



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士后研究工作报告

BESIII 实验上粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 绝对衰变分支比测量
及LHCb 实验上质心系能量在 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 产生截面测量

作者姓名: 李培荣

合作导师: 郑阳恒 教授, 中国科学院大学

流动站(一级学科): 地球物理学

学科专业: 粒子物理与原子核物理

培养单位: 中国科学院大学物理科学学院

2018 年 7 月

Measurements of Absolute Branching Fractions for $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$

at BESII and
Measurement of $\psi(2S)$ production cross-sections at LHCb at 13 TeV

A thesis submitted to the
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Natural Science
in Particle Physics and Nuclear Physics
By
Pei-Rong Li
Prof. Yangheng Zheng

University of Chinese Academy of Sciences

July, 2018

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘要

粲重子 Λ_c^+ 的强子末态衰变只能通过弱相互作用发生，研究其衰变分支比对于理解弱相互作用十分重要。基于 BESIII 实验在 $\sqrt{s} = 4.6 \text{ GeV}$ 处采集的 567 pb^{-1} 的 e^+e^- 对撞数据，运用双 Λ_c 标记的技术首次测量了 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 的绝对分支比分别为 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+) = (5.90 \pm 0.86 \pm 0.39) \times 10^{-3}$ 和 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi(1530)^0 K^+) = (5.02 \pm 0.99 \pm 0.31) \times 10^{-3}$ 。其中第一项误差指的是统计误差，第二项为系统误差。。这一测量是首次进行的绝对测量，且结果同之前相对测量的精度要好。

利用大型强子对装机 LHC 上的 LHCb 实验在 2015 年收集的积分亮度为 275 pb^{-1} 的质子-质子对撞数据，我们对 $\psi(2S)$ 介子的微分产生截面进行了测量。对于直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自于 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子我们都测量了其在横动量范围 $2 < p_T < 20 \text{ GeV}/c$ 且快度范围 $2.0 < y < 4.5$ 区间内，产生截面随着横动量 p_T 和快度 y 变化的微分截面。在整个运动学区间内的积分截面对于直接产生的 $\psi(2S)$ 介子为 $1.497 \pm 0.004 \pm 0.082 \mu\text{b}$ ，对于来自于 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子为 $0.443 \pm 0.002 \pm 0.026 \mu\text{b}$ 。其中第一项误差指的是统计误差，第二项为系统误差。上述所有的测量结果都和理论计算吻合的很好。

关键词：北京谱仪 III, 粲重子 Λ_c^+ , 绝对分支比, LHCb, $\psi(2S)$ 介子, 产生截面

Abstract

The hadronic decays of charmed baryon Λ_c^+ happen only through weak interaction. The study of its hadronic decay rates are key probes to understand the weak interactions. We report the first measurements of absolute branching fractions for the W -exchange-only processes $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+$ and $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi(1530)^0 K^+$ with the double-tag technique, by analyzing an e^+e^- collision data sample, that corresponds to an integrated luminosity of 567 pb^{-1} collected at a center-of-mass energy of 4.6 GeV by the BESIII detector. The branching fractions are measured to be $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+) = (5.90 \pm 0.86 \pm 0.39) \times 10^{-3}$ and $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi(1530)^0 K^+) = (5.02 \pm 0.99 \pm 0.31) \times 10^{-3}$, where the first uncertainties are statistical and the second systematic. These are the first absolute measurements of their branching fractions and the precisions are also improved compared with the relative measurements before.

The production cross-sections of $\psi(2S)$ mesons in proton-proton collisions at a centre-of-mass energy $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ are measured with a data sample collected by the LHCb detector in the LHC operations in 2015. The corresponding integrated luminosity is 275 pb^{-1} . The cross-sections for prompt $\psi(2S)$ mesons and those for $\psi(2S)$ mesons from b -hadron decays are determined as functions of the transverse momentum p_T and the rapidity y of the $\psi(2S)$ meson in the kinematic range $2 < p_T < 20 \text{ GeV}/c$ and $2.0 < y < 4.5$. The production cross-sections integrated over the kinematic coverage are $1.497 \pm 0.004 \pm 0.082 \mu\text{b}$ for prompt $\psi(2S)$ mesons, and $0.443 \pm 0.002 \pm 0.026 \mu\text{b}$ for $\psi(2S)$ mesons from secondary b -hadron decays. The first uncertainties are statistical and the second systematic. All measurements show good agreement with theoretical calculations.

Keywords: BESIII, charmed baryon Λ_c^+ , absolute branching fraction, LHCb, $\psi(2S)$, production cross-section

目 录

第1章 引言	1
1.1 粒子物理中的标准模型	1
1.2 粹重子 Λ_c^+ 强子衰变分支比	3
1.2.1 Λ_c^+ 强子衰变的相关理论现状	3
1.2.2 实验现状	9
1.3 重夸克偶素产生的研究现状	11
1.3.1 重夸克偶素简介	11
1.3.2 LHCb 上重夸克偶素的研究	12
1.4 论文结构	16
第2章 LHCb 实验上 $\psi(2S)$ 的微分产生截面测量	17
2.1 选题动机	17
2.2 LHC 和 LHCb 简介	17
2.2.1 LHC 简介	17
2.2.2 LHCb 装置简介	19
2.2.3 LHCb 数据处理框架	19
2.3 真实数据样本和 MC 样本	21
2.4 离线选择	22
2.5 $\psi(2S)$ 微分产生截面测量	23
2.6 信号提取	24
2.7 效率的测量	26
2.7.1 接受度效率	26
2.7.2 重建选择效率	27
2.7.3 μ 的粒子鉴别效率	29
2.7.4 触发效率	30
2.7.5 总的效率	30
2.8 系统误差分析	32
2.8.1 质量谱信号形状	32
2.8.2 初态辐射	33
2.8.3 全事例选择	33
2.8.4 径迹重建	33
2.8.5 μ 的粒子鉴别	33
2.8.6 触发	33

2.8.7	$p_T - y$ 子区间边界选择	34
2.8.8	顶点拟合	34
2.8.9	亮度	34
2.8.10	分支比	34
2.8.11	MC 样本统计量	34
2.8.12	t_z 拟合	34
2.9	结果报道	34
2.9.1	截面结果	34
2.9.2	来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 占总 $\psi(2S)$ 的比例	37
2.9.3	拓展到全空间的总 $b\bar{b}$ 截面	37
2.9.4	13 TeV 下 $\psi(2S)$ 结果与 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 发表结果的比值	38
2.9.5	13 TeV 下 $\psi(2S)$ 结果与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值	38
2.9.6	小节	38
	附录 A 不同运动学区间内的拟合参数值	41
	附录 B 效率表	47
	附录 C 微分截面结果	49
	参考文献	53
	作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	57
	致谢	59

图形列表

1.1.1 粒子物理的标准模型。	2
1.2.1 粒子 Λ_c^+ 的夸克组分示意图。	4
1.2.2 粒子及其高激发态重子跃迁示意图。	5
1.2.3 粒子 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+$ 衰变的典型拓扑图。	6
1.2.4 粒子 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\bar{K}^0$ 衰变的典型拓扑图。	6
1.2.5 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\phi$ 过程 W 内发射拓扑图。	7
1.2.6 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 过程 W 交换拓扑图。	8
1.2.7 粒子 Λ_c^+ 已测量 (measured) 和未测量 (guessed 和 unknown) 衰变分支比大小示意图。	10
1.2.8 Belle 实验的拟合结果图。	11
1.3.1 粒子和类粒子分布示意图。	13
1.3.2 质子质子对撞直接产生的 J/ψ 和 b 强子衰变而来的 J/ψ 在 7 TeV 下产生截面随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 J/ψ 和 NRQCD 模型计算的对比。右图为 b 强子衰变而来的 J/ψ 与 FONLL 模型的结果比较。	14
1.3.3 质子质子对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 和 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 在 7 TeV 下产生截面随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和三种 NRQCD 模型计算的对比。右图为 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 与 FONLL 模型的结果比较。	14
1.3.4 7 TeV 下极化参数 λ_θ 随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 J/ψ 和 CSM 模型以及三种 NRQCD 模型计算的对比。右图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和 CSM 模型以及三种 NRQCD 模型计算的对比。	15
2.2.1 LHC 及其附属装置示意图。	18
2.2.2 LHCb 探测器装置示意图。	20
2.2.3 LHCb 数据处理应用程序和数据流。	20
2.4.1 两种信号 $\psi(2S)$ 衰变链示意图。	23
2.6.1 在 $\psi(2S)$ 运动学区间 $2 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$, $3.5 < y < 4.0$ 内的不变质量拟合分布 (左图) 和寿命拟合分布 (右图)。红色的实线为总的拟合函数。绿色区域为本底。蓝色的交叉虚线区域为直接产生的 $\psi(2S)$, 黑色的为来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子。紫色区域为 wrong PV 事例的分布, 由于量很少, 在质量谱上小到看不到了。	25
2.7.1 以 p_T 、 y 为函数的接受度效率分布。	26
2.7.2 数据和 MC 中多重数的分布。	27

2.7.3 在每个 p_μ 和 η_μ 的区间之内, MC 和数据的效率修正表。 ······	28
2.7.4 以 p_T 、 y 为函数的重建选择效率分布图。 ······	28
2.7.5 以 p_T 、 y 为函数的 μ 粒子鉴别效率分布。 ······	29
2.7.6 以 p_T 、 y 为函数的触发效率分布。 ······	30
2.7.7 在不同的 p_T 和 y 区间内, $\psi(2S)$ 的总效率分布。 ······	31
2.7.8 在不同的 p_T 和 y 区间内, 直接产生的 $\psi(2S)$ 和来自于 b 强子衰变来的 $\psi(2S)$ 的总效率比值。 ······	31
2.9.1 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 的双微分产生截面分布图。 ······	35
2.9.2 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 的双微分产生截面分布图。 ······	35
2.9.3 以 p_T 为函数的 (左) pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 微分截面与 NRQCD 计算 [54] 的比较和 (右) 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 微分截面分布与 FONLL [42] 的计算比较。 ······	36
2.9.4 以 y 为函数的 (左) pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 微分截面和 (右) 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 微分截面分布与 FONLL [42] 的计算比较。 ······	36
2.9.5 F_b 随着 p_T 和 y 变化的分布。 ······	37
2.9.6 13 TeV 与 7 TeV 的产生截面比值随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和 NRQCD 计算的比较。右图为来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 和 FONLL 的比较。 ······	38
2.9.7 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值随着 p_T (左图) 和 y (右图) 的变化图。 ······	39
2.9.8 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值随着 p_T (左图) 和 y (右图) 的变化图。 ······	39

表格列表

1.1.1 标准模型中的三代费米子。	2
1.1.2 四种玻色子及其性质。	2
1.2.2 PDG2014 中粲强子典型衰变道的实验精度比较。	9
1.2.1 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)$ 的实验测量值与理论预言值比较。	9
 2.2.1 LHC 的部分设计参数。	 19
2.3.1 零级触发和高级触发的具体条件汇总表。	21
2.4.1 $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 离线选择条件。	22
2.8.1 $\psi(2S)$ 截面测量的系统误差汇总表。其中 t_z 拟合只会影响到来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 的截面测量。标记了 * 项目指的是在不同区间内该项误差是关联的。	32
 A.0.1 质量寿命联合拟合在 $2.0 < y < 2.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。	 42
A.0.2 质量寿命联合拟合在 $2.5 < y < 3.0$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。	43
A.0.3 质量寿命联合拟合在 $3.0 < y < 3.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。	44
A.0.4 质量寿命联合拟合在 $3.5 < y < 4.0$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。	45
A.0.5 质量寿命联合拟合在 $4.0 < y < 4.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。	46
 B.0.1 直接产生的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的总的选择效率值 ϵ_{tot} 。	 47
B.0.2 来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的总的选择效率值 ϵ_{tot} 。	48
 C.0.1 直接产生的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的微分产生截面。第一项误差为统计误差，第二项为无关的系统误差，第三项为相关联的系统误差。	 50
C.0.2 来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的微分产生截面。第一项误差为统计误差，第二项为无关的系统误差，第三项为相关联的系统误差。	51

第1章 引言

1.1 粒子物理中的标准模型

1964年，美国物理学家盖尔曼（Murray Gell-Mann）和兹韦格（George Zweig）分别提出了夸克模型 [1, 2]，他们认为，质子、中子等强子并不基本，而是由更基本的粒子—夸克组成的。他们认为强子由以下三种夸克组成：上夸克 (u)、下夸克 (d) 及奇异夸克 (s)。这种三夸克模型很好地解释了当时已发现的强子和共振态粒子，并成功预言了一些未发现粒子。也得到了后来进行的高能电子、高能中微子对质子和中子的深度非弹性散射实验的支持，实验显示出质子和中子内部存在点状结构，这些点状结构可以认为是夸克存在的证据。

到目前为止实验上尚未发现轻子和夸克还有内部结构。人们相信轻子是与夸克属于同一层次的基本粒子。理论和实验上最终表明不可再分的基本粒子可以归为三代，具体可以参看表1.1.1。夸克（上夸克 u 与下夸克 d 、粲夸克 c 与奇夸克 s 、顶夸克 t 与底夸克 b ，以及它们的反粒子）和三代轻子（电子 e 、缪子 μ 、陶子 τ 以及对应的中微子 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ ，并且还有它们的反粒子），以及传播强相互作用的传播子胶子、传播弱相互作用的传播子 W^\pm 和 Z^0 玻色子、传播电磁相互作用的光子、另外一个为解释质量起源的 Higgs 粒子，从而搭建了当代粒子物理学最成功的理论模型—标准模型（图1.1.1和表1.1.2）。

现在一般意义上的标准模型理论指的就是电弱统一理论和量子色动力学（QCD）的统称。一般可以抽象为如下群表示 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ，其中 $SU(3)_C$ 指代的是强相互作用， C 指的是颜色，表示强相互作用只发生在带有色量子数的粒子之间； $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 指代的是电弱相互作用， L 指的是只有左手的粒子参与， Y 代表超荷。标准模型是迄今为止公认的描述弱、电、强三种相互作用的成功理论。四十多年来，标准模型经历了各种实验的精确检验，取得了巨大的成功。

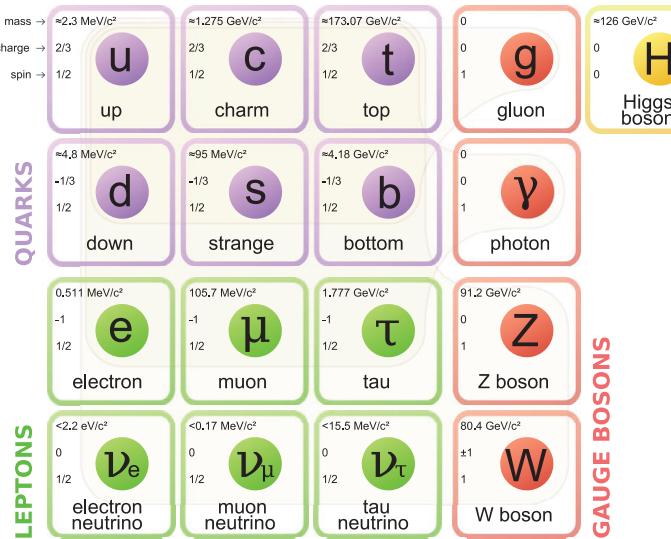


图 1.1.1 粒子物理的标准模型。

表 1.1.1 标准模型中的三代费米子。

	味道			电荷
轻子	e	μ	τ	-1
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
夸克	u	c	t	$+\frac{2}{3}$
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$

表 1.1.2 四种玻色子及其性质。

名称	相互作用	自旋/宇称	力程 (m)	作用强度	典型作用时间 (sec)	理论描述
胶子	强相互作用	1^-	10^{-15}	1	10^{-23}	量子色动力学 (QCD)
光子	电磁相互作用	1^-	∞	10^{-2}	10^{-16}	量子电动力学 (QED)
W^\pm, Z^0	弱相互作用	$1^-, 1^+$	10^{-18}	10^{-5}	10^{-10}	量子味动力学 (QFD)
引力子	引力相互作用	2^+	∞	10^{-39}	---	广义相对论

1.2 粒重子 Λ_c^+ 强子衰变分支比

Λ_c^+ 的质量约为质子质量的 2.5 倍，质量差别主要来自质子中的上夸克换成了较重的粲夸克。粲重子 Λ_c^+ 作为最轻的粲重子，包含三个夸克，即由一个重的粲夸克和两个处于同位旋 $I = 0$ 的轻夸克 (u, d) 组成，如图1.2.1所示。粲夸克弱衰变几乎主导了 Λ_c^+ 的衰变模式。研究 Λ_c^+ 衰变不仅可以用来检验弱作用理论，更重要的是可以利用粲重子的跃迁来检验强相互作用机制，比如 Λ_c^+ 内部三个夸克的分布及相应动力学机制、以及强相互作用的 SU(3) 对称性等。粲重子 Λ_c^+ 内部既有重夸克，又有轻夸克，因此，有其特别值得研究的地方。这样的系统既具有重夸克对称性，又具有轻夸克手征对称性。重夸克有效理论认为：当重夸克质量趋近无限大时，重夸克与轻夸克的自旋将退耦，重子的性质完全由轻夸克的自由度决定。这就是通常所说的重-轻系统满足的重夸克对称性。另外，对于较轻的 u, d 夸克，在取其质量为 0 的极限下，QCD 的拉氏量具有 $SU(3)_L \times SU(3)_R$ 的整体对称性，称为手征对称性。研究粲重子可以很好的理解轻夸克在重夸克环境下的动力学行为，很好的检验重夸克对称性和轻夸克手征对称性，这对理解低能区重子和 Goldstone 玻色子之间的相互作用至关重要。如图1.2.2所示，很多高激发态粲重子最终都要衰变到处于基态的 Λ_c^+ 。不仅如此，含底夸克的 Λ_b 重子和 B 介子也会衰变到含 Λ_c^+ 末态，对 Λ_c^+ 衰变性质的研究也有助于进一步理解重味重子谱学及其衰变性质。对于主要由底夸克衰变主导的实验，测量每一个底夸克产生的粲夸克数目（charm counting）以及测量唯象描述夸克强子化过程的碎裂函数，可以很好的对 QCD 进行检验 [3, 4]。而测量 Λ_c^+ 的强子衰变分支比对于此类问题是个重要输入量。目前对于此类计算最大的系统误差来源已经是粲重子 Λ_c^+ 的衰变分支比 [5, 6]。

1.2.1 Λ_c^+ 强子衰变的相关理论现状

描述重子结构及其性质较为成功的两个理论就是所谓的重夸克有效理论 (HQET) 和夸克-双夸克模型 (quark-diquark)。重夸克有效理论 [7, 8] 是理论物理学中的一个重要工具，理由很简单：对于物理问题的理解，考虑完全的理论往往是不必要的，在一个恰当的层次上来考虑问题反而会更加行之有效。HQET 是重夸克与轻自由度直接通过软胶子交换而形成相互作用的一个简单描述。其中重夸克的质量 m_Q 是一个重要的能量标度。HQET 在预言某些强子的性质时，对于重夸克质量 m_Q 远大于轻夸克 u, d, s 的质量情况，选择 $m_Q \rightarrow \infty$ 作一个近似计算。这时的重夸克表现的像一个色三态的静外场源，强子内动力学可以约化为

