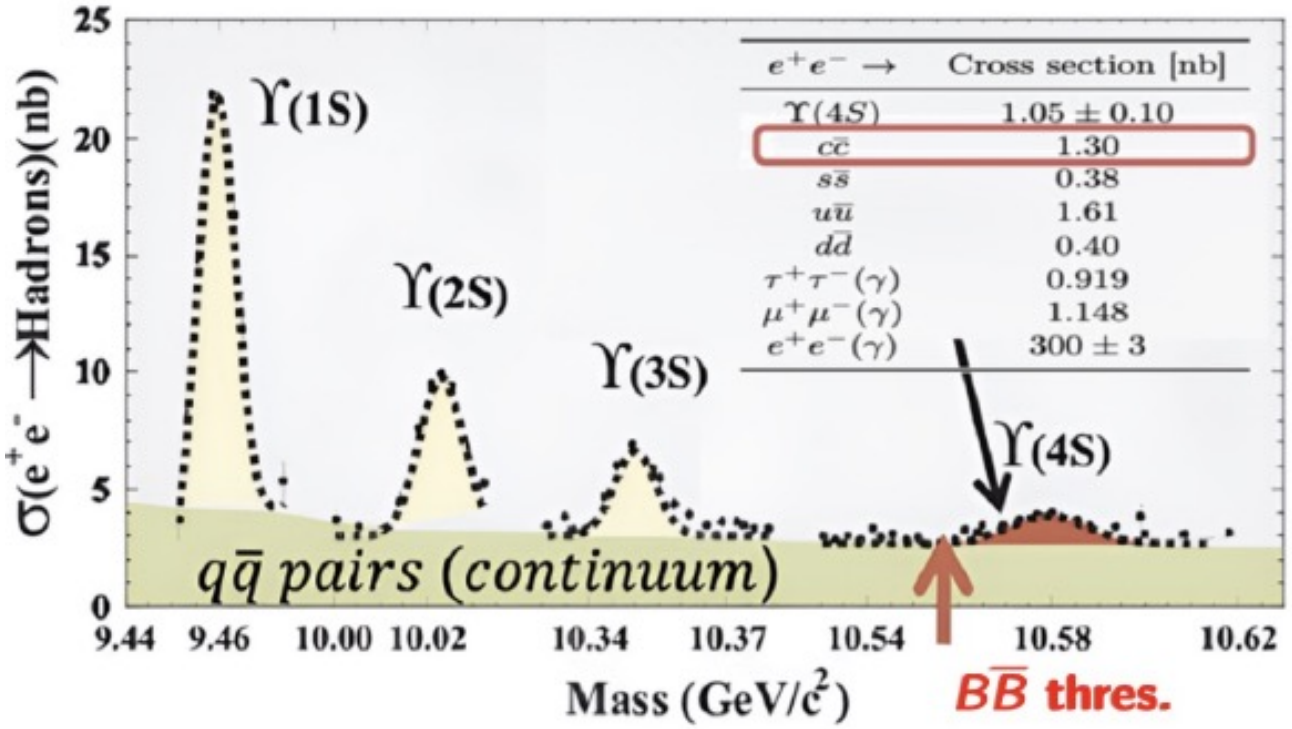
3. （粲）重子 / (Charmed) Baryon
Fanrong Xu (Jinan University)
2026/11/14 10:30
理论报告 / Theory Lectu...

粲夸克质量处于微扰与非微扰 QCD 的过渡能区

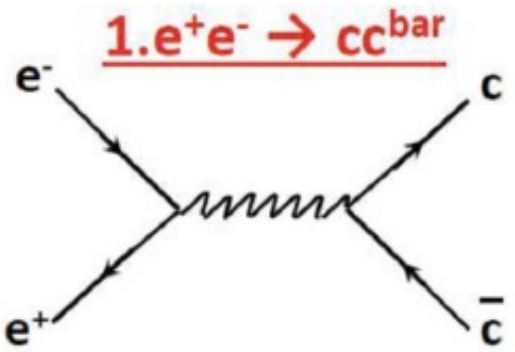
- **检验QCD非微扰理论**——粲重子精确测量可检验格点QCD等理论。
- **揭示奇特强子态**——激发态谱系研究有助于区分常规重子与分子态、五夸克态等奇特结构。
- **奠定重味物理基准**——绝对衰变分支比的精确测量可为底重子、双粲重子研究提供关键基准输入。

Belle和Belle II实验上粲重子的产生

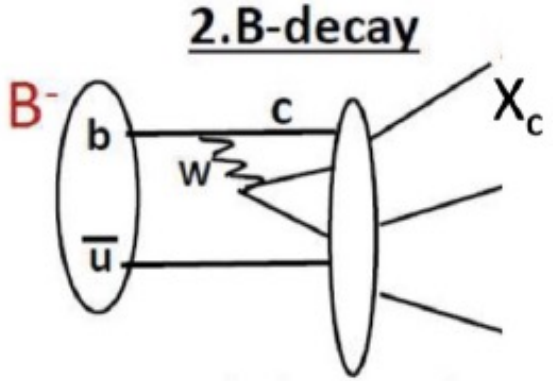
$\sqrt{s} \simeq 10.58$ GeV: $e^+e^- \to q\bar{q}\ (q = u, d, s, c)$, $e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to B\bar{B}$



连续过程



B 衰变



轻味重子还来自于$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$ 连续过程、粲重子衰变、$\Upsilon(1S, 2S, 3S)$衰变

实验样本比较

Comparison of available charm samples

Experiment	Machine	C.M.	Luminosity(fb^{-1})	N_{prod}	Efficiency	Characters
BESIII	BEPC-II (e^+e^-)	3.77 GeV 4.18-4.23 GeV 4.6-4.7 GeV	20 7.3 4.5	$D^{0,+}$: 10^8 D_s^+: 5×10^6 Λ_c^+ : 0.8×10^6 ★☆	∼ 10-30% ★★★	☺ extremely clean environment ☺ quantum coherence ☹ no boost, no time-dept analysis
Belle II	SuperKEKB (e^+e^-)	10.58 GeV	600 (→ 50000)	D^0: 10^9 (→ 10^{11}) $D^+_{(s)}$: 10^8 (→ 10^{10}) Λ_c^+: 10^7 (→ 10^9)	$\mathcal{O}$(1-10%)	☺ high-efficiency detection of neutrals ☺ good trigger efficiency ☺ time-dependent analysis ☹ smaller cross-section than LHCb
BELLE	KEKB (e^+e^-)	10.58 GeV	1000	$D^{0,+}$, D_s^+: 10^9 Λ_c^+: 10^8 ★★☆	★★	
LHCb	LHC (pp)	7+8 TeV 13 TeV	1+2 6+9 (→ 23 → 50)	5×10^{12} 10^{13} ★★★★	$\mathcal{O}$(0.1%) ★	☺ very large production cross-section ☺ large boost, excellent time resolution ☹ dedicated trigger required

Here uses $\sigma(D^0\bar{D}^0@3.77\,\text{GeV})$=3.61 nb, $\sigma(D^+D^-@3.77\,\text{GeV})$=2.88 nb, $\sigma(D_s^*D_s@4.17\,\text{GeV})$=0.967 nb; $\sigma(c\bar{c}@10.58\,\text{GeV})$=1.3 nb where each $c\bar{c}$ event averagely has 1.1/0.6/0.3 $D^0/D^+/D_s^+$ yields; $\sigma(D^0@CDF)$=13.3 μb, and $\sigma(D^0@LHCb)$=1661 μb, mainly from *Int. J. Mod. Phys. A* **29***(2014)24,14300518*.

- BESIII, Belle II, and LHCb experiments, with their advantages, are all ideal platforms for charm studies.
- They all are continuously collecting more datasets with increased luminosity in the foreseeable future.

Belle II 样本更新：约 900 fb^{-1}

二、Belle和Belle II 实验上的（粲）重子物理

基态粲重子衰变：只通过弱相互作用衰变

绝对分支比
强子化衰变
半轻及其他衰变
CPV检验

寿命

粲重子谱

产生与极化

超子谱

注：非完备统计。欢迎补充！

基态粲重子衰变

CKM 矩阵（Cabibbo–Kobayashi–Maskawa）

$$V_{\rm CKM} \equiv V_L^u V_L^{d\dagger} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

[PDG]

$$\begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$\lambda = s_{12} \simeq 0.225$

按 CKM 矩阵元大小分类

Cabibbo-favored（CF）	$c \to s\bar{u}d$	$\lvert V_{cs}V_{ud}^*\rvert \sim 1$
Singly Cabibbo-suppressed（SCS）	$c \to d\bar{u}d, s\bar{u}s$	$\lvert V_{cd}V_{ud}^*\rvert \sim \lvert V_{cs}V_{us}^*\rvert \sim \lambda$
Doubly Cabibbo-suppressed（DCS）	$c \to d\bar{u}s$	$\lvert V_{cd}V_{us}^*\rvert \sim \lambda^2$

仅按 CKM 因子估计，衰变率比例约为 $1:\lambda^2:\lambda^4$。

绝对分支比

回顾：

21. 绝对分支比的测量与实例 / Absolute Branching-Fraction Measurement & Analysis Example
郁博 李 (Xi'an Jiaotong Unive...
2026/11/17 09:45
物理分析实例 / Physics ...

$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \to pK^-\pi^+) = (6.84 \pm 0.36)\%$	PRL 113, 042002 (2014)	Belle
$\mathcal{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^-\pi^+) = (1.80 \pm 0.52)\%$	★ PRL 122, 082001 (2019)	Belle
$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+) = (2.86 \pm 1.27)\%$	★ PRD 100, 031101(R) (2019)	Belle

★中国组成员作为主要作者/之一

实验上仅测量过Λ_c^+和$\Xi_c^{0,+}$绝对分支比：$\Xi_c^{0,+}$分支比的误差极大、Ω_c至今未测量

- $\mathcal{B}(\Xi_c^0 \to \Xi^-\pi^+)$：理论与实验严重偏离
  - SU(3)对称性: ~3%；流代数模型: 6.47%； 半轻衰变间接推算值 = (3.26±0.62)%（格点QCD输入）
  - 远高于Belle实验测量值
- 严重制约对底重子、双粲重子等重味强子的研究

Ξ_c^0绝对分支比测量更新	★在研	Belle+Belle II
Ξ_c 绝对分支比（遍举重建）	在研	Belle II

强子化衰变：两体过程

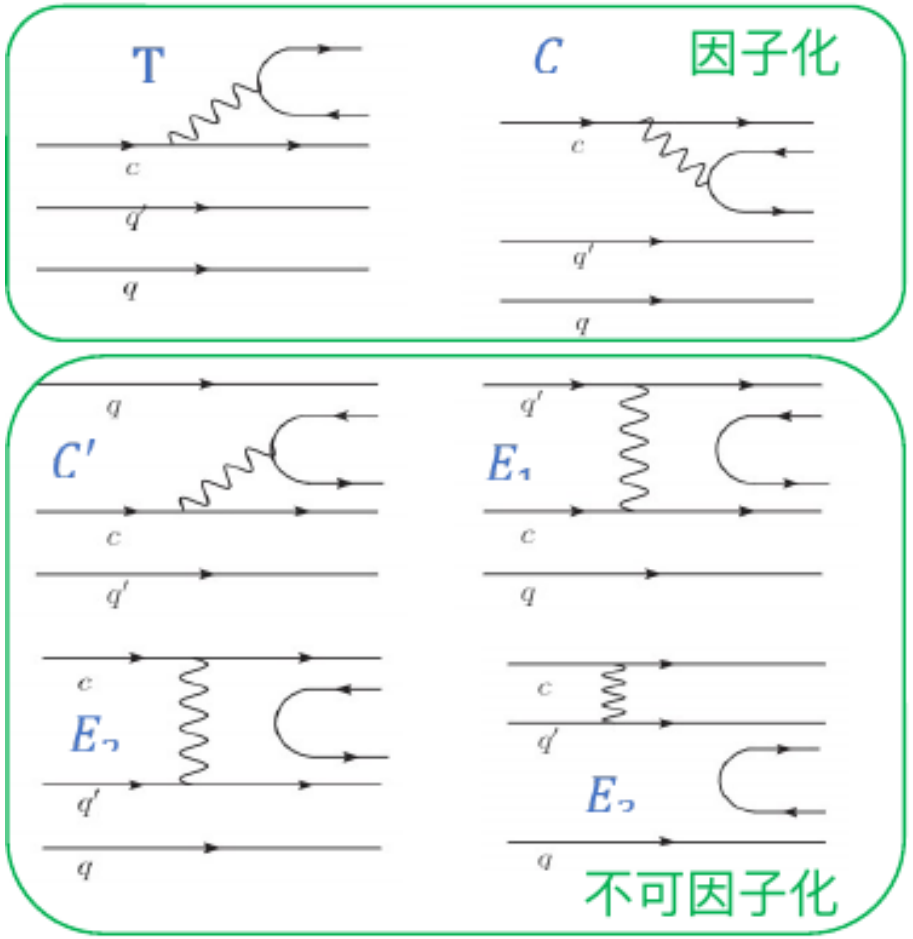
- **不可因子化振幅贡献显著**
  - 实验测量--检验非微扰QCD理论模型
- **动力学模型**
  - 夸克模型、极点模型、流代数法
- **$SU(3)$味对称性模型**
  - 构建轻味夸克对称性
  - 将衰变过程分解为拓扑图
  - 系统研究非轻衰变

