

稀有衰变 $B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 的实验寻找

[JHEP 05 (2022) 067]

王艺龙, 谢跃红

23.09.2022

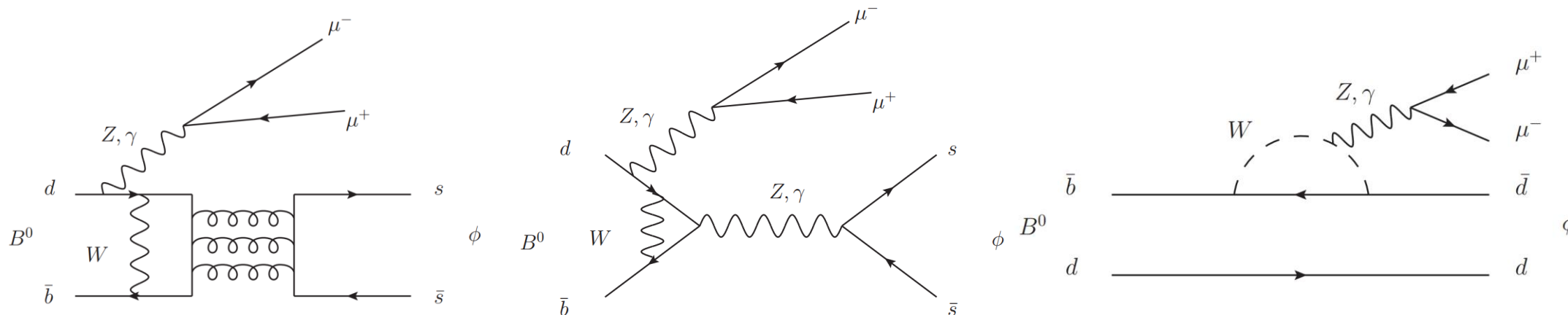
目录

- 研究动机
- LHCb实验
- 分析策略
 - 数据样本
 - 初选和多变量分析
 - 本底研究
 - 质量拟合
 - 系统误差和结果
- 总结

研究动机

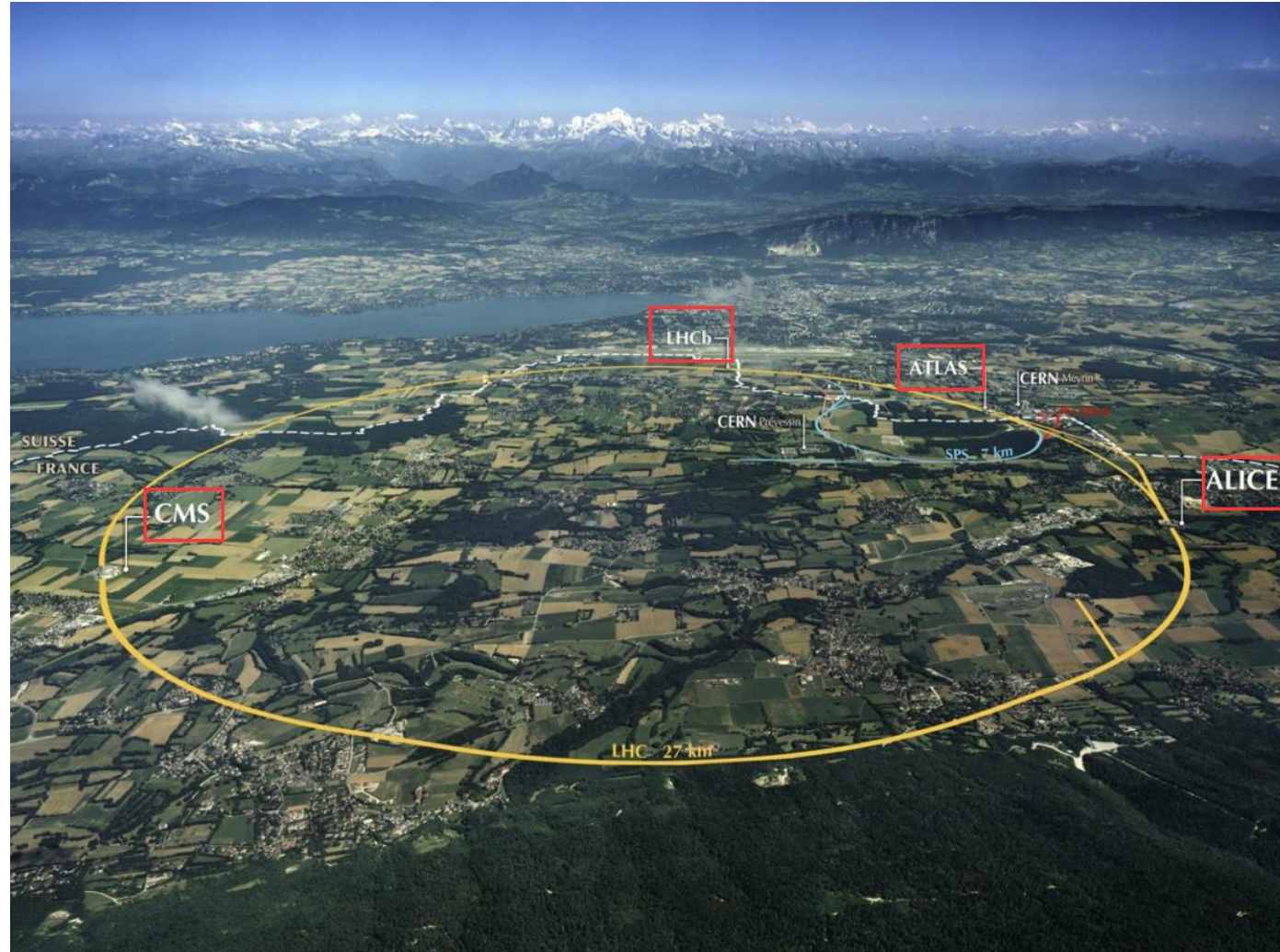
□ $B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 衰变是一个对新物理敏感极其稀有的过程

- 当色压低的企鹅湮灭圈图为主导时，基于 QCD 因子化的方法的理论计算预言 $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-) \sim 10^{-12}$ [A. Kuznetsova et al. EPJ Web Conf. 158 (2017) 03003]
- 考虑 $\omega - \phi$ 混合机制时， $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-) \sim 10^{-11} - 10^{-10}$ [H. Deng et al. Phys. Rev. D103 (2021) 076004]
- 考虑新粒子 Z' 的贡献时， $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-)$ 将会有显著提升 [X.-q. Li et al. E. P. J. C36 (2004) 97, J.Hua. E. P. J. C69 (2010) 139]
- 目前实验上没有对 $B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 衰变的测量结果，**首次**对稀有衰变 $B^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 进行寻找