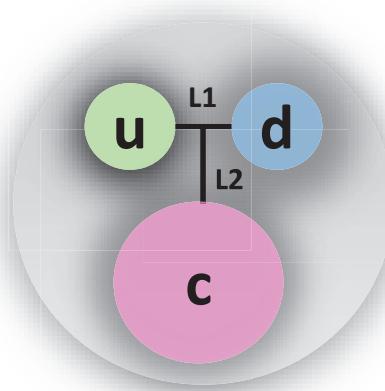


图 1.2.1 粲重子 Λ_c^+ 的夸克组分示意图。

轻自由度和色场源的相互作用。然而，实际上重夸克质量并不是无限大的，尤其我们讨论的粲重子中的 c 夸克的质量并不是特别的大，因此 HQET 理论在这种情况下需要对除领头阶之外的其余各项做高阶修正。重子结构的夸克-双夸克模型是 Lichtenberg 等 [9] 提出的。后来很多作者讨论过夸克-双夸克模型，虽然细节各不相同，但这些工作多少都采用了这样一个相同的物理图像。在重子内部，有两种组分夸克和双夸克，双夸克是两个夸克的束缚态，并与第三个夸克相互作用形成重子。对于含有两个重夸克和一个轻夸克的重子，这两个重的夸克可以组合成一个所谓的双夸克。如果含有一个重夸克和两个轻夸克的，则这两个轻的夸克更容易形成双夸克。双夸克模型很久以前就已经被很多理论的文章采用，计算了很多涉及重子的过程 [10–14]。它有着明显的优点，化三体问题为两体问题，使计算大为简化。用这一模型讨论重子介子散射、重子磁矩以及定性地讨论重子质量方面取得了一些成功。

具体到理论方面的计算。介子和重子所有的非轻子衰变都可以归为如下几类的拓扑图：W 外发射，W 内发射，W 交换图，W 湮灭图和 W 圈图。图1.2.3给出了粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+$ 衰变过程的三种典型拓扑图（W 外发射，W 内发射和 W 交换），其它衰变过程的图像大多与此类似的。粲重子 Λ_c^+ 的衰变中是没有湮灭图贡献的。我们研究的 Cabibbo 允许的过程也不会出现圈图的贡献。对于 W 内

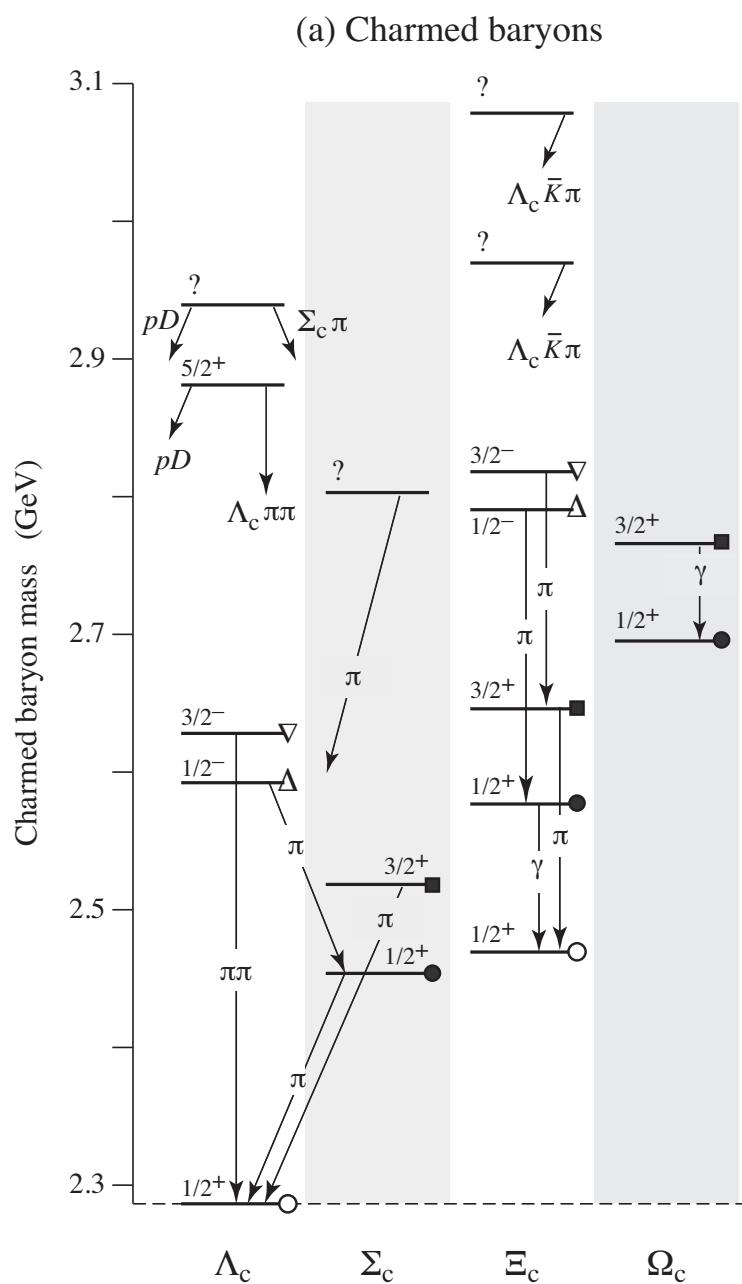


图 1.2.2 粒重子及其高激发态重子跃迁示意图。

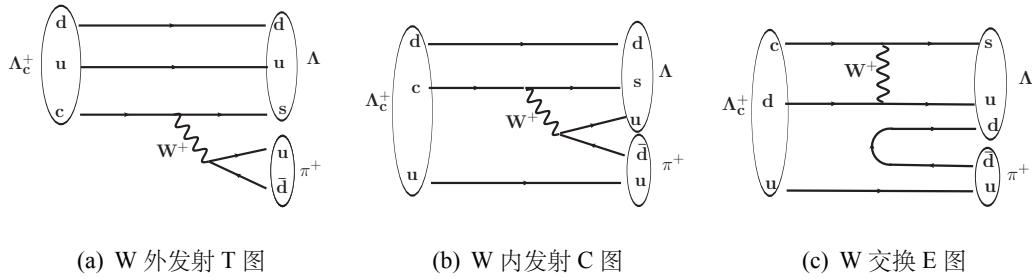


图 1.2.3 粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+$ 衰变的典型拓扑图。

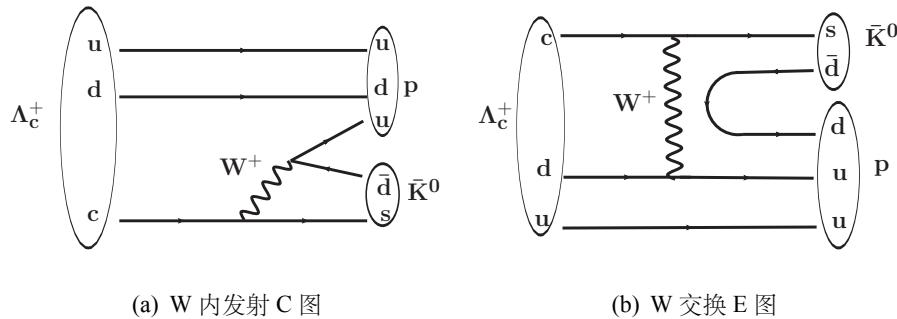


图 1.2.4 粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\bar{K}^0$ 衰变的典型拓扑图。

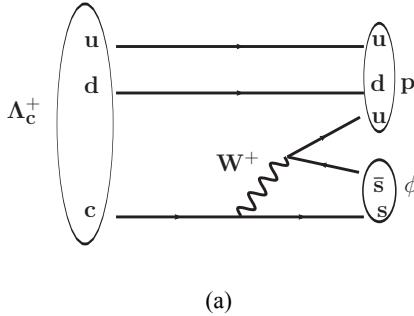
发射和外发射图通常认为是可因子化部分¹，而对于 W 交换和 W 湮灭图是不可以因子化的。粲重子中的 W 内发射对可因子化提出了更高的要求，即通过弱衰变来的夸克要强子化成介子的情形才可以因子化，而强子化成重子的过程是不可以因子化的。图1.2.4给出了粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\bar{K}^0$ 衰变过程的两个可能拓扑图(W 内发射和 W 交换)。我们可以清楚的看到图1.2.3(b)中 s 夸克出现在重子 Λ 中，故该拓扑图是不可因子化的，而图1.2.4(a)中 s 夸克是出现在介子 \bar{K}^0 中，故可以简单地认为该图是可以因子化的(后面会看到也有不可因子化的贡献)。

众所周知，粲介子中不可因子化的 W 交换过程存在着色压低和螺旋度压低，与可因子化的发射图贡献相比，可因子化部分是占主导地位的。简单因子化方法将外发射(图1.2.3(a))和内发射(图1.2.4(a)，区别于图1.2.3(b))贡献 a_1 ， a_2 分别写为 [15, 16]：

$$a_1(\mu) = C_2(\mu) + \frac{C_1(\mu)}{N_c}, a_2(\mu) = C_1(\mu) + \frac{C_2(\mu)}{N_c}, \quad (1.2.1)$$

$C_{1,2}$ 称作威尔逊系数，可以通过微扰论进行计算， N_c 在因子化方法中指的是颜色的数目 3。其中 $\mu = \sqrt{\Lambda m_D(1 - r_1^2)(1 - r_2^2)}$ 为威尔逊系数能标， $r_{1,2}$ 为与初末态相关的质量比值。 Λ 与末态粒子在 D 介子中的动量有关。粲介子环境下典型的能标 $\mu \sim 1 \text{ GeV}$ 。我们通过粲介子的衰变研究已经知道简单因子化方法描述色压低过

¹W 内发射意味着 W 出来的两个夸克要和其余夸克进行强子化，因此会有所谓的色压低效应。



(a)

图 1.2.5 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\phi$ 过程 W 内发射拓扑图。

程是不完备的，需要引入所谓的大 N_c 方法 [17]。大 N_c 方法的核心就是通过修正 W 内发射的振幅 a_2 中 N_c 这一项，来唯象的描述色压低的效应。大 N_c 方法在粲介子计算中的应用显著改善了实验和理论的一致性 [18–20]。这一结论也得到了 QCD 求和规则方法的验证 [21–23]。另一种有效解决简单因子化方法描述色压低过程不够好的方法是引入新的一项 $\chi_{nf} e^{i\phi}$ 来描述不可因子化的部分 [15, 16]。同时忽略外发射图的不可因子化贡献，则新的能标依赖的威尔逊系数可以写为

$$a_1^\mu = C_2(\mu) + \frac{C_1(\mu)}{N_c}, a_2^\mu = C_1(\mu) + C_2(\mu) \left(\frac{1}{N_c} + \chi_{nf} e^{i\phi} \right), \quad (1.2.2)$$

式中参数 χ_{nf} 和 ϕ 为新引入的参数用以描述图 1.2.4(a) 这一类拓扑图中的不可因子化部分。这些参数对于不同的衰变道应该是公用的，其具体的数值只能通过实验数据来确定。显然地，当 $\chi_{nf} e^{i\phi} = -1/N_c$ 的时候两种方法是等效的。同时也应注意到大 N_c 方法实际上没有考虑 a_1^μ 和 a_2^μ 这两部分之间存在着的强相角。而实验数据告诉我们 a_1^μ 和 a_2^μ 这两部分贡献之间的相角往往很大。为了理论计算方便往往认为 a_1 为实的，把相角归为 a_2 内，即

$$a_1 = |a_1|, \quad a_2 = |a_2| e^{i\delta}, \quad (1.2.3)$$

很自然地，理论学家尝试将其应用到粲重子的计算过程中去。但是这种方式对于粲重子是否适用还需要检验，理论学家找到了一个特殊的 Cabibbo 压低的衰变道 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\phi$ 去计算以和实验进行对比。如图 1.2.5 所示，这个过程只有内发射图的贡献是主导的，属于典型的图 1.2.4(a) 类似的情况，也没有外发射的图来产生干涉效果，可以拿来很好的来验证粲重子中上述大 N_c 方法是否适用。文献 [24] 指出了大 N_c 方法计算出的 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\phi$ 衰变分支比和实验测量是一致的。如果只用简单因子化方法计算，结果与实验测量值小了约 15 倍，这很好的说明了该方法同样适用于粲重子中的类似情形。

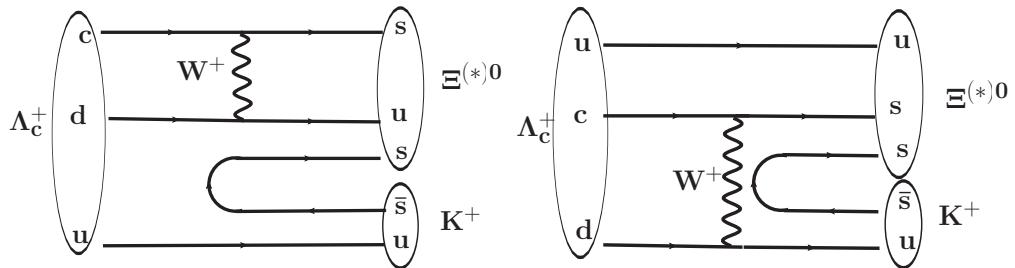


图 1.2.6 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 过程 W 交换拓扑图。

虽然如此，在粲重子还是有着其独特的情况的。不可因子化的 W 交换过程在粲重子中不再是色压低和螺旋度压低的。不可因子化的作用与可因子化部分相比并不低甚至比可因子化部分更主导。理论上对于粲重子的分支比计算过程中不确定性最大的就是在于如何处理不可因子化的 W 交换过程上。历史上比较有名的模型是流代数模型，1992 年之前一直在广泛使用 [25]。然而它也有着其局限性：要求两体衰变过程中的介子一定是赝标量介子，且一定要足够软。这一要求往往是不被满足的。所以理论学家不得不转向了更基本的极点模型（pole model）。其简单的图像就是将粲重子中不可因子化部分的贡献近似为一个中间共振态粒子的动力学行为。文献 [26] 给我们总结了各个模型计算出粲重子强衰变的分支比计算结果。目前理论上可以计算的只有两体过程。这些模型大都是利用的极点模型来计算的结果，只不过在处理非可因子化部分的细节上存在着差异。文献 [27] 更加注重处理 W 交换过程在强衰变里面的作用，通过对比我们发现随着理论的发展其结果与实验变得越来越一致。这再一次启示我们在粲重子衰变中不可因子化的 W 交换过程起着非常主要的角色。

如图 1.2.6 所示， $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 过程只能通过图示 W 交换过程才能发生的，同时，此一过程，在 S 波和 P 波的衰变振幅中均存在着不同强子衰变矩阵元之间的大幅相消，从而导致此过程的理论计算非常困难，且具有非常大的不确定性，如表 1.2.1 所示。理论预言给出的 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+)$ 落在 $[1.0, 3.6] \times 10^{-3}$ [27–31] 区间之内，而对于 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{*0} K^+)$ ，给出的三个理论计算结果更是有量级上的差异 [28, 32, 33]。我们去寻找和测量此一过程对于理解粲重子中不可因子化贡献起到非常重要的作用。测定此类过程的分支比对于理论来说是个重要的检验，同时也是一个重要的输入。

表 1.2.2 PDG2014 中粲强子典型衰变道的实验精度比较。

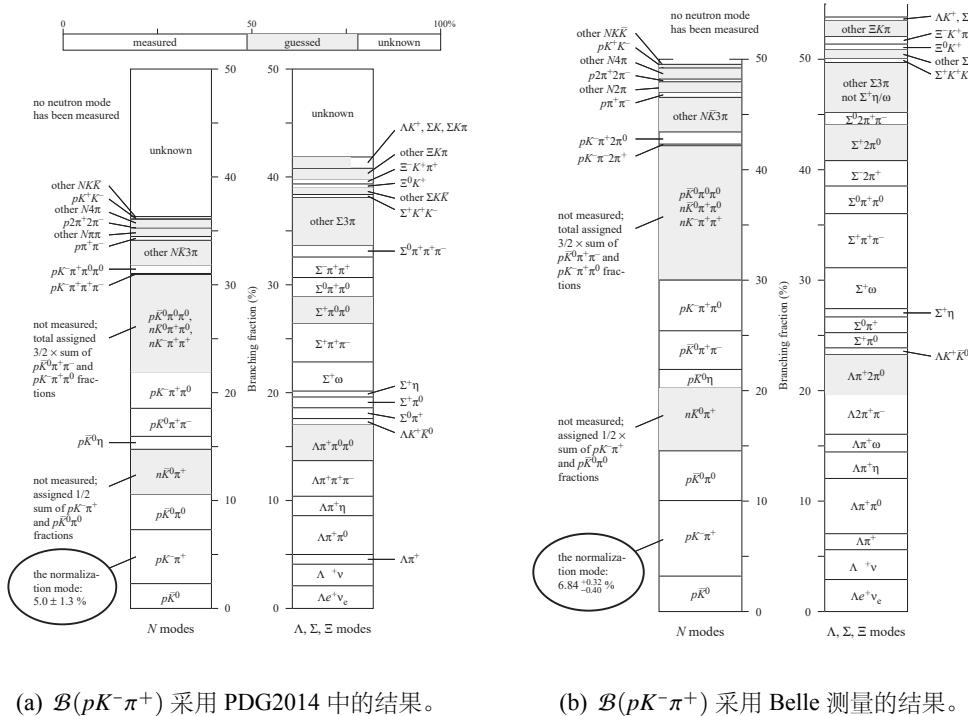
粲强子	强子衰变道	精度 ($\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}$)	半轻衰变道	精度 ($\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}$)
D^0	$\mathcal{B}(K^-\pi^+) = (3.88 \pm 0.05)\%$	1.3%	$\mathcal{B}(K^-e^+\nu_e) = (3.55 \pm 0.05)\%$	1.4%
D^+	$\mathcal{B}(K^-\pi^+\pi^+) = (9.13 \pm 0.19)\%$	2.1%	$\mathcal{B}(K^0e^+\nu_e) = (8.83 \pm 0.22)\%$	2.5%
D_s^+	$\mathcal{B}(K^+K^-\pi^+) = (5.39 \pm 0.21)\%$	3.9%	$\mathcal{B}(\phi e^+\nu_e) = (2.49 \pm 0.14)\%$	5.6%
Λ_c^+	$\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (5.0 \pm 1.3)\%$	26%	$\mathcal{B}(\Lambda e^+\nu_e) = (2.1 \pm 0.6)\%$	29%

表 1.2.1 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)$ 的实验测量值与理论预言值比较。

衰变道	其它实验的测量 $\frac{\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)}{\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+)}$	PDG 报道 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)$	理论预言 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)$
$\Xi^0 K^+$	$(7.8 \pm 1.8)\% [34]$	$(5.0 \pm 1.2) \times 10^{-3} [35]$	$2.6 \times 10^{-3} [28]$
			$3.6 \times 10^{-3} [29]$
			$3.1 \times 10^{-3} [30]$
			$1.0 \times 10^{-3} [31]$
			$1.3 \times 10^{-3} [27]$
$\Xi(1530)^0 K^+$	$(5.3 \pm 1.9)\% [34]$	$(4.0 \pm 1.0) \times 10^{-3} [35]$	$5.0 \times 10^{-3} [28]$
			$0.8 \times 10^{-3} [32]$
	$(9.3 \pm 3.2)\% [36]$		$0.6 \times 10^{-3} [33]$

1.2.2 实验现状

实验上多数关于 Λ_c^+ 的研究是 20 多年前开展的，主要以 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 衰变作为参考道来研究强子衰变的分支比。然而对于 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 分支比的实验测量并不准确，都或多或少地依赖于模型假设。这从整体上使 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 衰变分支比的结果存在很大的不确定性。过去的 20 年间，粲介子的研究取得了长足的发展。相反的是，在重子谱研究尤其是粲重子谱研究方面进展相对缓慢。主要原因还是因为缺乏有效的实验数据。表 1.2.2 给出了粲介子和粲重子典型衰变道的测量精度比较。很容易我们可以发现粲重子的精度比粲介子的精度差很多。图 1.2.7(a) 是 PDG2014 中 Λ_c^+ 各个衰变分支比的大小示意图。其中很多道的分支比结果都是采用的 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (5.0 \pm 1.3)\%$ 来进一步计算的（之前的实验大多都是相对 $pK^-\pi^+$ 的测量）。从图中我们可以清楚的看到有很多的衰变道没有很好的测量，尤其是末态含有中子的衰变道，基本都是理论预测的结果。同时我们也注意到这些已知的所有的 Λ_c^+ 的衰变道的总的分支比远小于 1。这也在一定程度上说明当前的 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$ 的结果有可能偏低。