① **理论**：全局拟合实验测量的衰变参数->给出预言

② **实验**：寻找、测量->验证理论、发现差异

③ **理论**：发展模型、更新计算

④ **实验**：更多寻找、精确测量

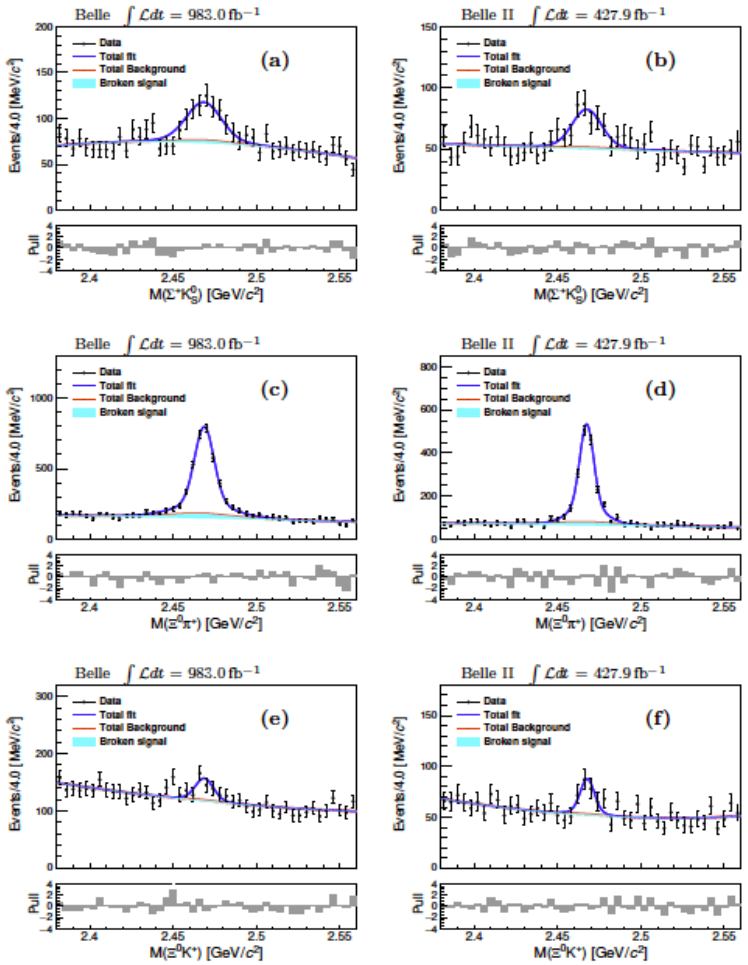


Hai-Yang Cheng [CJP 78, 324-362 (2022)]

- **绝对分支比的测量为实验和理论研究粲重子衰变带来了新的机遇**

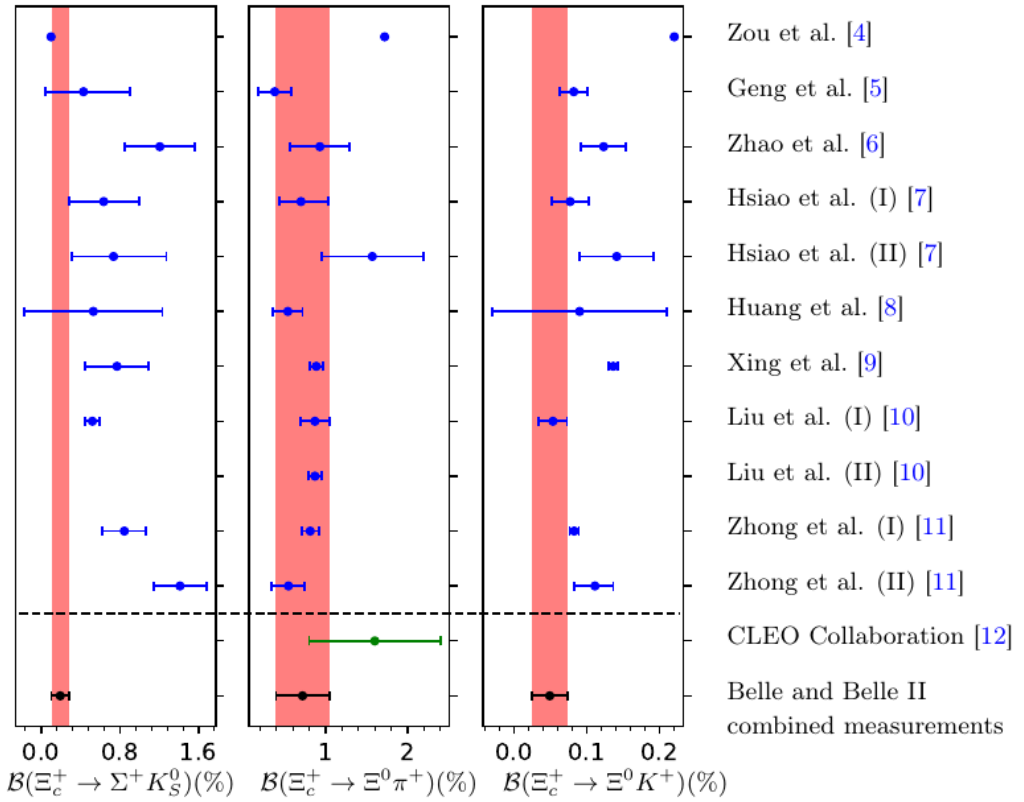
强子化衰变：两体过程

$\Xi_c^+ \to \Sigma^+ K_S^0, \Xi^0 \pi^+, \Xi^0 K^+$ ★ JHEP 08, 195 (2025) Belle+Belle II



$$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Sigma^+ K_S^0) = (0.194 \pm 0.021 \pm 0.009 \pm 0.087)\%,$$
$$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Xi^0 \pi^+) = (0.728 \pm 0.014 \pm 0.027 \pm 0.326)\%,$$
$$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Xi^0 K^+) = (0.049 \pm 0.007 \pm 0.003 \pm 0.022)\%,$$

主要误差来自参考道分支比。



强子化衰变：两体过程

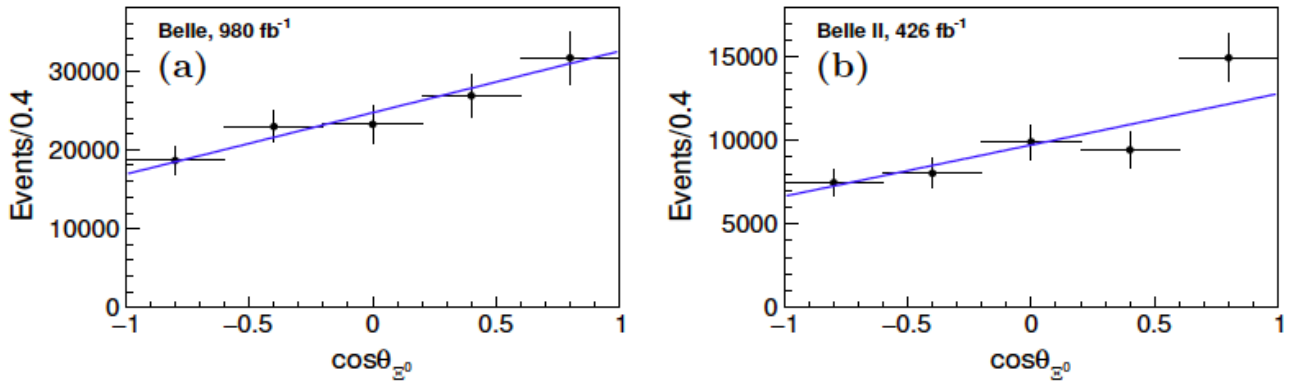
对于 $1/2^+ \to 1/2^+ + 0^-$ 的两体衰变：

宇称破坏的 S 波与宇称守恒的 P 波

衰变不对称参数：$\alpha = \frac{2\mathrm{Re}(S^*P)}{|S|^2+|P|^2}$

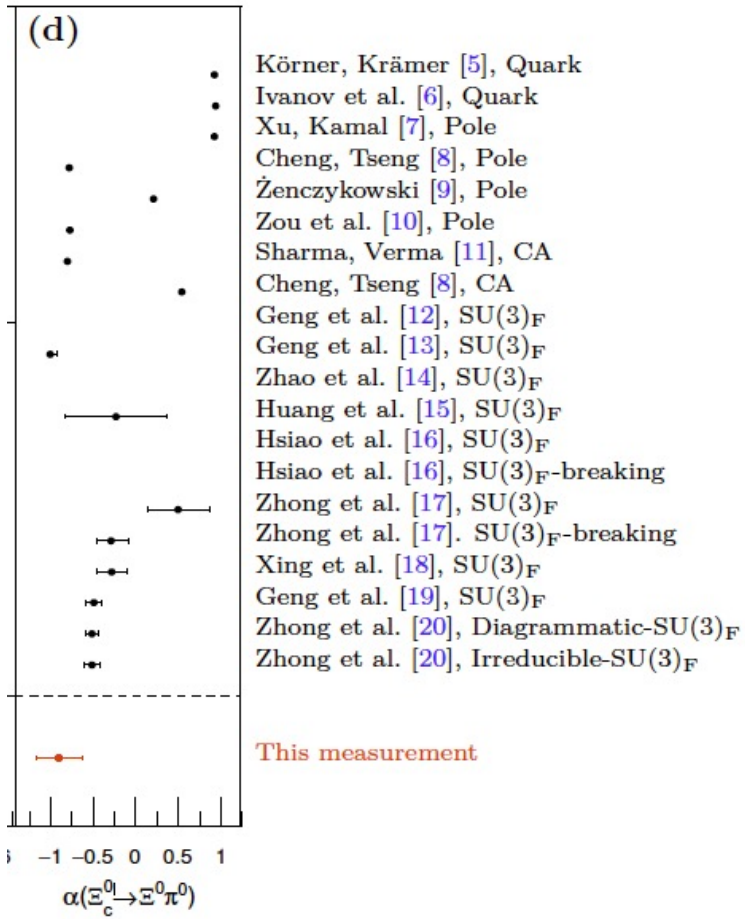
通过级联衰变角分布提取 α。

Lee & Yang, Phys. Rev. 108, 1645 (1957)



$$\frac{dN}{d\cos\theta_{\Xi^0}} \propto 1 + \alpha(\Xi_c^0 \to \Xi^0 h^0)\alpha(\Xi^0 \to \Lambda\pi^0)\cos\theta_{\Xi^0}$$

$$\alpha(\Xi_c^0 \to \Xi^0\pi^0) = -0.90 \pm 0.15(\mathrm{stat}) \pm 0.23(\mathrm{syst})$$