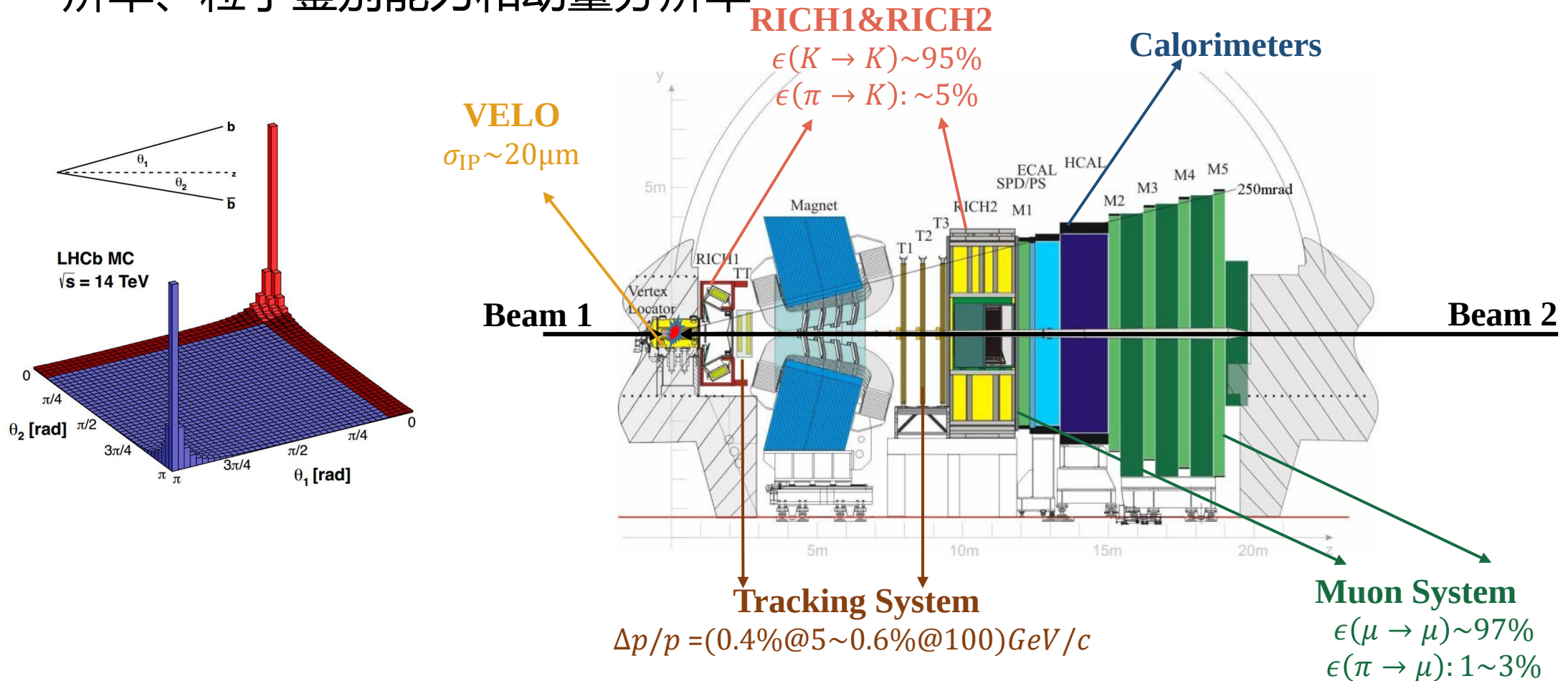
大型强子对撞机(LHC)

□ 世界上能量最高的对撞机



LHCb 探测器

- LHCb 探测器覆盖的快度区间 $2 < \eta < 5$ ，出众的顶点位置分辨率、固有时间分辨率、粒子鉴别能力和动量分辨率



分析策略

- 通过事例筛选和多变量分析方法中的增强决策树(BDT) 来保留信号、压低本底
- 采用 $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ 衰变作为归一化道, 利用 $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ 衰变的数据样本作为多变量分析方法训练的信号样本和确定信号模型的参数

$$\square \mathcal{R} = \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)} = \frac{f_s}{f_d} \times \frac{\epsilon(B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)}{\epsilon(B^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)} \times \frac{N_{B^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-}}{N_{B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-}}$$

$$\square \mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-) = \mathcal{R} \times \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)$$

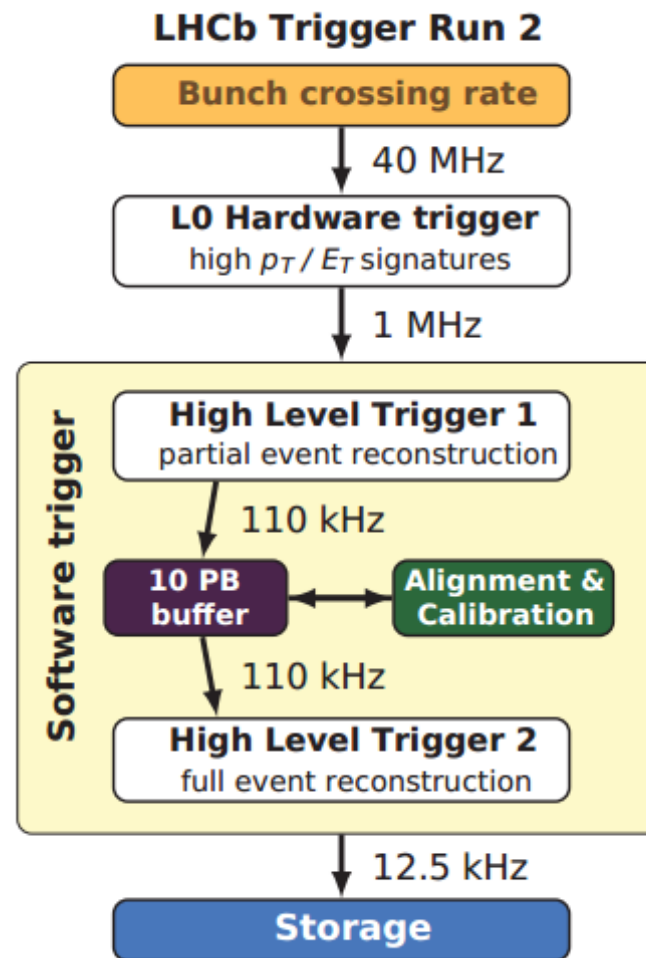
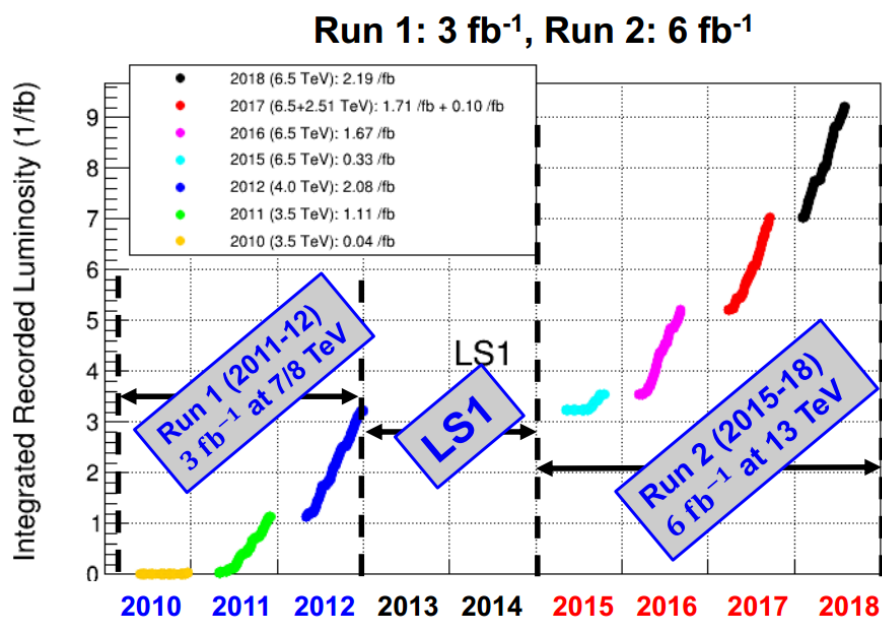
当前数据

□ 数据样本

- Run 1 + Run 2, 9fb^{-1}

□ 触发系统

- L0(硬件触发) + HLT1, 2(软件触发)



