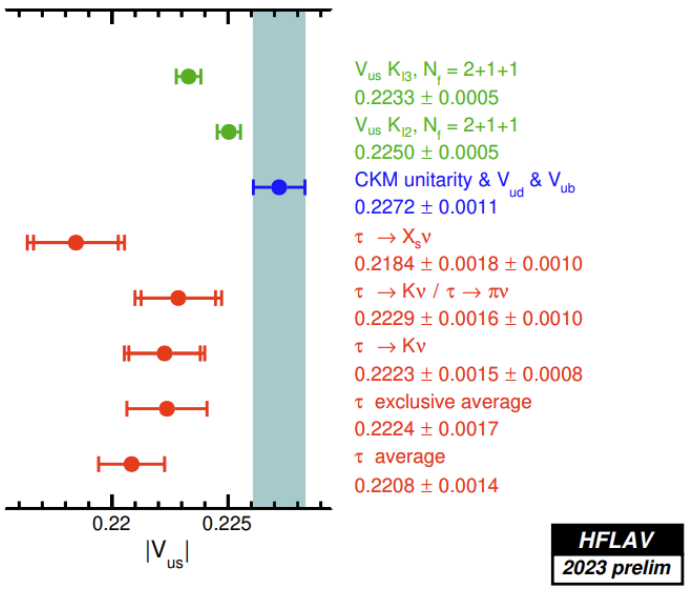
测量 $\tau^- \to K^-\pi^+\pi^-\pi^0\nu_\tau$ 的分支比和谱函数

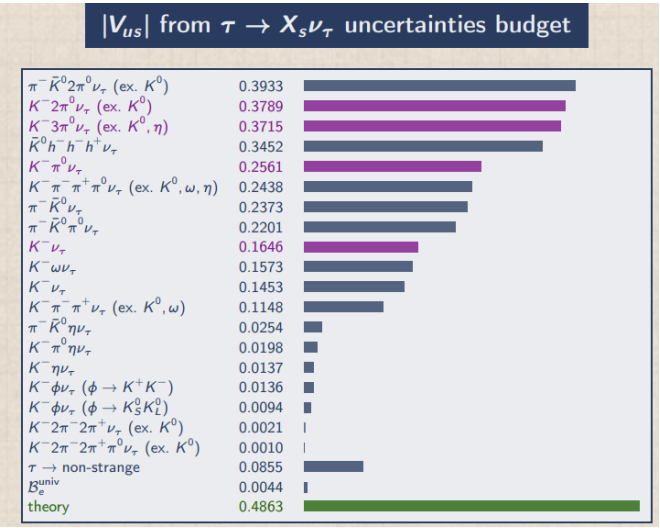
杨安旭　　吉林大学
许念湘　　湖南师范大学
王思宇　　辽宁师范大学
赵翔　　南开大学
郭梓帆　　河南师范大学

Belle2 中国组冬季学校

2026 年 11 月 18 日　南京

研究动机





- 测量 Cabibbo 压低的 τ 衰变过程的分支比和谱函数，对精确测量 $|V_{us}|$ 和奇异夸克质量非常重要

- 由 τ 的单举衰变和 CKM 幺正性得到的 $|V_{us}|$ 存在 3.7σ 差异

研究动机

利用分支比确定 $|V_{us}|$

$$|V_{us}| = \sqrt{\frac{\mathcal{B}_s}{\mathcal{B}_{\text{non-s}}/|V_{ud}|^2 - \mathcal{B}_e\,\delta R_{\tau,\text{th}}(m_s)}}$$

$\mathcal{B}_s$：τ 衰变至奇异强子末态的总分支比

$\mathcal{B}_{\text{non-s}}$：$\tau$ 衰变至非奇异强子末态的总分支比

$\mathcal{B}_e = \mathcal{B}(\tau^- \to e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$