$\alpha(\Xi_c^0 \to \Xi^0\pi^0)$ ★ JHEP 10, 045 (2024) Belle+Belle II

强子化衰变：两体过程

Belle和Belle II实验上进行了系统的测量

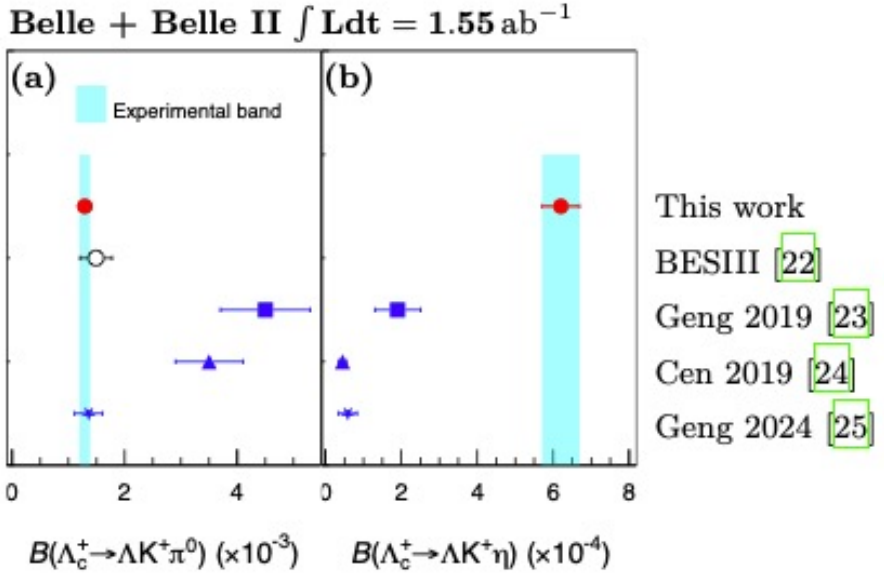
$\Xi_c^0 \to \Xi^- K^+, \Lambda\phi$	PRD 88, 071103(R) (2013)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Xi^0\pi^0, \Xi^0\eta, \Xi^0\eta'$:BR+$\alpha$	★ JHEP 10, 045 (2024)	Belle+ Belle II
$\Omega_c^0 \to \Xi^0\overline{K}^0$+多体	PRD 97, 032001 (2018)	Belle	$\Xi_c^+ \to p K_S^0, \Lambda\pi^+, \Sigma^0\pi^+$	★ JHEP 03, 061 (2025)	Belle+ Belle II
$\Lambda_c^+ \to p\eta, p\pi^0$	★ PRD 103, 072004 (2021)	Belle	$\Xi_c^+ \to \Sigma^+ K_S^0, \Xi^0\pi^+, \Xi^0 K^+$	★ JHEP 08, 195 (2025)	Belle+ Belle II
$\Xi_c^0 \to \Xi^0\phi$	PRD 103, 112002 (2021)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Lambda\pi^0, \Lambda\eta, \Lambda\eta'$	★ PRD 113, 032015 (2026)	Belle+ Belle II
$\Xi_c^0 \to \Lambda\overline{K}^{*0}, \Sigma^0\overline{K}^{*0}, \Sigma^+ K^{*-}$	★ JHEP 06, 160 (2021)	Belle	$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+ K_S^0$:BR+$\alpha$	在研	Belle+ Belle II
$\Lambda_c^+ \to p\omega$	★ PRD 104, 072008 (2021)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Xi^-\pi^+, \Lambda K_S^0, \Sigma^+ K^-$: α	★在研	Belle+ Belle II
$\Xi_c^0 \to \Lambda K_S^0, \Sigma^0 K_S^0, \Sigma^+ K^-$:BR+$\alpha$	★ PRD 105, L011102 (2022)	Belle	$\Lambda_c^+ \to \Xi^0 K^+$: BR+$\alpha$	★在研	Belle
$\Lambda_c^+ \to p\eta'$	★ JHEP 03, 090 (2022)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Omega^- K^+$: BR+α	★在研	Belle+ Belle II
$\Omega_c^0 \to \Xi^-\pi^+, \Xi^- K^+, \Omega^- K^+$	★ JHEP 01, 055 (2023)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Xi(1530)\pi$	★CWR	Belle+ Belle II
$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+\pi^0, \Sigma^+\eta, \Sigma^+\eta'$:BR+$\alpha$	★ PRD 107, 032003 (2023)	Belle	$\Xi_c^0 \to \Lambda K_S^0, \Sigma^+ K^-, \Xi^- K^+$: BR+$\alpha$	★在研	Belle II
$\Lambda_c^+ \to \Lambda\pi^+, \Lambda K^+, \Sigma^0\pi^+, \Sigma^0 K^+$ BR+α+CPV	★ Sci. Bull. 68, 583 (2023)	Belle	$\Xi_c^0 \to p\pi^-, \Sigma^+\pi^-, pK^-$	在研	Belle II

强子化衰变：三体过程

未态结构复杂：理论计算困难
实验研究目前较少

$\Lambda_c^+ \to \Lambda\, K^+\pi^0, \Lambda\, K^+\eta$

★ arXiv:2610.31377　Belle+Belle II



$$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \to \Lambda K^+\pi^0) = (1.29\pm0.05\pm0.05\pm0.06)\times10^{-3}$$

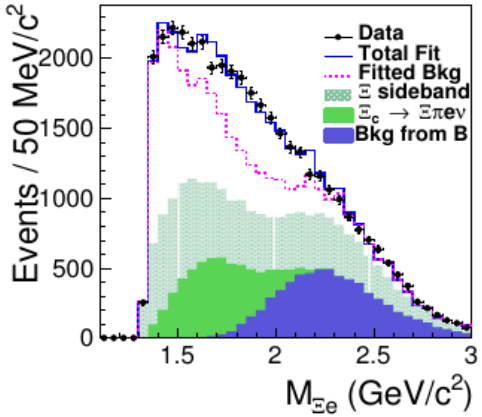
$$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \to \Lambda K^+\eta) = (6.20\pm0.25\pm0.31\pm0.30)\times10^{-4},$$

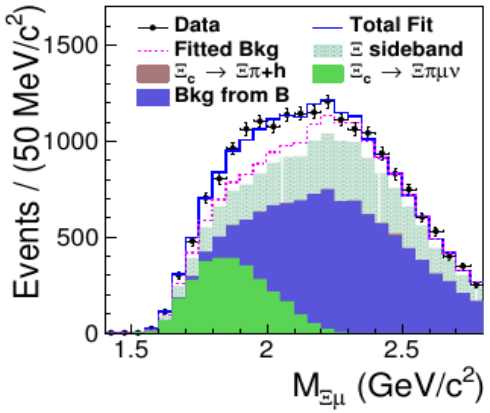
$\Lambda_c^+ \to pK^+\pi^-$	PRL 117, 011801 (2016)	Belle
Ω_c^0 多体	PRD 97, 032001 (2018)	Belle
$\Lambda_c^+ \to \eta\Lambda\pi^+, \eta\Sigma^0\pi^+$	PRD 103, 052005 (2021)	Belle
$\Lambda_c^+ \to pK_S^0K_S^0, pK_S^0\eta$	★ PRD 107, 032004(2023)	Belle
$\Lambda_c \to \Lambda K_S^0h^+, \Lambda K^+\pi^+\pi^-$	★在研	Belle+ Belle II
$\Xi_c^+ \to \Lambda K_S^0\pi^+, pK_S^0K_S^0$	★在研	Belle+ Belle II
$\Xi_c^0 \to \Xi^-\mathrm{h}^+\mathrm{h}^0$	★在研	Belle II
$\Xi_c^0 \to pK_S^0K^-$ 等	★在研	Belle II
$\Xi_c^{+,0} \to \Xi\pi\, K_S^0$ 等	★在研	Belle II
$\Lambda_c^+ \to \Xi^0K_S^0\pi^+$ 等	★在研	Belle II
$\Xi_c^+ \to \Omega^-K^+\pi^+$ 等	★在研	Belle II
$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+K_S^0K_S^0$ 等	★在研	Belle II

其他衰变

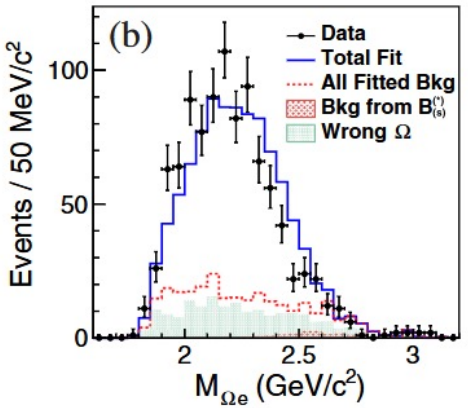
半轻衰变　　分离轻子流与强子流，检验轻子味普适性。

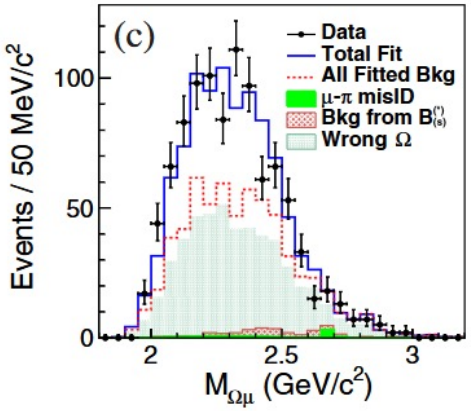
$\Xi_c^0 \to \Xi^- \ell^+ \nu_\ell$　★ PRL 127, 121803 (2021)　Belle





$\Omega_c^0 \to \Omega^- \ell^+ \nu_\ell$　★ PRD 105, L091101 (2022)　Belle





辐射衰变　$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+ \gamma, \Xi_c^0 \to \Xi^0 \gamma$　★ PRD 107, 032001 (2023)　Belle

稀有衰变　$\Xi_c^0 \to \Xi^0 \ell^+ \ell^-$　★ PRD 109, 052003 (2024)　Belle

重味守恒　$\Xi_c^0(csd) \to \Lambda_c^+(cud)\pi^-$　★ PRD 107, 032005 (2023)　Belle

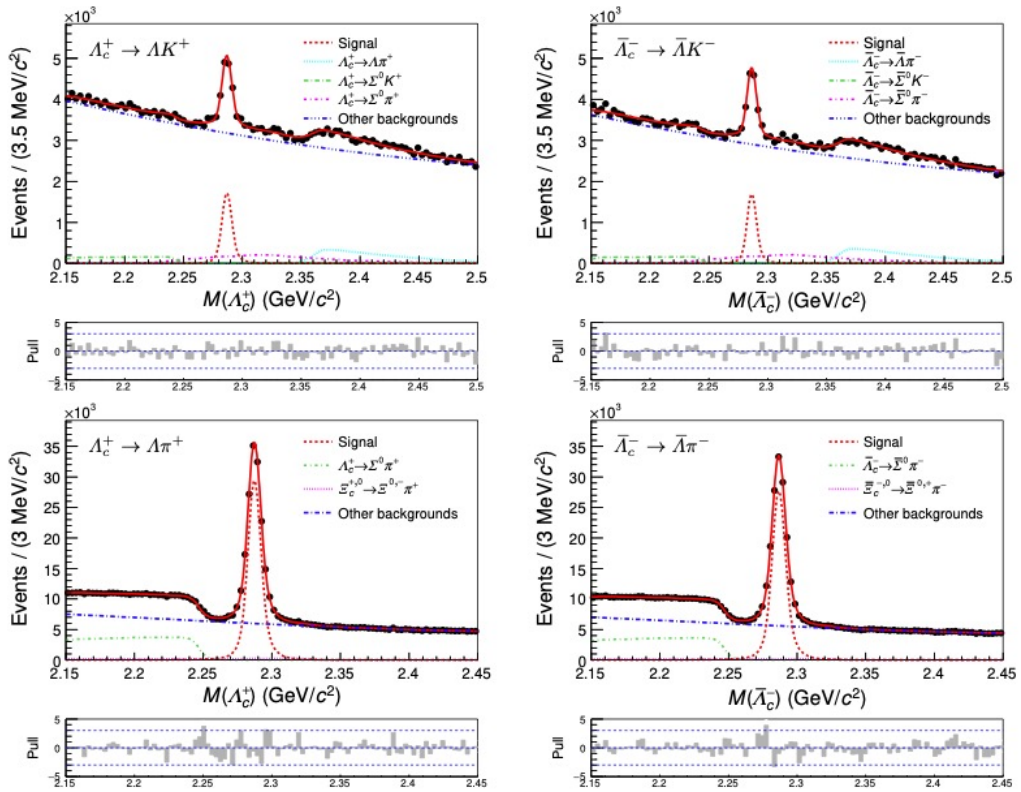
$\Xi_c^+ \to \Lambda_c^+ \pi^0$　在研　Belle II

