



LHCb实验上 B_c^+ 介子半轻衰变中轻子普适性的检验

黄文谦^{1,2}, 吴臻泓¹

1中国科学院大学

2广西大学

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会

强子物理与味物理分会

2026年7月17日

报告提纲

- 物理背景与意义
- LHCb 实验
- $R(J/\psi)$ 测量: B_c^+ 介子半轻衰变中轻子普适性的检验
- 总结与展望

轻子普适性:三代轻子是否遵守同一条规则?

➤ 轻子普适性(LFU): 标准模型中, 三代轻子的电弱规范耦合强度完全相同, 差别只来源于质量引起的相空间与螺旋度抑制

➤ 检验方法: 测量包含三代轻子过程的相对分支比, 检验耦合一致性

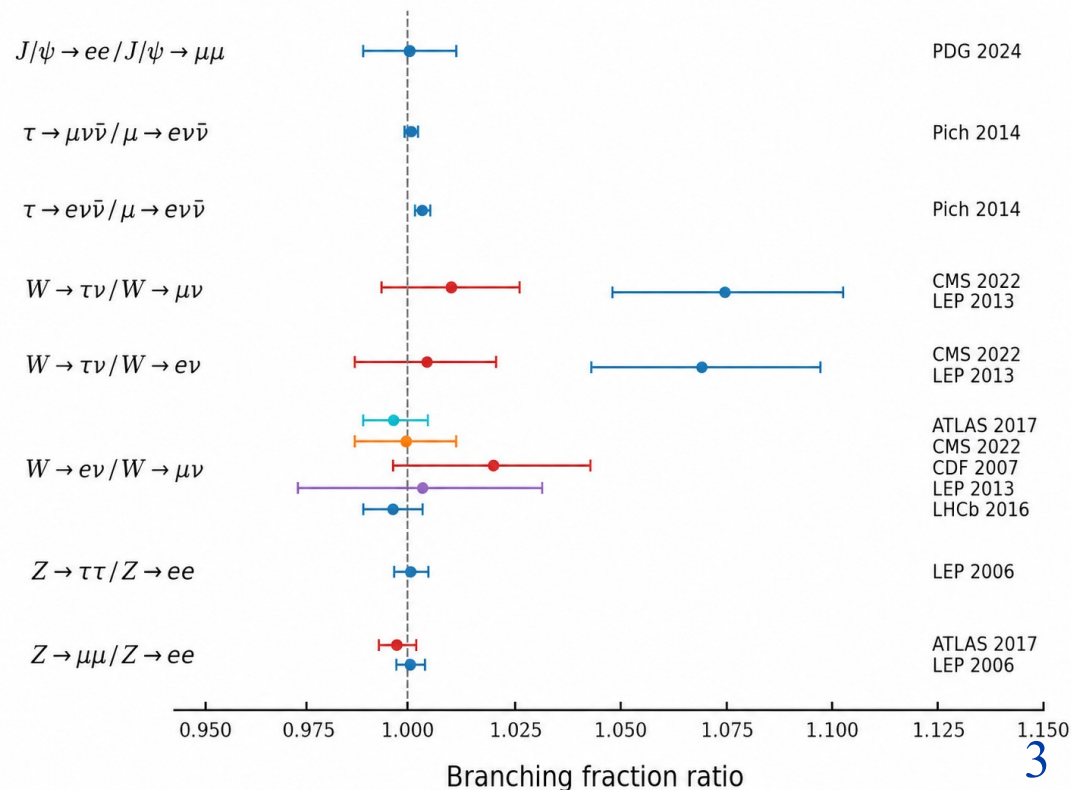
- 直接测量: $W^\pm \rightarrow l\nu$ 、 $Z^0 \rightarrow l^+l^-$, 精度0.2%, 符合标准模型

- 间接测量: B强子半轻衰变

 - 夸克味改变中性流 $b \rightarrow sll$, 符合标准模型

 - 夸克味改变带电流 $b \rightarrow c\tau\nu$

$$\text{low-}q^2 \begin{cases} R_K &= 0.994^{+0.090}_{-0.082} (\text{stat})^{+0.029}_{-0.027} (\text{syst}), \\ R_{K^*} &= 0.927^{+0.093}_{-0.087} (\text{stat})^{+0.036}_{-0.035} (\text{syst}), \end{cases}$$
$$\text{central-}q^2 \begin{cases} R_K &= 0.949^{+0.042}_{-0.041} (\text{stat})^{+0.022}_{-0.022} (\text{syst}), \\ R_{K^*} &= 1.027^{+0.072}_{-0.068} (\text{stat})^{+0.027}_{-0.026} (\text{syst}). \end{cases}$$

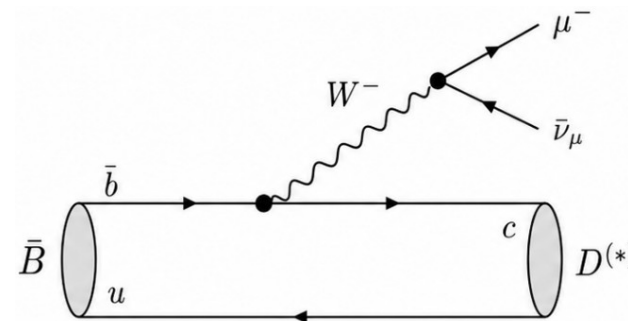


味改变带电流:持续存在的潜力

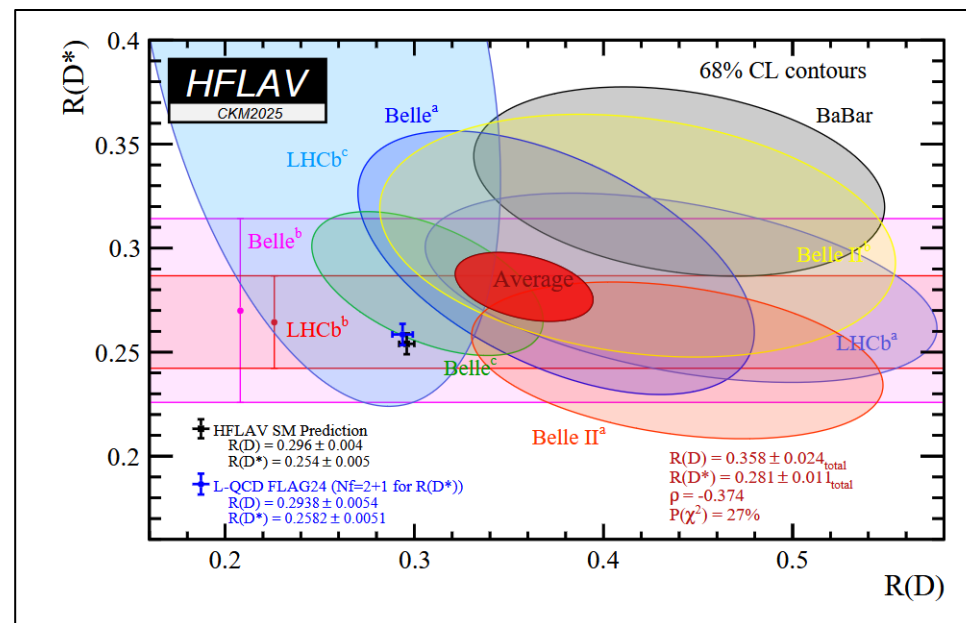
$$\triangleright R(D^{(*)}) = \frac{BR(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{BR(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$

- $R(D)$: 0.358 ± 0.024 (实验) vs 0.296 ± 0.004 (理论), 2.5σ
- $R(D^*)$: 0.281 ± 0.011 (实验) vs 0.254 ± 0.005 (理论), 2.3σ
- $R(D)-R(D^*)$ 联合偏差 3.8σ

➤ 可以在更多重味强子体系中独立检验



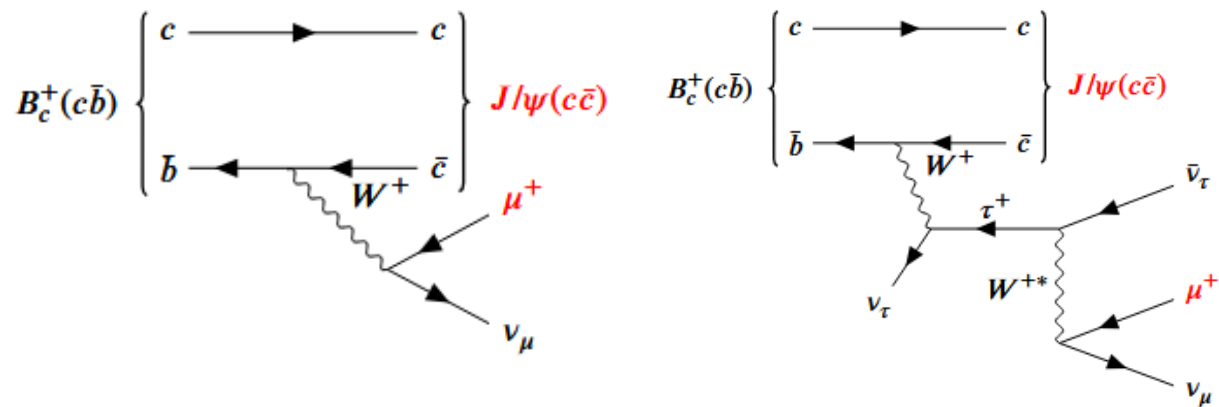
HFLAV, 2025



在 B_c^+ 介子半轻衰变中的检验

$$\text{➤ } R(J/\psi) = \frac{Br(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau)}{Br(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)}$$

其中 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$, $\tau^+ \rightarrow \mu^+ (\nu_\mu \bar{\nu}_\tau)$.



在 $B_c \rightarrow J/\psi$ 系统中的测量:

- 强子矩阵元独立: 双重 $\bar{b}c \rightarrow c\bar{c}$, 非微扰系统异于 $B \rightarrow D^{(*)}$; 全局拟合独立校验, 过滤赝NP解
- 理论侧: NRQCD 收敛更快, 形状因子计算覆盖全 q^2 范围[2503.15090], 规避 $B \rightarrow D^{(*)}$ 高 q^2 外推系统误差
- 实验侧: $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ 标记效率高; 信号道与控制道有相同末态与探测器中拓扑结构, 相对测量误差可控

LHCb实验

➤ LHCb 位于 LHC 上，是专门面向重味物理优化的前向谱仪

➤ LHCb 覆盖前向赳快度区域

➤ 优良顶点分辨率

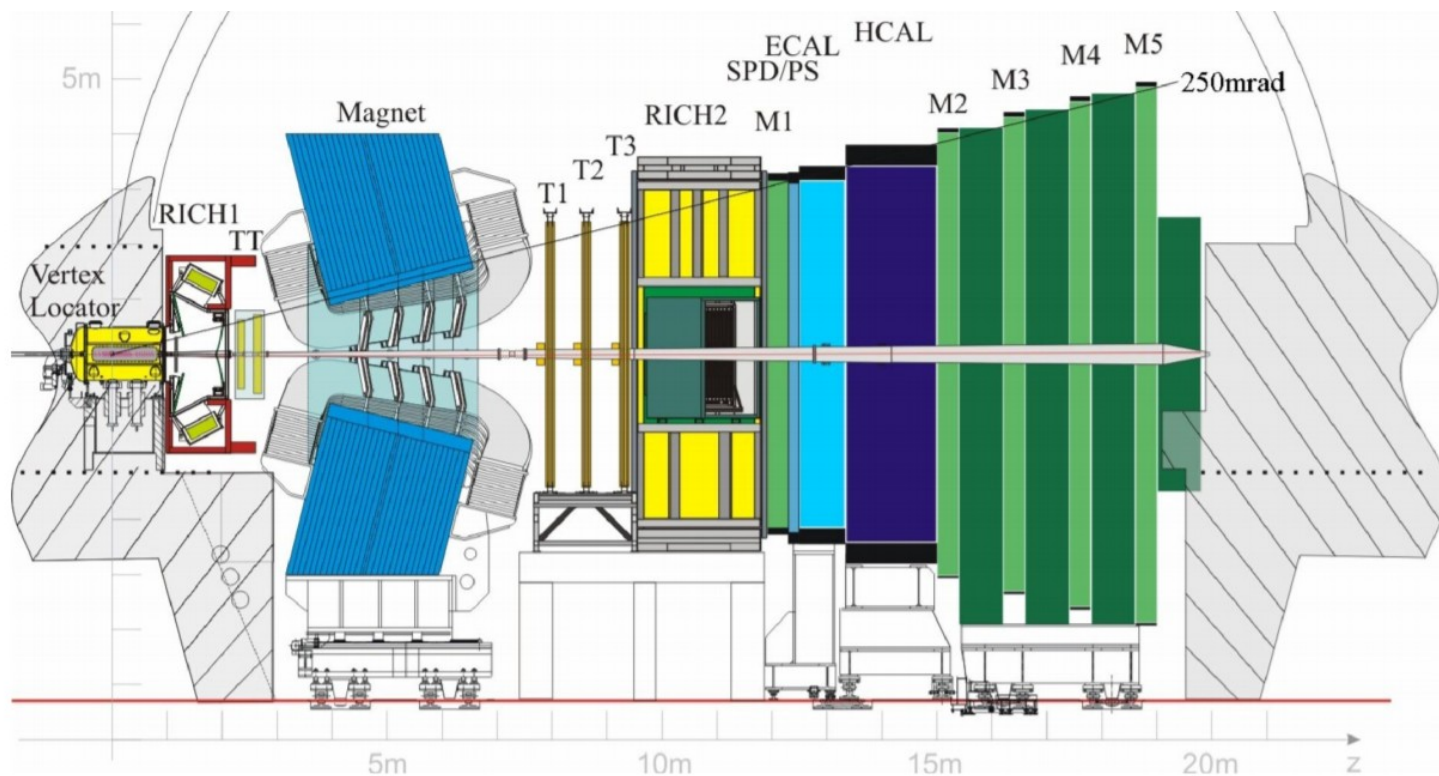
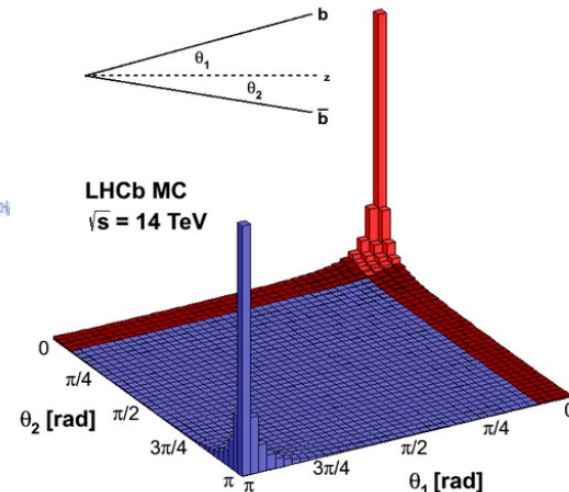
- $\sigma_{IP} = 20 \mu\text{m}$
- $\sigma_{\tau} = 45 \text{ fs}$