- $K\pi\pi\pi^0\nu_\tau$ 是 $\mathcal{B}_s$ 的组成部分
- 结合谱函数，可以利用其微分形式进行更精细的测量

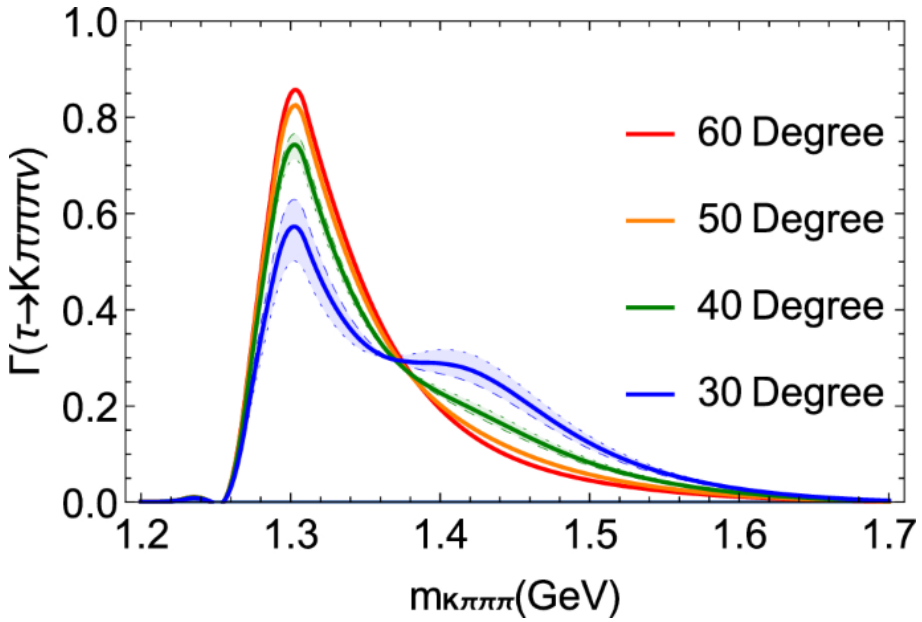
  输入外部测得的 $|V_{us}|$，同一关系也可用于约束 m_s

研究动机

- 可以利用 $\tau^- \to K^-\omega\nu_\tau$ 子过程的 $M(K\omega)$ 分布约束 $K_1(1270)$ 与 $K_1(1400)$ 的混合角

$$\begin{pmatrix} K_1(1270) \\ K_1(1400) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_{K_1} & \cos\theta_{K_1} \\ \cos\theta_{K_1} & -\sin\theta_{K_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{1A} \\ K_{1B} \end{pmatrix}$$

$K_{1A} : {}^3P_1, \quad K_{1B} : {}^1P_1; \qquad J^P = 1^+$



理论预言

Hayasaka, Huang, Kou, EPJC 81, 502 (2021)

数据样本

signal MC

MC16rd 样本

标记侧：e/μ

信号侧：$K^-\pi^+\pi^-\pi^0\nu_\tau$

包含 $K^-\omega$ 和 $K^-\eta$，排除 K^0

Data

Run 1 + Run 2 2024

$\mathscr{L}_{\text{data}} = (492.35 \pm 1.85)\ \text{fb}^{-1}$

Generic MC

MC16rd TauThrust skim

Generic MC 亮度 [fb^{-1}]

样本	Run 1	Run 2
$\tau^+\tau^-$	1429.23	517.11
$u\bar{u}$	1429.23	517.11
$d\bar{d}$	1429.23	517.11
$s\bar{s}$	1429.23	517.11
$c\bar{c}$	1429.23	517.11
$B\bar{B}$	1429.23	517.11
$\mu^+\mu^-$	1429.23	517.11
$\ell\ell XX$	1429.23	517.11
e^+e^-	35.73	12.93
$e^+e^-e^+e^-$	357.31	129.26
$e^+e^-\mu^+\mu^-$	357.31	129.27
$\gamma\gamma$	714.61	258.55
hh ISR	357.31	95.82

事例筛选

带电径迹

- $d_r \leq 1$ cm, $|d_z| \leq 3$ cm
- thetaInCDCAcceptance
- $p_T > 0.1$ GeV/c

粒子鉴别

- K^-：$\dfrac{\text{kaonID}}{\text{kaonID} + \text{pionID}} > 0.99$
- π^+：pionID > 0.90
- e^+：electronIDNN > 0.90