CPV 检验

$\Lambda_c^+ \to \Lambda\pi^+, \Lambda K^+, \Sigma^0\pi^+, \Sigma^0 K^+$

★ Sci. Bull. 68, 583–592 (2023) Belle

直接 CP 不对称：$A_{CP} = \frac{\Gamma(X_c \to f) - \Gamma(\overline{X}_c \to \overline{f})}{\Gamma(X_c \to f) + \Gamma(\overline{X}_c \to \overline{f})}$



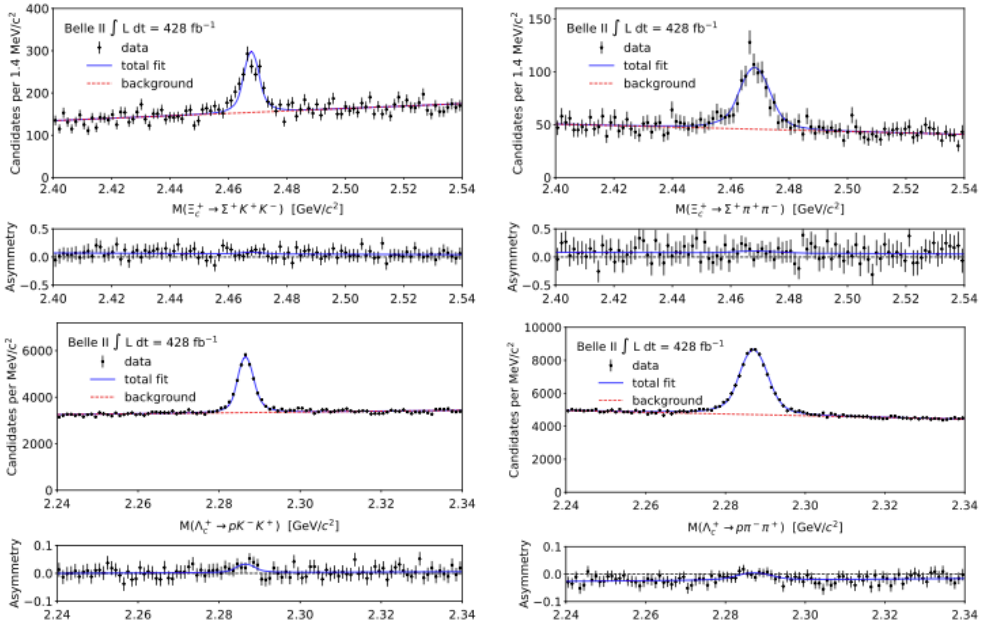
$\Xi_c^+ \to \Sigma^+ K^+ K^-, \Sigma^+ \pi^+ \pi^-$; $\Lambda_c^+ \to pK^+K^-, p\pi^+\pi^-$

PRD 113, 032017 (2026) Belle II

$$A'_N = \frac{A_N(\cos\theta > 0) + A_N(\cos\theta < 0)}{2}$$

$$A_{CP}(\Xi_c^+ \to \Sigma^+ h^+ h^-) = A'_N(\Xi_c^+ \to \Sigma^+ h^+ h^-) - A'_N(\Lambda_c^+ \to \Sigma^+ h^+ h^-),$$

$$A_{CP}(\Lambda_c^+ \to p h^+ h^-) = A'_N(\Lambda_c^+ \to p h^+ h^-) - A'_N(\Lambda_c^+ \to p\pi^+ K^-) + A'_N(D^0 \to \pi^+ K^- \pi^+ \pi^-).$$

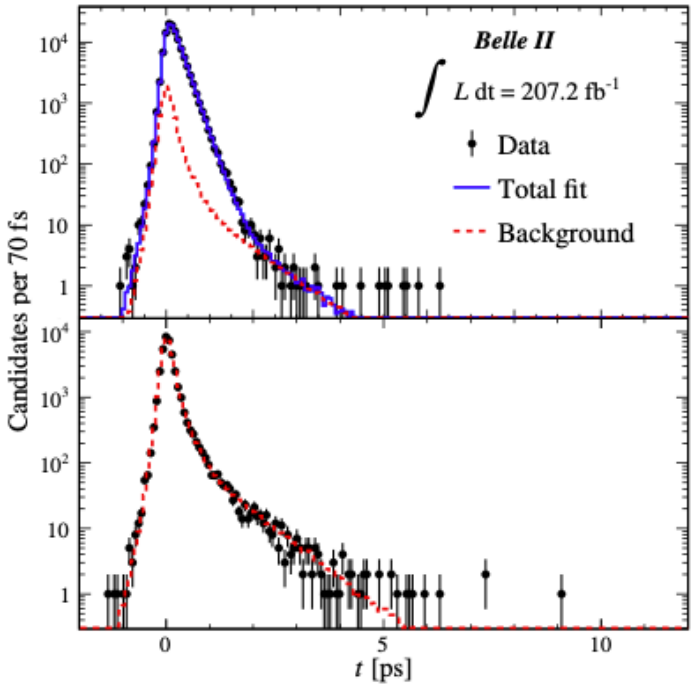


寿命

粲重子寿命排序问题

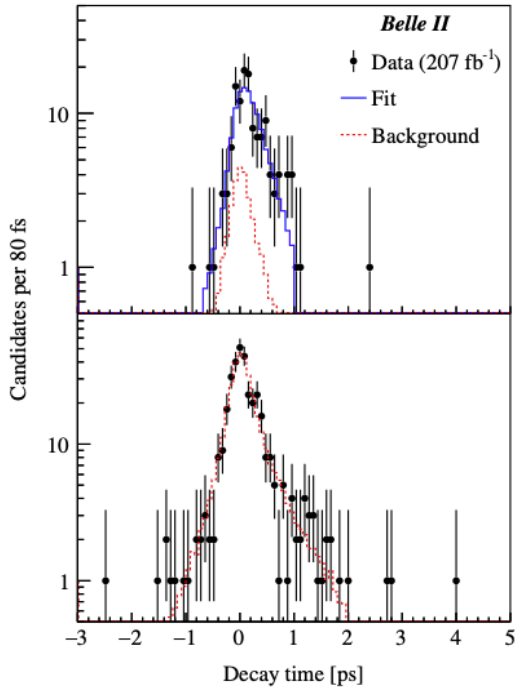
$\tau(\Lambda_c^+) = (203.20 \pm 0.89 \pm 0.77)$ fs

PRL 130, 071802 (2023) Belle II



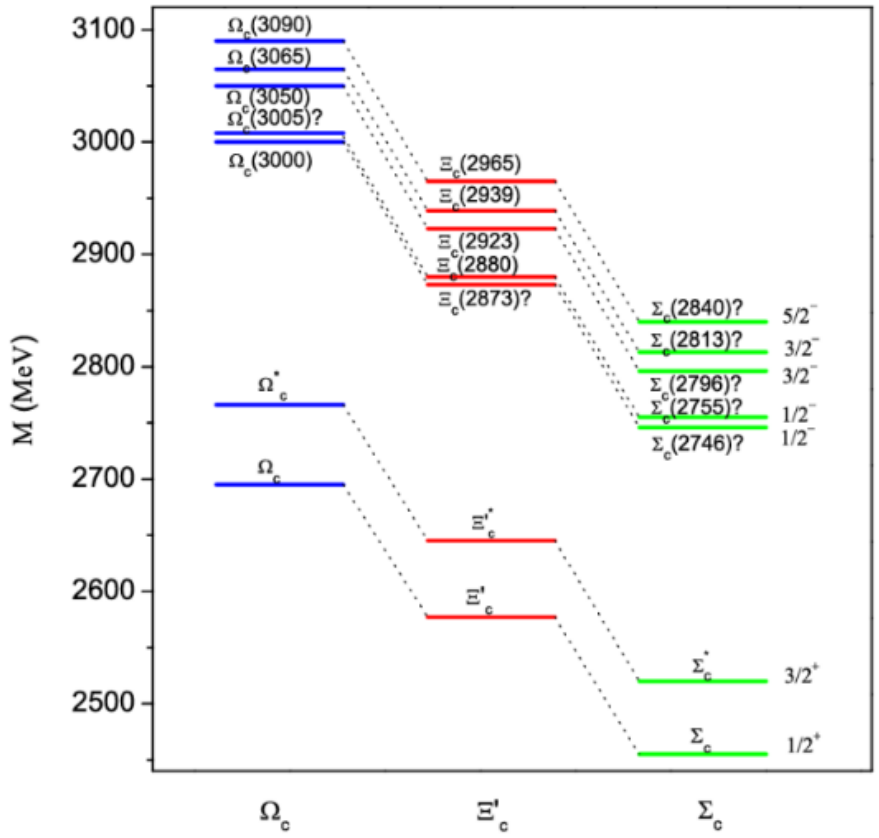
$\tau(\Omega_c^0) = (243 \pm 48 \pm 11)$ fs

PRD 107, L031103 (2023) Belle II



Ξ_c 寿命与分支比 在研 Belle II

粲重子谱



丰富的激发态结构

检验理论模型、理解动力学机制
高激发态的性质仍有疑惑
更多的Σ_c激发态?