 (a) $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$ 采用 PDG2014 中的结果。

 (b) $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$ 采用 Belle 测量的结果。

 图 1.2.7 粒重子 Λ_c^+ 已测量 (measured) 和未测量 (guessed 和 unknown) 衰变分支比大小示意图。

Belle 实验利用他们在 $\Upsilon(nS)$ 上采取的数据，采用初态辐射的技术在 2014 年报道了他们测量的 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 的衰变分支比结果 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (6.84 \pm 0.24_{-0.27}^{+0.21})\%$ [37]。测量结果的精度达到了 4.7%，较 PDG2014 好了有 5 倍之多。这一结果是首次进行的绝对测量，测量也是模型无关的。但是我们从图 1.2.8 [37] 可以注意到，Belle 实验的拟合结果遭受着高本底的污染，这主要是由于其运行在高能量区域所导致的。除此之外，高端还遭受着高激发态本底的尾巴的影响，这会大大增加信号数获取的不准确度。图 1.2.7(b)是采用了 Belle 的结果 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (6.84 \pm 0.24_{-0.27}^{+0.21})\%$ 来进一步计算之后的 Λ_c^+ 各个衰变分支比的大小示意图。我们注意到这些已知的所有 Λ_c^+ 的衰变道的总的分支比之和已经超过了 100% 了。如果说之前的相对测量是准确的话，那么这在一定程度上暗示 Belle 的 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+)$ 的结果有可能偏高。BESIII 在 2016 年的时候测量了 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (5.84 \pm 0.27 \pm 0.23)\%$ [38]，当 PDG2016 [35] 合并了 BESIII 和 Belle 的结果之后给出 $\mathcal{B}(pK^-\pi^+) = (6.35 \pm 0.33)\%$ ，从而缓解了 Belle 测量结果导致分支比超出的问题。

实验上，CLEO [34] 合作组和 ARGUS [36] 合作组对于 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 衰变分支比进行过一些测量。不过这些测量都是 20 多年前进行的，而且它们都是相

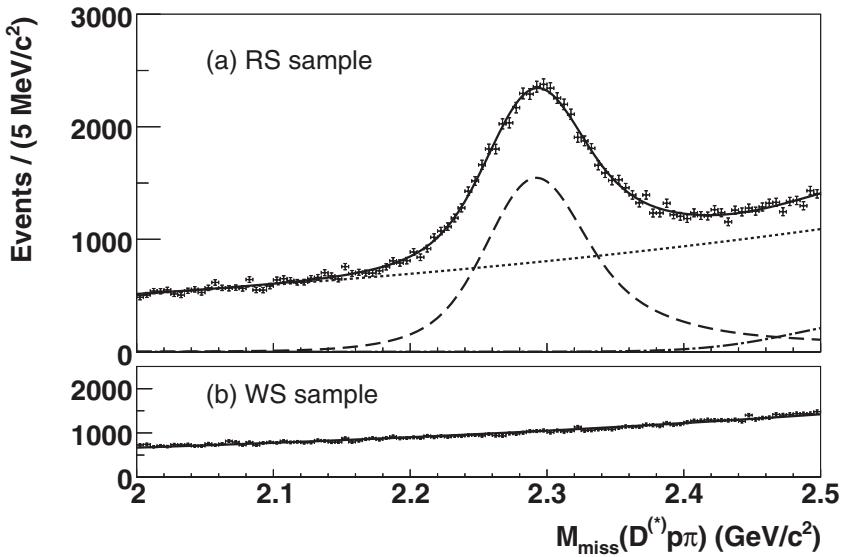


图 1.2.8 Belle 实验的拟合结果图，摘选自文献 [37]。

对于 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)$ 的相对测量。它们的测量结果我们同样展示在表 1.2.1 中以进行比较。PDG2016 中关于此两个衰变道的结果分别为 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+) = (5.0 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ [35] 和 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{*0} K^+) = (4.0 \pm 1.0) \times 10^{-3}$ [35]²。BESIII 实验利用阈值上的 $e^+ e^-$ 湮灭数据去研究 Λ_c^+ 衰变是更简单更直接的一种方式，这种方式有着其独特的优势所在。在阈值上 Λ_c 是成对产生的，除了 Λ_c 对之外不会有额外的任何强子产生。这就给我们提供了一个非常干净的 Λ_c 的产生环境。此外，由于是成对产生，我们可以双标记的技术来进行测量。这样一来，双标记侧几乎没有本底的，结果更加可靠。另外一个就是双标记方法可以做到绝对测量，单标记的系统误差基本可以认为消除掉了。这也是阈值上数据的优势。基于 BESIII 在 $\sqrt{s} = 4.6 \text{ GeV}$ 处采集的 567 pb^{-1} 的 $e^+ e^-$ 对撞数据，运用成熟的双 Λ_c 标记技术我们可以对 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+)$ 进行首次的绝对测量。

1.3 重夸克偶素产生的研究现状

1.3.1 重夸克偶素简介

重夸克是指粲夸克 (c)、底夸克 (b) 和顶夸克 (t)，他们都比较重，尤其是顶夸克 t 特别的重，寿命在 10^{-13} 量级上，几乎来不及形成强子。重夸克偶素 [39] 是指带有各种 J^{PC} 量子数的 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 束缚态，其中 J^{PC} 由两个组合重夸克的总自旋 S 和总角动量 L 决定。重夸克偶素的物理过程涉及了 QCD 的所有能区。在高

²假定 $\Xi(1530)^0 \rightarrow \Xi^- \pi^+$ 的分支比为 $\frac{2}{3}$ ，用它来修正文献 [36] 中 ARGUS 的测量值。

能区偶合常数是可适用的, QCD 微扰展开易于收敛; 而到了低能区域, 非微扰是主导的, QCD 失效了, 只能通过其他非微扰方法来处理 [40]。重夸克偶素物理过程的研究对考察微扰与非微扰 QCD 交叠区域的动力学, 检验和发展 QCD 模型起着重要意义。在过去的三十多年里, 许多理论工作也验证了 QCD 在重夸克偶素上的应用。历史上比较流行的理论基本上有三种: 色单态机制 (CSM)、色蒸发模型 (CEM)、色八重态机制 (COM)。伴随着实验的进程, 人类已经提前对 QCD 有了一个很好的理解。理论计算和实验都在夸克偶素的产生上做出了很大的贡献, 然而还存在着很多问题 [41]。例如, 色单态模型在解释 Tevatron 上正反质子对撞实验中高横动量 p_T 下 J/ψ 粒子的产生截面时遇到了很大的困难, 产生了数量级上的差异。COM 应用了 1986 年被 Caswell 和 Lapage 发展起来的有效场论发展出了非相对论量子色动力学 (Non-Relativistic QCD, NRQCD), 目前成为主流的描述强产生的里面模型, 在高 p_T 区域描述的比较好。虽然 NRQCD 能够很好地解释实验上测得的重味夸克偶素的产生截面, 但极化预测值与 CDF 实验所测结果相矛盾 [39]。COM 和领头阶 (LO) CSM 理论, 预言了高横动量下重夸克偶素的极化, 但是不能解释强子对撞中 $\psi(nS)$ 和 $\Upsilon(nS)$ 的极化。基于非微扰 QCD 框架开发的 Fixed-Order-with-Next-to-Leading-Logarithm (FONLL) [42] 成功的用于描述多个非直接产生的重夸克偶素态的产生截面。

1.3.2 LHCb 上重夸克偶素的研究

大型强子对撞机 LHC 上, 在质子质子对撞为 2.76 TeV, 7 TeV, 8 TeV 和 13 TeV 的质心系能量下, ATLAS、CMS、ALICE 和 LHCb 四个实验都对夸克偶素进行过研究。我们接下来以 LHCb 实验上 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 在 7 TeV 质心系能量下为例介绍目前对重夸克偶素的产生截面测量以及极化测量情况。

在高能对撞实验上, 以粲夸克偶素为例 (图 1.3.1 给出了按照 J^{PC} 和质量总结的各个粲偶素和类粲偶素粒子), 其产生主要有三种来源: 部分子碰撞直接产生, 高激发态退激发产生以及 b 强子衰变产生。LHCb 实验在运动学区间 $y \in [2.0, 4.5]$ 和 $p_T \in [0, 14]$ GeV 内, 对单举 J/ψ 微分产生截面, 包括直接产生的和来自 b 强子衰变来的都进行了测量 [43]。对 $\psi(2S)$ 的测量由于采用了多个重建衰变道, 其研究的运动学区间为 $y \in [2.0, 4.5]$ 和 $p_T \in [0, 14]$ GeV [44]。同样, 对于直接产生的 $\psi(2S)$ 和来自 b 强子衰变来的 $\psi(2S)$ 都进行了测量。如图 1.3.2 和图 1.3.3 所示, 在高动量区范围内, NLO NRQCD 理论计算与 LHCb 的测量吻合的很好。来自 b 强子衰变的 $J/\psi/\psi(2S)$ 的微分截面测量结果与 FONLL 的预言符合的很好。

2011 年, LHCb 探测器采集了大约 1.0 fb^{-1} 的质心能量为 7 TeV 质子质子

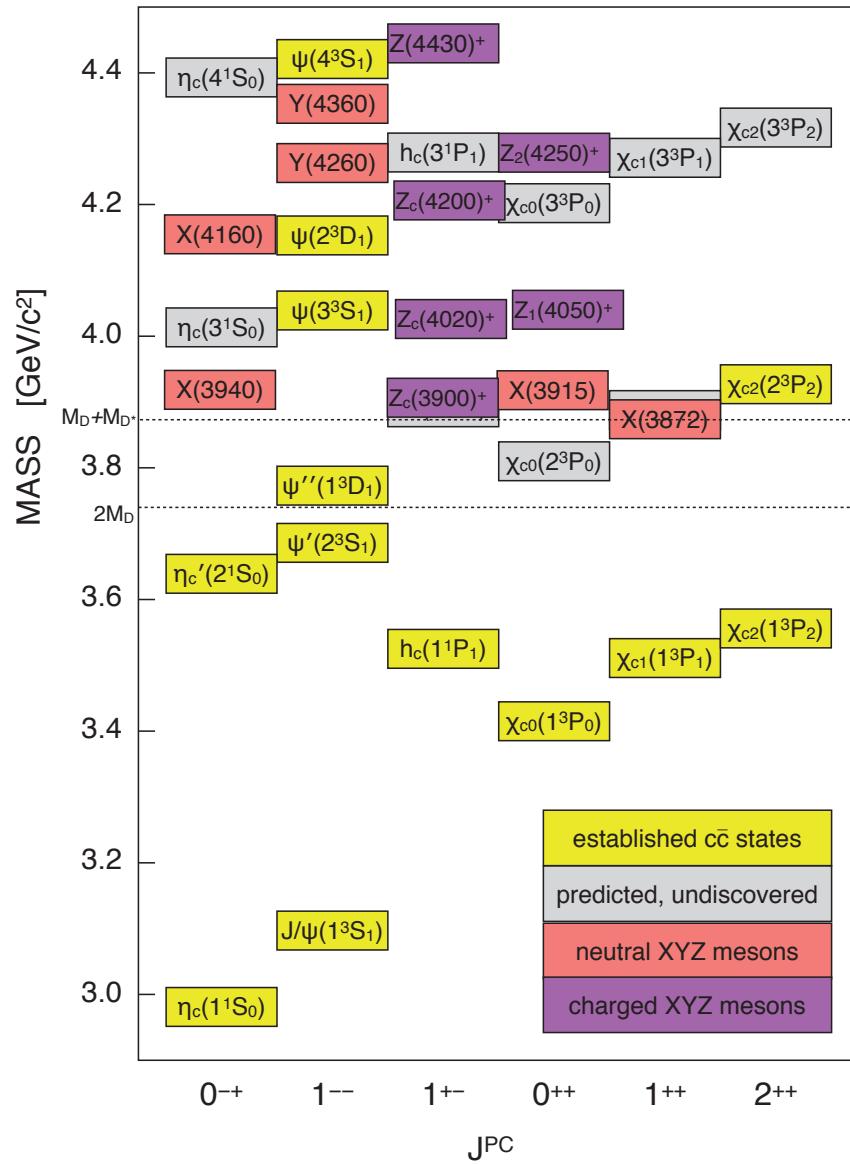


图 1.3.1 夸克偶素和类夸克偶素粒子分布示意图。

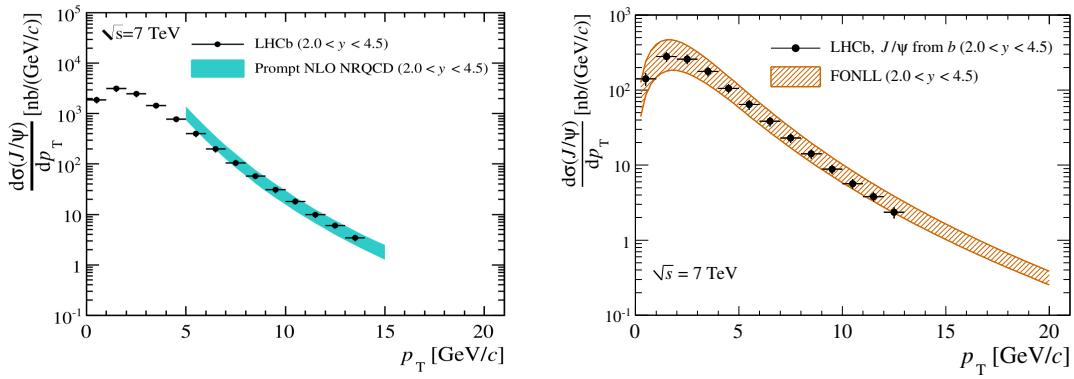


图 1.3.2 质子质子对撞直接产生的 J/ψ 和 b 强子衰变而来的 J/ψ 在 7 TeV 下产生截面随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 J/ψ 和 NRQCD 模型计算的对比。右图为 b 强子衰变而来的 J/ψ 与 FONLL 模型的结果比较。

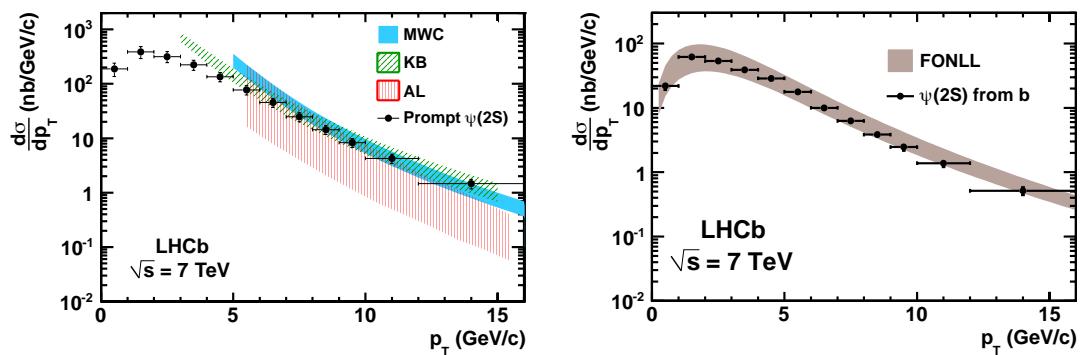


图 1.3.3 质子质子对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 和 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 在 7 TeV 下产生截面随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和三种 NRQCD 模型计算的对比。右图为 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 与 FONLL 模型的结果比较。

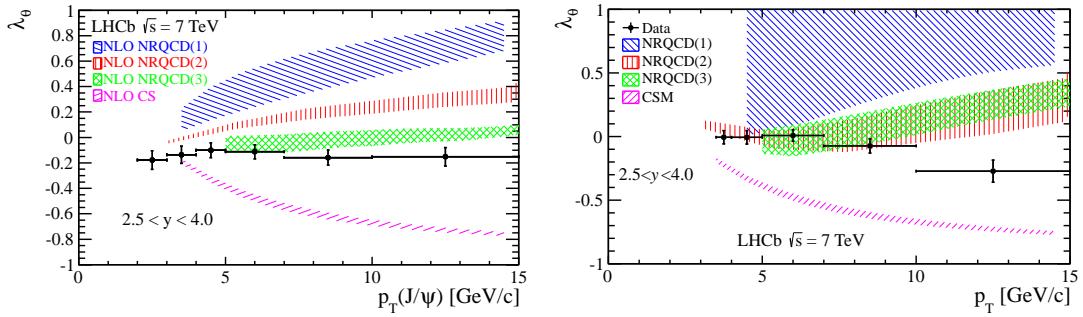


图 1.3.4 7 TeV 下极化参数 λ_θ 随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 J/ψ 和 CSM 模型以及三种 NRQCD 模型计算的对比。右图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和 CSM 模型以及三种 NRQCD 模型计算的对比。

对撞的数据。利用其中约 370 pb^{-1} 的数据，分别在螺旋度参考系和 Collins—Soper 参考系，在不同的横动量和快度区间，测量了直接产生的 J/ψ 粒子的三个极化参数 λ_θ 、 $\lambda_{\theta\phi}$ 以及 λ_ϕ 。在运动学区间 $2 < p_T < 15 \text{ GeV}, 2.0 < y < 4.5$ ，在螺旋度参考系中 λ_θ 最小边界 ≈ -0.2 ，具有轻微的纵向极化并且随着 J/ψ 横动量和快度的增加稍微减少，而 $\lambda_{\theta\phi}$ 和 λ_ϕ 在误差范围内近似为 0。利用全部 1.0 fb^{-1} 的数据，LHCb 还在螺旋度参考系和 Collins—Soper 参考系中测量了直接产生的 $\psi(2S)$ 的极化参数。测量结果表明，在误差范围内，在大部分运动学区间 $\psi(2S)$ 的三个极化参数都近似 0，而在某些区域 $\psi(2S)$ 有轻微的纵向极化， λ_θ 处于 -0.2 到 0 之间。如图 1.3.4 所示，直接产生的 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 在 7 TeV 下极化参数 λ_θ 随着 p_T 的变化，并和 CSM 模型以及三种 NRQCD 模型计算进行了对比。结果表明，在 LHCb 上 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 并不具有很大的横向极化或者纵向极化。在 LHCb 和 ALICE 探测器共同覆盖的运动学区间内， J/ψ 的测量结果和 ALICE 结果在误差范围内是一致的。LHCb 关于 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 的极化测量不支持领头阶 CSM 或者 NRQCD 的理论预言。目前为止，无论哪种模型都不能同时很好的描述重夸克偶素的微分产生截面和极化 [45]，重夸克偶素至今仍然是研究的热点和难点。

基于 LHCb 在 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 处采集的 275 pb^{-1} 的 pp 对撞数据，我们可以在高能量下测量 $\psi(2S)$ 介子的微分产生截面。这是在 LHCb 上 7 TeV 质心能量下测量后进行的又一次 $\psi(2S)$ 微分产生截面的测量。测量采用的大统计量的真实数据保证了测量的更高精度，测量结果可以很好的检验现有理论模型计算的可靠程度。结果中对微分产生截面与 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 发表结果的比值进行了研究，由于 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 只是发表了随 p_T 的变化，所以比值结果只是给出了随 p_T 的变化。与 13 TeV 下 J/ψ 结果的比较，可以研究比值随横动量 p_T 、和快度 y 的变化情况。

1.4 论文结构

本论文结构如下：第一章介绍本论文相关的理论和实验现状，交待选题背景。第二章介绍北京正负电子对撞机 BEPCII 和北京谱仪 BESIII。第三章介绍 BESIII 上粲重子 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^{(*)0} K^+$ 的绝对衰变分支比测量。第四章详细介绍 LHCb 上 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 介子微分产生截面的测量。第五章为总结和展望。