  对电子进行韧致辐射修正
- μ^+：muonIDNN > 0.90

光子

- beam background suppression > 0.8
- fake photon suppression > 0.5
- clusterNHits > 1.5
- thetaInCDCAcceptance
- π^0 子光子：$E_\gamma > 0.1$ GeV
- 额外光子：$E_\gamma > 0.2$ GeV

π^0

- $0.115 < M_{\gamma\gamma} < 0.152$ GeV/c^2

事例筛选

运动学

- $M_{K\pi\pi\pi^0} < 1.8\ \mathrm{GeV}/c^2$
- $\mu^2_{\mathrm{had}} = m^2_\tau + m^2_{\mathrm{had}} - 2E_\tau E_{\mathrm{had}} + 2p_\tau p_{\mathrm{had}} > 0$
- $\cos\theta^{\mathrm{sig}}_{\mathrm{thrust}} \cos\theta^{\mathrm{tag}}_{\mathrm{thrust}} < 0$

事例形状

- $N_{\mathrm{tracks}} = 4$
- $0.9 < \mathrm{thrust} < 0.99$
- $N^{\mathrm{sig}}_{\gamma\ \mathrm{extra}} = 0$
- $N^{\mathrm{tag}}_{\gamma\ \mathrm{extra}} = 0$

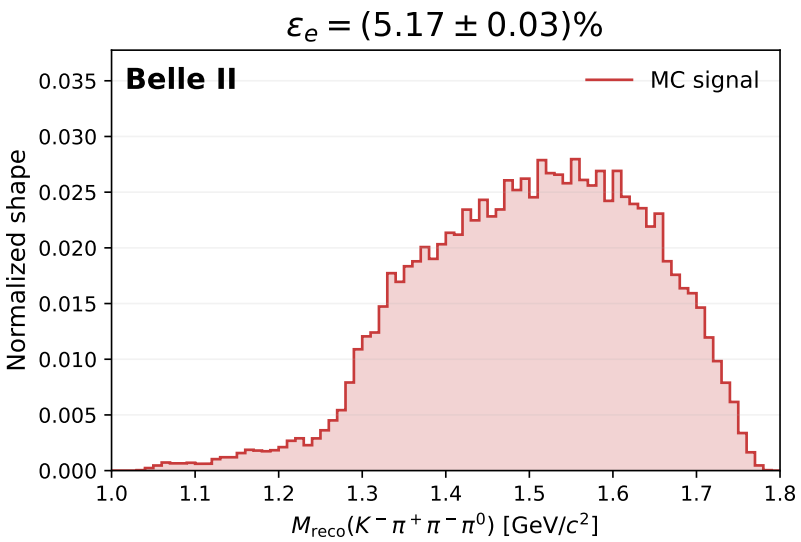
K_S veto

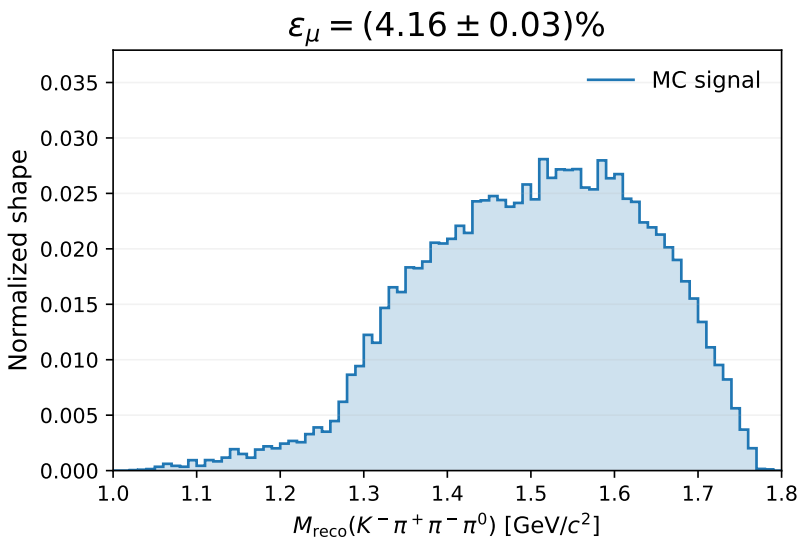
- IP 到 $\pi^+\pi^-$ 顶点距离 > 0.2 cm
- $0.45 < M(\pi^+\pi^-) < 0.55\ \mathrm{GeV}/c^2$