内部激发

λ 模：粲夸克相对两个轻夸克系统的激发。
ρ 模：两个轻夸克系统的内部激发。

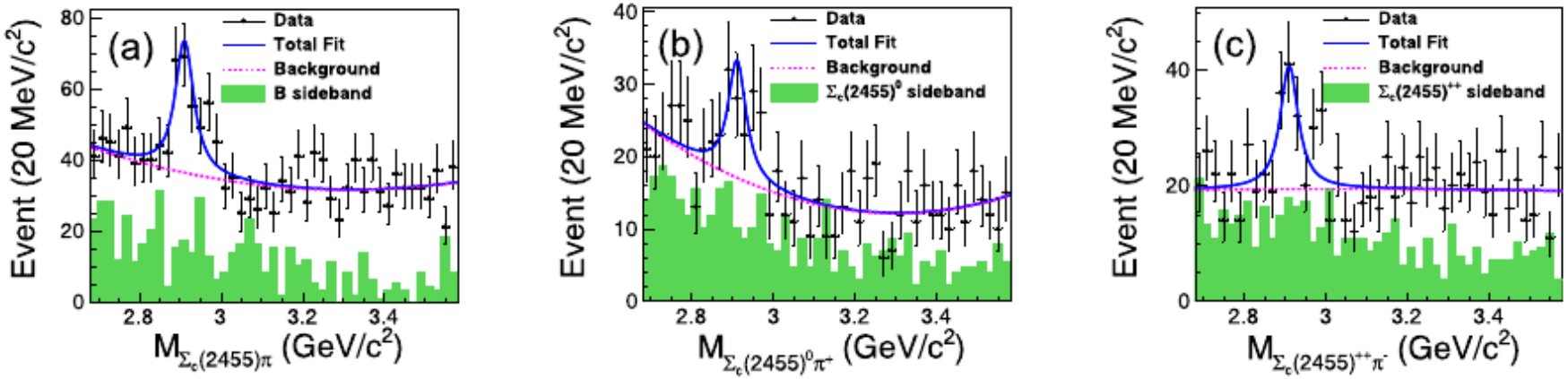
实验研究

新激发态寻找：填补谱学空缺
质量宽度测量：确定谱学位置
量子数、衰变性质测量：揭示内部结构

粲重子谱

在不变质量谱中寻找结构，检验显著性并测量质量与宽度。

$\Lambda_c(2910)^+ \to \Sigma_c(2455)\pi$：新结构的证据　★ PRL 130, 031901 (2023)　Belle

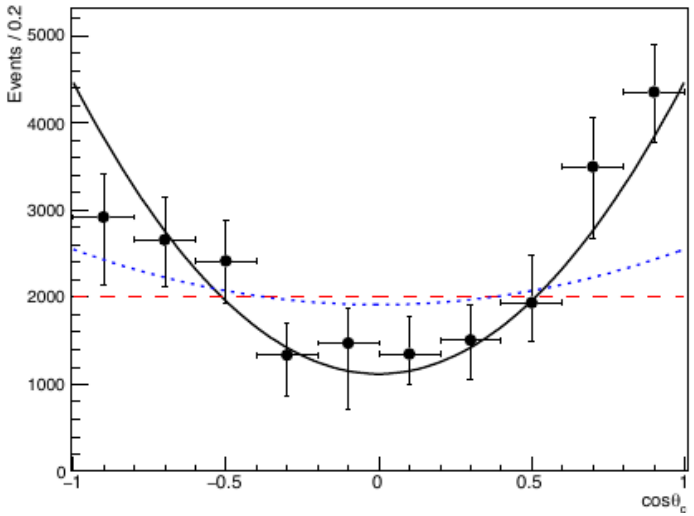


寻找 Ξ_{cc}，观测 $\Xi_c(3055)^+$	PRD 89, 052003 (2014)	Belle
$\Sigma_c(2455)^{0,++}$、$\Sigma_c(2520)^{0,++}$ 质量宽度	PRD 89, 091102(R) (2014)	Belle
系统测 Ξ_c 激发态的质量、宽度与跃迁	PRD 94, 052011 (2016)	Belle
在 $\Xi_c^+ K^-$ 谱中确认四个窄 Ω_c 态	PRD 97, 051102 (2018)	Belle
发现 $\Xi_c(2930)^0$	★ EPJC 78, 252 (2018)	Belle
$\Xi_c(2930)^+$ 的证据	★ EPJC 78, 928 (2018)	Belle
$\Sigma_c(2455)^+$、$\Sigma_c(2520)^+$ 质量宽度	PRD 104, 052003 (2021)	Belle
$\Lambda_c(2765)^+$	在研	Belle
$\Lambda_c(2595)^+$	在研	Belle+ Belle II

粲重子谱

量子数、衰变性质测量

自旋宇称分析：$\Xi_c(2970)^+$ PRD 103, L111101 (2021) Belle



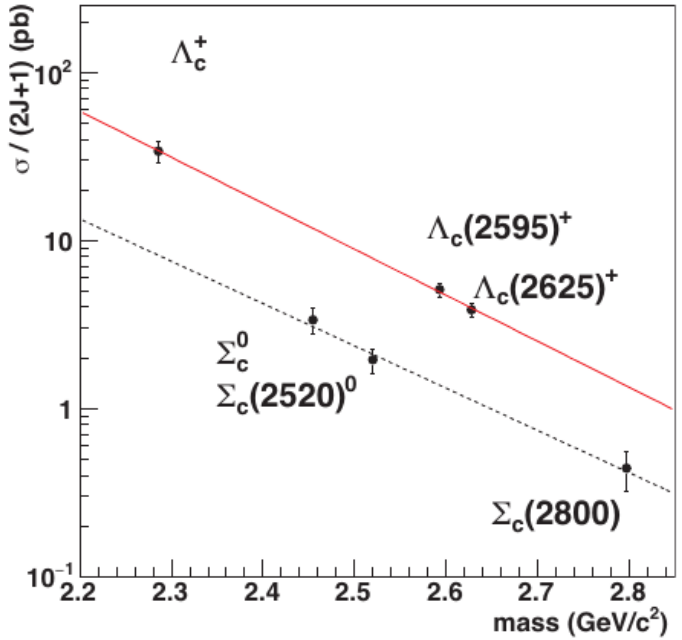
级联角分布 + 相对衰变率

$\Xi_c(2970)^+ \to \Xi_c(2645)^0\pi^+ \to \Xi_c^+\pi^-\pi^+$

实验支持：$J^P(\Xi_c(2970)^+) = 1/2^+$

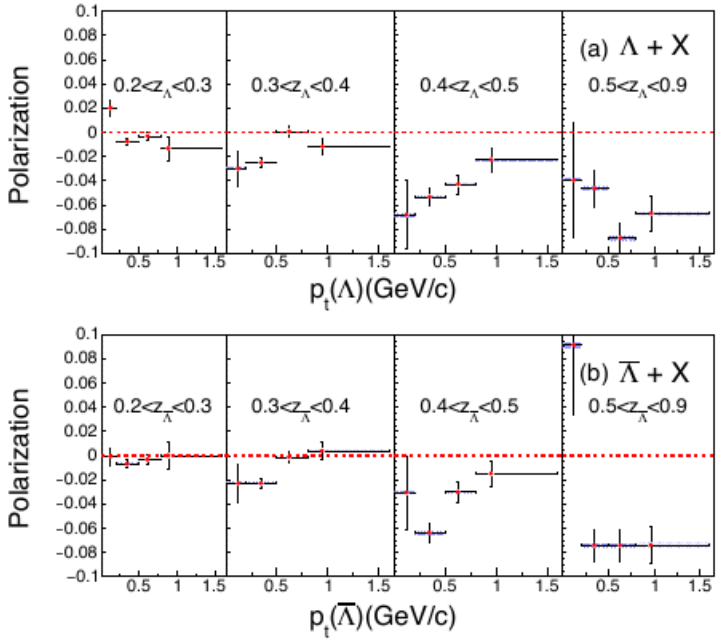
$\Xi_c(2790), \Xi_c(2815)$ 辐射衰变	PRD 102, 071103(R) (2020)	Belle
$\Lambda_c(2625)^+ \to \Sigma_c\pi$ 分支比	PRD 107, 032008 (2023)	Belle
$\Lambda_c(2880)^+, \Lambda_c(2940)^+ \to \Lambda_c\eta, pD^0$ 分支比	★ PRD 110, 032021 (2024)	Belle
$\Omega_c^0(2770)$ 和 $\Omega_c^*(1P) \to \gamma\Omega_c^0$	在研	Belle+Belle II

产生与极化



粲重子直接产生截面 $\sigma_{\mathrm{direct}}/(2J+1)$

粲强子碎裂	PRD 73, 032002 (2006)	Belle
$\sigma(e^+e^- \to \Lambda_c^+\overline{\Lambda}_c^-)$	PRL 101, 172001 (2008)	Belle
超子/粲重子直接产生截面	PRD 97, 072005 (2018)	Belle
$\Lambda/\overline{\Lambda}$ 横向极化	PRL 122, 042001 (2019)	Belle
$B^- \to \Xi_c^0\overline{\Lambda}_c^-$ 分支比	PRL 133, 071802 (2024)	Belle



轻味 Λ 横向极化

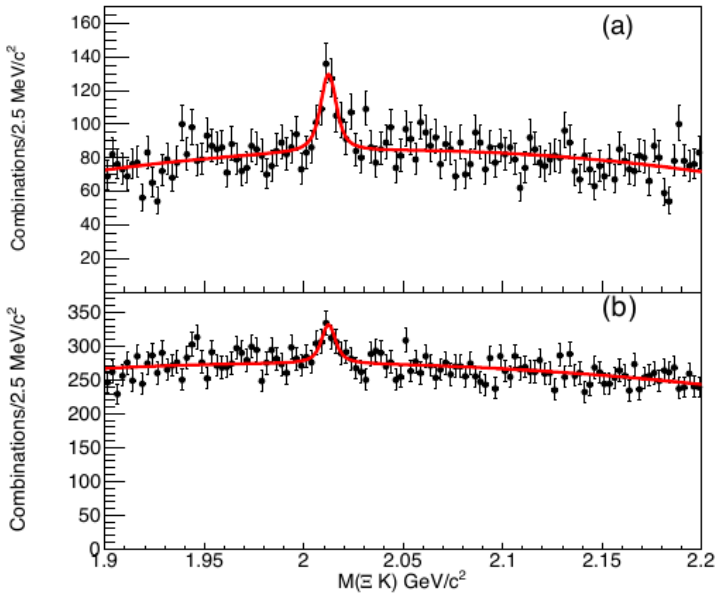
寻找 $B \to \overline{\Sigma}_c\Xi_c$	★ PRD 112, L051101 (2025)	Belle+ Belle II
$B \to \Sigma_c\overline{\Xi}_c'$ 分支比	★ arXiv:2606.12905 (2026)	Belle+ Belle II
Λ_c 产生极化	在研	Belle II
$\Lambda_c^+ \to pK^-\pi^+$PWA+极化	在研	Belle II

超子谱

$\Omega(2012)$ 的研究

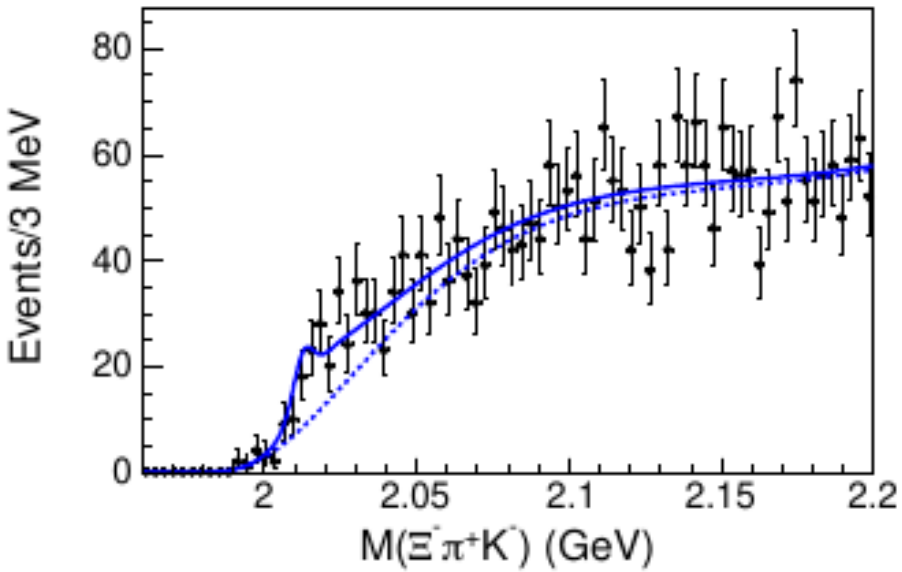
发现：$\Omega(2012) \to \Xi\overline{K}$

PRL 121, 052003 (2018) Belle



三体级联：$\Xi(1530)\overline{K} \to \Xi\pi\overline{K}$

★ PLB 860, 139224 (2025) Belle

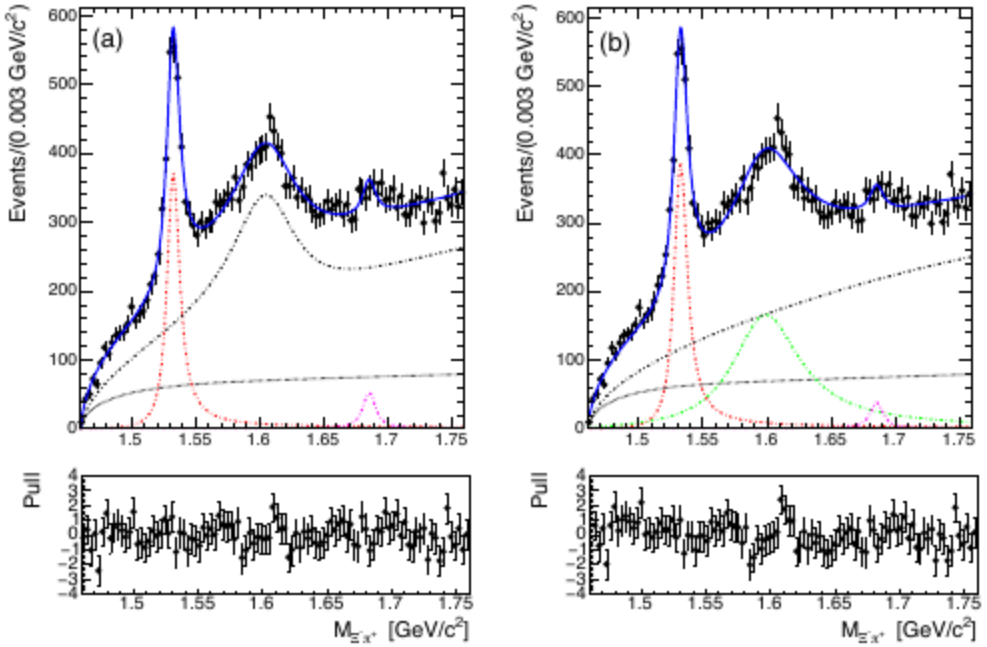


在 $\Omega_c^0 \to \pi^+\Xi\overline{K}$ 中观测 $\Omega(2012)^-$	★ PRD 104, 052005 (2021)	Belle
寻找 $\Omega(2012)$ 的辐射衰变	★在研	Belle+Belle II