第 2 章 LHCb 实验上 $\psi(2S)$ 的微分产生截面测量

2.1 选题动机

质心能量为 7 TeV pp 对撞下, LHCb 上已经对 $\psi(2S)$ 的微分产生截面进行过了研究 [46]。13 TeV pp 对撞下, 对其微分产生截面进行重新测量, 不仅可以更好的检验理论模型, 还可以很好的了解微分产生截面随质心能量的变化, 并且足够大统计量的 $\psi(2S)$ 介子可使得微分产生截面的测量精度更高。鉴于 $\psi(2S)$ 在粲偶素家族中处于激发态而不是基态位置, 使得受到来自 feed-down 部分的影响可以忽略, 其结果与理论比较更加容易。

2.2 LHC 和 LHCb 简介

本章所研究的 $\psi(2S)$ 介子是由 pp 对撞机制产生的, 对撞时发生的物理过程的相关信息, 目前只能由探测器来收集。为详细了解 $\psi(2S)$ 介子的来源, 本章先简要介绍高能质子—质子 (pp) 对撞的加速器 LHC(Large Hadron Collider) 和该加速器上专门用来研究 b 物理的探测器 LHCb(The Large Hadron Collider beauty experiment) 实验。

2.2.1 LHC 简介

LHC 是一个环形的质子-质子对撞机, 前身是欧洲核子中心原有的大型正负电子对撞机 (Large Electron Positron collider, LEP)。LHC 实际上是一个加速器链的最后一环, 其隧道周长约为 26.7 千米, 整个加速器综合体如图 2.2.1 所示。

LHC 中质子的加速是被安排成束团 (bunch) 来进行的, 每个束团大概包含 10^{11} 个质子, 两个束团交叉的时间间隔为 25 ns, 为了将这些束团限制在 LHC 环形轨道上, 采用了由 Nb-Ti 超导磁铁提供的约为 8.33 特斯拉的扭转磁场。在加速器链中, 质子产生后经过直线加速器 (LINAC)、质子同步加速器 (Proton Synchrotron, PS)、质子同步加速升压器 (Proton Synchrotron Booster, PSB)、超级质子同步加速器 (Super Proton Synchrotron, SPS) 相继被加速到 450 GeV, 随后质子被分成两束, 在 LHC 加速腔体内的不同束流管中相向被加速到 6 TeV, 最终两束质子对撞时的质心能量为 13 TeV。表 2.2.1 是 LHC 的部分设计参数。

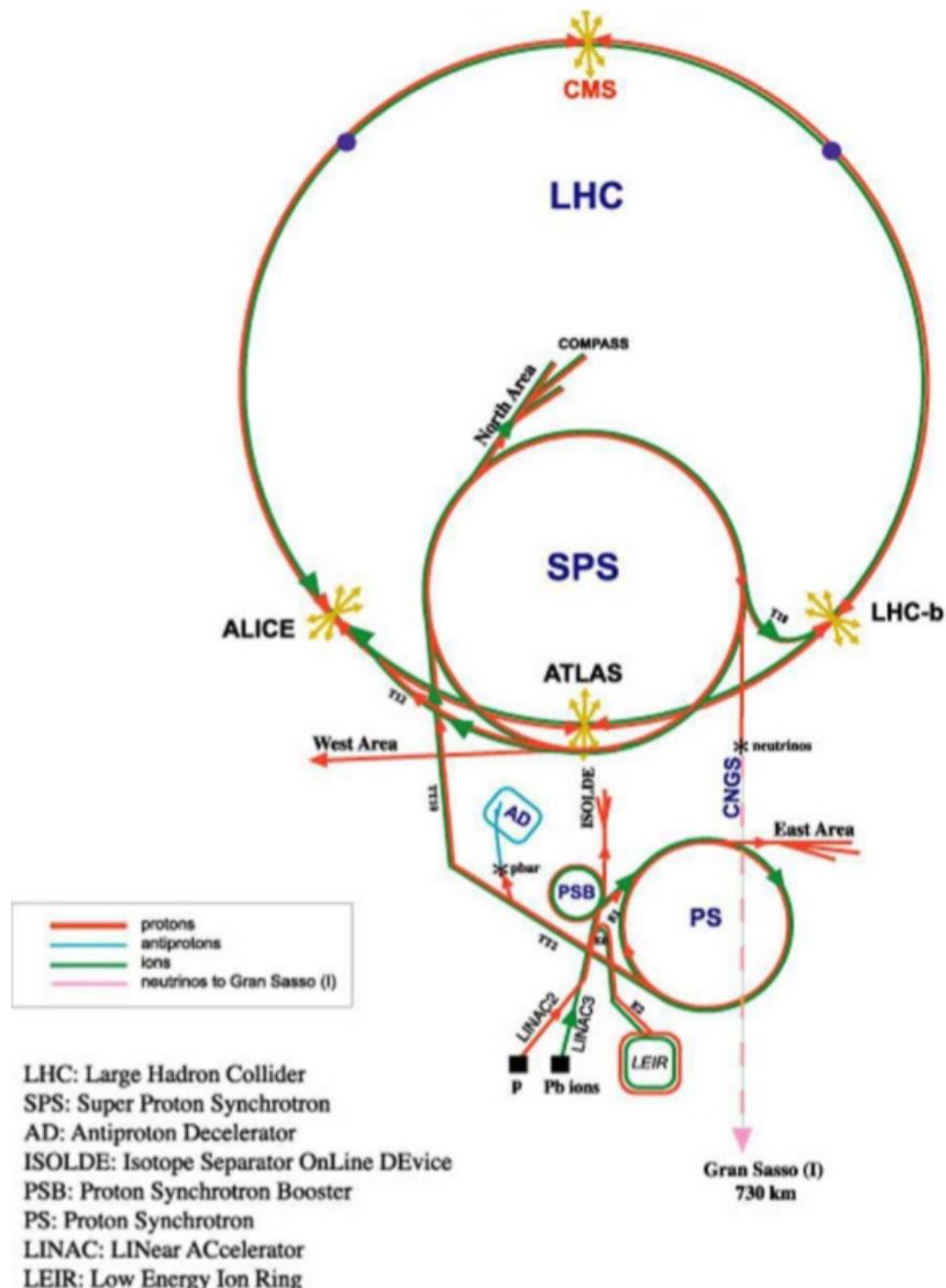


图 2.2.1 LHC 及其附属装置示意图。

表 2.2.1 LHC 的部分设计参数。

周长	26.7 km
注入能量	0.45 TeV
设计亮度	$10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
亮度寿命	10 h
束流寿命	22 h
束团间隔	25 ns
束团中质子数	1.15×10^{11}
储存束流能量	334 MJ
质子运行一圈损失能量	7.6 eV
每束束流辐射能量	3.6 kw

2.2.2 LHCb 装置简介

标准模型中弱相互作用给出的 CP 破坏尺度太小而不能对宇宙中正反物质的不对称性给出满意的解释。因此，需要用标准模型或超出标准模型的 CP 破坏的新来源去解决问题。LHCb 是一个单臂前向探测器，作为 LHC 上重点研究重味物理的实验，最初的设计目标是利用高统计量优势更高精度去测量标准模型参数，研究 b 物理和 c 物理中的 CP 破坏和稀有衰变，为新物理提供间接证据。另外，LHCb 上高统计量的实验数据使得在重味物理中寻找 CP 破坏新的来源成为可能。并且 13 TeV 下更高的 $c\bar{c}$ 微分截面和 $b\bar{b}$ 微分截面，使得 LHCb 实验成了最丰富的 c 强子和 b 强子来源。LHCb 探测器总体具有好的顶点位置分辨率、好的固有时间分辨率、好的动量分辨率、好的粒子鉴别能力，以及在其几何接受度范围内物质尽可能少，从而减少多级散射带来的影响。LHCb 探测器装置示意图如 2.2.2 所示。

2.2.3 LHCb 数据处理框架

LHCb 软件采用的是基于面向对象的 Gaudi 框架。LHCb 的应用程序包括事例产生、探测器模拟、数字化、重建、触发、物理分析和事例及探测器显示等，都是在 Gaudi 框架中来完成它们的任务。Gaudi 的一大特色是数据处理的算法部分被当成对象来处理，对应用程序在运行时进行设置，是 Gaudi 提供的一个重要服务作业选项服务，它通过和成分的数据成员（如算法）相关联的属性（properties）来进行。基于 Gaudi 框架的数据处理应用程序和数据流如图 2.2.3 所示。

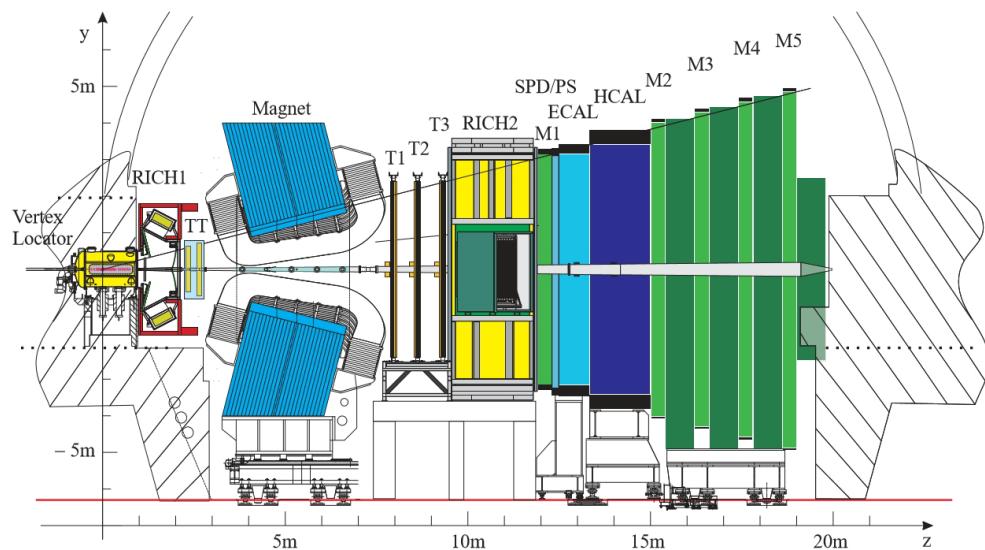


图 2.2.2 LHCb 探测器装置示意图。

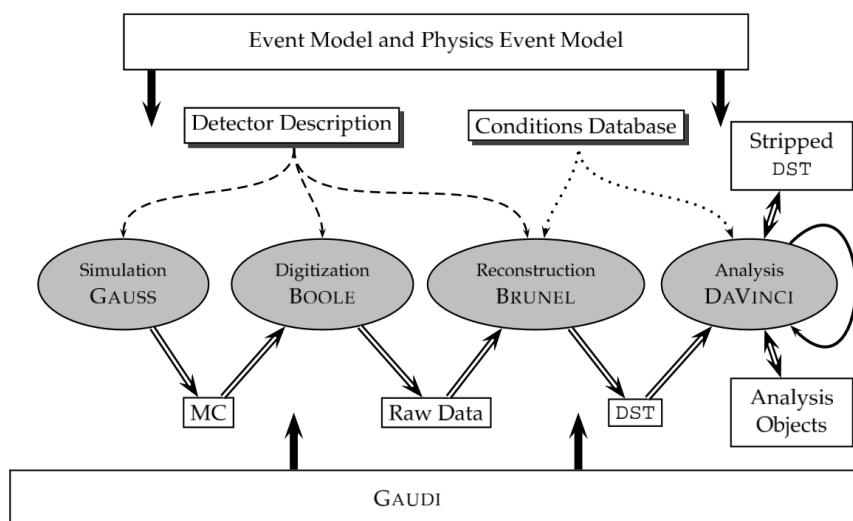


图 2.2.3 LHCb 数据处理应用程序和数据流。

2.3 真实数据样本和 MC 样本

本论文中，直接采用 Trubo Stream 真实数据用于分析，也就是说读出来的数据中 $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 这一衰变道已经经过了重建。在线选择我们采用了 *L0DiMuon*, *Hlt1DiMuonHighMass* 和 *Hlt2DiMuonPsi2STurbo* 三个触发选择条件，具体条件如表 2.3.1 所示。

表 2.3.1 零级触发和高级触发的具体条件汇总表。

触发条件	主要的选择条件
<i>L0DiMuon</i>	$p_{T1} \times p_{T2} > 1.69(\text{GeV}/c)^2$, nSPDHits < 900
<i>Hlt1DiMuonHighMass</i>	$p > 6 \text{ GeV}/c$ $p_T > 0.3 \text{ GeV}/c$ vertex DOCA < 0.2 Track $\chi^2/\text{ndf} < 3$ vertex $\chi^2/\text{ndf} < 25$ Muon ID: isMuon $m_{\mu^+ \mu^-} > 2.7 \text{ GeV}/c^2$
<i>Hlt2DiMuonPsi2STurbo</i>	$ m_{\mu^+ \mu^-} - m_{\psi(2S)} < 120 \text{ MeV}/c^2$ $p_{T\psi(2S)} > 2000 \text{ MeV}/c$

本论文利用 LHCb 实验上 2015 年收集的 275 pb^{-1} 数据，采用了 TCK0x10600A2, TCK0x10600A3, TCK0x10800A2 和 TCK0x11400A8 触发条件选择之后的数据。这几个选择条件针对 μ 子的选择是一样的。它们对应的各自积分亮度如下所示：

- 83.57 pb^{-1} with TCK 0x10600A2 MagDown;
- 60.00 pb^{-1} with TCK 0x10600A3 MagDown;
- 11.05 pb^{-1} with TCK 0x10800A2 MagDown;
- 48.56 pb^{-1} with TCK 0x10800A2 MagUp;
- 71.52 pb^{-1} with TCK 0x11400A8 MagUp.

LHCb 上针对效率的研究，采用的是蒙特卡洛 (MC) 样本，MC 样本需要通过专门申请产生。为研究接受度和重建效率，本论文产生了 8M 产生子水平的 MC 样本和 8M 全模拟型 MC 样本。简单介绍一下 LHCb 上 MC 样本的模拟模块：PYTHIA 软件产生 pp 对撞数据，EVTGEN [47] 软件描述强子的衰变，用 PHOTOS 产生末态辐射，用 GEANT4 包描述粒子的产生及其相互作用。特别指

出整个过程中，粲夸克偶素的模拟是非极化的。

2.4 离线选择

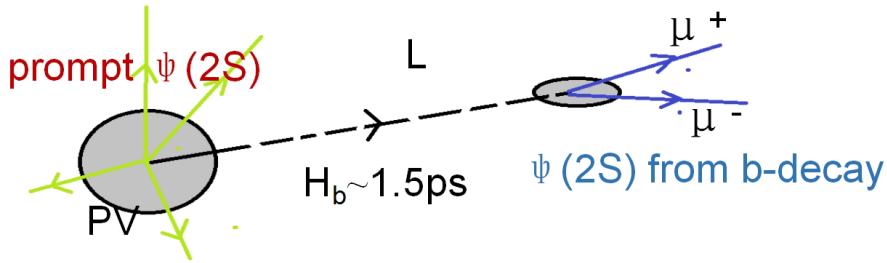
上文表 2.3.1 已经表明，针对在线选择，本文采用了 L0Dimuon、Hlt1Dimuon HighMass 和 Hlt2DimuonPsi2STurbo 三个触发选择条件。为进一步提高信噪比，本文还进行了离线选择：在径迹的选择中，为了减少鬼径迹的影响，选择条件要求径迹是鬼径迹的概率小于 0.3；为了选择好的 μ 径迹，要求径迹的重建质量 $\chi^2/ndof$ 小于 3，每条径迹的横动量 p_T 大于 1200 MeV/c，赝快度 η 满足 $2.0 < \eta < 4.9$ ，并且对径迹做了粒子鉴别，要求被鉴别为 μ ，具体的粒子鉴别要求 IsMuon&& MC15TuneV1_ProbNNmu*(1-MC15TuneV1_ProbNNpi) > 0.6；为了选择好的 $\psi(2S)$ 的径迹，要求顶点 χ^2 的 p 值大于 0.5%； $\psi(2S)$ 的质量窗卡在了 [3566, 3806] MeV/c²。最终离线选择条件总结如表 2.4.1 所示。

表 2.4.1 $\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 离线选择条件。

变量	选择条件
径迹: 鬼径迹概率	< 0.3
μ : 横动量 p_T	> 1200 MeV/c
μ : 赝快度 η	$2.0 < \eta < 4.9$
μ : 径迹质量 χ^2/ndf	< 3
μ : 粒子鉴别	IsMuon && MC15TuneV1_ProbNNmu*(1-MC15TuneV1_ProbNNpi) > 0.6
$\psi(2S)$: 顶点 Prob(χ^2/ndf)	> 0.5%
赝寿命 t_z	(-10, 10) ps
t_z 的不确定性:	< 0.3ps
$\psi(2S)$: 质量窗	[3566, 3806] MeV/c ²
$\psi(2S)$: 信号的零级触发	L0DiMuon
$\psi(2S)$: 信号的高级触发 HLT1	Hlt1DiMuonHighMass

$\psi(2S)$ 的两种来源： pp 对撞直接产生和 b 强子飞行一段时间衰变产生，信号衰变链如 2.4.1 所示：为提取 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 衰变产生的 $\psi(2S)$ 介子的信号数目，本文采用了变量赝寿命 t_z ，公式如下：

$$t_z = \frac{(z_{\psi(2S)} - z_{PV}) \times M_{\psi(2S)}}{p_z}, \quad (2.4.1)$$

图 2.4.1 两种信号 $\psi(2S)$ 衰变链示意图。

其中, $z_{\psi(2S)}$ 为 $\psi(2S)$ 衰变顶点沿 Z 轴的分量; z_{pv} 为初始的 pp 对撞顶点沿 Z 轴的分量; $M_{\psi(2S)}$ 为 $\psi(2S)$ 的 PDG 质量; p_z 为动量在 z 轴上的投影。

2.5 $\psi(2S)$ 微分产生截面测量

本论文核心是测量 $\psi(2S)$ 的微分产生截面, 微分产生截面的测量公式有如下定义:

$$\frac{d^2\sigma}{dy dp_T} = \frac{N(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{L} \times \varepsilon_{tot} \times \mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-) \times \Delta y \times \Delta p_T}. \quad (2.5.1)$$

其中:

- $N(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 是给定 (p_T, y) 内拟合得到的信号数目;
- \mathcal{L} 是总的积分亮度;
- ε_{tot} 是总的效率;
- 对于 $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 我们真正计算的时候采用的是 $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow e^+ e^-)$, 因为考虑到轻子普适性二者应该是等价的, 而 $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow e^+ e^-)$ 的精度要比 $\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ 好很多;
- $\Delta p_T = 1 \text{ GeV}/c$;
- $\Delta y = 0.5$ 。

$\psi(2S)$ 介子 p_T 、 y 的子区间边界定义如下所示:

- p_T 边界 [GeV/c]: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20;
- y 边界: 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5.