模拟数据

Decay model	Decay file	Events
$B_s \rightarrow \phi \mu \mu$	13114006	(1+2+0.6+3+3+3)M
$B^0 \rightarrow \phi \mu \mu$	11114017	(2+2+2+2+2+2)M
$B_s \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu$	13574092	(1+1+1+1+1+1)M
$B^0 \rightarrow K^* \mu \mu$	11114002	(3.5+4+2+4+4+4)M
$B_s \rightarrow J/\psi \phi$	13144001&&13144011	(2+2+4+10+4+4)M
$\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$	15144001	(1+3+1.5+10+12+10)M
$\Lambda_b \rightarrow p K^- \mu \mu$	15114011	(4+2+8+7+2+4)M

事例筛选

□ 触发判选

Level	Run1 Line	Run2 Line
L0	L0Muon TOS L0DiMuon TOS	L0Muon TOS L0DiMuon TOS
HLT1	Hlt1TrackAllL0 TOS Hlt1TrackMuon TOS Hlt1DiMuonLowMass TOS Hlt1DiMuonHighMass TOS Hlt1SingleMuonHighPT TOS	Hlt1TrackMVA, Hlt1TwoTrackMVA TOS Hlt1TrackMuon TOS Hlt1DiMuonLowMass TOS Hlt1DiMuonHighMass TOS Hlt1SingleMuonHighPT TOS
HLT2	Hlt2Topo(2,3,4)BodyBBDT TOS Hlt2TopoMu(2,3,4)BodyBBDT TOS Hlt2SingleMuon TOS Hlt2DiMuonDetached TOS Hlt2DiMuonDetachedHeavy TOS	Hlt2Topo(2,3,4)Body TOS Hlt2TopoMu(2,3,4)Body TOS Hlt2SingleMuon TOS <i>Hlt2DiMuonDetached</i> ^{2017/18} TOS Hlt2DiMuonDetachedHeavy TOS

事例筛选

□ 粒子重建和预选

- B2XMuMu

Variable	Stripping value
$B_{(s)}^0 \chi_{vtx}^2/\text{ndf}$	< 8
$B_{(s)}^0 \chi_{IP}^2$	< 16
$B_{(s)}^0 \text{ DIRA}$	> 0.9999
$B_{(s)}^0 \chi_{FD}^2$	> 121
$m_{B_{(s)}^0}$	$4900 \text{ MeV} < m_{B_{(s)}^0} < 7000 \text{ MeV}$
m_ϕ	$0 \text{ MeV} < m_\phi < 6200 \text{ MeV}$
$\phi \chi_{FD}^2$	> 9
$\phi \chi_{vtx}^2/\text{ndf}$	< 12
$m_{\mu^+\mu^-}$	$< 7100 \text{ MeV}$
$\mu^+\mu^- \chi_{vtx}^2/\text{ndf}$	< 12
$\mu^+, \mu^- DLL_{\mu\pi}$	$> -3^*$
$\mu^+, \mu^- \text{ isMUON}$	$true^*$
tracks min χ_{IP}^2	> 9
tracks ghost Prob	< 0.4

事例筛选

□ 初选

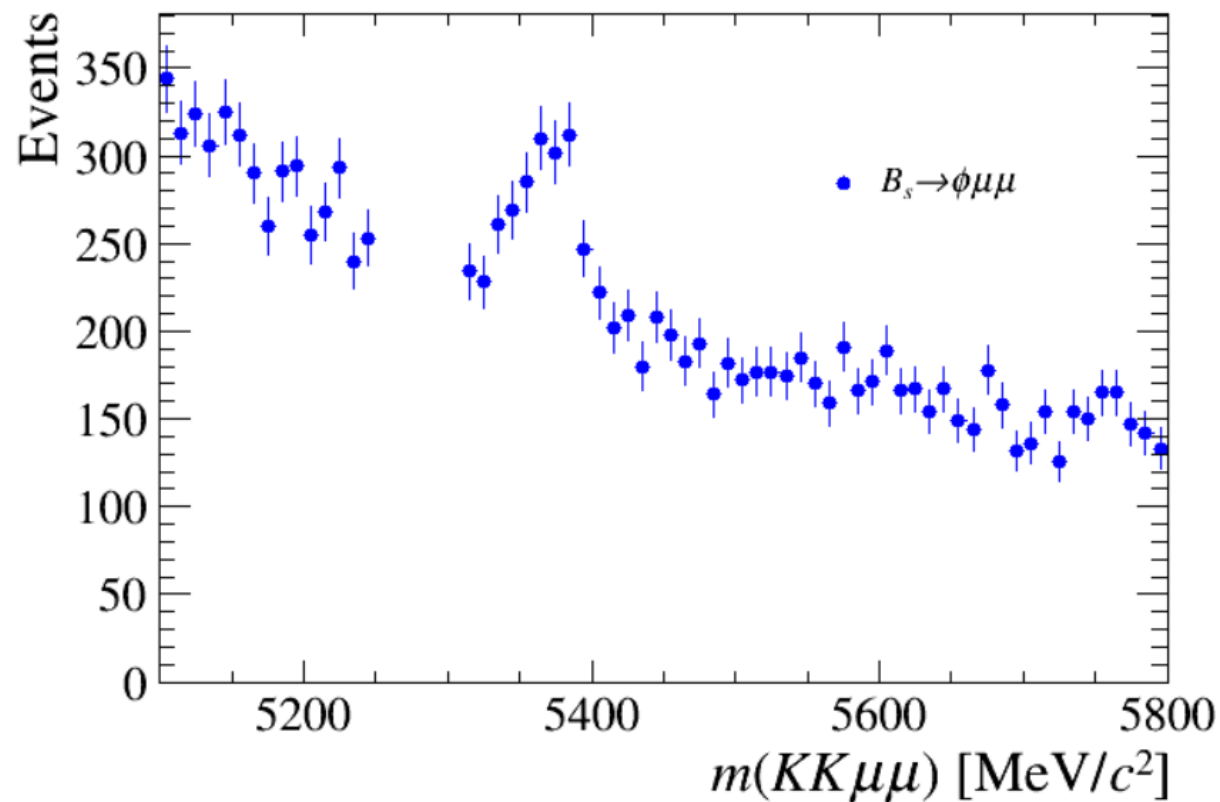
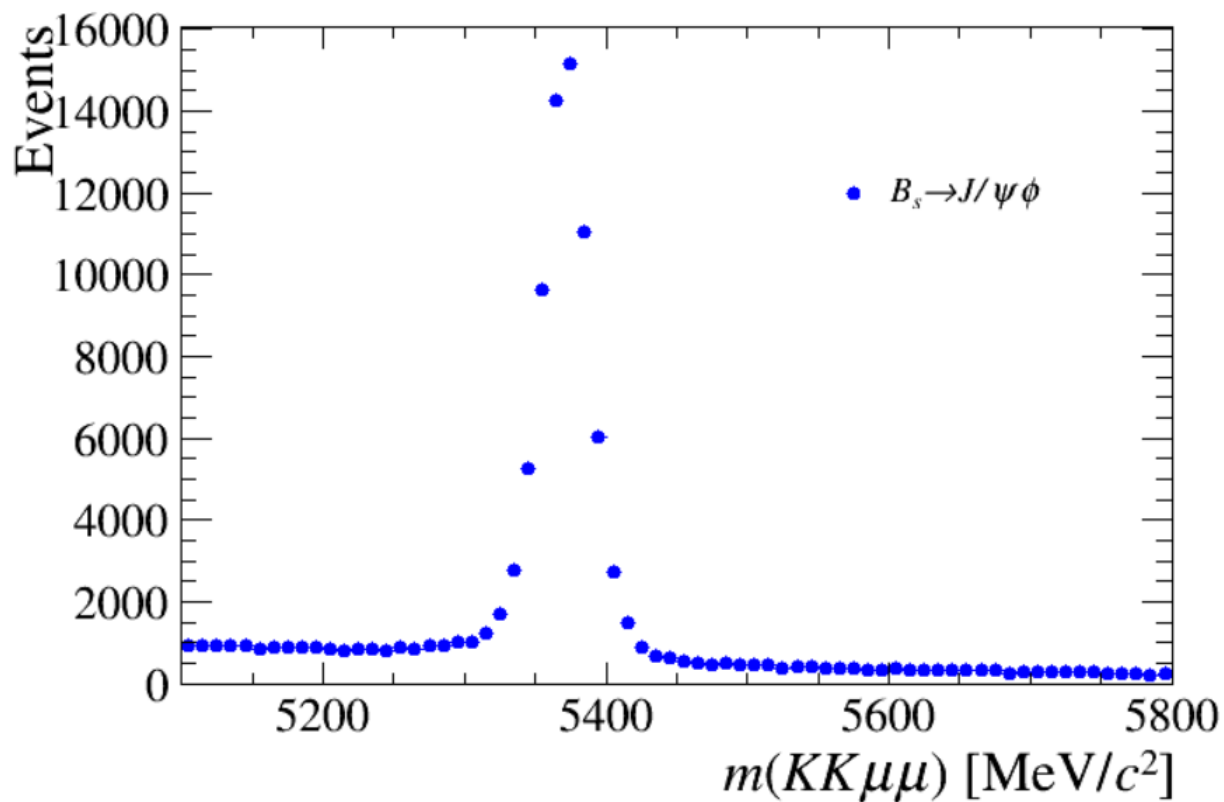
Variable	Cut value
B_s	$5100\text{MeV} < m_{B_s} < 5800\text{MeV}$
ϕ	$ m_\phi - 1019.461 < 12\text{MeV}$
K^+, K^-	$\text{PIDK} > -3$