超子谱

在粲重子多体衰变中寻找超子、研究共振性质

$\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+$： $\Xi\pi$质量谱　PRL 122, 072501 (2019)　Belle

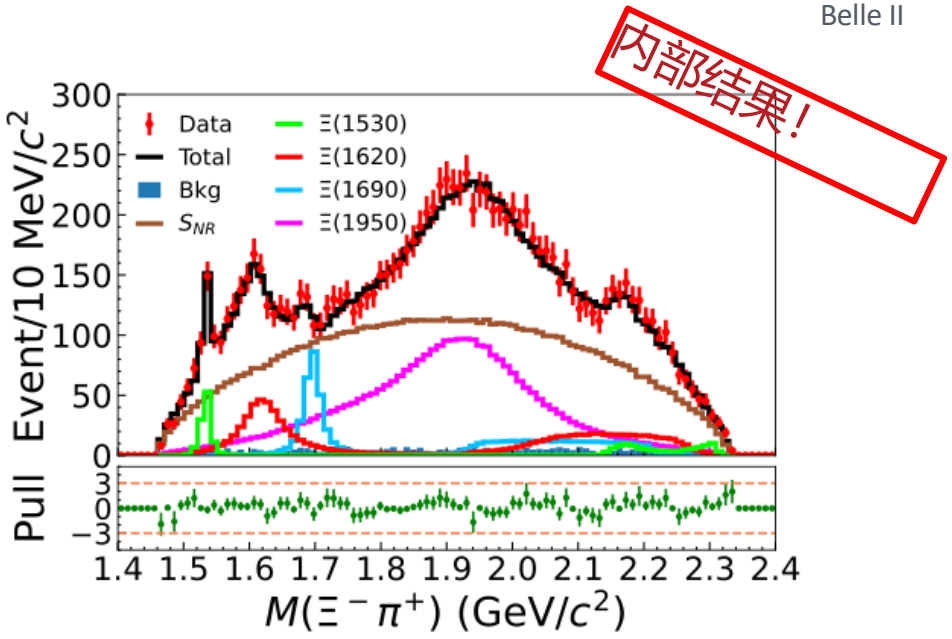


$\Lambda_c^+ \to \Lambda\pi\pi\pi$: NK阈值结构　PRL 130, 151903 (2023)　Belle

$\Lambda_c^+ \to \mathrm{pK}^-\pi^+$: $\Lambda\eta$ 阈值结构　PRD 108, L031104 (2023)　Belle

通过分波分析(PWA)提取共振组成、量子数及振幅

PWA： $\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+$　★已开盒　Belle+ Belle II



PWA: $\Xi_c^0 \to \Lambda K^-\pi^+$	在研	Belle II
PWA: $\Lambda_c^+ \to \Lambda\pi^+\pi^0$	在研	Belle II
PWA: $\Lambda_c^+ \to \Sigma^+\pi^+\pi^-$	在研	Belle+Belle II
PWA: $\Lambda_c^+ \to \Sigma^+K^+\pi^-$	在研	Belle II
PWA: $\Lambda_c^+ \to \Lambda\pi^+\eta$	★在研	Belle II

三、实例：$\Xi_c^+ \to \Sigma^0 \pi^+ K_S^0$

选题

测量方法

事例选择

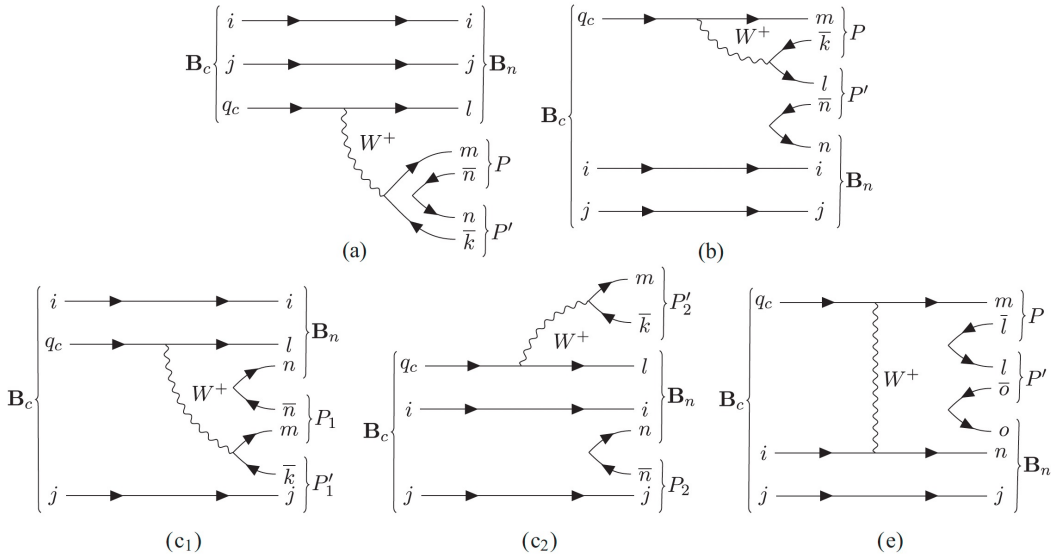
练习

选题

$SU(3)_F$ 味对称性模型

衰变振幅：

$$\mathcal{M}(\mathbf{B}_c \to \mathbf{B}_n PP') = \langle P'P\mathbf{B}_n|\mathcal{H}_{\rm eff}|\mathbf{B}_c\rangle = i\bar{u}_{\mathbf{B}_n}(A - B\gamma_5)u_{\mathbf{B}_c},$$



PRD 109, 093002 (2024)

将衰变分解成不同拓扑图组合

$$\begin{aligned}A(\mathbf{B}_c \to \mathbf{B}_n PP') &= a_1(\bar{\mathbf{B}}_n)_i^k(\bar{P})_l^m(\bar{P})_m^l H(\bar{\mathbf{6}})_{jk}T^{ij} + a_2(\bar{\mathbf{B}}_n)_i^k(\bar{P})_j^m(\bar{P})_m^l H(\bar{\mathbf{6}})_{kl}T^{ij} + a_3(\bar{\mathbf{B}}_n)_i^k(\bar{P})_k^m(\bar{P})_m^l H(\bar{\mathbf{6}})_{jl}T^{ij}\\ &+ a_4(\bar{\mathbf{B}}_n)_i^k(\bar{P})_j^l(\bar{P})_k^m H(\bar{\mathbf{6}})_{lm}T^{ij} + a_5(\bar{\mathbf{B}}_n)_k^l(\bar{P})_j^m(\bar{P})_m^k H(\bar{\mathbf{6}})_{il}T^{ij} + a_6(\bar{\mathbf{B}}_n)_k^l(\bar{P})_j^m(\bar{P})_l^k H(\bar{\mathbf{6}})_{im}T^{ij}\\ &+ a_7(\bar{\mathbf{B}}_n)_{ijl}(\bar{P})_m^n(\bar{P})_n^k H(\mathbf{15})_k^{lm}T^{ij} + a_8(\bar{\mathbf{B}}_n)_{ijn}(\bar{P})_m^k(\bar{P})_l^n H(\mathbf{15})_k^{lm}T^{ij}\\ &+ a_9(\bar{\mathbf{B}}_n)_{iln}(\bar{P})_j^k(\bar{P})_m^n H(\mathbf{15})_k^{lm}T^{ij} + a_{10}(\bar{\mathbf{B}}_n)_{iln}(\bar{P})_m^k(\bar{P})_j^n H(\mathbf{15})_k^{lm}T^{ij}\end{aligned}$$

$$B(\mathbf{B_c} \to \mathbf{B}_n PP') = A(\mathbf{B_c} \to \mathbf{B}_n PP')\{a_i \to b_i\}$$

根据实验测量拟合参数，给出预言

TABLE XI. A-amplitudes of $\Lambda_c^+ \to \mathbf{B}_n PP'$.

CF mode	Ac_c^{-2}	CF mode	Ac_c^{-2}
$\Lambda^0\pi^+\eta^0$	$-\frac{2}{3}(a_2 - a_3 + a_5 + 3a_6 - a_7 + a_8)$	$p\pi^0\bar{K}^0$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}(2a_3 + 2a_4 - a_7 + a_8)$
$\Lambda^0K^+\bar{K}^0$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}(a_2 - a_3 + a_5 - a_7 - a_8)$	$p\bar{K}^0\eta^0$	$\frac{1}{\sqrt{6}}(-2a_3 + 2a_4 + a_7 - a_8)$
$\Sigma^0\pi^+\pi^0$	$-2a_4 - 2a_6$	$p\pi^+K^-$	$2a_3 - 2a_6 - a_7 - a_8$
$\Sigma^0\pi^+\eta^0$	$\frac{2}{\sqrt{3}}(a_2 + a_3 + a_4 + a_5)$	$n\pi^+\bar{K}^0$	$-2a_4 - 2a_6 - 2a_8$
$\Sigma^0K^+\bar{K}^0$	$\sqrt{2}(a_2 + a_3 + a_5)$	$\Sigma^+\pi^0\pi^0$	$4a_1 + 2a_2 + 2a_3 + 2a_4 - 2a_5$
$\Sigma^-\pi^+\pi^+$	$-4a_4 - 4a_6$	$\Sigma^+\pi^0\eta^0$	$-\frac{2}{\sqrt{3}}(a_2 + a_3 + a_4 + a_5)$
$\Xi^-\pi^+K^+$	$-2a_6$	$\Sigma^+\eta^0\eta^0$	$\frac{2}{3}(6a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - a_5)$
$\Xi^0\pi^0K^+$	$-\sqrt{2}a_5$	$\Sigma^+\pi^+\pi^-$	$4a_1 + 2a_2 + 2a_3 - 2a_5 - 2a_6$
$\Xi^0K^+\eta^0$	$\sqrt{\frac{2}{3}}a_5$	$\Sigma^+K^+K^-$	$4a_1 - 2a_5$
$\Xi^0\pi^+K^0$	$-2a_5 - 2a_6$	$\Sigma^+K^0\bar{K}^0$	$4a_1 + 2a_2 + 2a_3$

选题

本例选择 $\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0$过程（CF），物理目标是测量分支比。

理论文章	预言的分支比
PRD 99, 073003 (2019)	$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+\overline{K}^0) = (12 \pm 3)\times10^{-3}$
EPJC 79, 946 (2019)	$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0) = (3.60 \pm 0.90)\times10^{-3}$
PRD 109, 093002 (2024)	$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0) = (33.3 \pm 5.5)\times10^{-3}$

理论预言差异明显，需要实验测量验证

测量方法

上节回顾：绝对分支比测量

Part 2 · 方法：inclusive 与 exclusive

$$\mathcal{B}(X \to f) = \frac{N(X \to f)}{N_X^{\text{prod}}\,\varepsilon}$$

P05

核心思想：用 tag 后的产额度代替产额

① 直接法：需要知道产生数

- Belle II中，绝大部分情况下，N_X^{prod} 是无法直接得知的



② 换一个分母： tag X外的其他粒子

- ✓ 重建目标粒子X外的其他所有粒子 （通过反冲质量谱提取$N(X \to \text{anything, tagged})$）
- ✓ 不需要任何理论截面或碎裂函数 （模型无关）

$$\mathcal{B}(X \to f) = \frac{N(X \to f, \text{tagged})\varepsilon^{\text{anything}}}{N(X \to \text{anything, tagged})\varepsilon^{\text{f}}}$$