➤ 高精度动量测量：构造半轻衰变

- $\sigma_p/p \sim 0.5\% - 1.0\%$
- $\sigma_E/E = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \pm 1\%$

➤ 强粒子鉴别能力：控制误鉴别本

- $\epsilon(K \rightarrow K) \sim 95\%$
- $\text{MisID } \epsilon(\pi \rightarrow K) \sim 5\%$



LHCb Run-1 Results

理论结果：

$$\triangleright R(J/\psi) = 0.25 \pm 0.02$$

LHCb Run-1 结果：

$$\triangleright R(J/\psi) = 0.71 \pm 0.17 \pm 0.18 \quad \sim 1.8\sigma$$

Source of uncertainty	Size ($\times 10^{-2}$)
Limited size of simulation samples	8.0
$B_c^+ \rightarrow J/\psi$ form factors	12.1
$B_c^+ \rightarrow \psi(2S)$ form factors	3.2
Fit bias correction	5.4
Z binning strategy	5.6
Misidentification background strategy	5.6
Combinatorial background cocktail	4.5
Combinatorial J/ψ sideband scaling	0.9
$B_c^+ \rightarrow J/\psi H_c X$ contribution	3.6
Semitauponic $\psi(2S)$ and χ_c feed-down	0.9
Weighting of simulation samples	1.6
Efficiency ratio	0.6
$\mathcal{B}(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau)$	0.2
Total systematic uncertainty	17.7
Statistical uncertainty	17.3

信号特点与主要本底

➤ 信号与控制道:

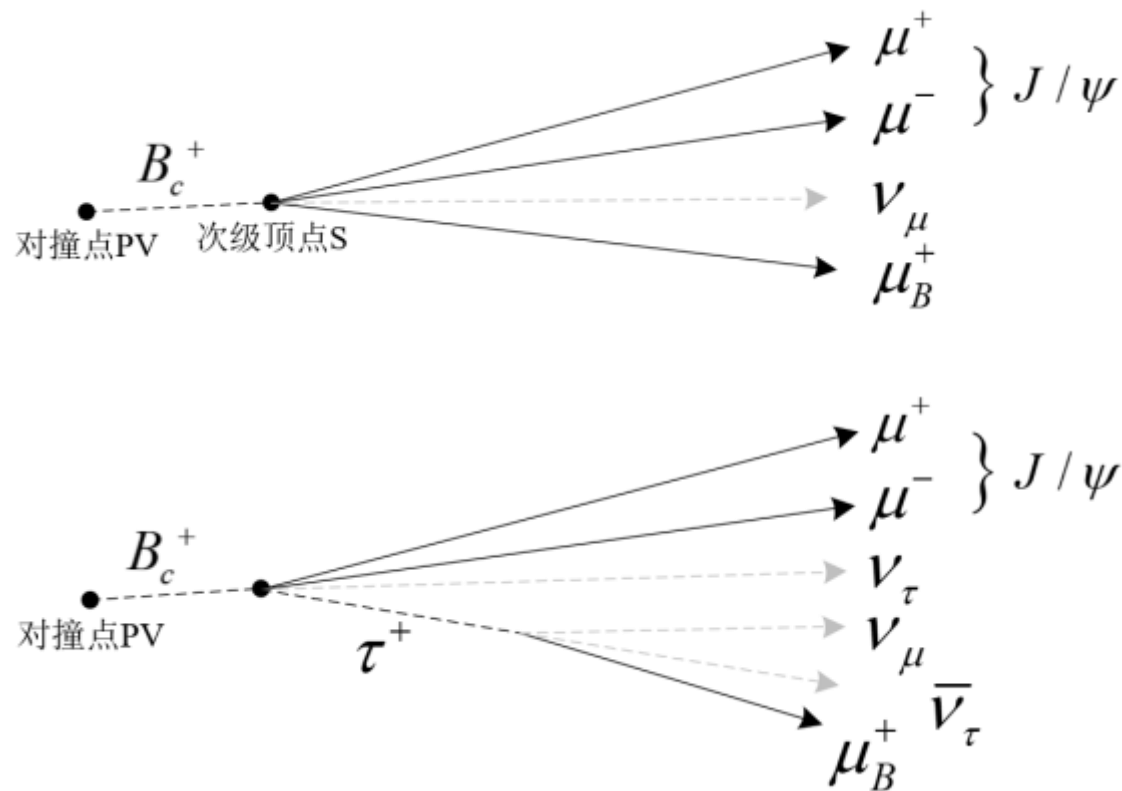
- $B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau$, $\tau^+ \rightarrow \mu_B^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$
- $B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu_B^+ \nu_\mu$

➤ 非物理本底:

- $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 组合本底
- μ_B 误鉴别本底
- $J/\psi \mu$ 组合本底

➤ 物理本底:

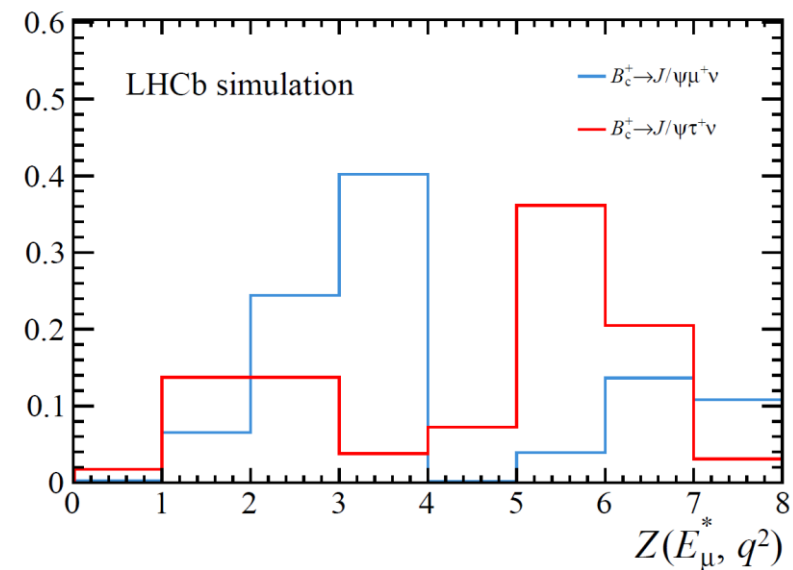
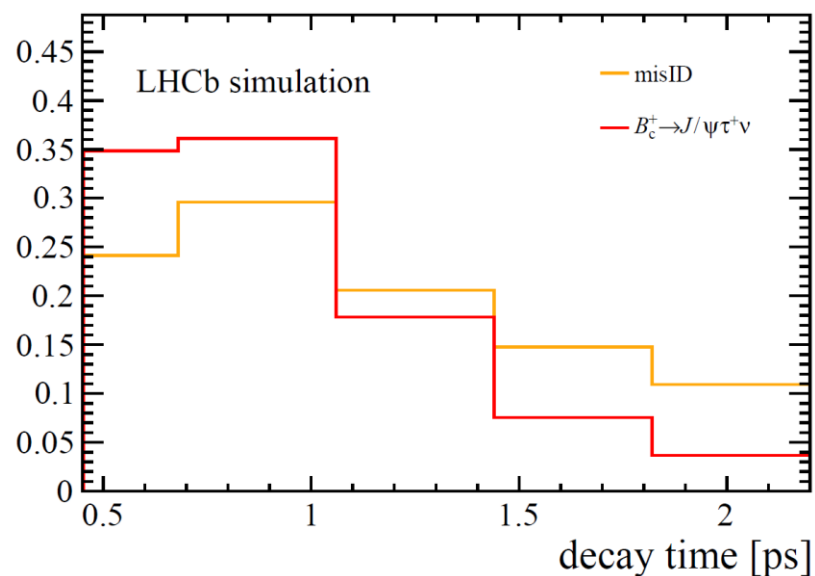
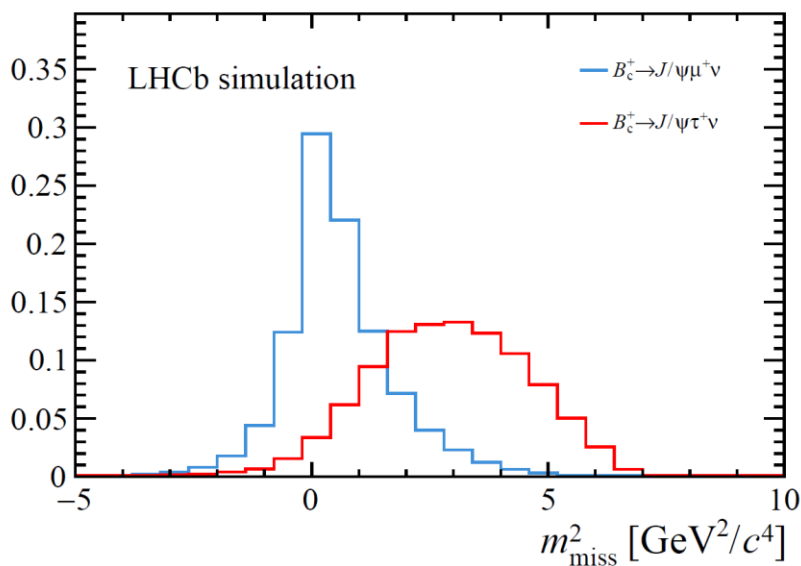
- 衰变为 J/ψ 的中间过程
 - $B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \mu^+ \nu_\mu$
- 双粲过程
 - $B_c^+ \rightarrow J/\psi D X$, $D \rightarrow \mu X$
- 粲伴随本底