显而易见, 在微分截面均值的计算中, 给定运动学范围内信号数目的提取和效率的研究是最关键的两部分。

2.6 信号提取

为提取信号数目，本论文采用了质量-寿命联合拟合技术。针对质量部分，信号用双 Crystal Ball(CB) 函数 [48] 来描述。其定义如下：

$$f_{\text{CB}}(m; \mu, \sigma, \alpha, n) = \begin{cases} \left(\frac{n}{|\alpha|}\right)^n e^{-\frac{1}{2}\alpha^2} \left(\frac{n}{|\alpha|} - |\alpha| - \frac{m-\mu}{\sigma}\right)^{-n} & \frac{m-\mu}{\sigma} < -|\alpha| \\ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{m-\mu}{\sigma}\right)^2\right) & \frac{m-\mu}{\sigma} > -|\alpha|. \end{cases}, \quad (2.6.1)$$

CB 函数是由一个高斯函数的核心 (通过参数 μ 和 σ 描述) 和一个左端的用来描述初态辐射效应的尾巴 (通过参数 α 和 n 描述) 构成。在拟合的时候并不是所有的参数都是浮动的我们固定了其中的一些参数或者参数与参数直接的关系 (这些值大多通过 MC 研究固定)。比如，两个 CB 函数共享同一个 μ 值，但是宽度不同，分别为 σ_1 和 σ_2 。但是 σ_1 和 σ_2 直接具有固定的关系，即， $\sigma_2 = 25.7 + \sigma_1$ 。此外，通过 MC 模拟，我们将两个 CB 函数之间的相对比例固定为 0.96. n 固定到了 1， α 和 σ 直接具有关系 $\alpha = 2.066 \pm 0.0085\sigma - 0.00011\sigma^2$ (此处只两个 CB 函数各自的 α 和 σ 都具有同样的关系)。因此在最终的拟合里面，只要 μ 和 σ_1 是浮动的。对于质量谱上的本底成分采用指数函数 $f_{\text{bkg}}(m) = a_0 e^{-p_0 m}$ 来描述。

针对 t_z 的描述， pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子信号用一个 $\delta(t_z)$ 函数描述， b 强子飞行一段时间衰变产生的 $\psi(2S)$ 介子信号用指数函数描述。因为数据是经过了探测器重建的，所以两个信号过程应该都要卷积一个分辨函数之后才能描述数据。分辨函数用两个高斯来描述，其参数化形式如下：

$$f_{\text{resolution}}(t_z; \mu, S_1, S_2, \beta) = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}S_1\sigma} e^{-\frac{(t_z-\mu)^2}{2S_1^2\sigma^2}} + \frac{1-\beta}{\sqrt{2\pi}S_2\sigma} e^{-\frac{(t_z-\mu)^2}{2S_2^2\sigma^2}}. \quad (2.6.2)$$

参数 σ 我们取自数据中 t_z 的重建误差，是逐个事例计算的。另外一种情况我们也需要考虑到“wrong” PV 事例，这指的是该事例本身是真正的 $\psi(2S)$ ，但是由于重建效率的原因，个别事例的 PV 没有正确重建出来，从而指定了一个错误的 PV。这类事例的 t_z 分布会拖着一个较长的尾巴。这种事例我们通过数据中故意将 PV 搞错来重新计算 t_z ，从而拿到他们的形状。具体做法是在当前事例的 t_z 重建过程中使用下一个事例的 PV 信息来进行计算。即，

$$t_z^{\text{next}} = \frac{(z_{\mu\mu} - z_{\text{PV}}^{\text{next}}) \times m_{\mu\mu}}{p_z}, \quad (2.6.3)$$

由于 LHCb 非常好的顶点重建能力，这种事例其实非常之少。

t_z 本底用一个 δ 函数加多个指数函数的经验公式 2.6.4 来描述，本底参数值通过拟合质量谱的边带区域进行了固定。质量谱的边带区选择为 $3566 < m_{\mu^+\mu^-} <$

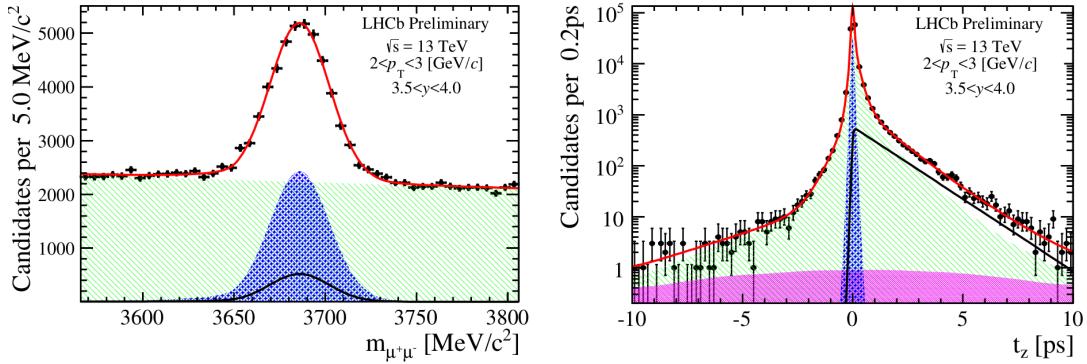


图 2.6.1 在 $\psi(2S)$ 运动学区间 $2 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$, $3.5 < y < 4.0$ 内的不变质量拟合分布 (左图) 和赝寿命拟合分布 (右图)。红色的实线为总的拟合函数。绿色区域为本底。蓝色的交叉虚线区域为直接产生的 $\psi(2S)$, 黑色的为来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子。紫色区域为 wrong PV 事例的分布, 由于量很少, 在质量谱上小到看不到了。

$3620 \text{ MeV}/c^2$ 和 $3750 < m_{\mu^+\mu^-} < 3806 \text{ MeV}/c^2$ 的区域。

$$f_{\text{background}} = \left[(1 - f_1 - f_2 - f_3 - f_4) \delta(t_z) + \theta(t_z) \left(\frac{f_1}{\tau_1} e^{-t_z/\tau_1} + \frac{f_2}{\tau_2} e^{-t_z/\tau_2} \right) + \theta(-t_z) \frac{f_3}{\tau_3} e^{t_z/\tau_3} + \frac{f_4}{2\tau_4} e^{-|t_z|/\tau_4} \right] * \left(\frac{\beta'}{\sqrt{2\pi} S'_1 \sigma} e^{-\frac{(t_z - \mu)^2}{2S'^2_1 \sigma^2}} + \frac{1 - \beta'}{\sqrt{2\pi} S'_2 \sigma} e^{-\frac{(t_z - \mu)^2}{2S'^2_2 \sigma^2}} \right). \quad (2.6.4)$$

所以, 最终对于 t_z 的拟合函数形式为:

$$F_{t_z}(t_z; n_{\text{prompt}}, n_{\text{tail}}, n_{\text{bdecay}}, n_{\text{bkg}}, \mu, S_1, S_2, \beta, \tau_b) = \left(n_{\text{prompt}} \delta(t_z) + \frac{n_{\text{bdecay}}}{\tau_b} e^{-t_z/\tau_b} \right) * f_{\text{resolution}}(t_z; \mu, S_1, S_2, \beta) + n_{\text{tail}} f_{\text{tail}}(t_z) + n_{\text{bkg}} f_{\text{background}}(t_z), \quad (2.6.5)$$

其中 n_{bkg} , n_{prompt} , n_{bdecay} 和 n_{tail} 指的分别是本底事例数, 直接产生的 $\psi(2S)$ 信号, 来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 信号数以及 wrong PV 事例数。

图 2.6.1展示了动力学区间 $2 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$, $3.5 < y < 4.0$ 范围内的质量-寿命联合拟合图。其中蓝色代表 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子的分布, 黑色代表 b 强子飞行一段时间后产生的 $\psi(2S)$ 介子的分布, 绿色代表本底分布, 红色代表总的分布。在二维拟合过程中, 质量谱拟合形状的参数 μ_{mass} , σ_{mass} , p_0 , 通过对一维的质量谱拟合进行了固定。所有的拟合参数我们放在了附录 A 中的表 A.0.1-表 A.0.5。

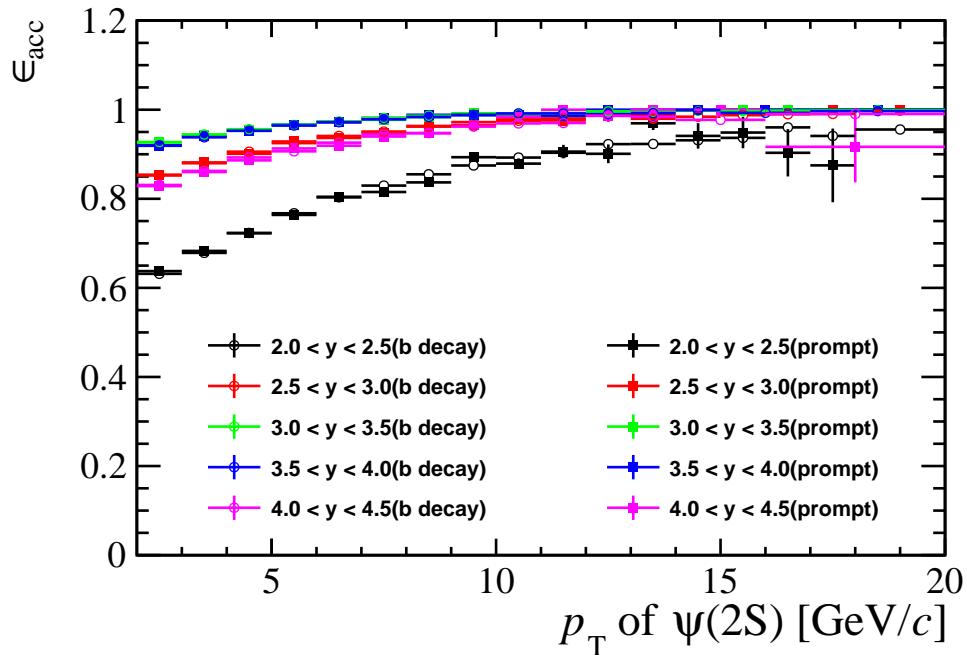


图 2.7.1 以 p_T 、 y 为函数的接受度效率分布。

2.7 效率的测量

LHCb 上总的效率 ϵ_{tot} 由四部分组成：接受度效率 ϵ_{acc} 、重建选择效率 $\epsilon_{rec\&sel}$ 、粒子鉴别效率 ϵ_{MuonID} 、触发效率 $\epsilon_{Trigger}$ ，总的效率 ϵ_{tot} 的计算公式如 2.7.1 所示：效率主要是通过 MC 进行研究， pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的效率有可能会有轻微的差别，我们对这两者分开进行计算。

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{acc} \times \epsilon_{rec\&sel} \times \epsilon_{MuonID} \times \epsilon_{Trigger}, \quad (2.7.1)$$

2.7.1 接受度效率

接受度效率的研究思路，如公式 2.7.2 所示：

$$\epsilon_{acc} \equiv \frac{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中 } \psi(2S) \text{ 衰变而来的两个 } \mu \text{ 都在 LHCb 接受范围内的 } \psi(2S)}{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中产生的 } \psi(2S)}. \quad (2.7.2)$$

公式的分子中要求两个 μ 的极角（相对 z 轴的夹角）在 $[10 \square 400]$ mrad 的范围内。图 2.7.1 给出了直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的接受度效率分布。

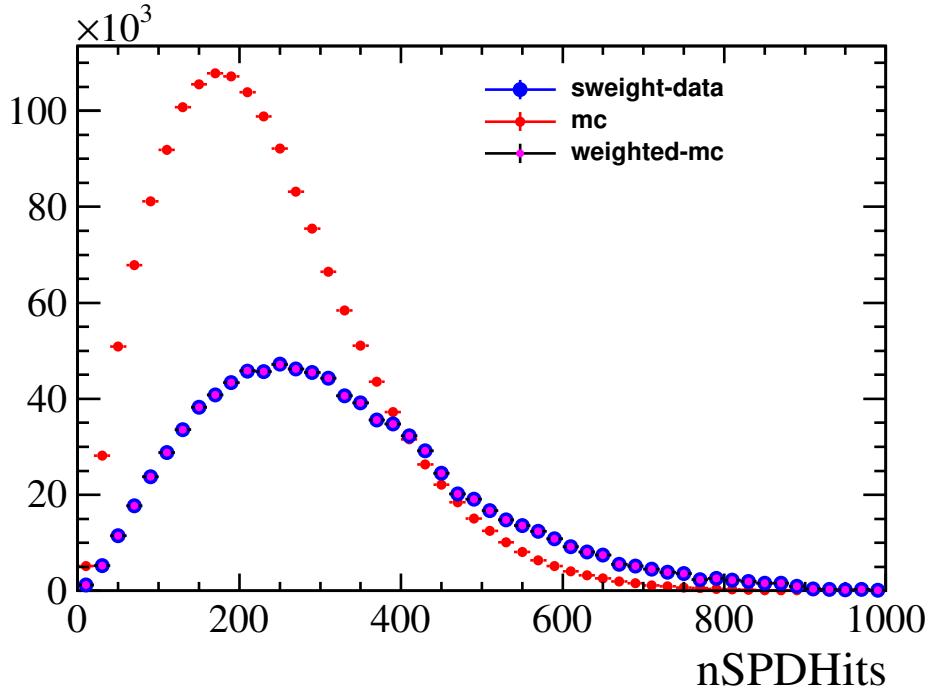


图 2.7.2 数据和 MC 中多重数的分布。

2.7.2 重建选择效率

重建选择效率计算公式如下所示：

$$\epsilon_{\text{rec\&sel}} \equiv \frac{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中被探测且经过了重建选择但未加 } PID_\mu \text{ 要求的 } \psi(2S)}{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中 } \psi(2S) \text{ 衰变而来的两个 } \mu \text{ 子都在 LHCb 接受范围内的 } \psi(2S)}. \quad (2.7.3)$$

重建选择效率包含了表 2.4.1除了粒子鉴别之外其它所有涉及到径迹重建的效率。

研究表明 MC 得出的效率和真实数据中的效率有些差别，我们需要按照给定的效率修正表 2.7.3来进行修正。在每个 (p_T, y) 的区间之内修正重建效率之前，我们先对 MC 事例多重数进行了修正，使其分布和数据保持一致，见图 2.7.2。因为多重数也会影响效率的计算。

对于每一个 p_T, y 区间，重建选择效率 $\epsilon_{\text{rec\&sel}}$ 的分布见图 2.7.4，需要指出在研究重建选择效率的时候，对于 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 介子效率略有差异，原因主要有两个：一个是因为来自 b 强子的事例有较大的径迹重建数；另一个原因是来自 b 强子的事例有一个大约 1.5 ps 的有效寿命。

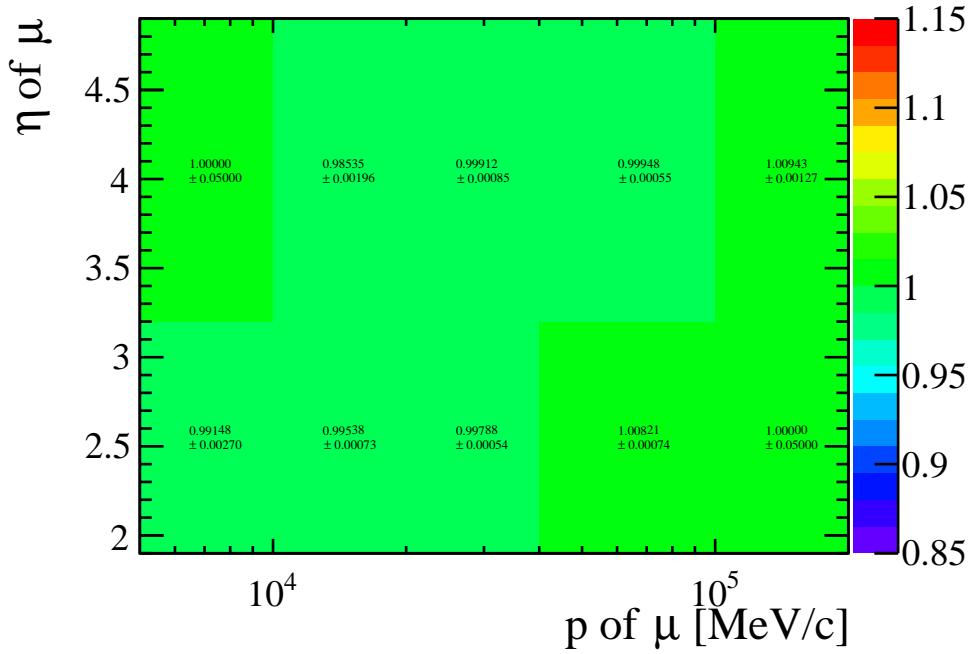


图 2.7.3 在每个 p_μ 和 η_μ 的区间之内，MC 和数据的效率修正表。

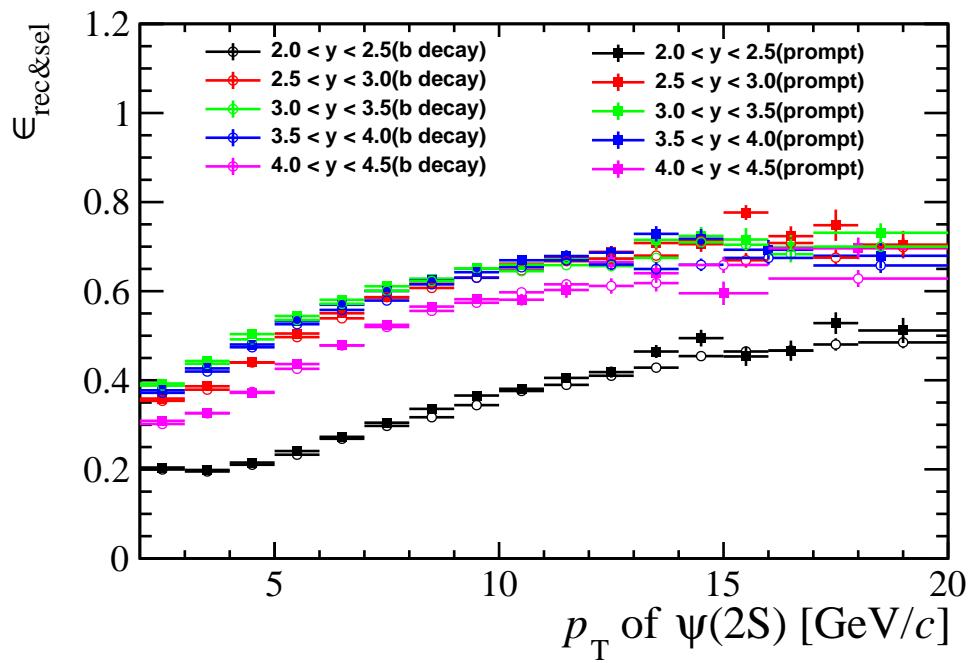
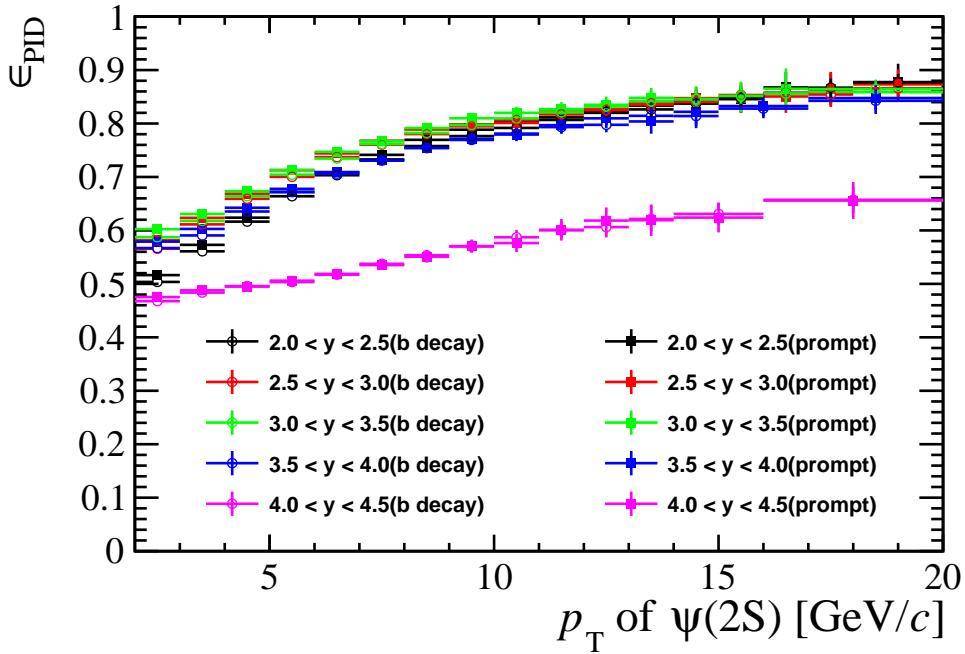