分子分母同源：同一批数据、同一套事例选择框架 → 大量系统误差在比值中抵消

测量方法

本节做法：相对分支比测量

$$\mathcal{B}(X \to f) = \frac{N(X \to f)}{N_X^{\text{prod}}\,\varepsilon}$$

信号道 $\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0(sig)$

$$\mathcal{B}\left(\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0\right) = \frac{N(\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0)}{N_{\Xi_c}^{prod}\varepsilon_{sig}\mathcal{B}(\Sigma^0)\mathcal{B}(K_S^0)}$$

参考道 $\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+(ref)$

$$\mathcal{B}(\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+) = \frac{N(\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+)}{N_{\Xi_c}^{prod}\varepsilon_{ref}\mathcal{B}(\Xi^-)}$$

ε：重建效率

$\mathcal{B}\left(\Xi^-/\Sigma^0/K_S^0\right)$: 次级粒子重建道分支比

相对分支比： 上下两式相除

$$R = \frac{\mathcal{B}_{\text{sig}}}{\mathcal{B}_{\text{ref}}} = \frac{N_{\text{sig}}/\varepsilon_{\text{sig}}}{N_{\text{ref}}/\varepsilon_{\text{ref}}} \times \frac{\mathcal{B}(\Xi^-)}{\mathcal{B}(\Sigma^0)\mathcal{B}(K_S^0)}$$

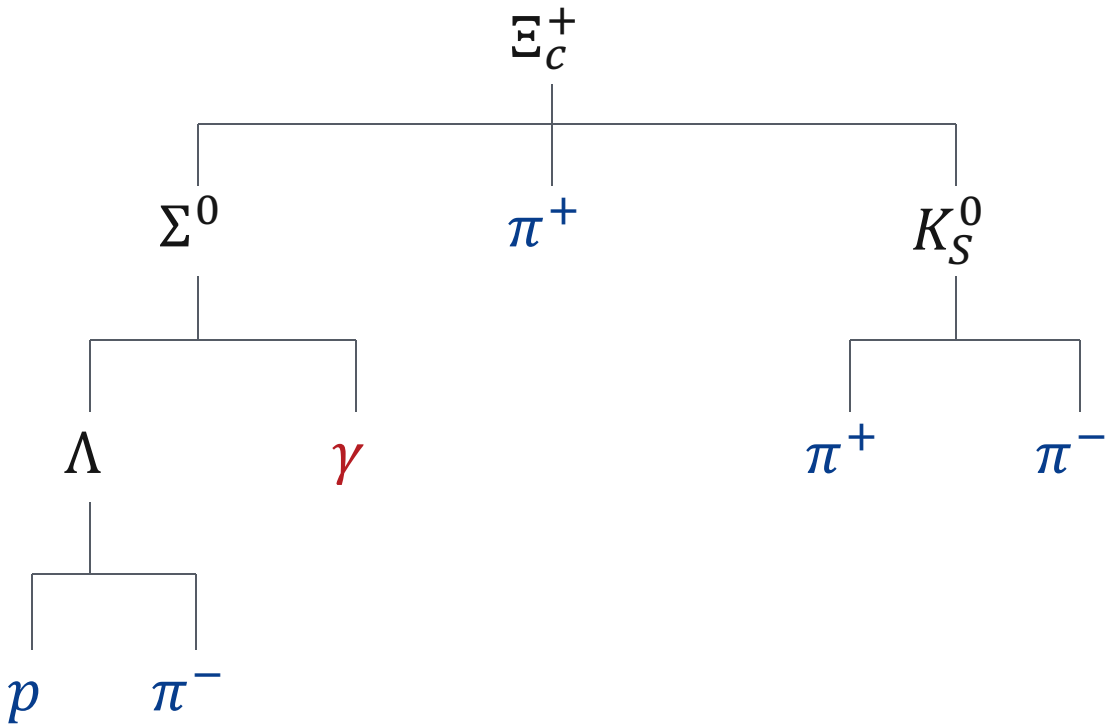
消去共有的未知 Ξ_c^+ 产生数

参考道产额高、已有绝对分支比测量 $\mathcal{B}_{\text{sig}} = R \times \mathcal{B}_{\text{ref}}^{measured}$

大量系统误差在比值中抵消

事例选择

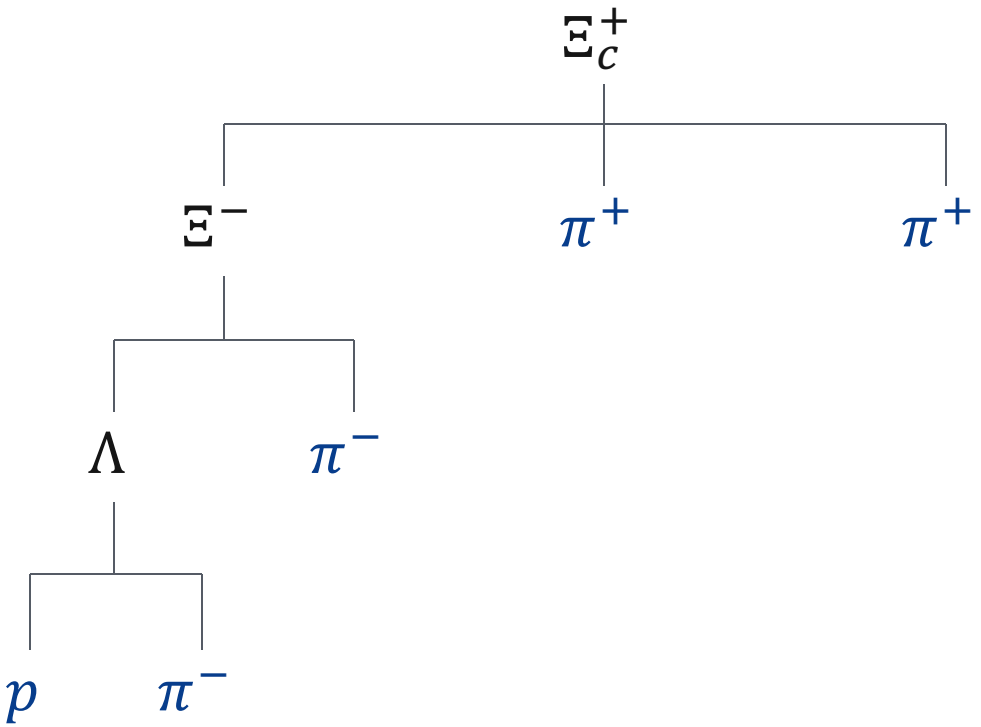
信号道： $\Sigma^0\pi^+K_S^0$



$\mathcal{B}(\Sigma^0)$: $\mathcal{B}(\Sigma^0 \to \Lambda\gamma)\times\mathcal{B}(\Lambda \to p\pi^-)$

$\mathcal{B}(K_S^0)$: $\mathcal{B}(K_S^0 \to \pi^+\pi^-)$

参考道： $\Xi^-\pi^+\pi^+$



$\mathcal{B}(\Xi^-)$: $\mathcal{B}(\Xi^- \to \Lambda\pi^-)\times\mathcal{B}(\Lambda \to p\pi^-)$

$\mathcal{B}(\Lambda \to p\pi^-)$ 在相对测量中可以消去；可以由PDG得到分支比数值

选择程序：目录与文件

KEKCC上工作目录

`/group/belle2/users2022/cuijx/winterschool2026/xicp2sgm0piks/`

gen-signalMC/	产生好的信号 MC样本
ana-xicp2sgm0piks/	信号道选择
ana-xicp2ximpipi/	参考道选择

先复制ana-*目录到个人工作目录，再查看和修改程序。

两个 ana 目录中的主要文件

ana.py	事例选择脚本
head.py / env_settings_*.py	头文件导入、设置输入
makescript.sh/testrun.sh/runjobs.sh	拼接源码/单文件试运行/提交作业
myana-basf2.py/myana-gridMC.py/myana-gridData.py	实际控制脚本
Ana-*.root	生成的root文件
signalMC.datalink	信号MC文件链接

单样本运行

使用参考道作为例子：在配置好 basf2 的终端中，先选一个 signal MC 的 mDST 文件。

```
cd YOUR_WORK/ana-xicp2ximpipi
source /cvmfs/belle.cern.ch/tools/b2setup light-2609-luna
sample_base=/group/belle2/users2022/cuijx/winterschool2026/xicp2sgm0piks
input_mdst="$sample_base/gen-signalMC/merged/2510038481/exp012_4S/mDST_e012_00.root"
sh makescript.sh
basf2 -n 2000 myana-basf2.py mc $input_mdst signal-test.root signal
```

YOUR_WORK 为个人工作目录；input_mdst随便选一个信号MC的mdst文件

命令中的内容	含义
-n 2000	本次只处理 2000 个输入事件，用于单作业试运行
mc / signal	MC 样本；启用信号 MC 的产生级处理
input_mdst / 输出文件	输入 mDST 文件；本次输出的候选 ntuple
myana-basf2.py	makescript.sh 生成的运行入口

检查终端是否正常结束、输出 ROOT 是否生成。
如果修改ana.py后需要重新执行 makescript.sh。

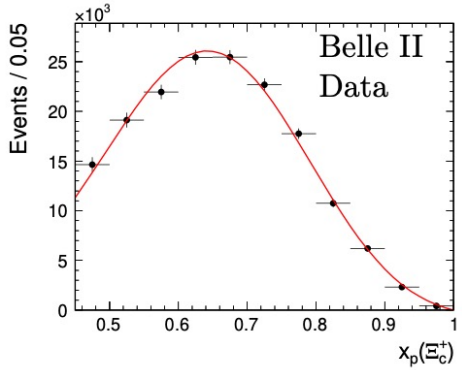
选择程序：产生级匹配

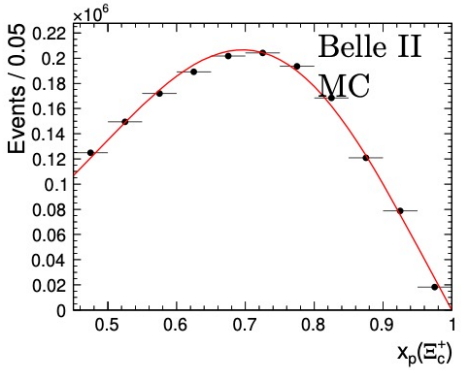
匹配参考道产生链

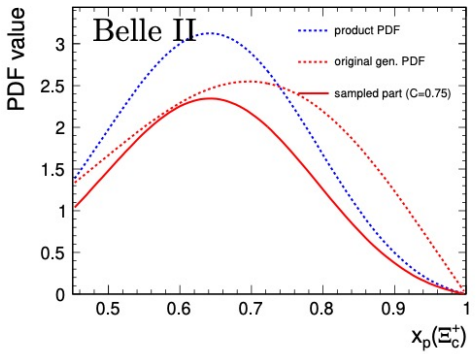
```
ma.findMCDecay('Xi_c+:gen',
  'Xi_c+ -> [Xi- -> [Lambda0 -> p+ pi-] pi-] pi+ pi+', path=main)
```

约化动量：$x_p = \frac{p^*}{\sqrt{s/4-m^2}}$；按 BELLE2-NOTE-TE-2024-013 重抽样。

```
ma.applyCuts("Xi_c+:gen",
  "formula(random*xp*(1-xp)*exp(1.78*(1-xp)-5.98*(1-xp)**2))"
  "<formula(0.1240*xp*(1-xp)*exp(11.99*(1-xp)-18.33*(1-xp)**2))",
  path=main)
ma.applyEventCuts("nParticlesInList(Xi_c+:gen)>0.5", path=main)
```







计算效率时，分母按抽样后保留的计数

输出产生级信息

```
variablesToNtuple('Xi_c+:gen',
  ['mcPDG','M','InvM','xp','eventRandom','EcmsMC'] + three_body_vars,
  filename=outputFile, treename='gen', path=main)
```

选择程序：基本粒子

```
pion_pid = 'PID_pion_k > 0.6'
goodtrack = ('dr < 2 and abs(dz) < 4 '
             'and thetaInCDCAcceptance and pt > 0.1')
stdPi('all', path=main)
cutAndCopyList('pi+:mypi', 'pi+:all',
               pion_pid + ' and ' + goodtrack, path=main)
```