半轻衰变中的部分重建算法

➤ 使用部分重建的 B_c^+ 动量信息，重建拟合变量：

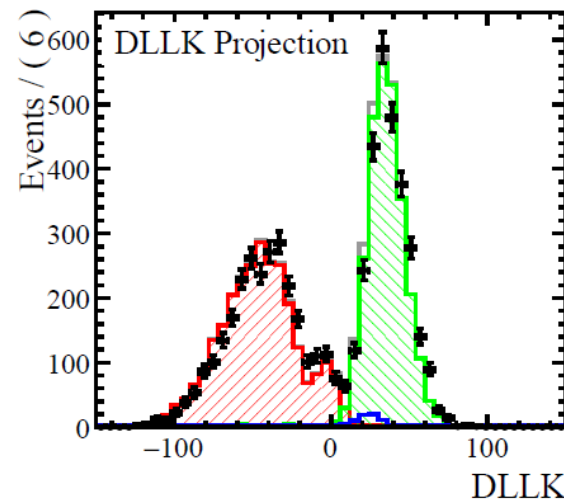
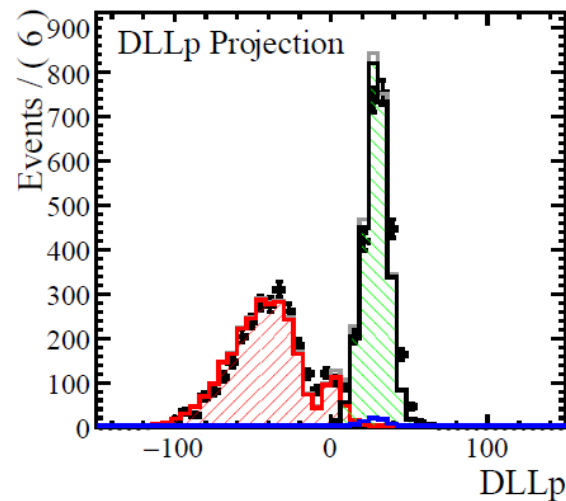
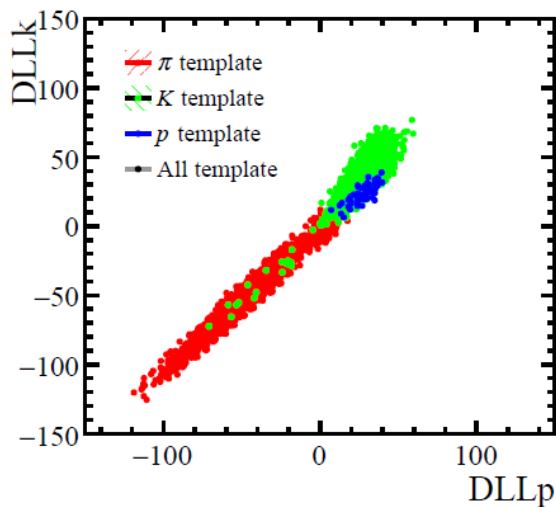
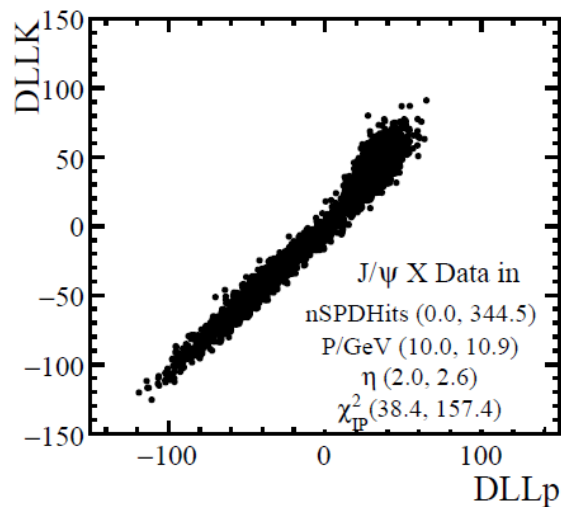
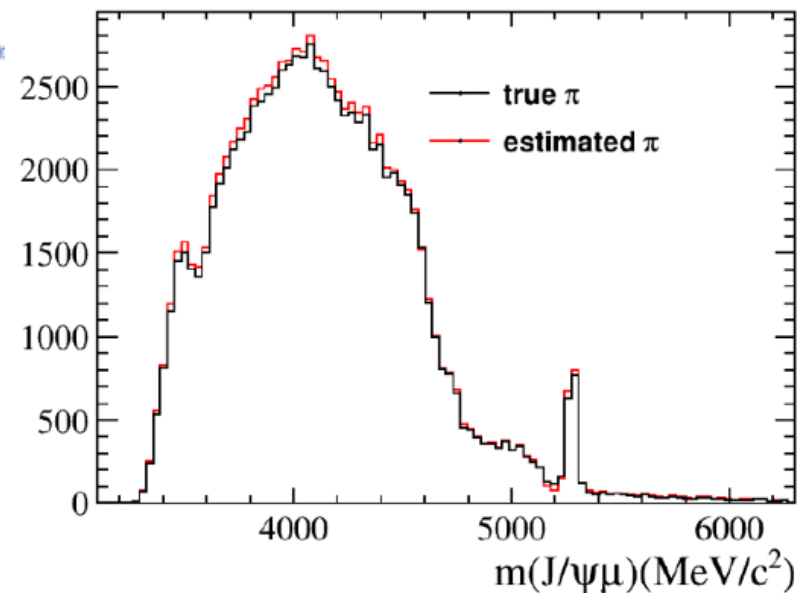
- 缺失质量平方、衰变时间、静止系中第三个 μ 的能量、转移四动量



误鉴别本底

使用inclusive MC验证

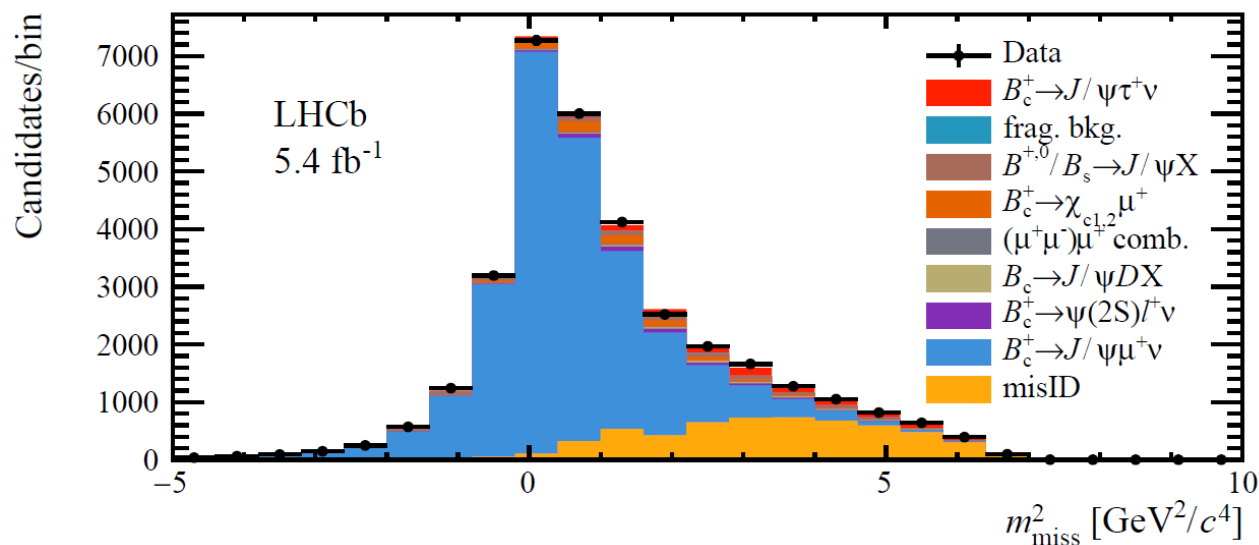
- 原理：强子 被误鉴别成了 μ $\Rightarrow$ 强子产额 $\times$ 误鉴别率
- 细化：三维运动学+二维PID参数空间的强子产额
- 数据模板+sPlot拟合 $\Rightarrow$ 同时确定 π, K, p 的产额与分布



误鉴别本底产额对比

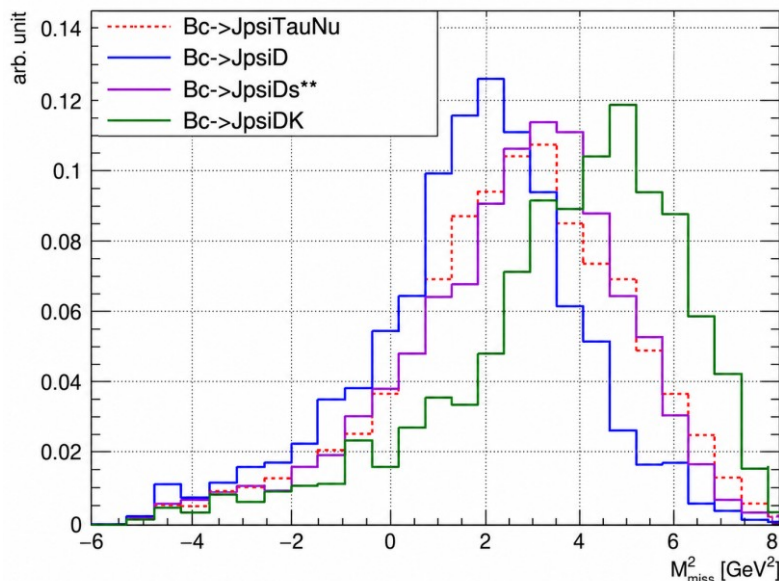
➤ 同时也使用了反卷积方法交叉验证误鉴别成分形状，误鉴别成分描述准确

	2016	2017	2018
Data driven methods	1723 ± 44	1737 ± 46	1980 ± 46
Nominal fit	1518 ± 100	2273 ± 119	2074 ± 251



双粲本底：来自粲强子的 μ

- 双粲本底： J/ψ 和一个来自粲强子半轻衰变的 μ 组合而成
- 粲强子和 τ 具有寿命接近：与信号拓扑结构相似，与信号道关联性极强
- 数据驱动方法，结合多来源输入对双粲本底进行约束

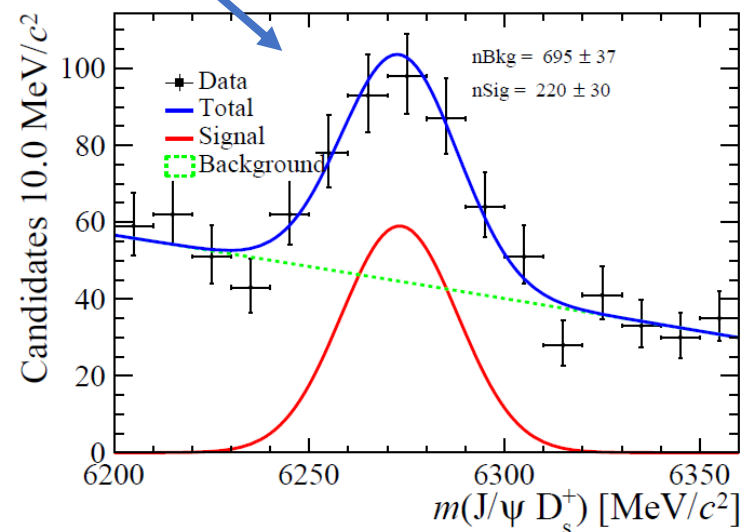


Calculate target yield,

from PDG

from MC

$$\frac{N(b \rightarrow J/\psi D(\rightarrow \mu X) Y)}{N(b \rightarrow J/\psi D(\rightarrow h) Y)} = \frac{\boxed{B(D \rightarrow \mu X)} \cdot \varepsilon(b \rightarrow J/\psi D(\rightarrow \mu X) Y)}{\boxed{B(D \rightarrow h)} \cdot \varepsilon(b \rightarrow J/\psi D(\rightarrow h) Y)}$$