图 2.7.4 以 p_T 、 y 为函数的重建选择效率分布图。

图 2.7.5 以 p_T 、 y 为函数的 μ 粒子鉴别效率分布。

2.7.3 μ 的粒子鉴别效率

对于 μ 的粒子鉴别效率的研究，研究思路如公式所示：

$$\epsilon_{\text{MuonID}} \equiv \frac{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中被探测且经过了重建选择并加了 } PID_\mu \text{ 要求的 } \psi(2S)}{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中被探测且经过了重建选择但未加 } PID_\mu \text{ 要求的 } \psi(2S)}. \quad (2.7.4)$$

实际计算的时候，我们依然采用 MC 样本计算，然后用控制样本来修正 MC 数据差异的方式。PID calibration 效率表是一个 $p - \eta - nSPDhits$ 的三维表，这里用 nSPD 的击中数代表了径迹的多重数。在每一个 (p_T, y) 的运动学区间内，我们根据此区间内每个事例的效率值进行平均得到该区间内的效率值。而每个事例的效率是通过两个 μ 的效率（依赖于各自的 $(p, \eta, nSPDhits)$ ）的乘积来进行计算。具体的计算公式如下：

$$\bar{\epsilon}(p_T, y) = \frac{\sum \epsilon_{\mu^+}(p_{\mu^+}, \eta_{\mu^+}, nSPDhits) \epsilon_{\mu^-}(p_{\mu^-}, \eta_{\mu^-}, nSPDhits)}{N_{\text{res}\&\text{sel}}}. \quad (2.7.5)$$

其中 $\epsilon_{\mu^+}(p_{\mu^+}, \eta_{\mu^+}, nSPDhits)$ 和 $\epsilon_{\mu^-}(p_{\mu^-}, \eta_{\mu^-}, nSPDhits)$ 是来自于效率修正表修正之后的效率值。每一个 (p_T, y) 的运动学区间内， μ 的粒子鉴别效率 ϵ_{MuonID} 展示在图 2.7.5 内。

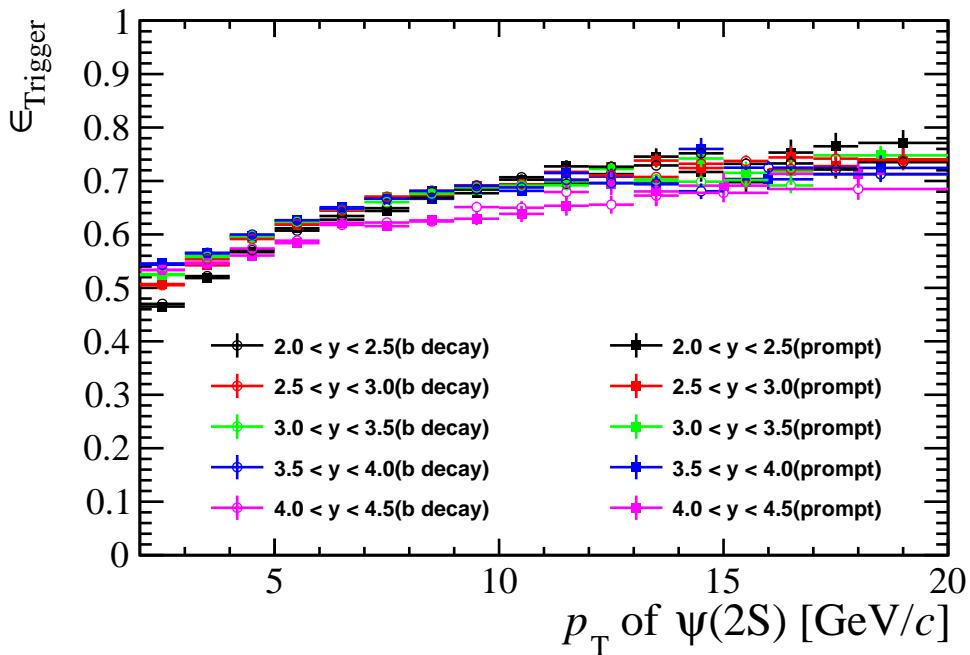


图 2.7.6 以 p_T 、 y 为函数的触发效率分布。

2.7.4 触发效率

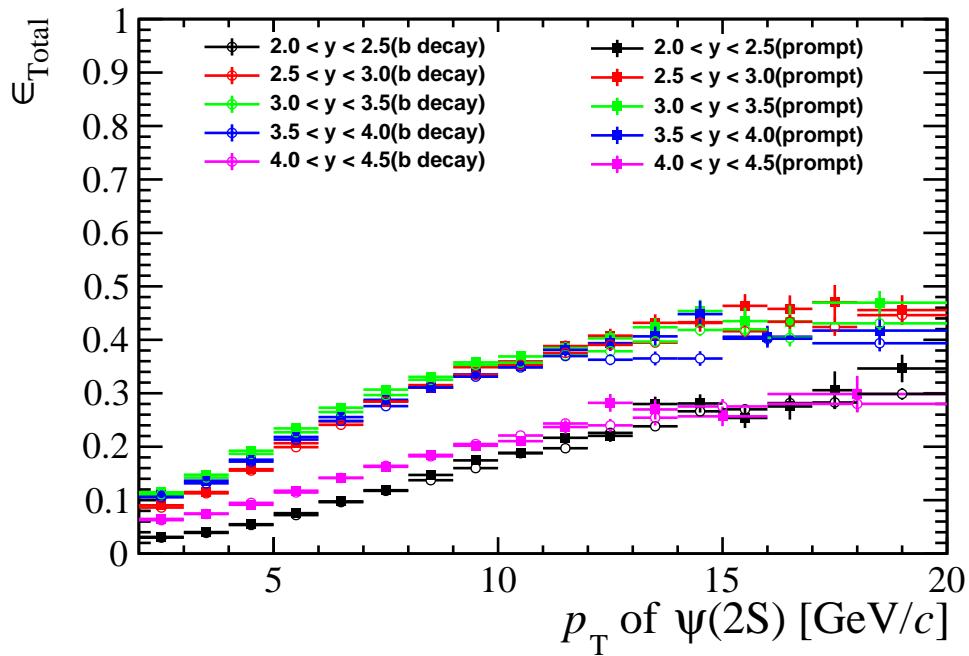
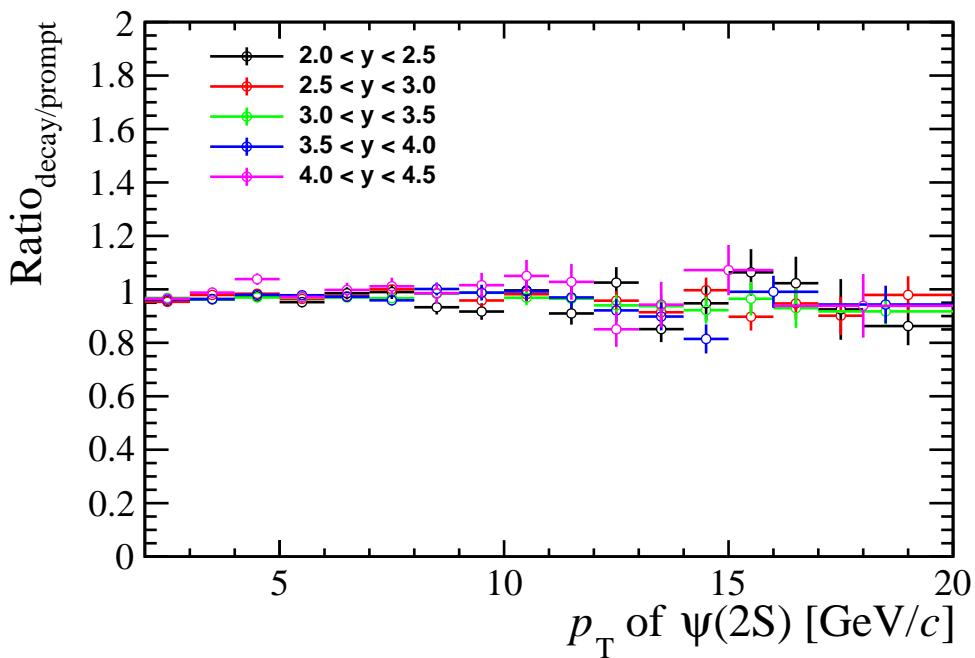
触发效率的计算公式下所示：

$$\epsilon_{\text{Trigger}} \equiv \frac{\text{加了分母中的选择条件且经过触发之后的 } \psi(2S)}{\text{子区间 } (p_T, y) \text{ 中被探测且经过了重建选择并加了 } \mu \text{ 粒子鉴别要求的 } \psi(2S)} \quad (2.7.6)$$

在效率计算中，起主要贡献的仅仅是 L0Dimuon 和 Hlt1DimuonHighMass 这两部分，而对 Hlt2DimuonPsi2STrubo 这部分的效率几乎是 100%，因为离线选择条件比起 Hlt2DimuonPsi2STrubo 而言，加了更紧的条件。每个 (p_T, y) 区间内，触发效率 $\epsilon_{\text{Trigger}}$ 的分布图如 2.7.6 所示。

2.7.5 总的效率

pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 介子的总效率图如 2.7.7 所示。总效率的数值结果，我们总结在附录 B 的表 B.0.1 和表 B.0.2 中。为了方便比较，我们讲直接产生的 $\psi(2S)$ 和来自于 b 强子衰变来的 $\psi(2S)$ 的总效率做了个比值放在图 2.7.8。我们注意到二者效率基本是一致的。

图 2.7.7 在不同的 p_T 和 y 区间内， $\psi(2S)$ 的总效率分布。图 2.7.8 在不同的 p_T 和 y 区间内，直接产生的 $\psi(2S)$ 和来自于 b 强子衰变来的 $\psi(2S)$ 的总效率比值。

2.8 系统误差分析

本节针对在计算微分产生截面时，由于方法的采用从而导致的系统误差进行了研究。主要包括事例选择中的信号模型、本底模型的选择，效率研究过程中 μ 径迹重建效率，粒子鉴别效率、触发效率，以及由于全事例选择、初始顶点的 cut 条件选择、亮度、分支比、 $p_T - y$ 子区间边界选择、MC 的统计量等引入的系统误差，还分析了极化部分导致的系统误差。以下分别进行研究。系统误差的研究结果总结如表 2.8.1 所示：

2.8.1 质量谱信号形状

本文最初使用双 CB 函数描述信号，为了研究双 CB 模型带来的系统误差，此处采用另外一种模型（即从 MC 中抽取出来的模型 [49]）去描述信号，为了更好的描述真实数据，卷积了一个高斯函数来作为分辨函数描述信号形状。两者拟合结果的差距，作为了系统误差，误差的范围变化从 0.0 到 5.9%。

表 2.8.1 $\psi(2S)$ 截面测量的系统误差汇总表。其中 t_z 拟合只会影响到来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 的截面测量。标记了 * 项目指的是在不同区间内该项误差是关联的。

来源	系统误差值 (%)
质量谱信号形状 *	0.0 – 5.9
辐射尾巴 *	1.0
径迹重建 *	$(0.1 - 2.4) \oplus (2 \times 0.8)$
粒子鉴别 *	$(0.1 - 0.9) \oplus (0.1 - 4.0)$
触发 *	0.6 – 7.1
$p_T - y$ 子区间边界条件	0.1 – 1.8
顶点约束 *	0.4
亮度 *	3.9
$\mathcal{B}(\psi(2S) \rightarrow e^+ e^-)^*$	2.2
MC 统计量	0.8 – 5.7 (直接产生的 $\psi(2S)$) 0.7 – 12.1 (来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$)
t_z 拟合 * (只影响来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$)	0.1 – 5.9

2.8.2 初态辐射

由于初态辐射效应的存在，有可能会导致 $\psi(2S)$ 的信号落在我们的质量窗口外边。通过 MC 样本研究这种效应对截面测量的影响有 1.0%。

2.8.3 全事例选择

对于零级出发条件 L0Dimuon 而言，SPD 击中的数目小于 900，为了研究此 cut 的效率，本文采用了两个 Γ 函数来还原原本的分布，然后分别研究采用了此要求对真实数据和 MC 的效率差异，将两者效率的差距作为 (Global Event Cuts, GECs) 带来的系统误差。经研究表明此项系统误差非常之小，可以安全的忽略。

2.8.4 径迹重建

LHCb 实验上对于径迹重建效率的研究采用的是标记-探针技术 [50]。系统误差来自两方面，一是由于 tracking 效率表 (表如 2.7.3 所示) 的统计误差引入的，针对此来源本文采用了 toy MC 的方法得到由于有限的样本统计量带来的系统误差。这项误差取值为 0.1%-2.4%。事例多重数变量的选择是另一个系统误差的来源，最后安排每条径迹为 0.8% [51]。

2.8.5 μ 的粒子鉴别

针对 μ 粒子鉴别效率的计算，误差来自于两部分。一是有限的控制样本统计量，对于这部分系统误差我们依然采用了 toy MC 的方法，不同的 (p_T, y) 区间内相应的系统误差为 0.1% 至 0.9%；另一个是人为的对控制样本分区间的分配模式引入的系统误差，在这里我们改变了原来的分配模式，将改变前后效率的差距 0.1 – 4.0% 作为系统误差。

2.8.6 触发

为研究触发效率导致的系统误差，这里本文采用了另外一种常用方法，即 TISTOS 方法 [52]。分别对 MC 和真实数据采用 TISTOS 的方法，二者之间的差距做为触发效率导致的系统误差。对于真实数据，TIS 和 TISTOS 选择后通过拟合取其数目。MC 由于没有本底，采用数数的方式。最终发现约 0.6 – 7.1% 的系统误差需要考虑。

2.8.7 $p_T - y$ 子区间边界选择

本文采用 p_T 为 1 GeV/c, y 为 0.5 的间隔进行了微分产生截面的研究。在特定的 p_T 、 y 的区间内，我们使用了该区间内的一个平均效率值来计算整个区间内的效率。但是由于所分区间毕竟不是无限小的，在这个区间之内 MC 和数据在 p_T 谱和 y 谱的差异依然会引进系统误差。我们在计算效率之前将 MC 的 p_T 谱和 y 谱分布重新抽样至和数据一致，然后再重新计算效率。二者之间的差别 0.1 – 1.8%，作为此项系统误差。

2.8.8 顶点拟合

对于初始顶点拟合的 cut 条件引入的系统误差，本文通过比较真实数据和 MC 样本加了这一条件的效率值之间的差距作为系统误差，由于不同给定运动学区间内这一系统误差的浮动不是很大，所以最后取 0.4% 作为最终结果。

2.8.9 亮度

亮度 [53] 的系统误差有专门的专家组研究，本文直接引用了该组的研究结果。

2.8.10 分支比

由于轻子的普适性允许本文用 $\psi(2S) \rightarrow e^+e^-$ 代替 $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$ 进行分支比的研究，从而引进了 2.2% 的系统误差，而 $\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的精度较低 (10%)。

2.8.11 MC 样本统计量

有限的直接产生 $\psi(2S)$ 的 MC 数量，带来了 0.8%-5.7% 的系统误差。来自 b 衰变产生的 $\psi(2S)$ 的 MC 数量，带来了 0.7%-12.1% 的系统误差。

2.8.12 t_z 拟合

通过改变对本底参数的拟合方式，具体就是将对质量谱边带区本底的拟合改为对整个整个质量区的拟合，只不过通过 sPlot 技术将其中的信号提出掉。这一项系统误差只影响来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 的截面测量。其大小为 0.1 – 5.9%.

2.9 结果报道

2.9.1 截面结果

以 p_T 、 y 为函数的 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 和由 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 微分产生截面分布如图 C.0.1 和图 C.0.2 所示。相应的数值结果我们放在附录 C 的

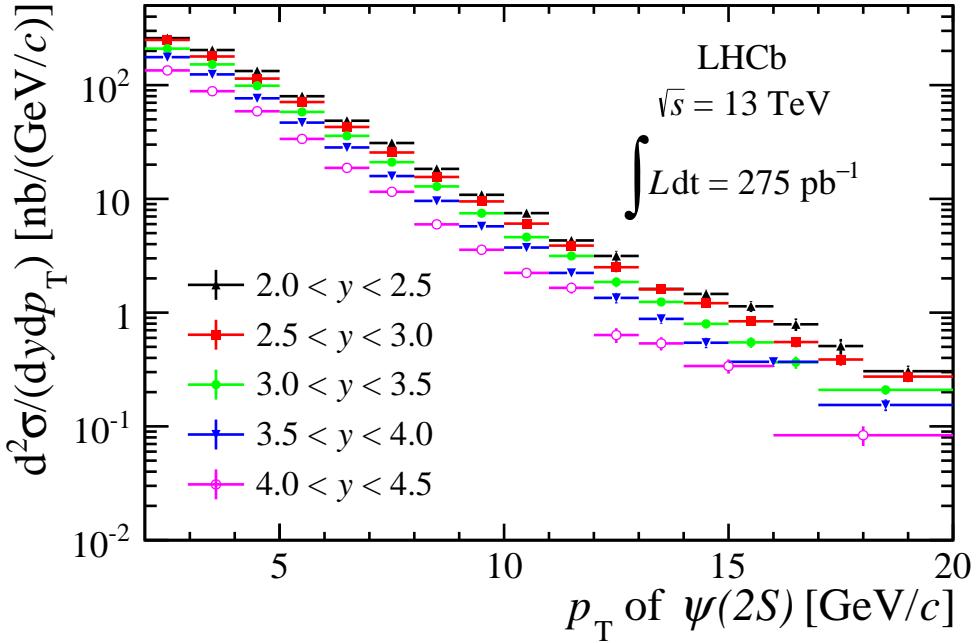
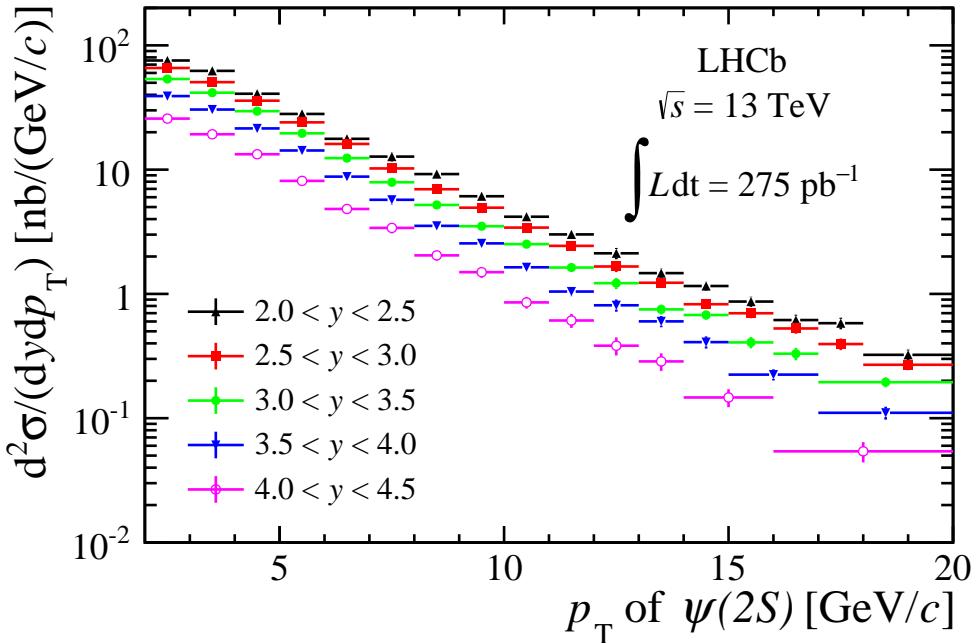
图 2.9.1 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 的双微分产生截面分布图。图 2.9.2 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 的双微分产生截面分布图。