□ 利用PID和质量窗的选择来压低特定的本底

$ m(\mu^-, K^+ \text{ as } \mu^+) - 3096.916 $ for $isMuon(K^+)$ or $PIDmu(K^+) > 5$ ($J/\psi\phi \rightarrow KK\mu\mu$ double Mis-ID)	$< 45\text{MeV}$
$ m(\mu^-, \mu^+, K^-, K^+ \text{ as } p^+) - 5620 $ for $(PIDp - PIDK)(K^+) > 10$ ($\Lambda_b^0 \rightarrow pK\mu\mu$)	$< 50\text{MeV}$

不变质量分布

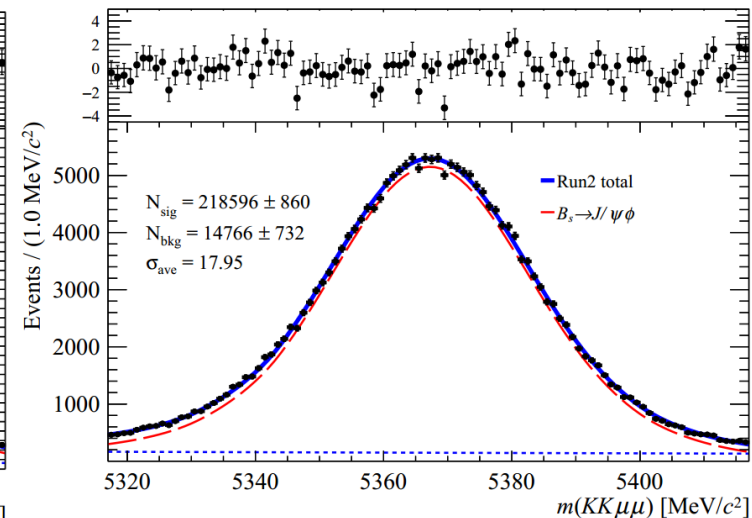
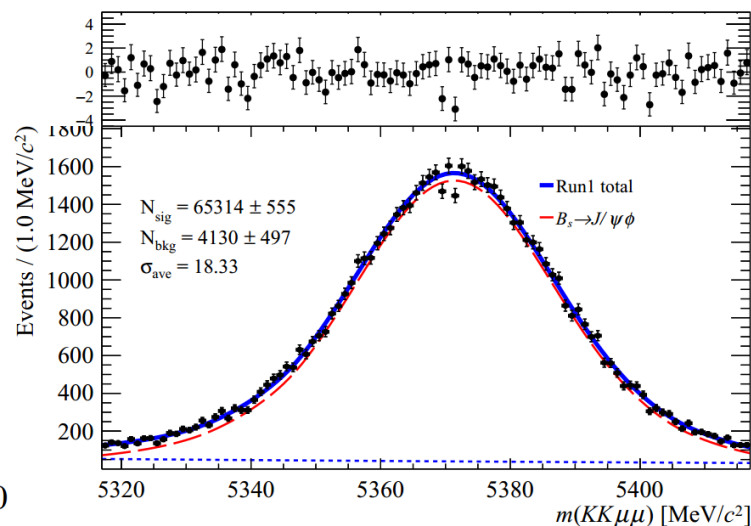
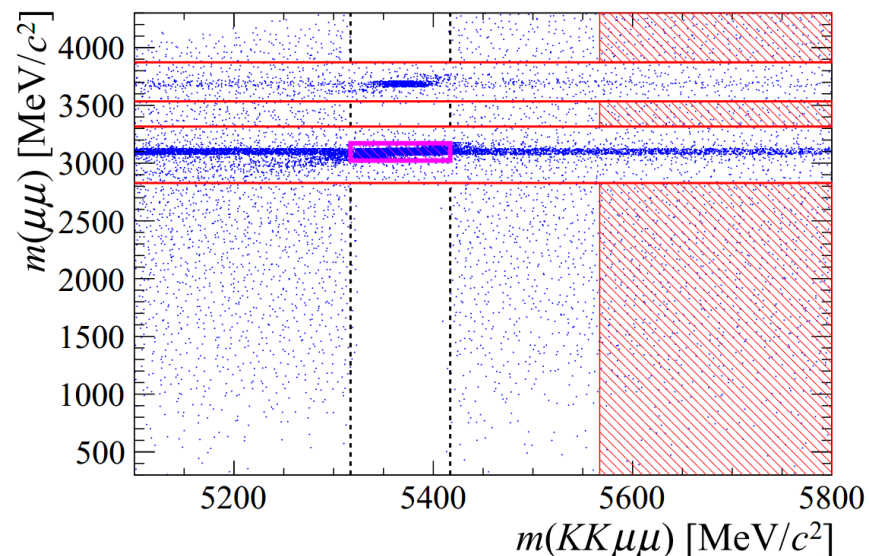
□ $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ 和 $B_s^0 \rightarrow \phi\mu^+\mu^-$ 的不变质量分布