双粲本底结果

➤ 本底产额评估与拟合结果对比

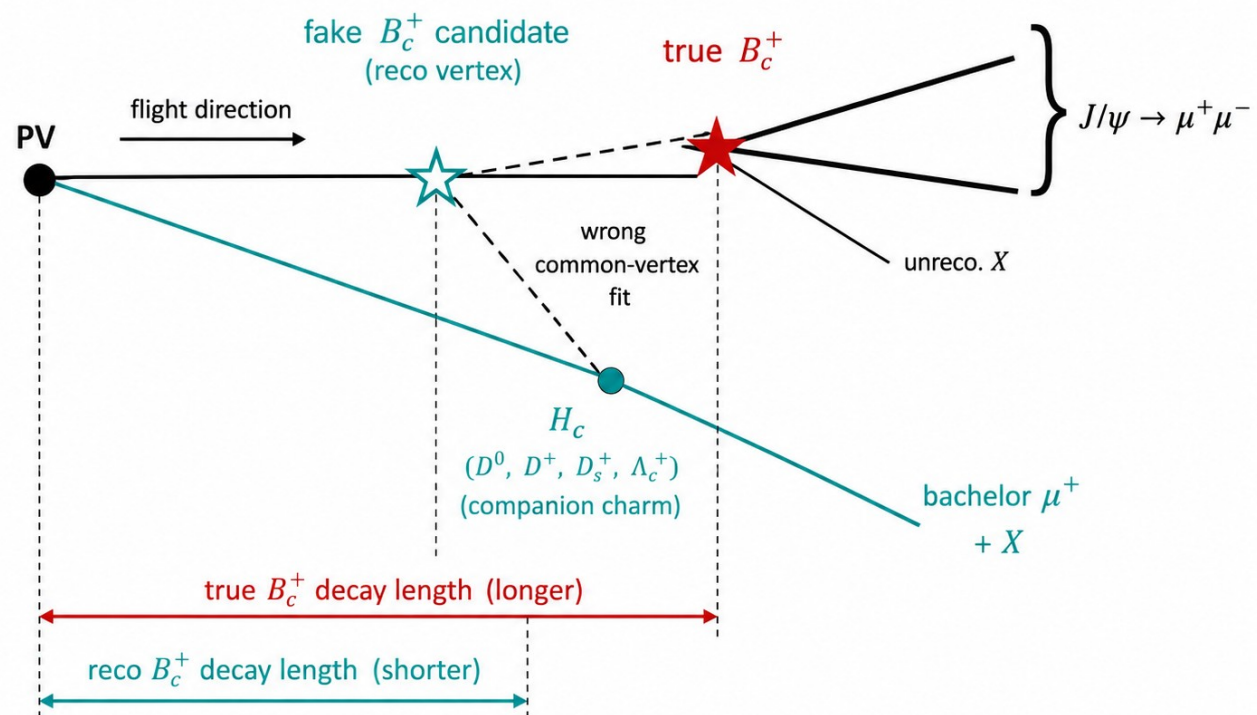
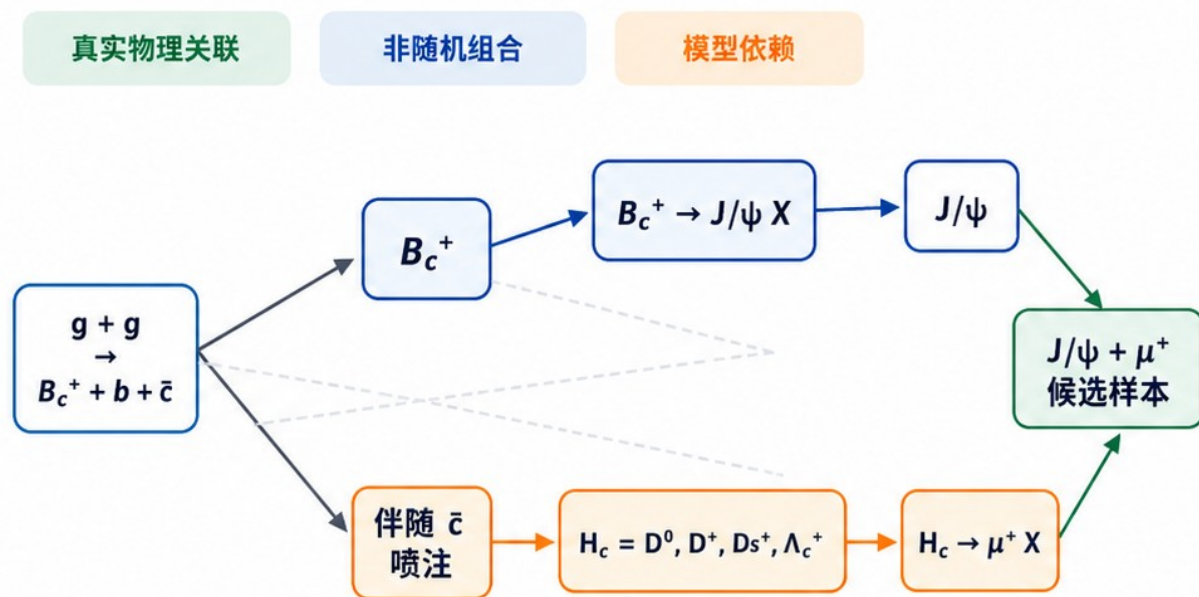
	2016	2017	2018
$b \rightarrow J/\psi D^0 X$	6 ± 1	6 ± 1	8 ± 2
$b \rightarrow J/\psi D^+ X$	1 ± 2	1 ± 2	1 ± 2
$b \rightarrow J/\psi D_s^+ X$	71 ± 11	64 ± 10	88 ± 13

	2016	2017	2018
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D$	44 ± 6	40 ± 6	55 ± 8
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D^{**}$	13 ± 5	12 ± 4	17 ± 6
$B_c^+ \rightarrow J/\psi DK$	4 ± 1	4 ± 1	5 ± 2
Total	61 ± 8	56 ± 7	77 ± 10

➤ 也使用不同分类方法，总产额稳定，解耦与信号道的关联

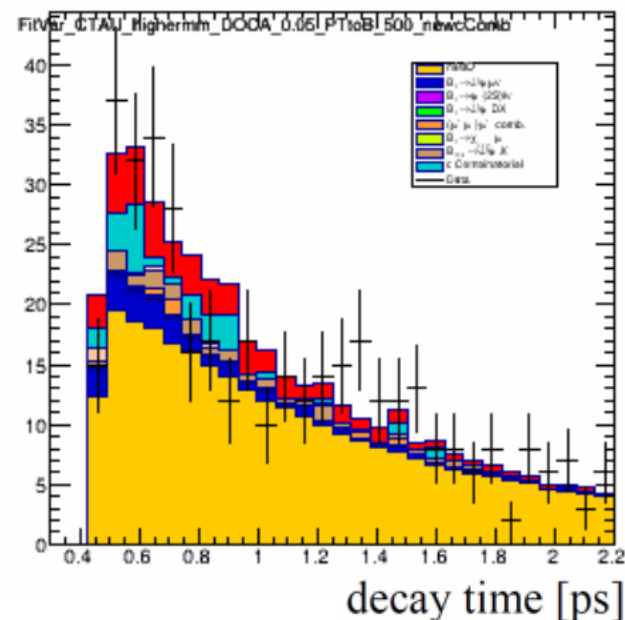
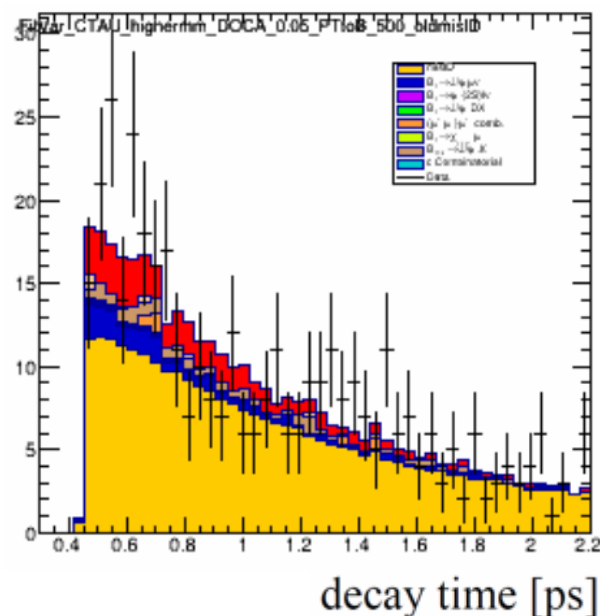
粲伴随本底

➤ $gg \rightarrow \bar{b}c + \bar{c} + b$ 真实重味关联的特殊物理本底，区别于随机组合本底



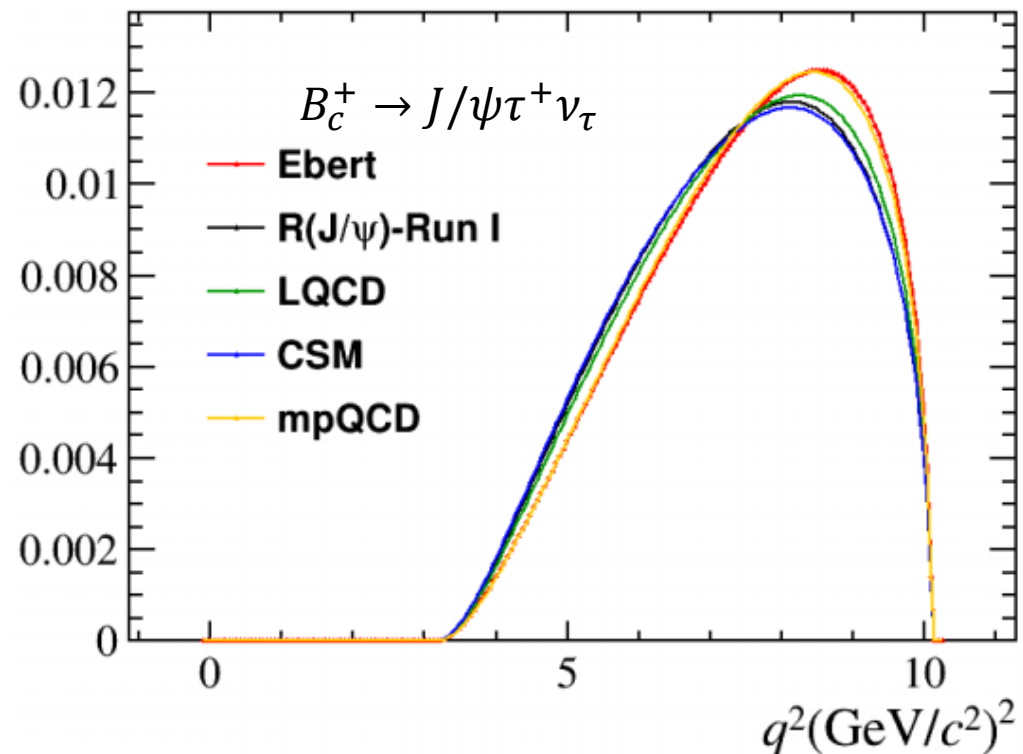
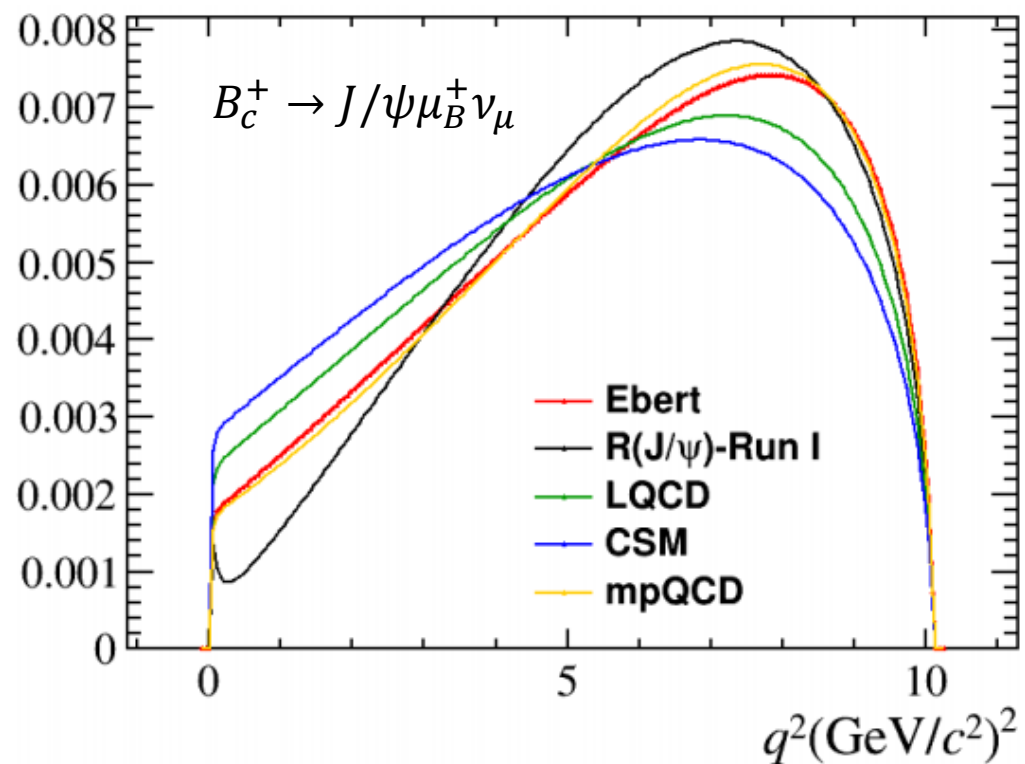
粲伴随本底

- 粲伴随: μ 来自 D , 且 D 不来源于 B_c^+ <-- MC truth match
- 使用专用模拟样本, 并放宽选择条件提升统计量
- 在 B_c^+ 产生实验分析中, 对比数据与模拟, 修正产生子角度分布, 应用到本工作
- 对低衰变时间区间描述提升