表 C.0.1 和表 C.0.2 之中。

通过将双微分截面积分掉 y , 我们可以得到 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 与来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 随着 p_T 变化的单微分截面, 如图 2.9.3 所示。我们将直接产生的 $\psi(2S)$ 和 NRQCD [54] 的理论计算, 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 和 fixed-order-plus-next-leading-logarithm (FONLL) [42] 的理论计算进行了比较。通

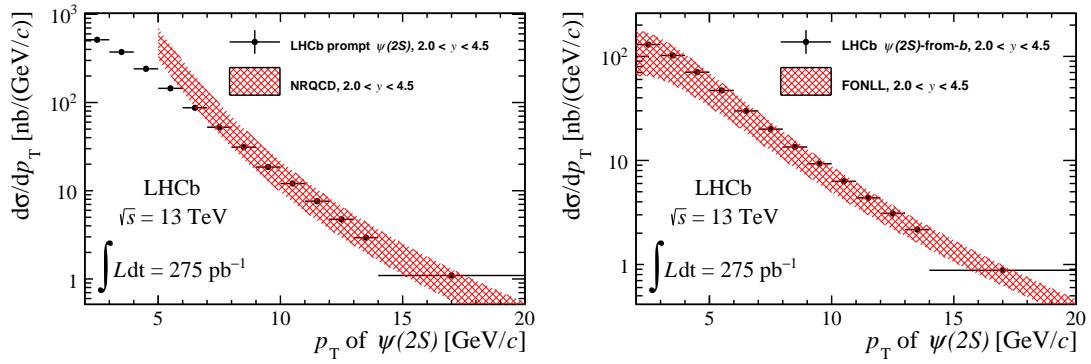


图 2.9.3 以 p_T 为函数的 (左) pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 微分截面与 NRQCD 计算 [54] 的比较和 (右) 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 微分截面分布与 FONLL [42] 的计算比较。

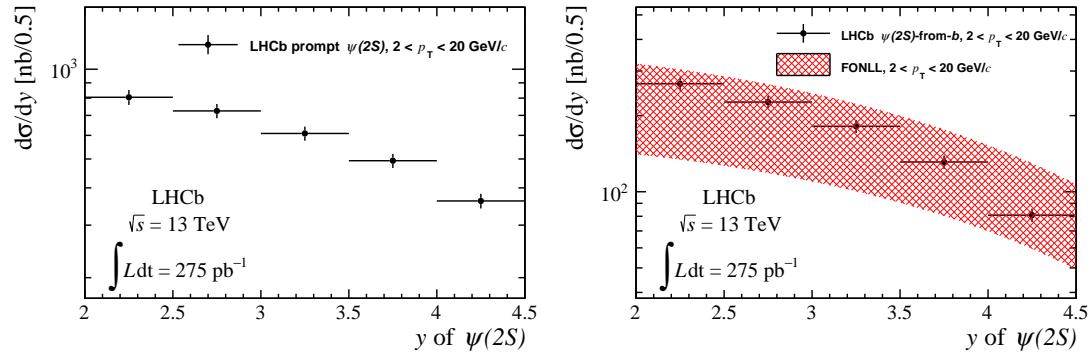


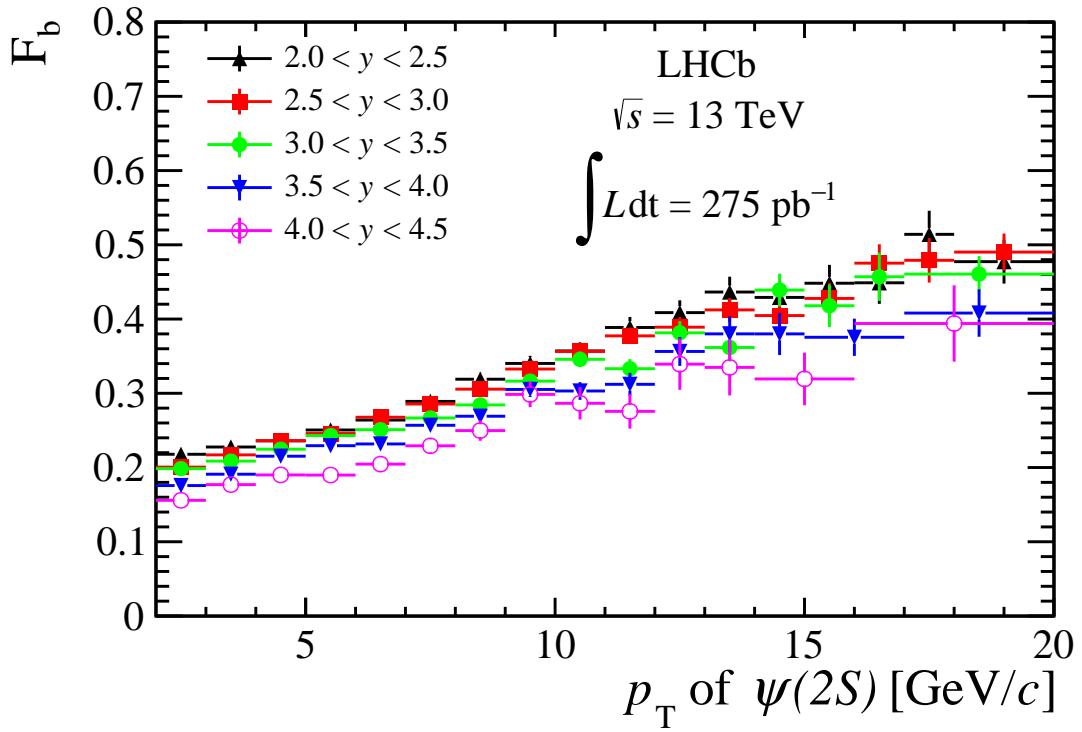
图 2.9.4 以 y 为函数的 (左) pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 微分截面和 (右) 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 微分截面分布与 FONLL [42] 的计算比较。

过对比可以发现，在 $p_T > 7 \text{ GeV}/c$ 的区域，NRQCD 计算和实验测量吻合的非常好，FONLL 的计算和实验测量在整个区间对的都是挺好的。如果将双微分截面积分掉 p_T ，我们可以得到 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 与来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 随着 y 变化的单微分截面，如图 2.9.4 所示。由于 NRQCD 在低动量区表述的不好，所以没有提供和实验数据的比较。基于 FONLL 的理论计算，与实验数据进行了比较，在误差范围内可以很好的吻合。

pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 介子和来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 介子在运动学范围 $p_T[2, 20]$ 、 $y[2, 4.5]$ 内的结果如下所示；

$$\begin{aligned}\sigma(\text{prompt } \psi(2S), 2 < p_T < 20 \text{ GeV}/c, 2.0 < y < 4.5) &= 1.497 \pm 0.004 \pm 0.082 \mu\text{b}, \\ \sigma(\psi(2S)\text{-from-}b, 2 < p_T < 20 \text{ GeV}/c, 2.0 < y < 4.5) &= 0.443 \pm 0.002 \pm 0.026 \mu\text{b},\end{aligned}$$

式子中第一个误差是统计误差，第二个误差是系统误差。

图 2.9.5 F_b 随着 p_T 和 y 变化的分布。

2.9.2 来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 占总 $\psi(2S)$ 的比例

自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 占总 $\psi(2S)$ 的比例, F_b , 通过每个运动学区间内效率修正之后的直接产生的 $\psi(2S)$ 的产额, N_p , 和来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 效率修正之后的产额, N_b : $F_b = N_b / (N_b + N_p)$. 图 2.9.5 给出了比例 F_b 随着 p_T 和 y 的分布。在每个特定的 y 区间内, 比例 F_b 随着 p_T 的增加而增加。对每个特定的 p_T 区间内, 比例 F_b 随着 y 的增加而降低。

2.9.3 拓展到全空间的总 $b\bar{b}$ 截面

全空间的总 $b\bar{b}$ 产生截面通过下面这个公式

$$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X) = \alpha_{4\pi} \frac{\sigma(\psi(2S)\text{-from-}b, 2 < p_T < 20 \text{ GeV}/c, 2.0 < y < 4.5)}{2\mathcal{B}(b \rightarrow \psi(2S)X)} \quad (2.9.1)$$

来计算, 其中 $\alpha_{4\pi}$ 为修正到 4π 的修正因子, $b \rightarrow \psi(2S)X$ 的分支比 $\mathcal{B}(b \rightarrow \psi(2S)X) = (2.83 \pm 0.29) \times 10^{-3}$ [35]. 利用 LHCb 调试的 Pythia 8 [?] 程序, 修正因子 $\alpha_{4\pi} = 7.29$, 我们得到了 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ 下总的 $b\bar{b}$ 产生截面为

$$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X) = 571 \pm 3 \pm 67 \mu\text{b},$$

第一项误差为统计误差, 第二项为系统误差。分支比 $\mathcal{B}(b \rightarrow \psi(2S)X)$ 的误差也已经包含在内。修正因子 $\alpha_{4\pi}$ 没有考虑误差。这一结果和 J/ψ 介子的测量结果

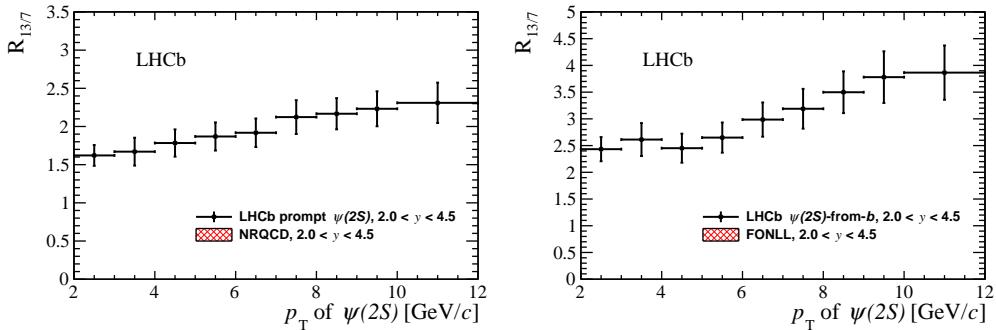


图 2.9.6 13 TeV 与 7 TeV 的产生截面比值随着 p_T 的变化。左图为直接产生的 $\psi(2S)$ 和 NRQCD 计算的比较。右图为来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 和 FONLL 的比较。

$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}X) = 495 \pm 2 \pm 52 \mu\text{b}$ [?] 在误差范围内是一致的。如果将我们的结果和 J/ψ 介子的测量结果合并的话，可以给出联合之后的结果 $524 \pm 45 \mu\text{b}$ 。

2.9.4 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 结果与 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 发表结果的比值

不同质心能量下微分产生截面比值的研究可以减少系统误差带来的影响，本文对 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 微分产生截面和 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 微分产生截面报道结果 [?] 的比值 $R_{13/7}$ 进行了研究。图 2.9.6 所示为 $R_{13/7}$ 随着 p_T 变化的分布。在计算比值 $R_{13/7}$ 的时候，两个分析里面的分支比是按 100% 完全关联考虑的。亮度，拟合模型和寻迹效率按照 50% 的关联考虑。其它各项均按照无关考虑。

2.9.5 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 结果与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值

我们对 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 微分产生截面和 13 TeV 下 J/ψ 微分产生截面 [?] ($0 < p_T < 14 \text{ GeV}/c$, $2.0 < y < 4.5$) 的比值 $R_{\psi(2S)/J/\psi}$ 进行了研究。如图 2.9.7 所示为对于 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 与 J/ψ 的截面比值。左(右)图展示了 $R_{\psi(2S)/J/\psi}$ 对于积分掉 $2 < y < 4.5$ ($2 < p_T < 14$) 之后随着 $p_T(y)$ 变化的分布。左图同时提供了 NRQCD 的理论计算作为比较。图 2.9.8 所示为来自 b 强子衰变产生的 $\psi(2S)$ 与 J/ψ 的截面比值。左(右)图展示了 $R_{\psi(2S)/J/\psi}$ 对于积分掉 $2 < y < 4.5$ ($2 < p_T < 14$) 之后随着 $p_T(y)$ 变化的分布。同时提供了 FONLL 的理论计算作为比较。为了计算两个测量截面直接的比值，二者之间的亮度，径迹寻迹，拟合模型系统误差是按照完全关联处理的。其它的误差都假定为完全无关。

2.9.6 小节

本章主要讲了 13 TeV 下 $\psi(2S)$ 微分截面测量的具体方法，并给出了微分截面测量结果，及其结果与 7 TeV 下 $\psi(2S)$ 发表结果的比值，和 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值。

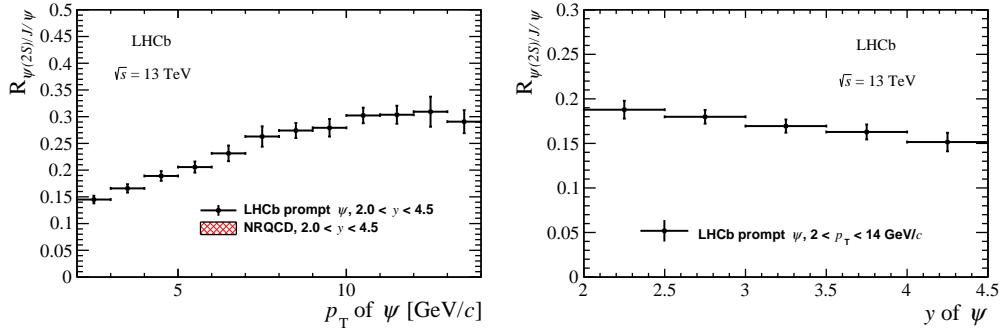


图 2.9.7 pp 对撞直接产生的 $\psi(2S)$ 与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值随着 p_T (左图) 和 y (右图) 的变化图。

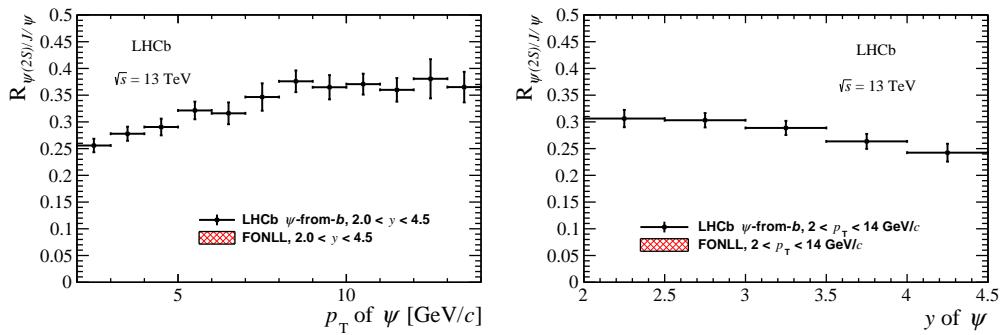


图 2.9.8 b 强子衰变而来的 $\psi(2S)$ 与 13 TeV 下 J/ψ 发表结果的比值随着 p_T (左图) 和 y (右图) 的变化图。

附录 A 不同运动学区间内的拟合参数值

表 A.0.1 质量寿命联合拟合在 $2.0 < y < 2.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。

parameters	p_T (GeV/c)								
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
μ_{mass}	3687.7 ± 0.2	3687.6 ± 0.2	3687.3 ± 0.2	3687.2 ± 0.2	3687.2 ± 0.2	3686.7 ± 0.3	3686.7 ± 0.3	3686.4 ± 0.4	3686.7 ± 0.4
σ_{mass}	12.5 ± 0.2	12.9 ± 0.2	13.1 ± 0.2	13.8 ± 0.2	13.7 ± 0.2	14.7 ± 0.3	14.7 ± 0.3	15.1 ± 0.3	15.4 ± 0.4
n_{sig}	11240 ± 200	11542 ± 179	10292 ± 154	8776 ± 133	7005 ± 112	5615 ± 97	4297 ± 82	3121 ± 69	2390 ± 59
n_{bkg}	59962 ± 298	40654 ± 247	24746 ± 195	14715 ± 153	9003 ± 121	52222 ± 95	3151 ± 74	1977 ± 60	1276 ± 49
$1000 * p_0$	-0.10 ± 0.06	-0.37 ± 0.07	-0.57 ± 0.09	-0.76 ± 0.12	-0.55 ± 0.16	-0.60 ± 0.21	-0.48 ± 0.27	-0.56 ± 0.34	-0.44 ± 0.42
$1000 * \mu_z$	-7.2 ± 0.9	-6.3 ± 0.8	-4.1 ± 0.7	-5.6 ± 0.7	-1.9 ± 0.8	-2.3 ± 0.8	-0.7 ± 0.9	-1.8 ± 1.0	0.3 ± 1.1
$S1_{tz}$	1.31 ± 0.08	1.28 ± 0.10	4.71 ± 0.61	0.88 ± 0.16	1.48 ± 0.18	2.90 ± 0.56	4.56 ± 1.00	1.43 ± 0.14	1.41 ± 0.22
$S2_{tz}$	0.67 ± 0.06	0.75 ± 0.07	1.01 ± 0.01	1.15 ± 0.08	0.88 ± 0.06	1.00 ± 0.03	1.06 ± 0.02	0.85 ± 0.12	0.92 ± 0.13
β_{tz}	0.54 ± 0.09	0.51 ± 0.14	0.04 ± 0.01	0.26 ± 0.19	0.29 ± 0.13	0.08 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.57 ± 0.19	0.45 ± 0.29
τ_b	1.56 ± 0.04	1.51 ± 0.04	1.56 ± 0.04	1.50 ± 0.04	1.50 ± 0.04	1.42 ± 0.04	1.39 ± 0.04	1.41 ± 0.05	1.41 ± 0.06
n_{prompt}	8768 ± 145	8880 ± 135	7926 ± 120	6548 ± 102	5150 ± 87	3982 ± 76	2926 ± 64	2053 ± 52	1531 ± 44
n_{bdecay}	2444 ± 70	2620 ± 68	2365 ± 63	2191 ± 58	1847 ± 52	1620 ± 49	1370 ± 44	1059 ± 38	850 ± 33
n_{tail}	1 ± 9	2 ± 5	3 ± 4	0 ± 2	0 ± 6	3 ± 4	0 ± 1	3 ± 3	0 ± 2
parameters	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-20	
μ_{mass}	3687.1 ± 0.5	3686.9 ± 0.6	3686.8 ± 0.7	3687.1 ± 0.8	3687.8 ± 0.9	3686.7 ± 1.2	3687.4 ± 1.4	3687.9 ± 1.1	
σ_{mass}	15.7 ± 0.5	16.3 ± 0.6	15.4 ± 0.7	16.3 ± 0.7	16.7 ± 0.8	19.0 ± 1.2	20.2 ± 1.5	18.5 ± 1.0	
n_{sig}	1655 ± 49	1270 ± 44	868 ± 36	778 ± 34	564 ± 29	422 ± 25	345 ± 24	439 ± 26	
n_{bkg}	887 ± 41	673 ± 36	497 ± 31	342 ± 26	271 ± 23	170 ± 19	189 ± 21	200 ± 20	
$1000 * p_0$	-0.33 ± 0.51	-0.43 ± 0.58	-0.84 ± 0.68	-0.38 ± 0.81	-0.47 ± 0.91	-0.00 ± 0.52	-0.00 ± 0.67	-0.00 ± 6.36	
$1000 * \mu_z$	-1.7 ± 1.2	-1.8 ± 1.4	-3.5 ± 1.6	4.9 ± 1.9	-2.2 ± 2.2	2.2 ± 2.5	-3.3 ± 2.4	3.3 ± 2.6	
$S1_{tz}$	1.64 ± 0.32	2.81 ± 1.05	2.54 ± 1.04	1.63 ± 0.29	1.60 ± 0.20	1.31 ± 0.08	1.94 ± 0.87	2.35 ± 0.46	
$S2_{tz}$	0.88 ± 0.08	1.09 ± 0.06	0.97 ± 0.08	0.92 ± 0.21	0.74 ± 0.20	0.89 ± 7.42	0.93 ± 0.13	0.90 ± 0.17	
β_{tz}	0.27 ± 0.16	0.07 ± 0.06	0.14 ± 0.10	0.53 ± 0.29	0.66 ± 0.18	0.98 ± 0.02	0.19 ± 0.21	0.42 ± 0.15	
n_{prompt}	1012 ± 36	752 ± 32	490 ± 26	444 ± 24	313 ± 20	235 ± 18	168 ± 15	229 ± 18	
n_{bdecay}	643 ± 29	519 ± 26	379 ± 23	334 ± 21	254 ± 18	188 ± 16	178 ± 15	209 ± 17	
n_{tail}	0 ± 1	0 ± 1	2 ± 3	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	2 ± 2	0 ± 1	