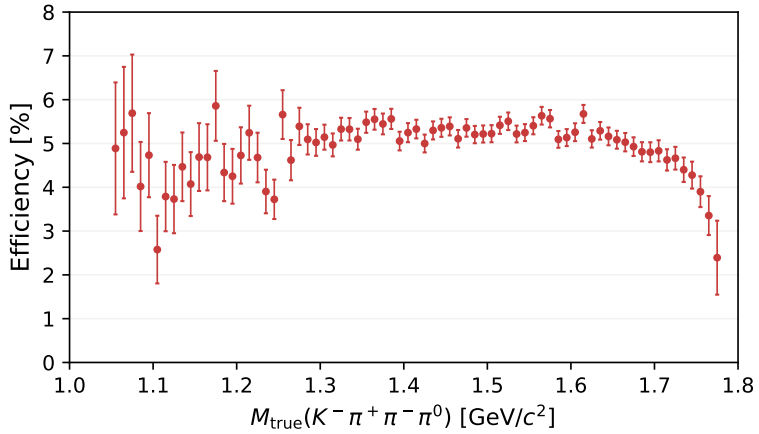
触发

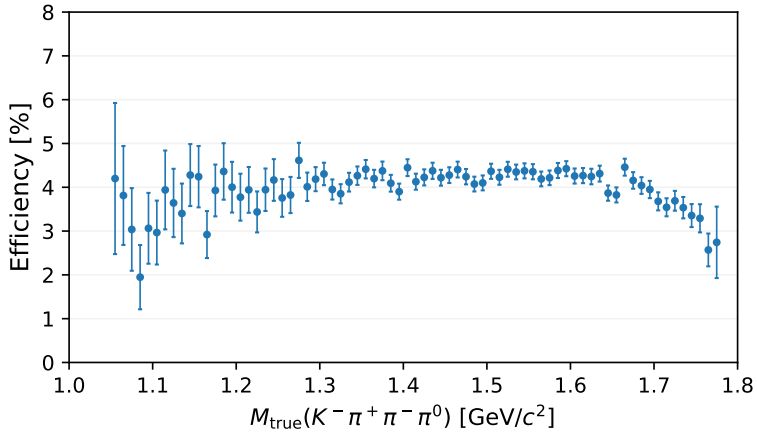
- ECL 触发：lmlX or hie

信号效率

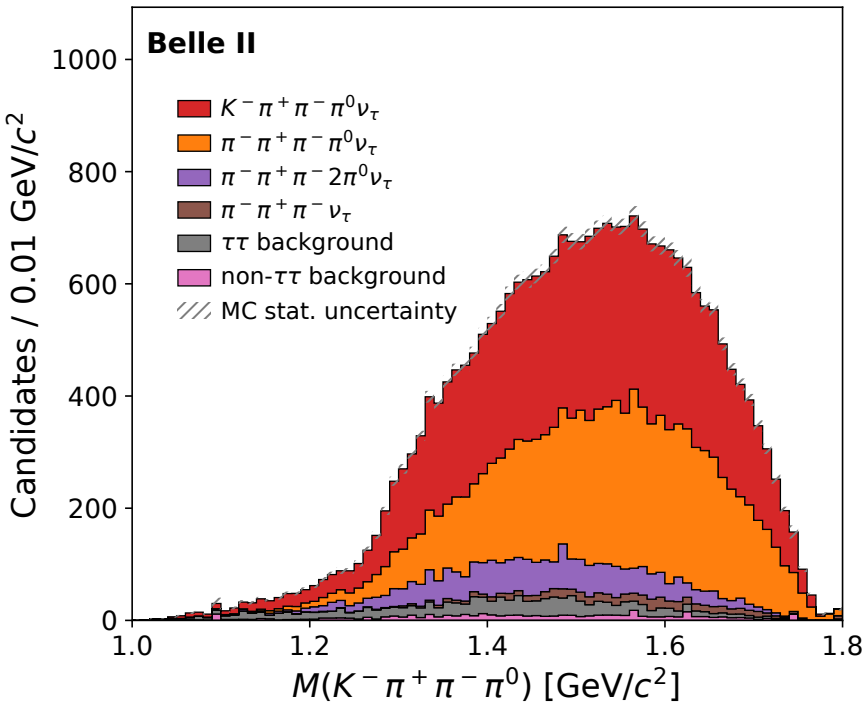

$\varepsilon_e = (5.17 \pm 0.03)\%$
Belle II
MC signal
Normalized shape
$M_{\mathrm{reco}}(K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$ [GeV/c^2]


$\varepsilon_\mu = (4.16 \pm 0.03)\%$
MC signal
Normalized shape
$M_{\mathrm{reco}}(K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$ [GeV/c^2]


Efficiency [%]
$M_{\mathrm{true}}(K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$ [GeV/c^2]


Efficiency [%]
$M_{\mathrm{true}}(K^-\pi^+\pi^-\pi^0)$ [GeV/c^2]