MC 修正

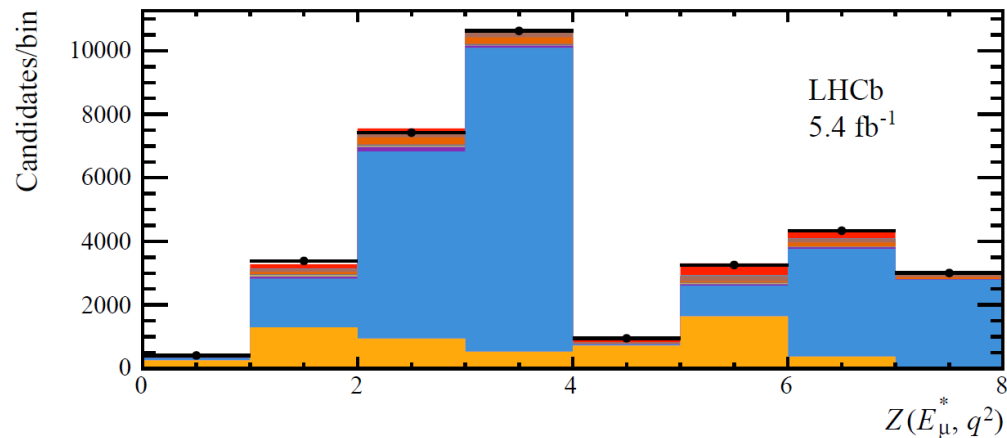
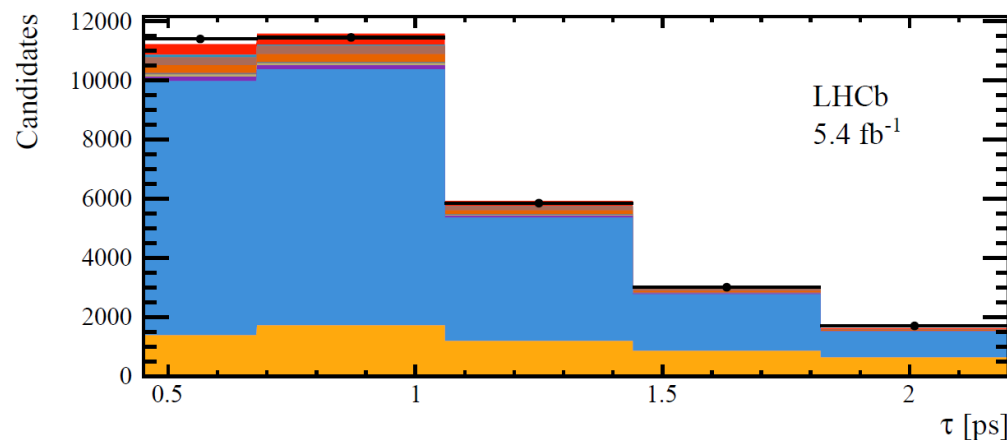
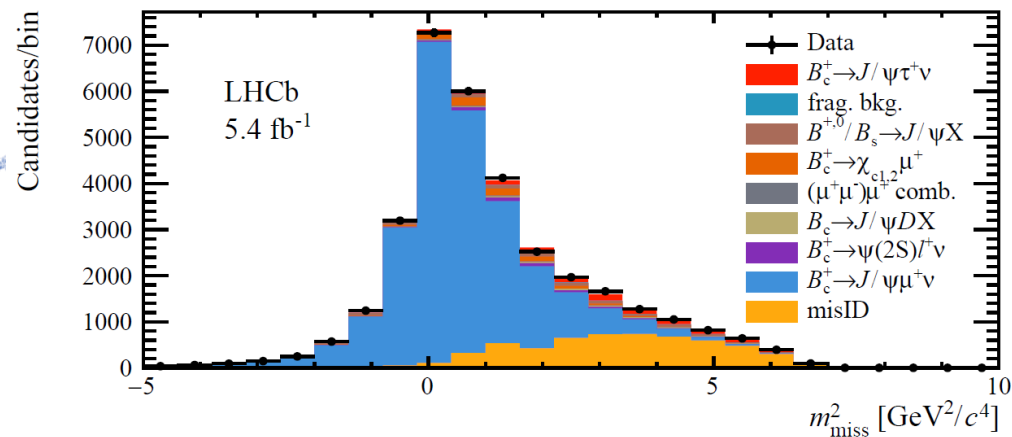
➤ 基于最新LQCD，修正形状因子



拟合结果

➤ $R(J/\psi) = 0.51 \pm 0.12(stat.) \pm 0.08(syst.)$

- 统计不确定度仍是主导来源之一
- 系统不确定度已通过数据驱动本底和 MC 修正得到控制
- 结果与标准模型预言在 1.8σ 范围内相符
- 与 LHCb Run 1 测量结果一致



相对效率

➤ GEN: generator

➤ FIL: filter (norm only)

➤ REC: reconstruction

➤ SEL: main selection

➤ ISO: isolation BDT

➤ PID: muon PID

➤ L0: L0 and HLT1

➤ HLT2: HLT2

样本	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{GEN}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{GEN}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{FIL}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{FIL}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{REC}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{REC}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{SEL}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{SEL}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{ISO}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{ISO}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{PID}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{PID}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{L0}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{L0}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}^{\text{HLT2}}}{\epsilon_{\mu}^{\text{HLT2}}}$	$\frac{\epsilon_{\tau}}{\epsilon_{\mu}}$
2016 MagDown	1.348(3)	2.325(1)	0.3329(3)	0.466(1)	0.997(2)	0.937(4)	1.007(6)	0.9997(4)	0.46(1)
2016 MagUp	1.339(3)	2.334(1)	0.3317(3)	0.467(1)	1.000(2)	0.940(4)	0.995(7)	1.0000(6)	0.45(1)
2017 MagDown	1.350(3)	2.325(1)	0.3315(3)	0.478(1)	1.007(2)	0.947(3)	0.979(6)	0.9995(5)	0.46(1)
2017 MagUp	1.342(3)	2.336(1)	0.3222(3)	0.470(1)	1.008(2)	0.933(3)	0.997(6)	1.0000(4)	0.45(1)
2018 MagDown	1.344(3)	2.326(1)	0.3288(2)	0.4739(8)	1.006(1)	0.942(2)	0.995(5)	1.0000(4)	0.46(1)
2018 MagUp	1.348(3)	2.338(1)	0.3291(2)	0.4734(8)	1.002(2)	0.940(2)	0.985(5)	0.9993(4)	0.46(1)
合并	1.3451(4)	2.3306(5)	0.32942(3)	0.471(1)	1.003(1)	0.938(2)	0.992(3)	0.9998(1)	0.454(6)

系统误差

Run 1		Run 2	
Source of uncertainty	Size ($\times 10^{-2}$)	Source of uncertainty on $\mathcal{R}(J/\psi)$	Value ($\times 10^{-2}$)
Limited size of simulation samples	8.0	Simulation statistical uncertainty	5.9
$B_c^+ \rightarrow J/\psi$ form factors	12.1	$B_c^+ \rightarrow \psi(2S)\ell^+\nu$ modeling	2.6
$B_c^+ \rightarrow \psi(2S)$ form factors	3.2	MisID composition estimation	2.5
Fit bias correction	5.4	Simulation corrections	2.0
Z binning strategy	5.6	$B_c^+ \rightarrow J/\psi \ell^+ \nu$ form factors	1.8
Misidentification background strategy	5.6	$B_c^+ \rightarrow \chi_c \mu^+ \nu$ scaling	1.5
Combinatorial background cocktail	4.5	Efficiency ratio	1.3
Combinatorial J/ψ sideband scaling	0.9	Fragmentation background modeling	1.3
$B_c^+ \rightarrow J/\psi H_c X$ contribution	3.6	MisID decay-in-flight correction	1.1
Semitauponic $\psi(2S)$ and χ_c feed-down	0.9	$(J/\psi \mu^+)$ combinatorial modeling	0.6
Weighting of simulation samples	1.6	MisID decay-in-flight smearing	0.3
Efficiency ratio	0.6	$B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \ell^+ \nu$ scaling	0.3
$\mathcal{B}(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau)$	0.2	$\mathcal{B}(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau)$	0.2
Total systematic uncertainty	17.7	Trimuon effect	0.1
Statistical uncertainty	17.3	Systematic uncertainty	7.9
		Statistical uncertainty	11.9
		Total uncertainty	14.3

总结展望

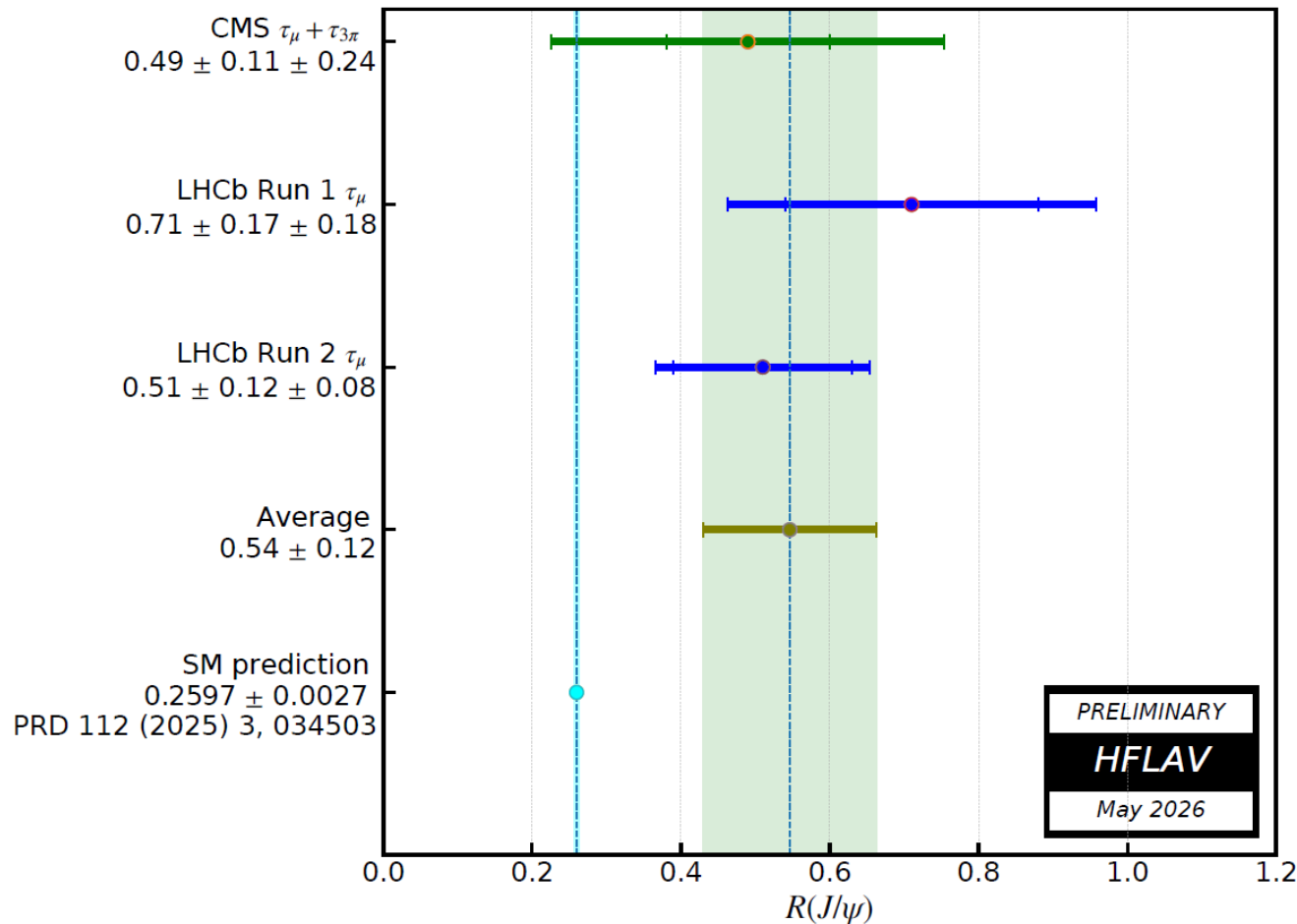


➤ 总结：LHCb Run 2 B_c^+ 半轻衰变 $R(J/\psi)$ 工作

- 数据驱动为主体处理本底
 - 多维变量拟合，确定误鉴别本底
 - 双粲本底
 - 粲伴随本底 (首次)
- 结果与标准模型在 1.8σ 范围内相符
- 联合拟合结果与标准模型偏差 2.4σ