BDT训练样本

□ 信号: $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ 衰变的数据样本

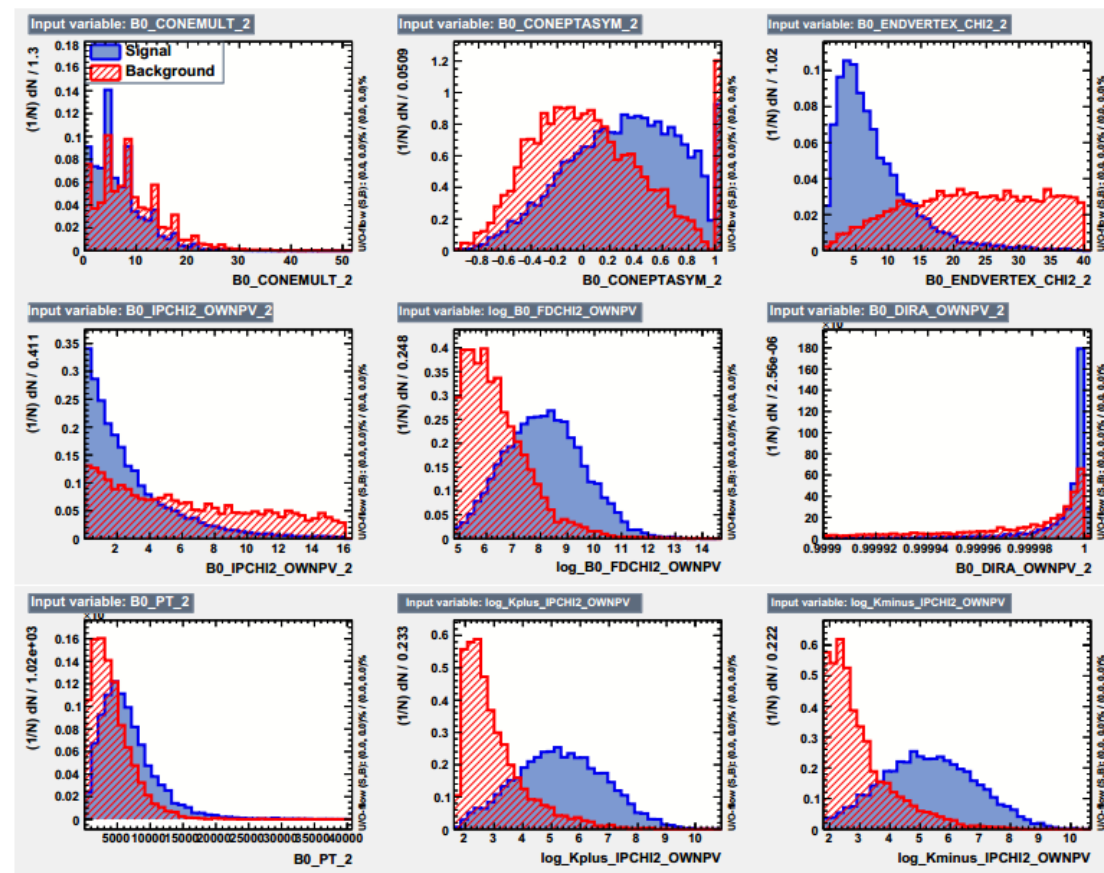
□ 本底: B_s^0 不变质量的高端区域不包括共振态 J/ψ 和 $\psi(2S)$



BDT训练输入变量

□ 能够较好地区分信号和本底

B_s^0	锥角内的粒子多重数(CONEMULT) 锥角内的横动量不对称信息(CONEPTASYM) 衰变顶点的卡方值(χ_{vtx}^2) 碰撞参数的卡方值(χ_{IP}^2) 飞行距离的卡方值(χ_{FD}^2) 角度 (θ_{DIRA}), 横动量(p_T)
$K^\pm, \mu^\pm$	碰撞参数的卡方值(χ_{IP}^2) 粒子鉴别信息(ProbNN)



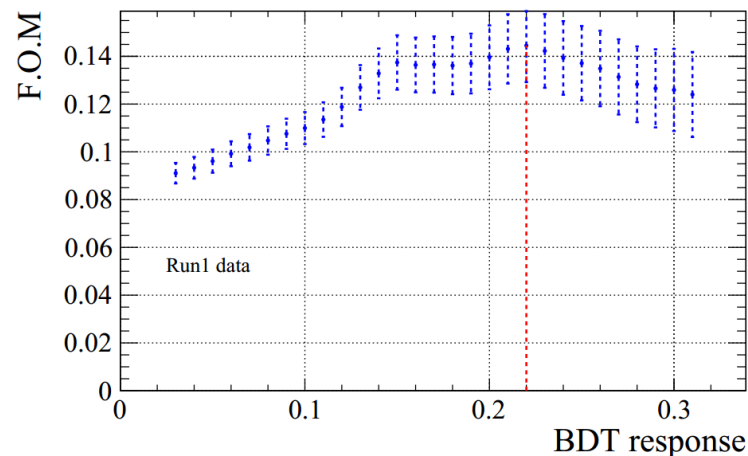
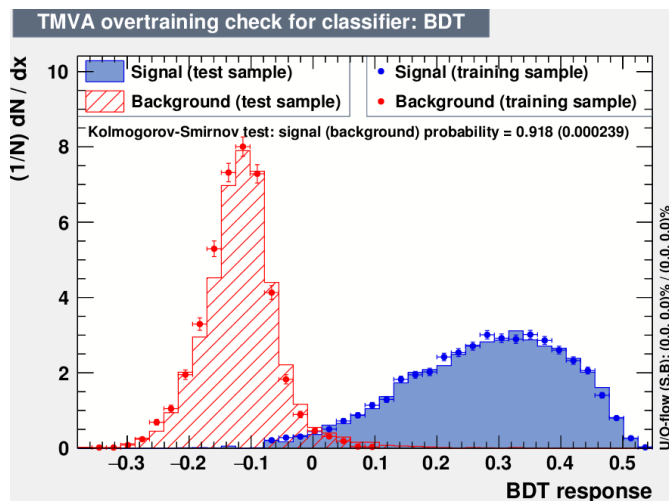
Run 1