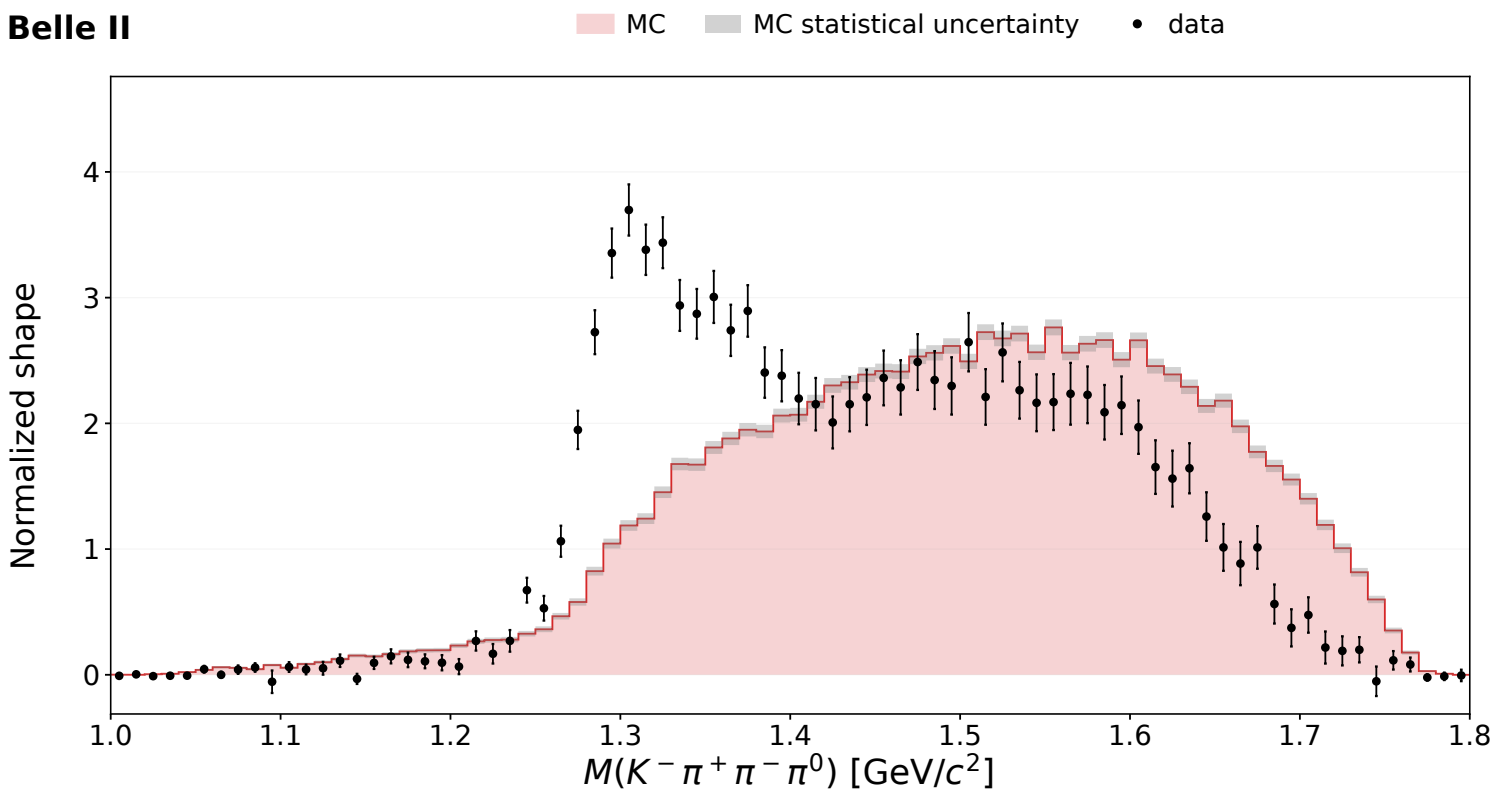
事例组成



τ^- 衰变末态	事例数	比例
$K^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$	6,024	23.6%
$K^-\omega(\to\pi^-\pi^+\pi^0)\nu_\tau$	5,489	21.5%
$K^-\eta(\to\pi^-\pi^+\pi^0)\nu_\tau$	532	2.1%
$\pi^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$	9,453	37.0%
$2\pi^-\pi^+2\pi^0\nu_\tau$	2,026	7.9%
$2\pi^-\pi^+\nu_\tau$	480	1.9%
$K^-\pi^0\eta(\to\pi^-\pi^+\pi^0)\nu_\tau$	258	1.0%
$K^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$	218	0.9%
$K^-\pi^0K^0_S\nu_\tau$	208	0.8%
其他 $\tau\tau$ 本底	421	1.6%
非 $\tau\tau$ 本底	437	1.7%
MC 总计	25,546	100.0%