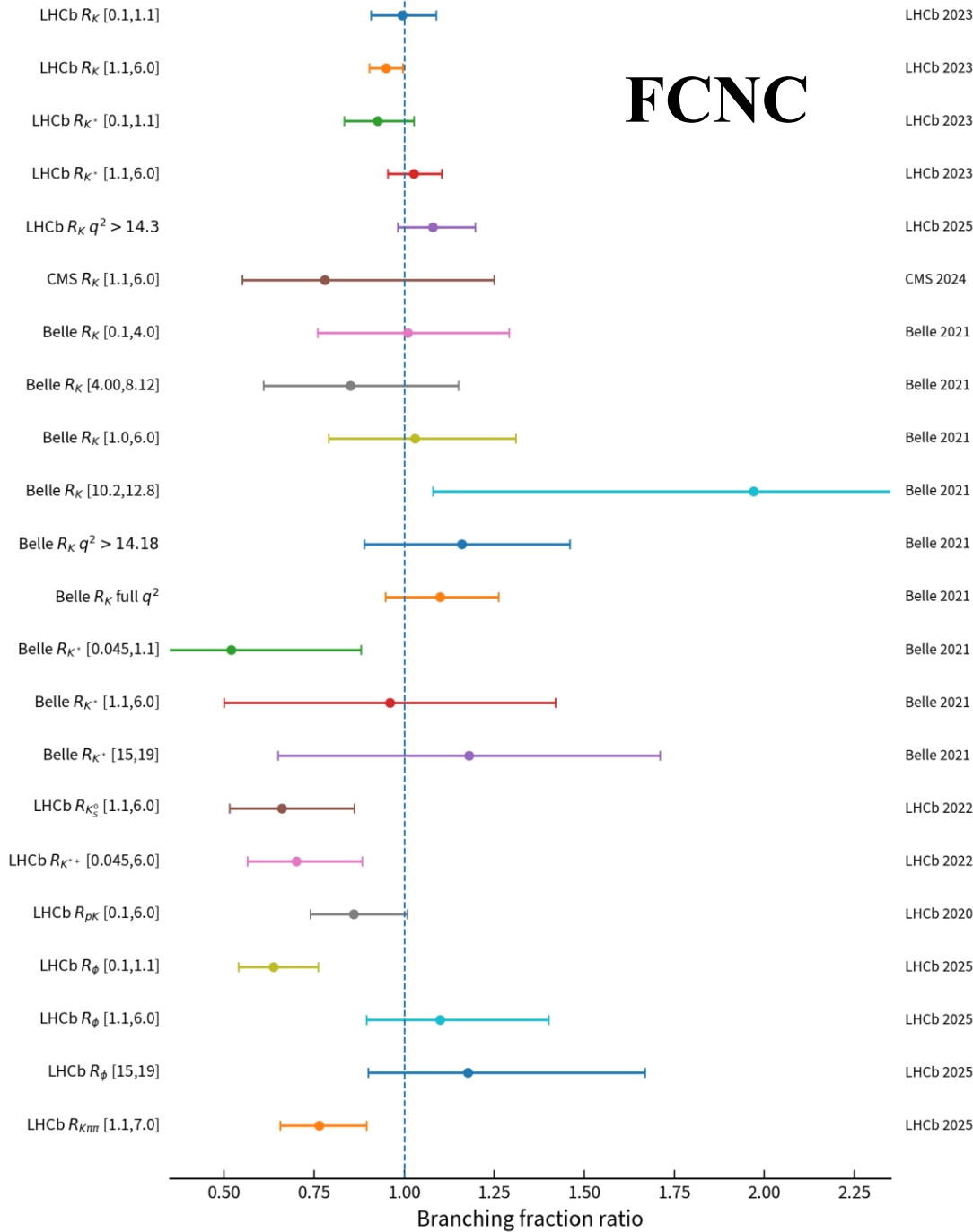
➤ 展望：

- Run 3 更高统计量降低统计误差
- $\tau \rightarrow 3\pi\nu$ 衰变道的互补测量正在进行

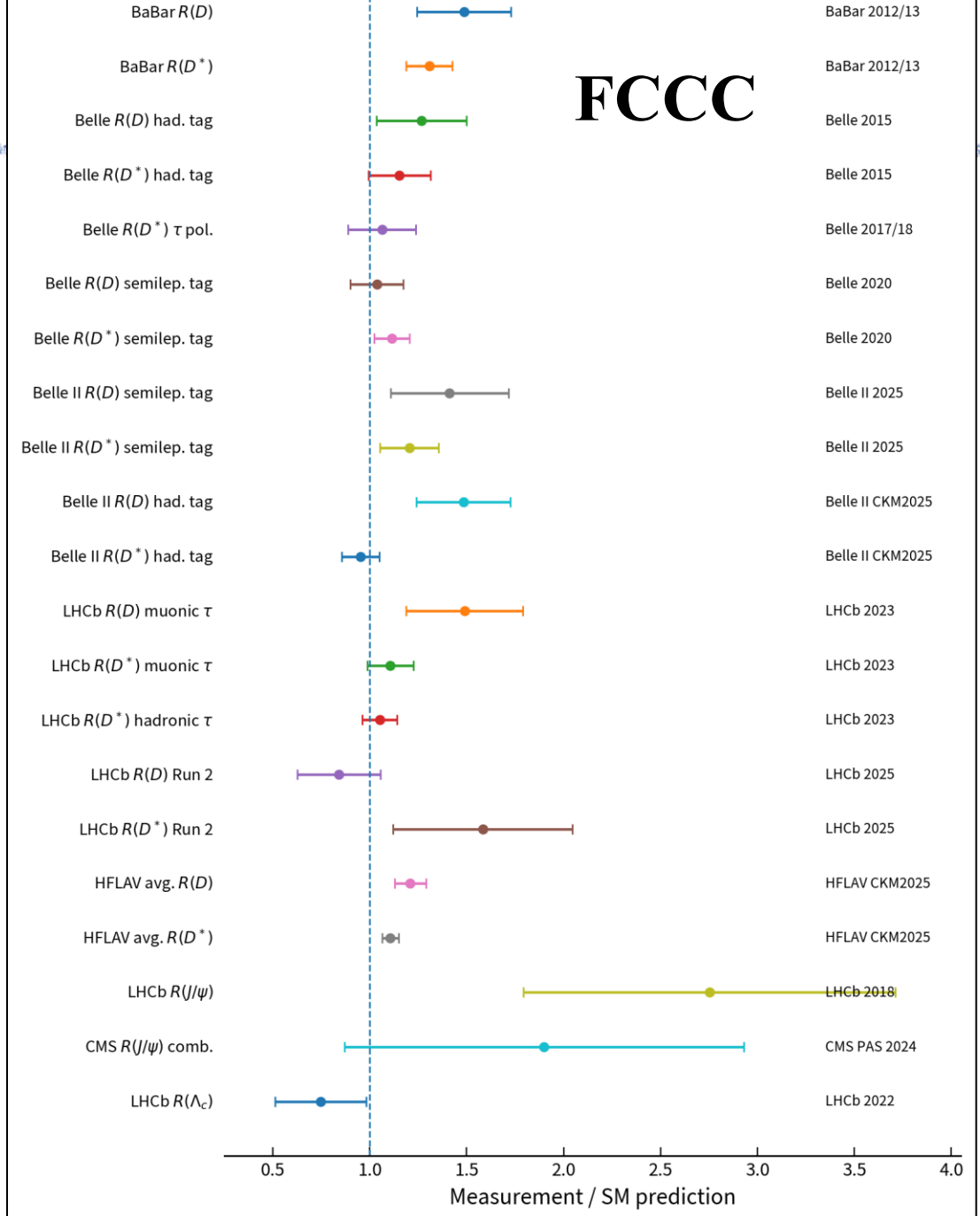


附录

FCNC

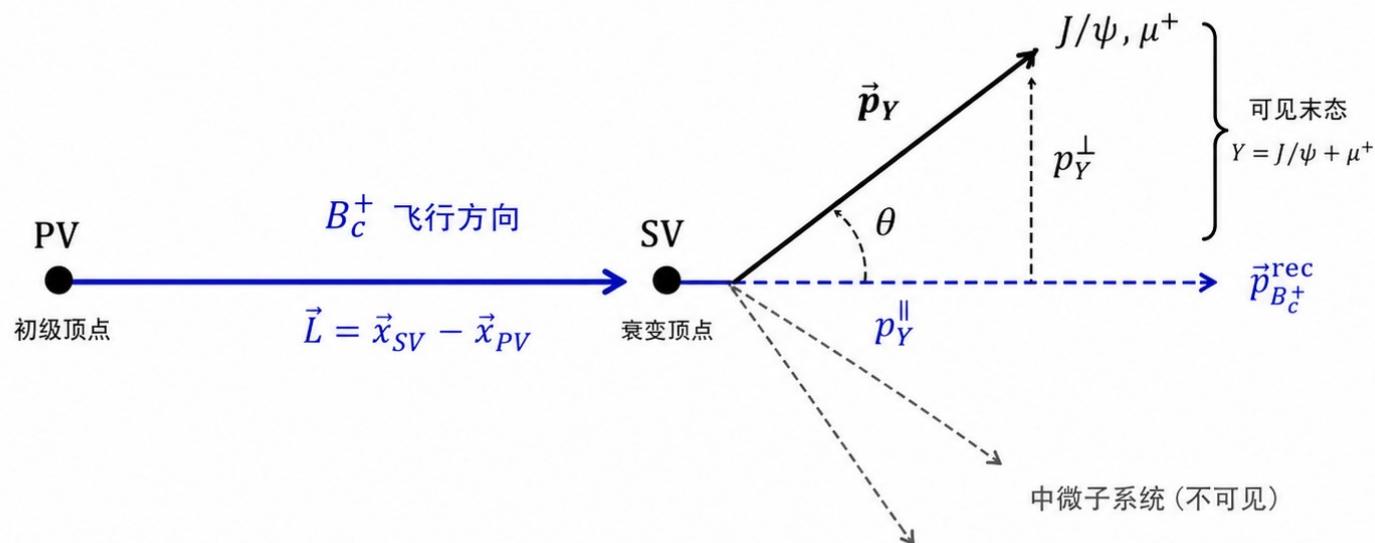


FCCC



部分重建算法

- 核心问题：半轻衰变中含有中微子， B_c^+ 四动量不能被完全重建
- 利用 B_c^+ 从初级顶点到衰变顶点的飞行方向，结合可见末态 $J/\psi\mu^+$ 的动量，近似估计 B_c^+ 动量
- 该近似方法常用于半轻衰变分析中
- 该方法估计精度大致在~17%
- 后续使用 B_c^+ 动量信息，重建
 - 缺失质量平方 (m_{miss}^2)
 - 衰变时间 ($t_{B_c^+}$)
 - 静止系中第三个 μ 的能量 (E_μ^*)
 - 转移四动量 (q^2)



$$p_{est} = \frac{m_{B_c} p_Y^{\parallel}}{\sqrt{M_Y^2 + (p_Y^{\perp})^2}}$$

$$(p_B)_z = \frac{m_B}{m_Y} (p_Y)_z$$

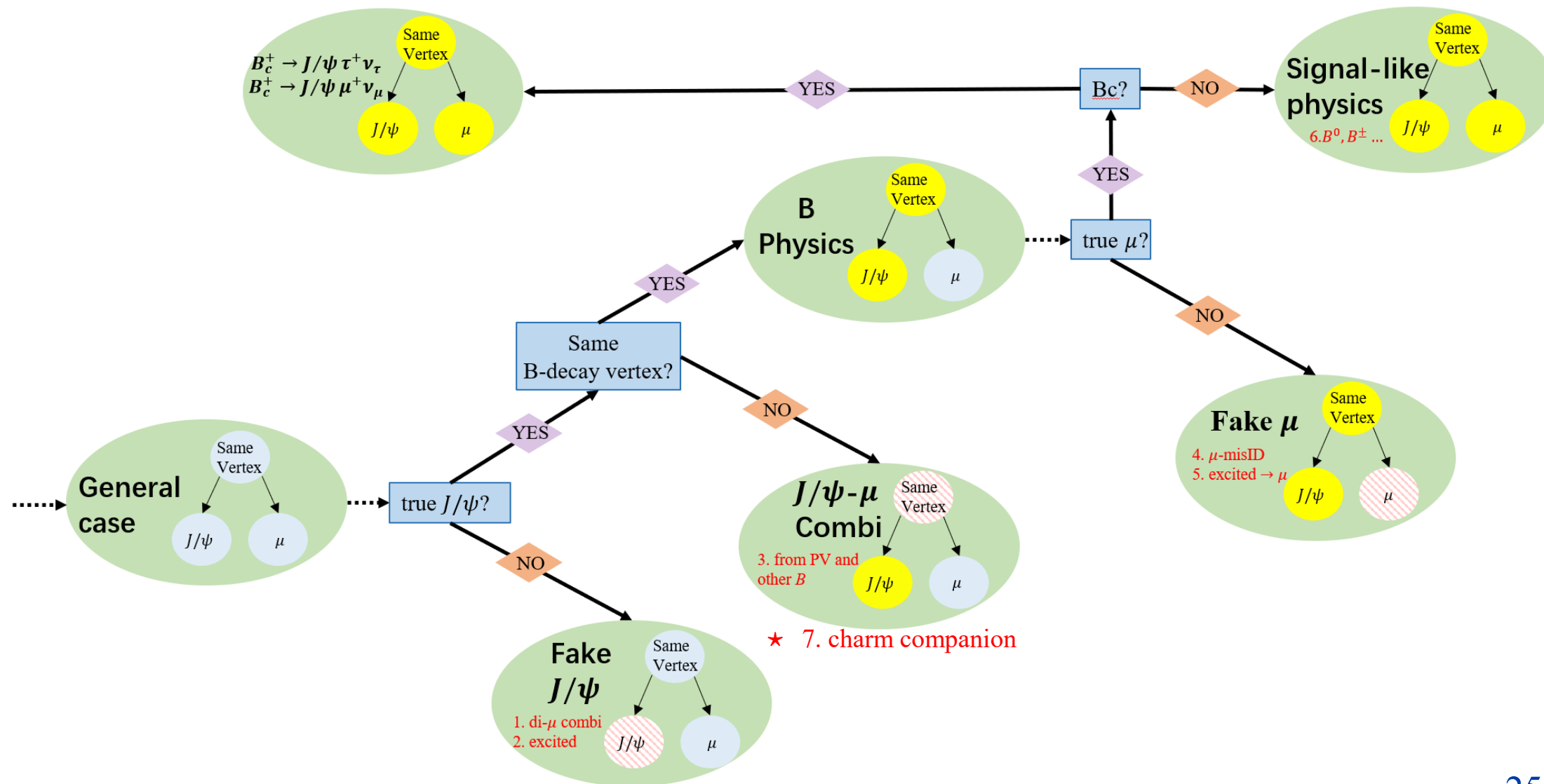
$$|p_B| = \frac{m_B}{m_Y} (p_Y)_z \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$$