$\Xi_c^+ \to \Xi^- \pi^+ \pi^+$

PID：$\frac{\mathcal{L}(\pi)}{\mathcal{L}(\pi)+\mathcal{L}(K)} > 0.6$

径迹：$d_r < 2\,\mathrm{cm}$，$|d_z| < 4\,\mathrm{cm}$

横动量：$p_T > 0.1\,\mathrm{GeV}/c$

并要求在 CDC 接受度内。

```
stdLambdas(path=main)
LambdaSelector.LambdaSelector(
  particleListName='Lambda0:merged', output_label_name='standard',
  extraInfoName_V0Selector='V0_mva', extraInfoName_KsVeto='Ks_mva',
  path=main)
cutAndCopyList('Lambda0:myLambda0', 'Lambda0:standard',
  '[abs(dM)<0.02] and [daughterSumOf(charge)==0]', True, path=main)
```

$\Xi_c^+ \to \Xi^- (\to \Lambda \pi^-) \pi^+ \pi^+$

使用官方标准stdLambdas+ LambdaSelector+宽质量窗

```
stdKshorts(path=main)
ksSelector.ksSelector(
  particleListName="K_S0:merged", output_label_name="standard",
  extraInfoName_V0Selector="V0_mva", extraInfoName_LambdaVeto="Lam_mva",
  identifier_Ks="Ks_LGBM_V0Selector",
  identifier_vLambda="Ks_LGBM_LambdaVeto", path=main)
ksSelector_vars = ["extraInfo(V0_mva)", "extraInfo(Lam_mva)"]
cutAndCopyList("K_S0:myKshort", "K_S0:standard",
  "[abs(dM)<0.02] and [daughterSumOf(charge)==0]", True, path=main)
```

$\Xi_c^+ \to \Sigma^0 \pi^+ K_S^0$

使用官方标准stdKshorts+ KsSelector+ 宽质量窗

选择程序：中间态粒子

```
reconstructDecay('Xi-:reco -> Lambda0:myLambda0 pi-:all',
                 '1.295 < M < 1.35', path=main)
cutAndCopyList('Xi-:myXim', 'Xi-:reco',
               'daughter(1,pt)>0.1', True, path=main)
treeFit('Xi-:myXim', conf_level=0.0,
        updateAllDaughters=False, ipConstraint=False, path=main)
v.variables.addAlias('distSign',
'formula(flightDistance/flightDistanceErr)')
applyCuts('Xi-:myXim', 'distSign > 2', path=main)
```

$\Xi_c^+ \to \Xi^-\pi^+\pi^+$

Λ和π^-组合: $p_t(\pi^-) > 0.1$

宽质量窗

顶点拟合：treeFit

飞行距离显著性$\mathrm{L}/\sigma_L > 2$

```
photonCut = ('E>0.05 and fakePhotonSuppression>0.1 '
             'and beamBackgroundSuppression>0.1')
reconstructDecay(
  'Sigma0:rec -> Lambda0:myLambda0 gamma:mygamma',
  'abs(dM)<0.1', path=main)
cutAndCopyList('Sigma0:mySigma0', 'Sigma0:rec',
               'daughter(1,E)>0.1', path=main)
```

$\Xi_c^+ \to \Sigma^0\pi^+K_S^0$

先选择一个光子：$E_\gamma > 50$ MeV, MVA_score>0.1

Λ和γ组合

宽质量窗

进一步选择$\mathrm{E}_\gamma > 100$ MeV

选择程序：本底排除

信号光子：$\Xi_c^+ \to \Sigma^0(\to \Lambda\gamma)\pi^+ K_S^0$

组合本底光子γ_{ROE}: Rest-of-event

筛选$|M(\gamma_{sig}\gamma_{ROE}) - m(\pi^0)|$ 最小的组合

ROE 与光子列表

```
ma.buildRestOfEvent('Sigma0:mySigma0', path=main)
ROEpi0Cut = '0.08 < InvM < 0.18'
roePath1 = b2.create_path()
deadEndPath1 = b2.create_path()
ma.signalSideParticleFilter(
  'Sigma0:rec', selection='', roe_path=roePath1,
  deadEndPath=deadEndPath1)
stdPhotons(listtype='cdc',
  beamBackgroundMVAWeight=photonMVAWeight,
  fakePhotonMVAWeight=photonMVAWeight,
  biasCorrectionTable=photonCorrectionTable,
  path=roePath1)
cutAndCopyList('gamma:ROEpi0_1', 'gamma:cdc',
  'isInRestOfEvent == 1 and ' + photonCut,
  path=roePath1)
```

组合、排序与变量输出

```
ma.fillSignalSideParticleList(
  outputListName="gamma:ROEsig1",
  decayString="Sigma0 -> Lambda0 ^gamma",
  path=roePath1)
ma.reconstructDecay(
  "pi0:ROEveto1 -> gamma:ROEsig1"
  " gamma:ROEpi0_1", cut=ROEpi0Cut, path=roePath1)
ma.rankByLowest("pi0:ROEveto1", "abs(dM)",
  numBest=1, path=roePath1)
ma.variableToSignalSideExtraInfo(
  particleList="pi0:ROEveto1",
  varToExtraInfo={"M": "pi0VetoM"}, path=roePath1)
main.for_each("RestOfEvent", "RestOfEvents",
  path=roePath1)
v.variables.addAlias("pv_M",
  "ifNANgiveX(extraInfo(pi0VetoM), -1)")
```

选择程序：粲重子重建

参考道

```
reconstructDecay('Xi_c+:rec -> Xi-:myXim pi+:mypi pi+:mypi',
  'xp>0.0 and abs(dM)<0.25', dmID=1, path=main)
treeFit('Xi_c+:rec', conf_level=0.0,
  massConstraint=['Xi-','Lambda0'],
  updateAllDaughters=False, ipConstraint=True, path=main)
```

组合 Ξ_c^+ 候选

宽质量窗

衰变链拟合与质量约束

飞行显著性 $L/\sigma_L > 2$

信号道

```
reconstructDecay(
  'Xi_c+:rec -> Sigma0:mySigma0 pi+:mypi K_S0:myKshort',
  'xp>0.0 and abs(dM)<0.25', dmID=1, path=main)
treeFit('Xi_c+:rec', conf_level=0.0,
  massConstraint=['Sigma0','Lambda0','K_S0'],
  updateAllDaughters=False, ipConstraint=True, path=main)
```

```
applyCuts('Xi_c+:rec',
  'distSign > 2 and abs(dM)<0.2', path=main)
```

选择程序：ROOT 文件输出

```
xic_vars = kinematics_vars + fit_vars + vertex_vars + ['xp']
xim_vars = kinematics_vars + fit_vars + vertex_vars
lbd_vars = kinematics_vars + fit_vars + vertex_vars + lambdaSelector_vars

out_vars = (evtLel + xic_vars
  + vu.create_aliases_for_selected(
      xim_vars, 'Xi_c+ -> ^Xi- pi+ pi+')
  + vu.create_aliases_for_selected(
      lbd_vars, 'Xi_c+ -> [Xi- -> ^Lambda0 pi-] pi+ pi+')
  + vu.create_aliases_for_selected(
      trk_vars, 'Xi_c+ -> [Xi- -> [Lambda0 -> ^p+ ^pi-] ^pi-] ^pi+ ^pi+'))

variablesToNtuple('Xi_c+:rec', out_vars,
  filename=outputFile, treename='rec', path=main)
```

重建候选输出到 rec 树，每行对应一个候选。

练习: ROOT输出检查

打开单作业输出，逐项核对变量与候选。

```
root -l signal-test.root
rec->Print();
rec->Show(0);
rec->Draw("M");
```

对照选择程序，确认变量输出及物理意义

选择已输出的变量，画出分布

信号MC

信号与参考道分别处理各自的 信号MC样本，得到两套 gen / rec 树。

每个输入文件对应一个输出文件

```
# 在信号道 / 参考道各自的 ana 目录中运行
# runjobs.sh 中的单行命令
python job_bsub.py myana-basf2.py mc signalMC.datalink MC signal
```

同一道内合并

```
hadd -f Ana-signalMC.root  MC/myana-basf2/signalMC/outdir/myana-*root
```

练习：信号 MC 分布与 cut

任务	操作内容
1 读输出	查看 gen / rec 与 branch，明确母粒子和中间态变量
2 画分布	画 $M(\Xi_c)$、x_p 和光子能量等分布；MC 中区分正确重建与误组合
3 加 cut	以 $x_p > 0.5$ 为例，比较 cut 前后的 Ξ_c^+ 质量谱
4 效率计算	通过全部选择且 isSignal=1 事例数 / 抽样后保留的产生粒子数

通用MC 与数据

signal MC 用于学习信号形状；generic MC 与 data 用于研究本底并提取产额。

已选择的 ROOT 文件

```
Ana-data.root
Ana-genericMC.root
```

练习

画出 generic MC 和 data 的变量分布。

比较信号与本底分布的差异，尝试收紧质量窗。

拟合 $M(\Xi_c^+)$（M），提取 Ξ_c^+ 产额。

Dalitz 分布与效率修正：思考+后期任务

两个独立的变量描述三体相空间

Dalitz 变量：$s_{12} = M^2(1,2)$，$s_{13} = M^2(1,3), s_{23} = M^2(2,3)$

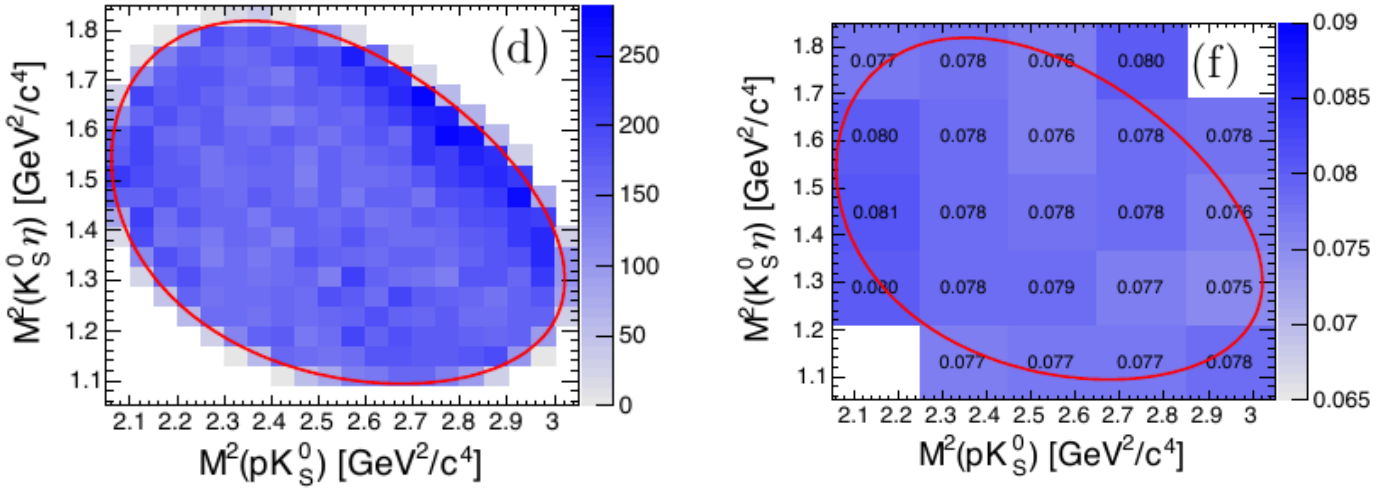
约束关系：$s_{12} + s_{13} + s_{23} = M^2 + m_1^2 + m_2^2 + m_3^2$

信号MC 按均匀相空间产生；数据中Dalitz图中存在结构

信号MC需要通过数据得到真实的分布，再进行修正

图例：$\Lambda_c^+ \to pK_S^0\eta$ 的信号区分布（左）与局部效率（右）

PRD 107, 032004 (2023)



效率修正 $\varepsilon = \dfrac{1}{\sum \dfrac{w_i}{\varepsilon_i}}$

总结

Belle和Belle II实验上的粲重子物理

粲重子样本
物理题目丰富、中国组贡献突出
大量正在进行的分析
未来大统计量下更多的研究

实例：一个三体过程相对分支比测量

谢谢！欢迎讨论