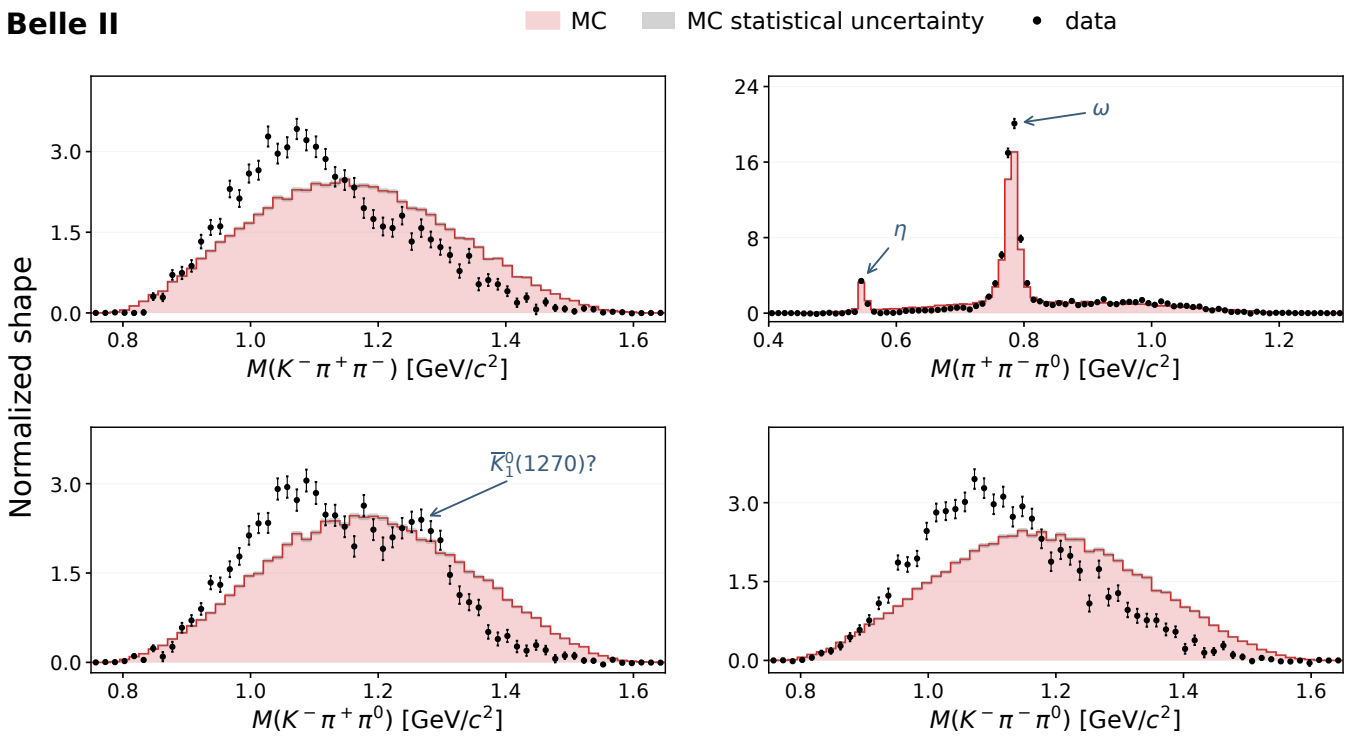
$M(K\pi\pi\pi^0)$

Data 已扣除预期本底



三体不变质量谱

Data 已扣除预期本底



可能的中间过程：