BDT输出和选择优化

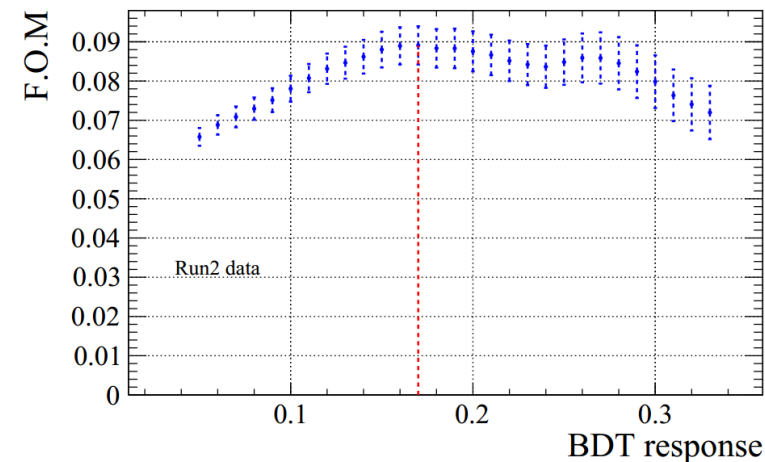
□ 不存在过度训练

□ 优化公式 FOM: $\epsilon / (\frac{a}{2} + \sqrt{B})$

- ϵ : 信号效率
- a : 取为3, 以寻找新的衰变证据为目标
- B : 在 B^0 信号区间[5249, 5309] 估计的本底数目



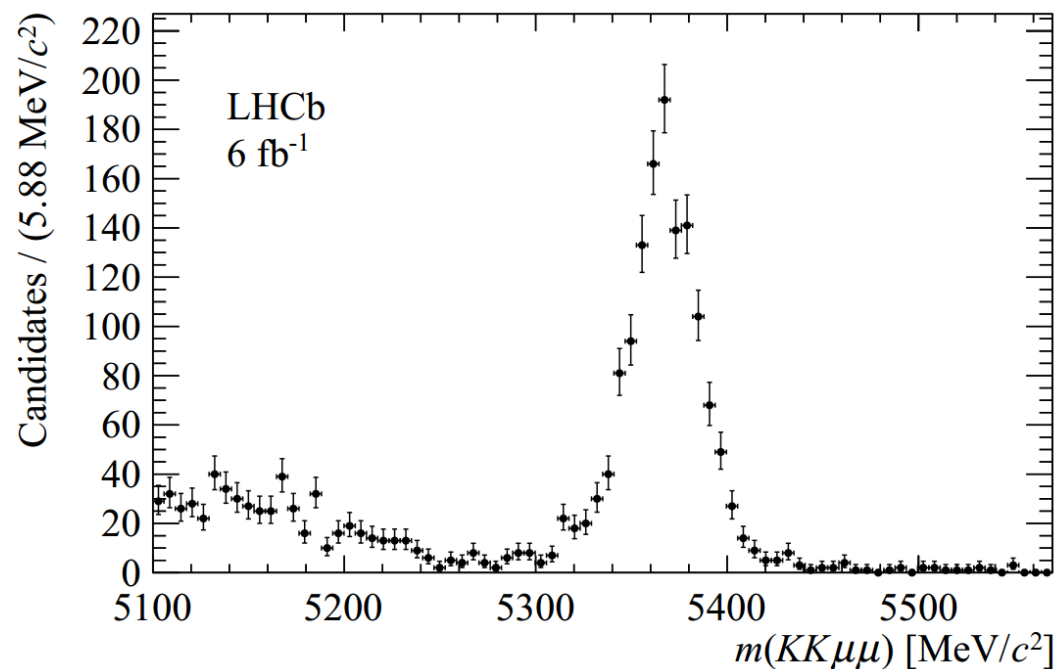
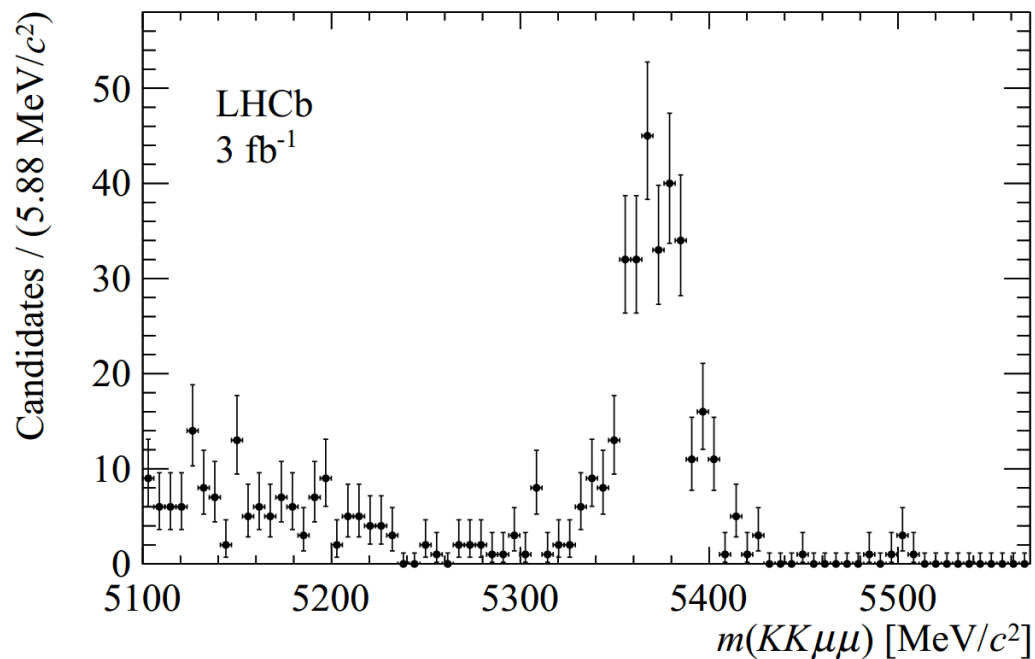
0.22



0.17

$B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 不变质量分布

□ Run 1 和Run 2的不变质量分布

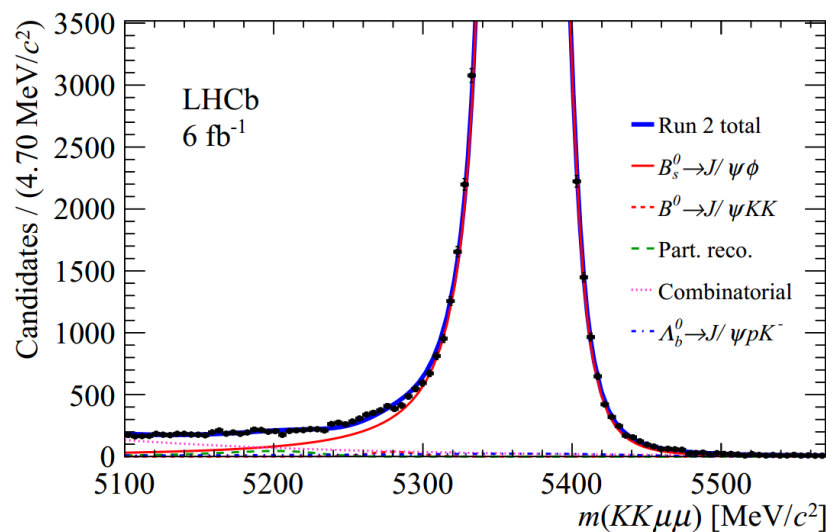
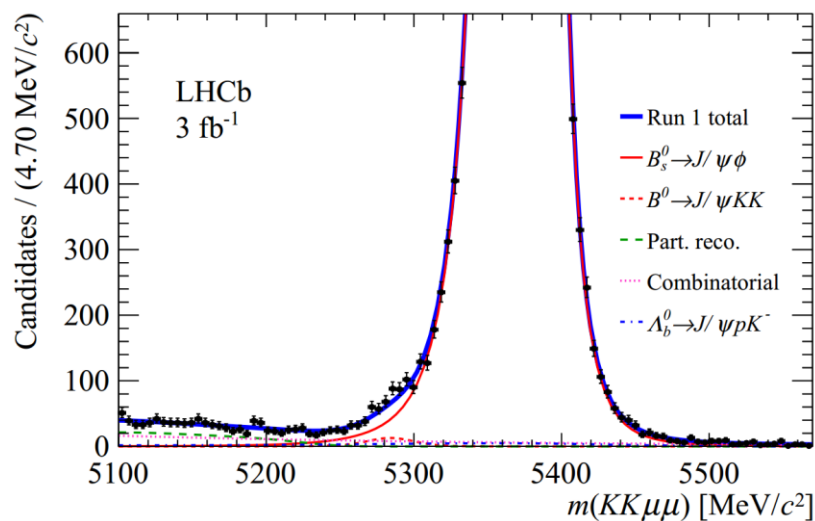


$B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 信号形状的确定

▣ $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ 信号: 双边Hypatia函数 (B_s^0 信号和 B^0 信号)

▣ $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ 本底:

- 部分重建本底: $\text{Argus}(x; \mu - m_{\pi^0}, c) \otimes \text{Gaussian}(x; 0, \sigma_{\text{signal}})$
- 组合本底: 指数函数
- 误鉴别本底: $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K^-$ 的形状由模拟样本确定 & n_{Λ_b} 固定