系统误差

- 信号道和控制道：形状因子模型
- $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 组合本底：改变模型拟合函数
- Bachelor μ 误鉴别本底
 - 误鉴别成分、效率、DIF形状影响
- $J/\psi \mu^+$ 组合本底：改变误组合模型拟合函数
- 衰变为 J/ψ 的中间过程：不同理论模型
- 衰变为 μ 的中间过程
- 粲伴随本底：改变模型参数
- 模拟样本：样本修正、样本统计量

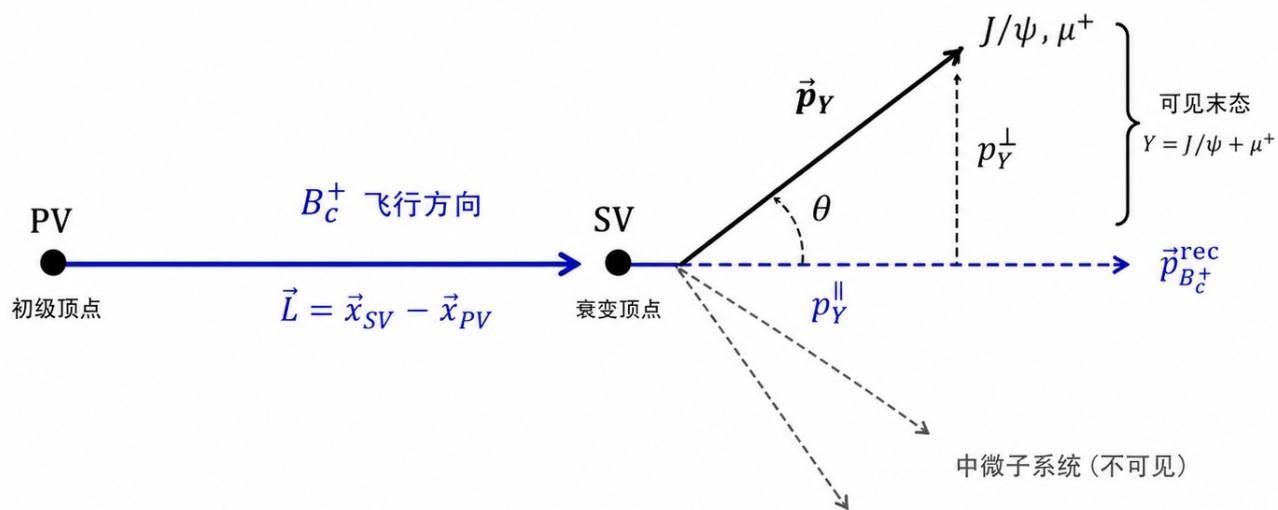
Source of uncertainty on $\mathcal{R}(J/\psi)$	Value ($\times 10^{-2}$)
Simulation statistical uncertainty	5.9
$B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \ell^+ \nu$ modeling	2.6
MisID composition estimation	2.5
Simulation corrections	2.0
$B_c^+ \rightarrow J/\psi \ell^+ \nu$ form factors	1.8
$B_c^+ \rightarrow \chi_c \mu^+ \nu$ scaling	1.5
Efficiency ratio	1.3
Fragmentation background modeling	1.3
MisID decay-in-flight correction	1.1
$(J/\psi \mu^+)$ combinatorial modeling	0.6
MisID decay-in-flight smearing	0.3
$B_c^+ \rightarrow \psi(2S) \ell^+ \nu$ scaling	0.3
$\mathcal{B}(\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau)$	0.2
Trimuon effect	0.1
Systematic uncertainty	7.9
Statistical uncertainty	11.9
Total uncertainty	14.3

本底来源分析



半轻衰变中的部分重建算法

➤ 无法完整重建 B_c^+ 四动量 → 部分重建算法



$$p_{\text{est}} = \frac{m_{B_c} p_Y^\parallel}{\sqrt{M_Y^2 + (p_Y^\perp)^2}} \quad (p_B)_z = \frac{m_B}{m_Y} (p_Y)_z \quad |p_B| = \frac{m_B}{m_Y} (p_Y)_z \sqrt{1 + \tan^2 \theta}$$

- 衰变过程的可见末态完全相同 → 模板拟合
 - 误鉴别强子基数大
 - 双粲本底与信号一致性
 - 形状因子影响模板形状 → Hammer工具
- 数据驱动约束本底
- 使用 B_c^+ 动量信息, 重建拟合变量
 - 缺失质量平方 (m_{miss}^2)
 - 衰变时间 ($t_{B_c^+}$)
 - 静止系中第三个 μ 的能量 (E_μ^*)
 - 转移四动量 (q^2)

拟合变量

➤ 缺失质量平方

- 归一化道：主要集中在 0 附近
- 信号道：因 3 个中微子而向较大正值展宽

$$m_{\text{miss}}^2 = \left(p_{B_c^+}^{\text{rec}} - p_{J/\psi} - p_{\mu} \right)^2$$

➤ 衰变时间

- 区分信号与其他重味强子衰变本底

$$t_{B_c^+} = \frac{m_{B_c^+} L}{c \left| \vec{p}_{B_c^+}^{\text{rec}} \right|}$$

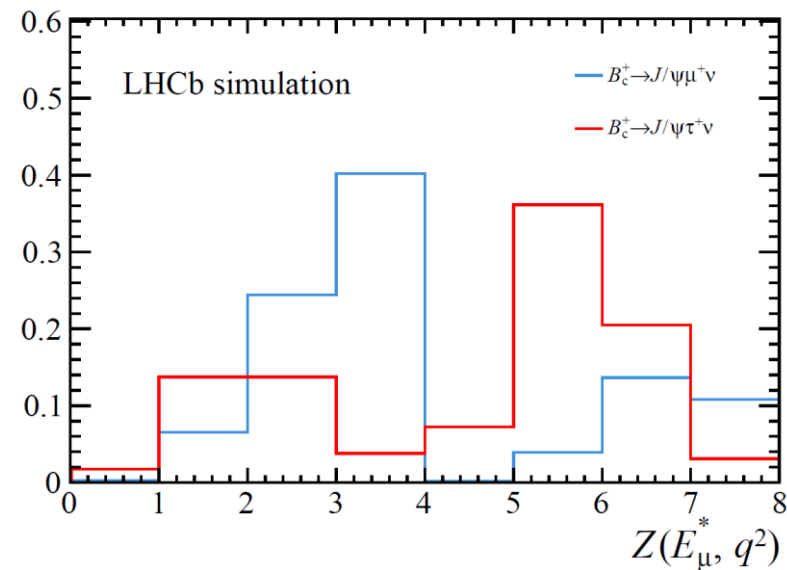
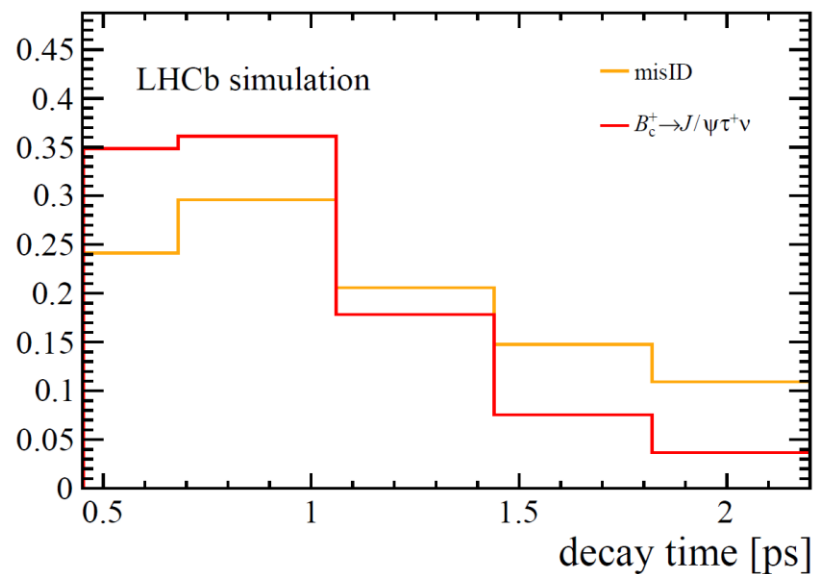
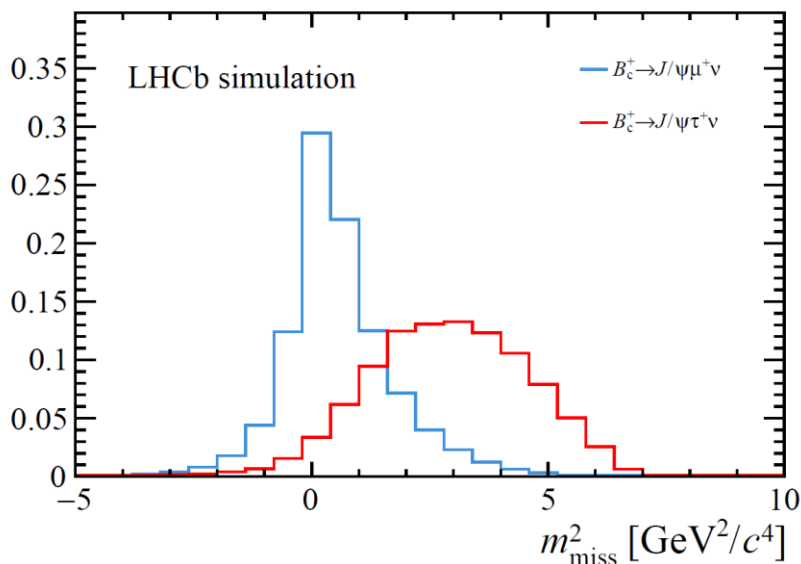
$$L = |\vec{x}_{\text{SV}} - \vec{x}_{\text{PV}}|$$