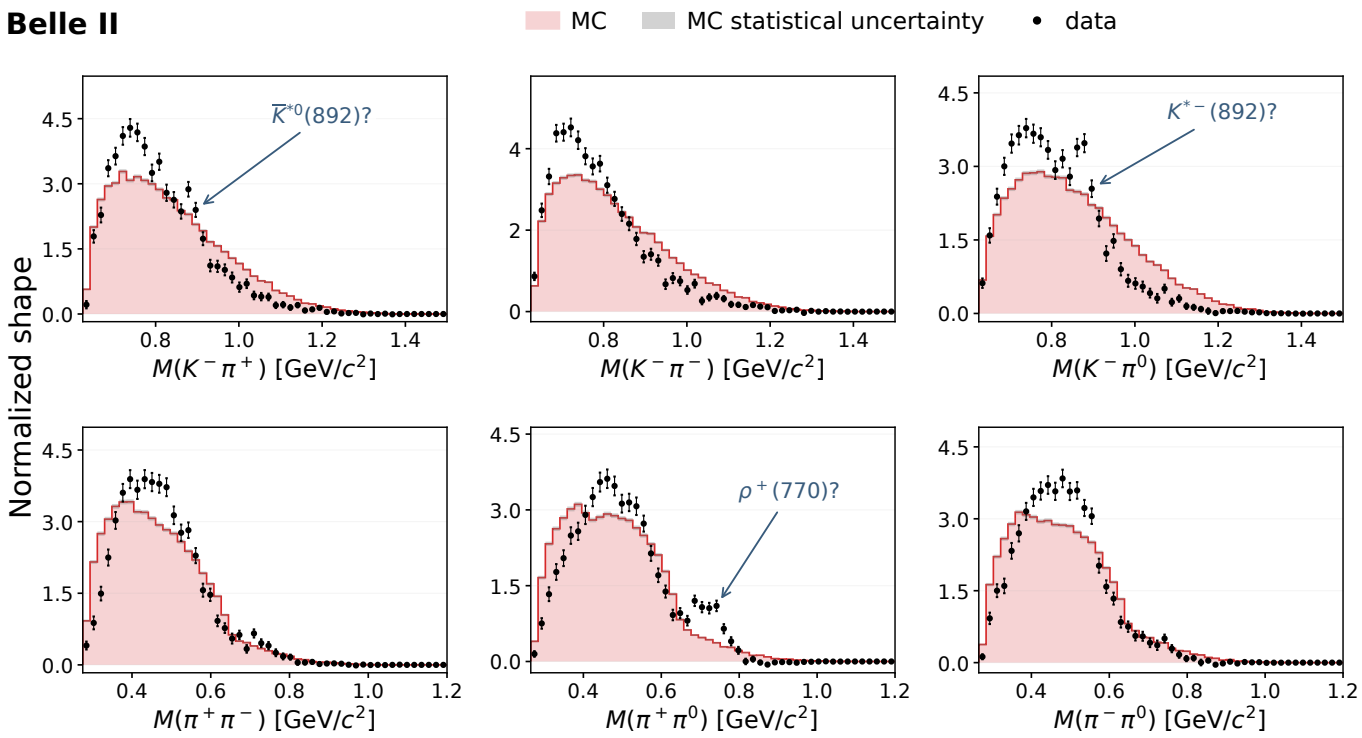
$$\tau^- \to K^-\eta\nu_\tau, \qquad \eta \to \pi^+\pi^-\pi^0$$