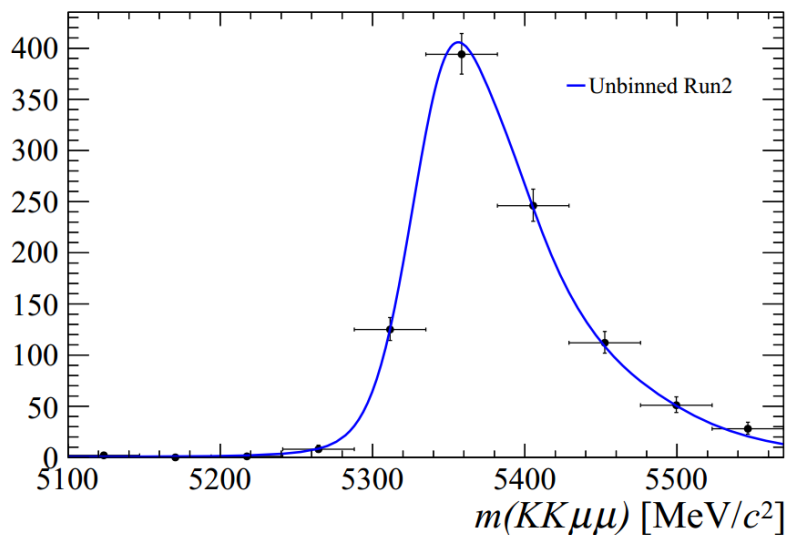
没有 J/ψ 质量限制

确定 $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 信号模型的尾巴参数

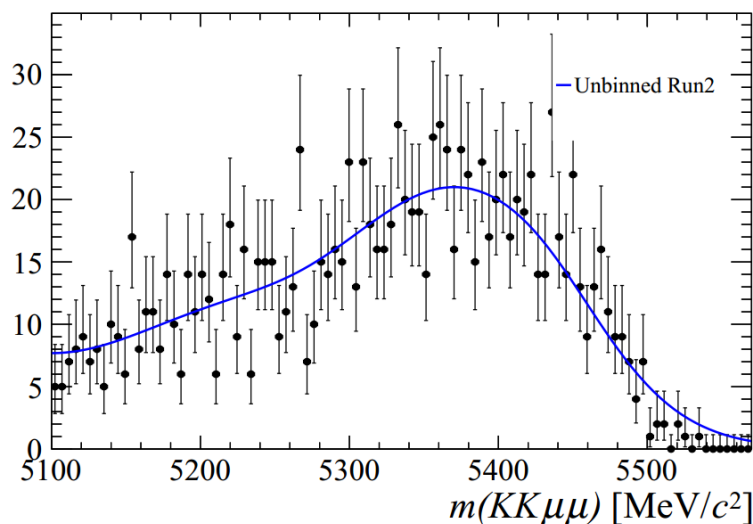
$B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$ 特定本底的确定

▣ $B^0 \rightarrow K^{*0}(\rightarrow K^+ \pi^-) \mu^+ \mu^-$, $\Lambda_b \rightarrow p K^- \mu^+ \mu^-$ 和 $B_s^0 \rightarrow D_s^- (\rightarrow \phi \mu^- \bar{\nu}) \mu^+ \nu$

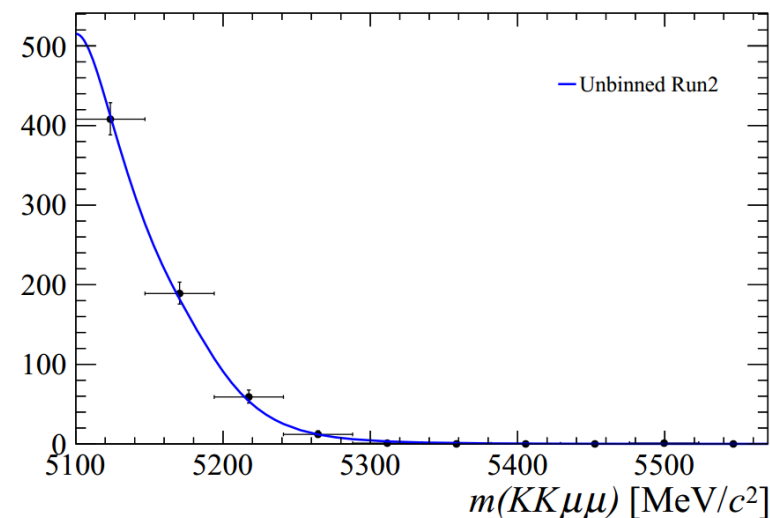
- 采用 RookeysPdf 通过模拟数据的样本抽取形状



$B^0 \rightarrow K^{*0}(\rightarrow K^+ \pi^-) \mu^+ \mu^-$



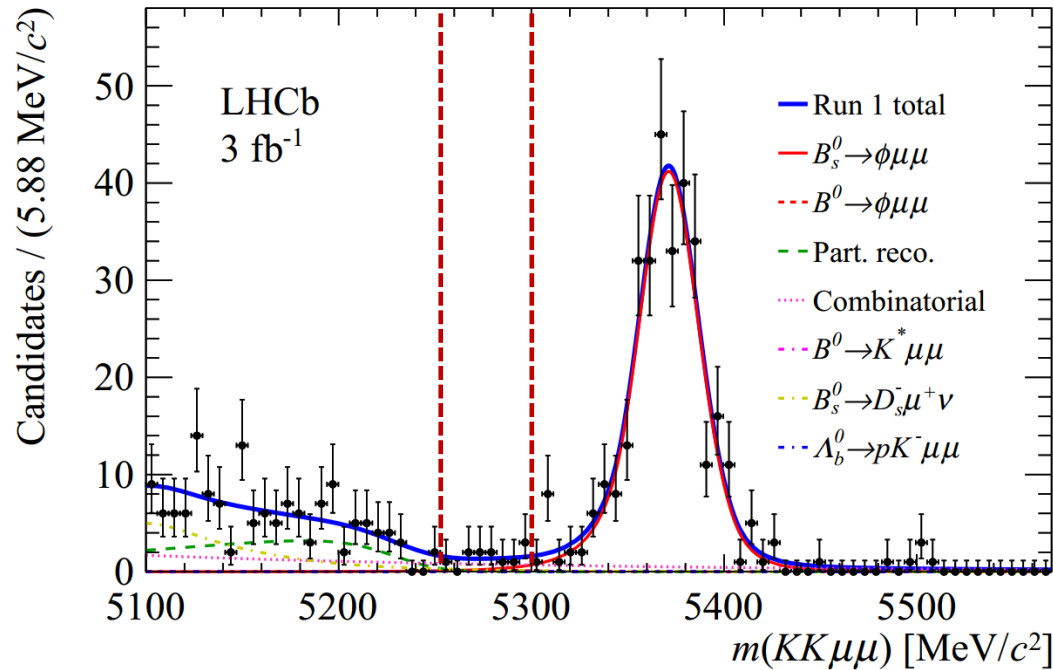
$\Lambda_b \rightarrow p K^- \mu^+ \mu^-$