➤ 静止系中第三个 μ 的能量

$$E_{\mu}^* = \frac{p_{B_c^+}^{\text{rec}} \cdot p_{\mu}}{m_{B_c^+}}$$

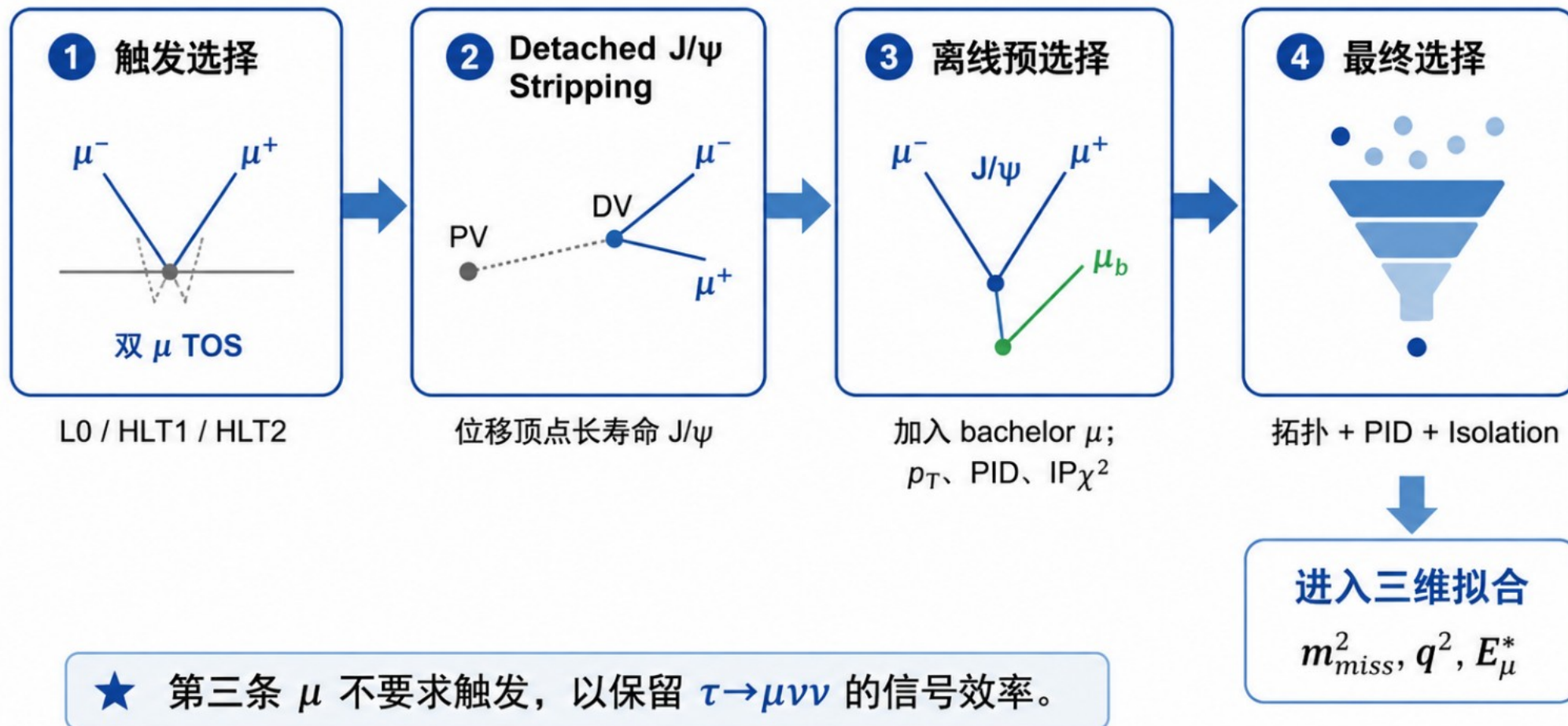
➤ 转移四动量

$$q^2 = \left(p_{B_c^+}^{\text{rec}} - p_{J/\psi} \right)^2$$



事例选择

➤ 核心目标：保持信号效率的同时，有效控制组合本底、误鉴别本底和拟合不稳定区域。



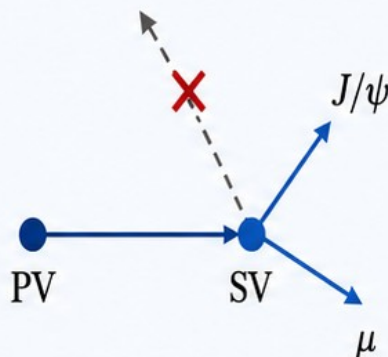
高阶本底压制



1. 部分重建 / 双粲本底

$$\text{Isolation BDT} < 0.2$$

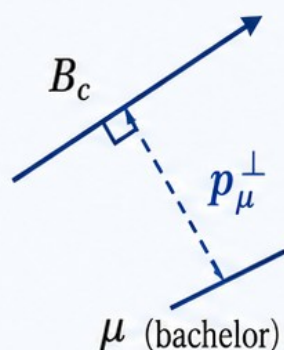
作用：压制伴随额外带电径迹的
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi H_c X$ 和
 $B_c^+ \rightarrow J/\psi (n\pi) \mu \nu$ 本底



2. 组合本底 / 碎裂伴随粲本底

$$t_{Bc} > 0.45 \text{ ps} \cdot \text{DIRA} > 0.9998 \cdot \\ \text{DOCA} \in [-0.13, 0.05] \text{ mm}$$

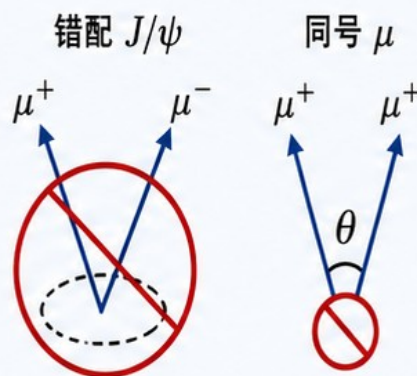
作用：去除短寿命、错误飞行方向和
空间不相容的 $J/\psi + \mu$ 组合



3. mis-ID 本底

$$p_\mu^\perp > 500 \text{ MeV}/c$$

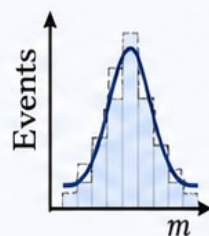
作用：抑制 $J/\psi h^+$ 中 h^+
被误鉴别为 bachelor μ 的贡献



4. 误配对与拟合区域控制

$$\text{错配 } J/\psi \text{ veto} \cdot \text{同号 } \mu \text{ 夹角 veto} \cdot \\ m_{\text{miss}}^2 > -5 \text{ GeV}^2/c^4$$

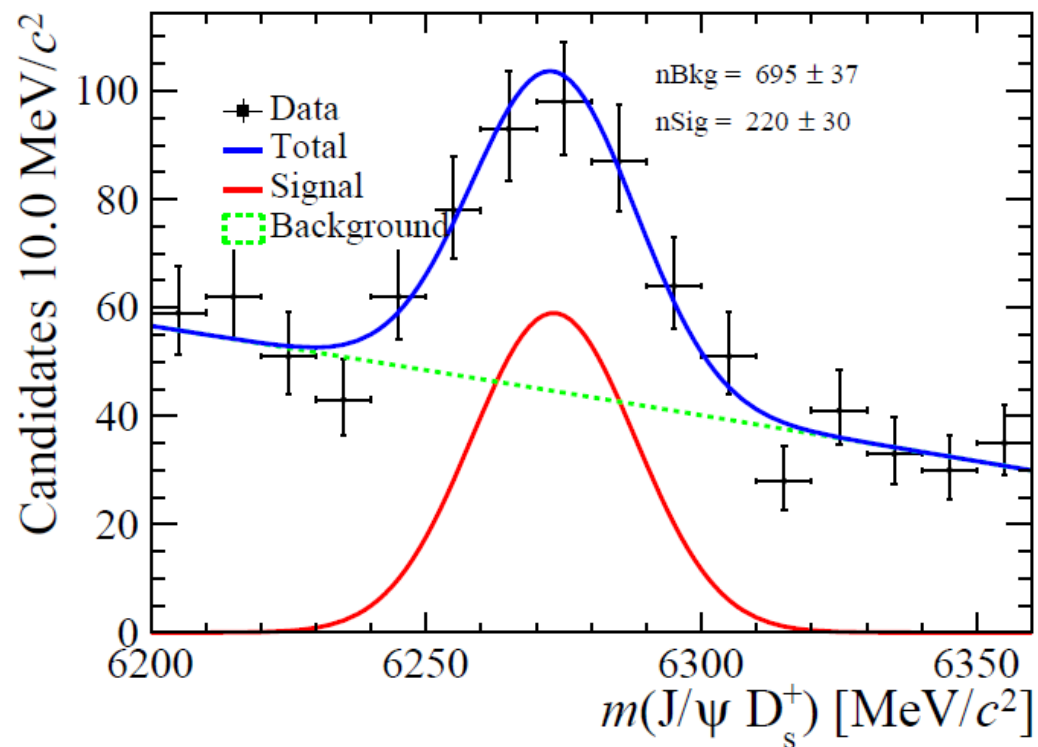
作用：去除假三 μ 候选，并提高
最终三维模板拟合稳定性



双粲本底拟合固定

➤ $J/\psi D_s^+ Y$ ($Y = 0$ or $Y = \gamma$ from D_s^{*+})

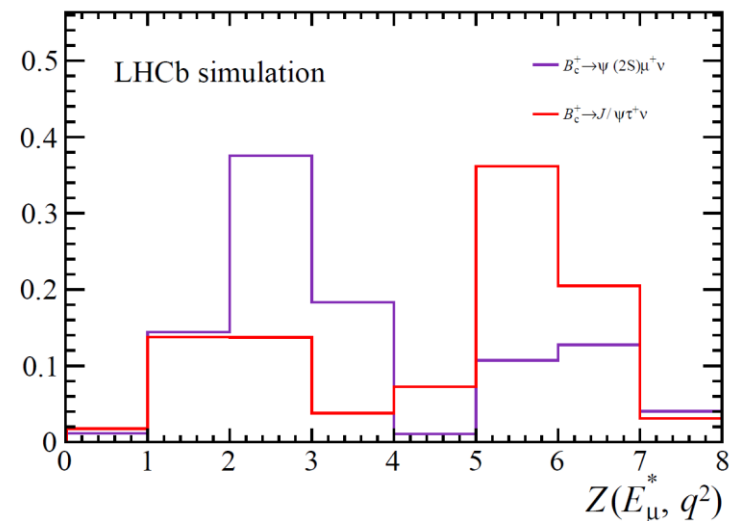
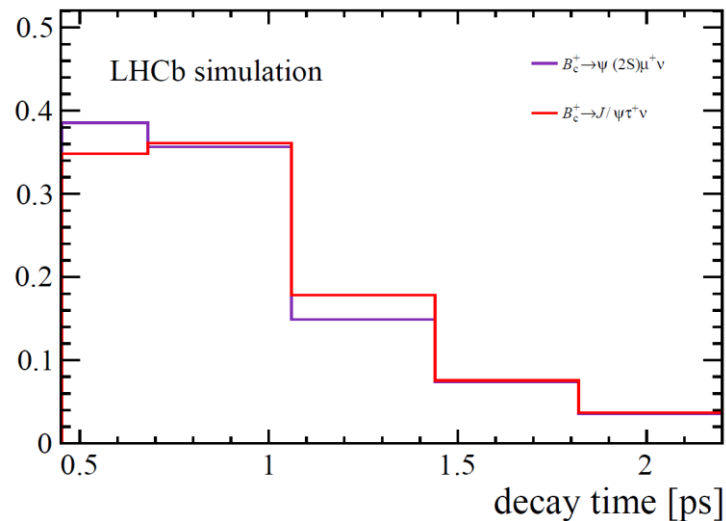
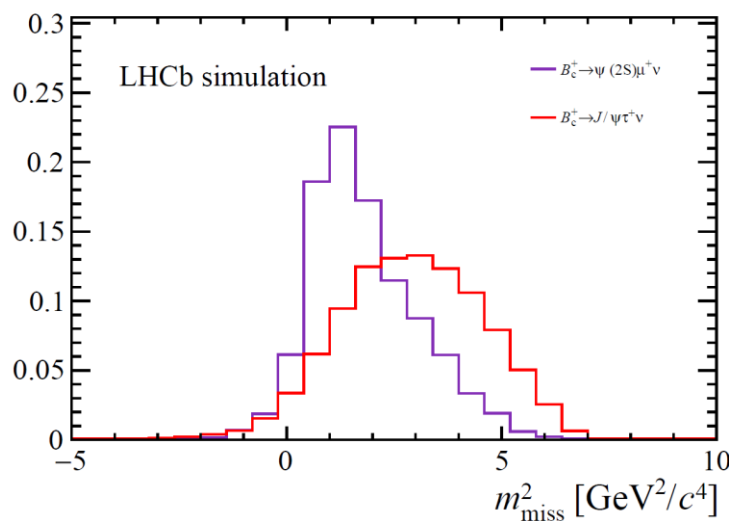
	2016	2017	2018
$B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+ Y$	44 ± 5	40 ± 5	54 ± 7



- 目标产额，在拟合中作为高斯约束的中心值
- 不使用该方法，该成分与信号过程相关度高达~95%
- 通过该方法，最高的相关度为~4.5%

粲激发态本底

- $\psi(2S)$ 、 χ_{c1} 、 χ_{c2} 等激发态可通过衰变进入 $J/\psi\mu$ 样本
- 使用理论分支比输入 $\times$ MC 相对效率，对 feed-down 本底产额进行数值交叉检查
 - $$\frac{N(B_c^+ \rightarrow H_c \ell^+ \nu_\ell)}{N(B_c^+ \rightarrow J\psi \mu^+ \nu_\mu)} = \frac{B(B_c^+ \rightarrow H_c \ell^+ \nu_\ell) \times \varepsilon(B_c^+ \rightarrow H_c \ell^+ \nu_\ell)}{B(B_c^+ \rightarrow J\psi \mu^+ \nu_\mu) \times \varepsilon(B_c^+ \rightarrow J\psi \mu^+ \nu_\mu)},$$
- 在拟合中直接用理论估计的产额，并且施加 log-normal 约束



组合本底

➤ J/ψ 组合本底

- 上侧带选取控制样本来描述形状
- 质量谱拟合估计其在信号区内的产额
- 同时去掉 mis-ID 样本中重复计算的部分

➤ $J/\psi + \mu$ 组合本底

- Inclusive MC 构建模板，归一化比例由重味强子产生率约束
- 尝试了event mixing的办法
- 尝试了rotation的办法，都因为对寿命的重建不完整导致失败