$$\tau^- \to K^-\omega\nu_\tau, \qquad \omega \to \pi^+\pi^-\pi^0$$

$$\tau^- \to \overline{K}_1^0(1270)\pi^-\nu_\tau, \qquad \overline{K}_1^0(1270) \to K^-\pi^+\pi^0$$

两体不变质量谱

Data 已扣除预期本底



可能的中间过程：

$\tau^- \to \overline{K}^{*0}\pi^-\pi^0\nu_\tau, \quad \overline{K}^{*0} \to K^-\pi^+$

$\tau^- \to K^{*-}\pi^+\pi^-\nu_\tau, \quad K^{*-} \to K^-\pi^0$

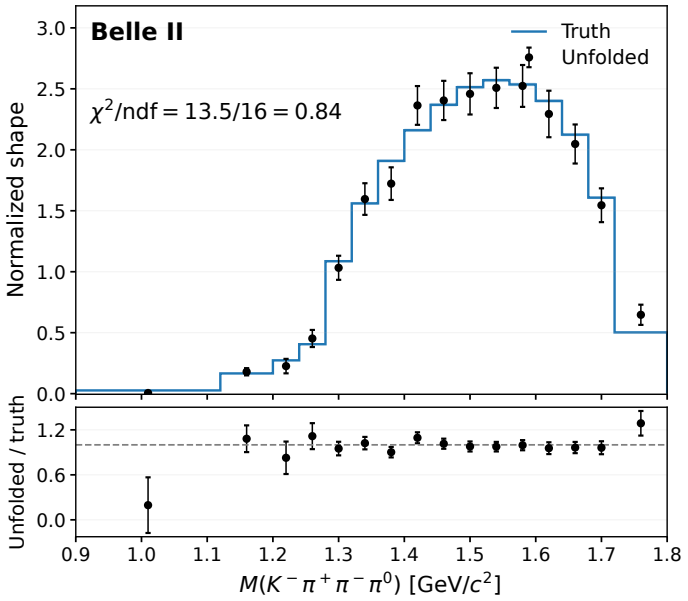
$\tau^- \to K^-\rho^+\pi^-\nu_\tau, \quad \rho^+ \to \pi^+\pi^0$

结果

$$\mathcal{B} = \frac{N_{\text{tot}} - N_{\text{bkg}}}{2\mathcal{L}\sigma_{\tau^+\tau^-}\left[\begin{array}{l}\mathcal{B}(\tau \to e\nu\bar{\nu})\,\varepsilon_e \\ +\,\mathcal{B}(\tau \to \mu\nu\bar{\nu})\,\varepsilon_\mu\end{array}\right]}$$

$$\mathcal{B}_{\text{input}} = 7.96 \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}_{\text{output}} = (7.91 \pm 0.11_{\text{stat}}) \times 10^{-4}$$



Unfolding

用 MC 建立响应矩阵 A

$$n_{\text{obs}} = A\, n_{\text{true}} + n_{\text{bkg}}$$

A_{ij}：真值第 j bin 到重建第 i bin 的响应，包含筛选效率和质量迁移

$n_{\text{obs},i}$：重建第 i bin 的观测产额

$n_{\text{bkg},i}$：重建第 i bin 的本底产额

$n_{\text{true},j}$：真值第 j bin 的产额

$$n_{\text{unfolded}} = A^{-1}(n_{\text{obs}} - n_{\text{bkg}})$$

n_{unfolded}：真值产额的估计

展开后的 MC 谱与 truth 在统计误差内一致

总结

- 压低本底，完成事例筛选
- MC 分支比结果与输入值一致
- 展开后的 MC 谱与 truth 一致

后续计划

- 完善系统误差评估
- 研究 $K\omega$ 子过程和中间共振态
- 进一步研究 unfolding 过程

感谢聆听