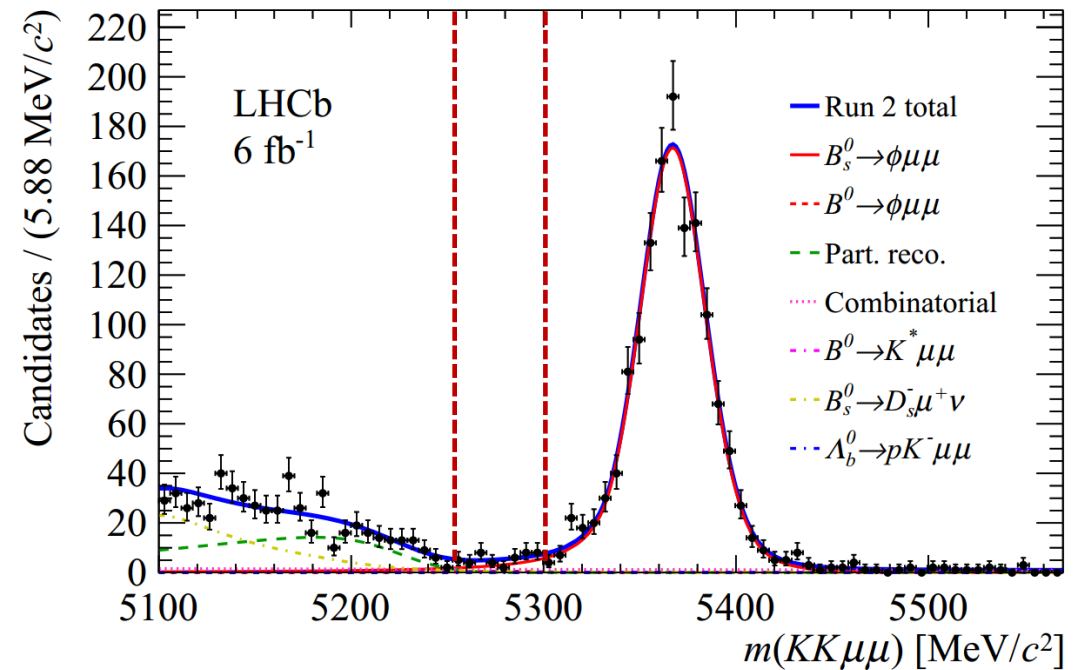
$B_s^0 \rightarrow D_s^- (\rightarrow \phi \mu^- \bar{\nu}) \mu^+ \nu$

Run 1 & Run 2 联合质量拟合结果

□ 没有发现显著的 $B^0 \rightarrow \phi\mu\mu$ 信号, $\mathcal{R} = (0.86 \pm 2.15) \times 10^{-3}$



$$N_{B_s^0} = 302 \pm 19$$



$$N_{B_s^0} = 1389 \pm 41$$

系统误差

$$\square \sigma_{sys}(\mathcal{R}) = \sqrt{\sigma_{model}^2 + (k \times \mathcal{R})^2}$$

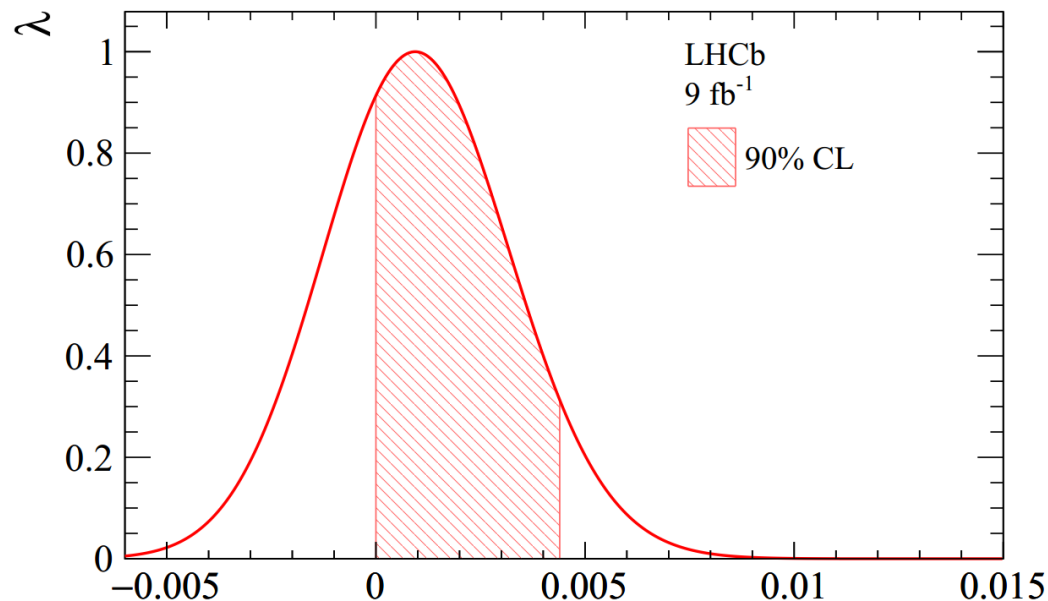
Additive uncertainties	Value [$\times 10^{-3}$]
Fit bias	0.09
Signal model	0.39
Partial background	0.15
Yield of $B^0 \rightarrow J/\psi K^+ K^-$	0.09
Yield of $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi p K^-$	0.07
Yield of $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$	0.01
Yield of $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \mu^+ \mu^-$	0.03
Yield of $B_s^0 \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu$	0.27
Shape of $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$	0.01
Shape of $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \mu^+ \mu^-$	0.00
Shape of $B_s^0 \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu$	0.13
Total	0.54
Multiplicative uncertainties	Value [%]
f_s/f_d	3.1
$\varepsilon_{B^0}/\varepsilon_{B_s^0}$	0.8
Total	3.2

当系统误差和统计误差对比时，
统计误差占主导

含系统误差的上限值

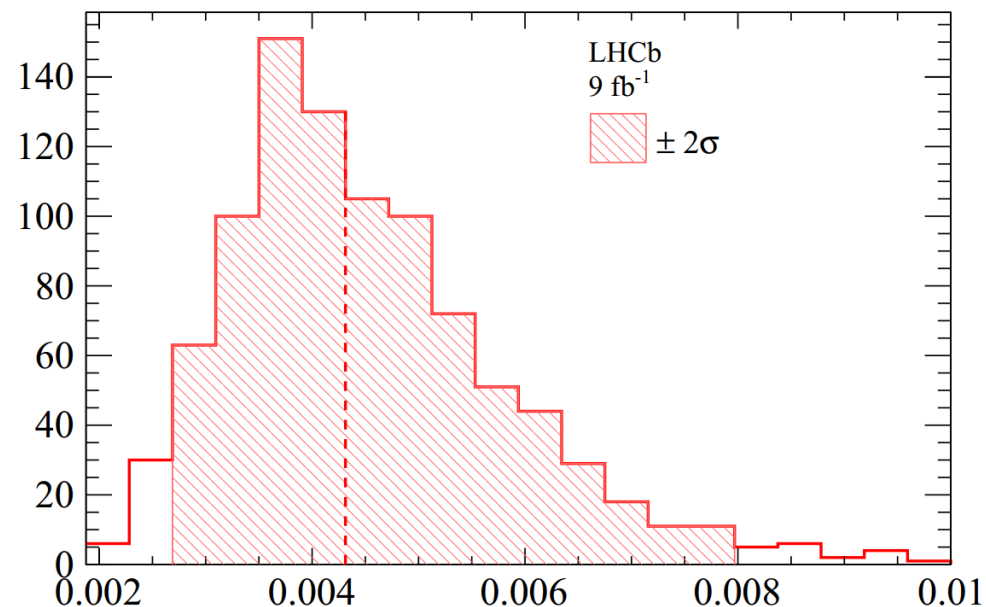
- 采用轮廓似然 (Profile Likelihood) 算法, 并包含所有的系统误差, 得到了在 90% 信度水平下, $\mathcal{R}$ & $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi\mu\mu)$ 的上限值

真实数据中 $\mathcal{R}$ 的上限值



$$\mathcal{R} < 4.4 \times 10^{-3} @90\%CL$$

模拟数据中 $\mathcal{R}$ 的上限分布



$$\mathcal{R} \text{ 的上限中值 } 4.3 \times 10^{-3} @90\%CL$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi\mu\mu) < 3.2 \times 10^{-9} @90\% CL \text{ 和标准模型的理论预言值一致}$$

总结

- 我们基于LHCb现有数据，首次寻找了稀有衰变 $B^0 \rightarrow \phi\mu\mu$ ，得到了 $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \phi\mu\mu) < 3.2 \times 10^{-9}$ @90% CL 和标准模型的理论预言值一致

谢 谢!