表 A.0.2 质量寿命联合拟合在 $2.5 < y < 3.0$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。

parameters	p_T (GeV/c)						
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
μ_{mass}	3686.8 ± 0.2	3686.4 ± 0.1	3686.5 ± 0.1	3686.2 ± 0.2	3686.0 ± 0.2	3685.8 ± 0.2	3685.4 ± 0.3
σ_{mass}	12.9 ± 0.2	13.0 ± 0.2	13.4 ± 0.2	14.1 ± 0.2	14.8 ± 0.2	14.6 ± 0.2	15.0 ± 0.3
n_{sig}	30617 ± 350	28489 ± 308	25571 ± 263	21155 ± 213	15733 ± 170	11047 ± 134	7684 ± 108
n_{bkg}	184177 ± 525	131766 ± 445	79834 ± 351	39525 ± 252	19107 ± 180	9811 ± 129	5372 ± 97
$1000 * p_0$	-0.32 ± 0.03	-0.45 ± 0.04	-0.47 ± 0.05	-0.35 ± 0.07	-0.34 ± 0.11	-0.66 ± 0.15	-0.78 ± 0.21
$1000 * \mu_{tz}$	-5.9 ± 0.5	-5.1 ± 0.5	-5.3 ± 0.4	-2.9 ± 0.4	-2.1 ± 0.4	-2.3 ± 0.5	-2.5 ± 0.5
$S1_{tz}$	1.44 ± 0.06	1.28 ± 0.09	1.44 ± 0.13	1.41 ± 0.11	1.61 ± 0.12	1.34 ± 0.08	1.37 ± 0.10
$S2_{tz}$	0.78 ± 0.03	0.78 ± 0.06	0.85 ± 0.04	0.86 ± 0.05	0.85 ± 0.03	0.78 ± 0.07	0.86 ± 0.06
β_{tz}	0.43 ± 0.06	0.48 ± 0.13	0.33 ± 0.11	0.40 ± 0.12	0.28 ± 0.06	0.55 ± 0.12	0.45 ± 0.14
τ_b	1.57 ± 0.03	1.58 ± 0.03	1.46 ± 0.02	1.51 ± 0.03	1.49 ± 0.03	1.47 ± 0.03	1.42 ± 0.03
n_{prompt}	24456 ± 252	22293 ± 226	19530 ± 196	15894 ± 162	11497 ± 130	7885 ± 103	5322 ± 83
n_{bdecay}	6138 ± 114	6181 ± 107	6040 ± 102	5183 ± 90	4204 ± 78	3152 ± 66	2342 ± 56
n_{tail}	10 ± 13	20 ± 12	44 ± 14	8 ± 11	1 ± 6	11 ± 8	0 ± 1
parameters	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
μ_{mass}	3685.6 ± 0.4	3685.5 ± 0.5	3685.6 ± 0.6	3686.7 ± 0.7	3685.8 ± 0.8	3686.1 ± 1.0	3684.0 ± 1.1
σ_{mass}	15.8 ± 0.3	16.1 ± 0.5	16.0 ± 0.6	16.7 ± 0.7	17.6 ± 0.7	17.3 ± 0.8	16.4 ± 1.2
n_{sig}	2632 ± 60	1812 ± 51	1277 ± 43	952 ± 37	734 ± 32	523 ± 27	377 ± 24
n_{bkg}	1128 ± 46	827 ± 40	597 ± 35	397 ± 28	271 ± 24	233 ± 21	195 ± 20
$1000 * p_0$	-0.00 ± 0.50	-1.28 ± 0.54	-1.90 ± 0.63	-0.86 ± 0.77	-1.76 ± 0.95	-1.29 ± 1.01	-0.35 ± 1.04
$1000 * \mu_{tz}$	-1.6 ± 0.8	-1.6 ± 1.0	-3.0 ± 1.1	-0.7 ± 1.3	-1.1 ± 1.6	-0.1 ± 1.6	1.1 ± 1.9
$S1_{tz}$	2.77 ± 0.74	1.13 ± 0.03	2.02 ± 1.12	1.67 ± 0.26	1.43 ± 0.16	1.43 ± 0.37	1.71 ± 0.38
$S2_{tz}$	1.05 ± 0.04	9.07 ± 0.87	1.02 ± 0.10	0.87 ± 0.11	0.67 ± 0.22	0.75 ± 0.19	0.77 ± 0.14
β_{tz}	0.07 ± 0.04	0.97 ± 0.01	0.11 ± 0.18	0.38 ± 0.18	0.68 ± 0.20	0.47 ± 0.31	0.41 ± 0.20
τ_b	1.39 ± 0.05	1.54 ± 0.07	1.39 ± 0.07	1.34 ± 0.08	1.38 ± 0.09	1.46 ± 0.11	1.43 ± 0.12
n_{prompt}	1634 ± 45	1107 ± 38	750 ± 31	568 ± 27	421 ± 23	273 ± 19	197 ± 16
n_{bdecay}	990 ± 36	703 ± 31	526 ± 26	386 ± 22	315 ± 20	248 ± 18	181 ± 15
n_{tail}	0 ± 2	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 2	2 ± 2	5 ± 3	0 ± 2
							5 ± 4

表 A.0.3 质量寿命联合拟合在 $3.0 < y < 3.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。

parameters	p_T (GeV/c)					
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
μ_{mass}	3686.2 ± 0.2	3686.0 ± 0.2	3685.6 ± 0.2	3685.2 ± 0.2	3684.8 ± 0.2	3684.9 ± 0.3
σ_{mass}	14.7 ± 0.2	14.4 ± 0.2	15.1 ± 0.2	15.2 ± 0.2	16.1 ± 0.2	16.6 ± 0.3
n_{sig}	32610 ± 379	30733 ± 330	26640 ± 266	19728 ± 201	14217 ± 159	9550 ± 124
n_{bkg}	191316 ± 550	136252 ± 463	68276 ± 336	30627 ± 227	13907 ± 158	7138 ± 114
$1000 * p_0$	-0.35 ± 0.03	-0.48 ± 0.04	-0.37 ± 0.06	-0.35 ± 0.09	-0.48 ± 0.13	-0.16 ± 0.18
$1000 * \mu_{tz}$	-4.5 ± 0.5	-4.4 ± 0.5	-3.1 ± 0.4	-3.2 ± 0.3	-2.8 ± 0.4	-3.3 ± 0.5
$S1_{tz}$	1.30 ± 0.08	1.35 ± 0.08	0.86 ± 0.02	0.02 ± 0.01	2.31 ± 0.32	2.36 ± 0.48
$S2_{tz}$	0.76 ± 0.05	0.80 ± 0.04	1.78 ± 0.13	1.01 ± 0.01	0.94 ± 0.02	0.97 ± 0.02
β_{tz}	0.46 ± 0.10	0.41 ± 0.09	0.81 ± 0.04	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.03	0.07 ± 0.03
τ_b	1.54 ± 0.03	1.52 ± 0.03	1.51 ± 0.03	1.42 ± 0.03	1.48 ± 0.03	1.42 ± 0.04
n_{prompt}	26054 ± 265	24338 ± 237	20614 ± 196	14757 ± 150	10596 ± 123	6993 ± 97
n_{decay}	6457 ± 122	6415 ± 113	5975 ± 101	4820 ± 86	3552 ± 73	2544 ± 61
n_{tail}	30 ± 22	17 ± 19	0 ± 13	0 ± 10	0 ± 13	21 ± 8
parameters	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
μ_{mass}	3684.9 ± 0.4	3684.3 ± 0.5	3684.6 ± 0.7	3685.2 ± 0.8	3687.2 ± 0.9	3683.1 ± 1.1
σ_{mass}	17.7 ± 0.4	18.5 ± 0.5	18.3 ± 0.6	17.5 ± 0.7	18.7 ± 0.9	17.4 ± 1.2
n_{sig}	2818 ± 66	1972 ± 54	1310 ± 45	893 ± 37	701 ± 33	439 ± 27
n_{bkg}	1418 ± 54	902 ± 44	646 ± 37	508 ± 31	344 ± 27	248 ± 23
$1000 * p_0$	-0.34 ± 0.41	-0.42 ± 0.51	-1.17 ± 0.61	-0.83 ± 0.68	-1.15 ± 0.83	-1.40 ± 0.97
$1000 * \mu_{tz}$	-2.8 ± 0.8	-1.0 ± 0.9	-3.3 ± 1.1	-1.4 ± 1.3	1.7 ± 1.5	-1.0 ± 1.8
$S1_{tz}$	1.08 ± 0.09	9.71 ± 6.99	1.93 ± 0.57	1.04 ± 0.94	2.68 ± 0.82	2.64 ± 1.45
$S2_{tz}$	0.65 ± 0.74	1.05 ± 0.03	0.96 ± 0.08	1.04 ± 0.06	0.99 ± 0.07	0.95 ± 0.06
β_{tz}	0.92 ± 0.76	0.03 ± 0.01	0.16 ± 0.14	0.04 ± 0.11	0.08 ± 0.06	0.04 ± 0.06
τ_b	1.29 ± 0.05	1.49 ± 0.07	1.41 ± 0.07	1.34 ± 0.09	1.53 ± 0.10	1.06 ± 0.10
n_{prompt}	1842 ± 48	1312 ± 41	812 ± 32	570 ± 27	392 ± 23	258 ± 19
n_{decay}	973 ± 36	655 ± 30	501 ± 25	323 ± 21	307 ± 20	185 ± 16
n_{tail}	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	0 ± 1	7 ± 4	2 ± 2
						0 ± 1

表 A.0.4 质量寿命联合拟合在 $3.5 < y < 4.0$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。

parameters	p_T (GeV/c)							
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
μ_{mass}	3685.9 ± 0.2	3685.6 ± 0.2	3685.6 ± 0.2	3684.9 ± 0.2	3684.9 ± 0.3	3685.4 ± 0.3	3685.0 ± 0.4	3684.7 ± 0.5
σ_{mass}	16.3 ± 0.2	16.9 ± 0.2	18.0 ± 0.2	18.6 ± 0.2	19.6 ± 0.3	19.4 ± 0.3	20.3 ± 0.4	21.6 ± 0.5
n_{sig}	25483 ± 314	22813 ± 269	18737 ± 220	14479 ± 174	10256 ± 139	6669 ± 107	4425 ± 87	3011 ± 70
n_{bkg}	107081 ± 424	67783 ± 343	35107 ± 255	16691 ± 180	7972 ± 131	4381 ± 96	2535 ± 76	1378 ± 58
$1000 * p_0$	-0.46 ± 0.05	-0.46 ± 0.06	-0.51 ± 0.08	-0.42 ± 0.12	-0.73 ± 0.17	-0.39 ± 0.23	-0.96 ± 0.31	-0.59 ± 0.43
$1000 * \mu_{tz}$	-1.2 ± 0.6	-0.4 ± 0.5	-0.5 ± 0.5	-1.1 ± 0.5	-1.4 ± 0.5	-0.6 ± 0.6	-1.1 ± 0.7	-0.7 ± 0.8
$S1_{tz}$	1.27 ± 0.07	0.82 ± 0.06	0.86 ± 0.03	1.47 ± 0.13	1.77 ± 0.19	2.88 ± 0.53	1.23 ± 0.09	1.62 ± 0.28
$S2_{tz}$	0.75 ± 0.05	1.36 ± 0.16	1.60 ± 0.15	0.84 ± 0.04	0.90 ± 0.03	0.99 ± 0.02	0.71 ± 0.11	0.85 ± 0.08
β_{tz}	0.50 ± 0.10	0.67 ± 0.15	0.79 ± 0.06	0.33 ± 0.10	0.16 ± 0.05	0.06 ± 0.02	0.65 ± 0.16	0.30 ± 0.15
τ_b	1.53 ± 0.03	1.60 ± 0.03	1.50 ± 0.03	1.46 ± 0.03	1.45 ± 0.04	1.45 ± 0.04	1.37 ± 0.05	1.44 ± 0.06
n_{prompt}	20923 ± 220	18365 ± 193	14581 ± 160	11075 ± 129	7838 ± 104	4948 ± 82	3230 ± 64	2083 ± 52
n_{decay}	4462 ± 104	4339 ± 93	4003 ± 85	3298 ± 73	2363 ± 61	1710 ± 51	1189 ± 42	915 ± 36
n_{tail}	71 ± 20	11 ± 18	38 ± 20	10 ± 13	2 ± 8	7 ± 5	1 ± 13	0 ± 5
parameters	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-17	17-20	
μ_{mass}	3684.5 ± 0.7	3684.9 ± 0.8	3684.9 ± 1.1	3685.9 ± 1.3	3684.9 ± 1.6	3686.6 ± 1.6	3688.0 ± 2.1	
μ_{mass}	3684.5 ± 0.7	3684.9 ± 0.8	3684.9 ± 1.1	3685.9 ± 1.3	3684.9 ± 1.6	3686.6 ± 1.6	3688.0 ± 2.1	
σ_{mass}	23.1 ± 0.7	22.2 ± 0.8	24.0 ± 1.1	23.5 ± 1.3	23.5 ± 1.7	26.2 ± 1.5	26.3 ± 2.2	
n_{sig}	2043 ± 60	1346 ± 47	892 ± 41	625 ± 33	424 ± 29	520 ± 32	351 ± 29	
n_{bkg}	822 ± 49	558 ± 38	413 ± 34	281 ± 28	242 ± 26	280 ± 29	239 ± 27	
$1000 * p_0$	-0.22 ± 0.56	-2.20 ± 0.68	-0.29 ± 0.77	-2.18 ± 0.97	-0.26 ± 0.96	-2.38 ± 1.00	-0.28 ± 0.99	
$1000 * \mu_{tz}$	0.0 ± 0.9	0.2 ± 1.1	0.6 ± 1.3	1.1 ± 1.6	1.5 ± 2.4	1.3 ± 1.7	0.4 ± 2.0	
$S1_{tz}$	1.46 ± 0.30	3.20 ± 0.81	4.54 ± 7.16	9.77 ± 7.81	2.12 ± 0.69	1.06 ± 0.06	2.68 ± 1.49	
$S2_{tz}$	0.92 ± 0.10	0.95 ± 0.04	0.96 ± 0.05	0.94 ± 0.05	1.05 ± 0.25	1.06 ± 1.48	0.95 ± 0.08	
β_{tz}	0.27 ± 0.24	0.09 ± 0.03	0.02 ± 0.03	0.06 ± 0.02	0.31 ± 0.28	0.99 ± 0.91	0.04 ± 0.07	
τ_b	1.60 ± 0.08	1.25 ± 0.07	1.41 ± 0.09	1.67 ± 0.13	1.54 ± 0.15	1.42 ± 0.12	1.33 ± 0.13	
n_{prompt}	1420 ± 42	922 ± 35	575 ± 28	388 ± 23	264 ± 19	325 ± 21	209 ± 18	
n_{decay}	618 ± 29	418 ± 24	318 ± 21	238 ± 18	162 ± 15	195 ± 16	141 ± 14	
n_{tail}	0 ± 2	4 ± 4	0 ± 1	0 ± 2	2 ± 2	0 ± 0	0 ± 0	

表 A.0.5 质量寿命联合拟合在 $4.0 < y < 4.5$ 范围内不同 p_T 的拟合参数值。

parameters	p_T (GeV/c)						
	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
μ_{mass}	3684.5 ± 0.3	3684.4 ± 0.4	3684.5 ± 0.4	3685.6 ± 0.4	3686.0 ± 0.6	3685.4 ± 0.7	3685.0 ± 0.9
σ_{mass}	19.1 ± 0.3	20.3 ± 0.4	22.1 ± 0.4	22.4 ± 0.4	24.8 ± 0.6	26.3 ± 0.8	25.8 ± 1.0
n_{sig}	11286 ± 190	8771 ± 155	7289 ± 130	5331 ± 106	3644 ± 89	2642 ± 75	1604 ± 58
n_{bkg}	26136 ± 226	14305 ± 172	7904 ± 132	4414 ± 101	2317 ± 81	1332 ± 65	881 ± 52
$1000 * p_0$	-0.52 ± 0.09	-0.72 ± 0.13	-0.63 ± 0.17	-0.77 ± 0.24	-0.72 ± 0.34	-0.45 ± 0.45	-0.95 ± 0.55
$1000 * \mu_{tz}$	-4.3 ± 0.9	-2.7 ± 0.9	0.2 ± 0.9	0.4 ± 0.9	5.9 ± 1.1	3.0 ± 1.2	3.6 ± 1.5
$S1_{tz}$	1.49 ± 0.14	5.12 ± 0.61	1.28 ± 0.12	2.53 ± 0.36	1.32 ± 0.34	1.78 ± 0.32	1.30 ± 0.64
$S2_{tz}$	0.85 ± 0.05	1.00 ± 0.02	0.82 ± 0.11	0.93 ± 0.03	0.88 ± 0.29	0.98 ± 0.06	1.03 ± 0.44
β_{tz}	0.33 ± 0.11	0.05 ± 0.01	0.55 ± 0.22	0.11 ± 0.03	0.53 ± 0.75	0.18 ± 0.11	0.45 ± 0.70
τ_b	1.53 ± 0.05	1.48 ± 0.05	1.36 ± 0.05	1.44 ± 0.06	1.36 ± 0.06	1.47 ± 0.08	1.56 ± 0.10
n_{prompt}	9469 ± 133	7188 ± 113	5836 ± 94	4293 ± 79	2878 ± 63	2030 ± 52	1195 ± 40
n_{bdecay}	1746 ± 66	1546 ± 59	1368 ± 51	1005 ± 43	740 ± 36	604 ± 30	403 ± 24
n_{tail}	28 ± 13	11 ± 10	17 ± 10	0 ± 2	8 ± 7	7 ± 5	0 ± 2
parameters	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-16	16-20
μ_{mass}	3683.3 ± 1.2	3685.9 ± 1.4	3688.5 ± 2.1	3687.8 ± 2.2	3687.3 ± 3.0	3686.0 ± 4.1	3688.0 ± 5.0
μ_{mass}	3683.3 ± 1.2	3685.9 ± 1.4	3688.5 ± 2.1	3687.8 ± 2.2	3687.3 ± 3.0	3686.0 ± 4.1	3688.0 ± 5.0
σ_{mass}	30.6 ± 1.3	27.4 ± 1.5	35.2 ± 2.2	26.2 ± 2.2	31.7 ± 3.0	38.8 ± 4.4	33.2 ± 8.0
n_{sig}	1120 ± 50	715 ± 41	586 ± 40	292 ± 26	235 ± 25	281 ± 38	167 ± 39
n_{bkg}	466 ± 43	456 ± 38	187 ± 34	216 ± 24	125 ± 23	188 ± 37	253 ± 40
$1000 * p_0$	-0.00 ± 1.22	-0.00 ± 0.82	-3.38 ± 1.55	-0.32 ± 1.03	-1.44 ± 1.57	-1.27 ± 1.48	-1.52 ± 1.12
$1000 * \mu_{tz}$	5.9 ± 1.9	-0.8 ± 2.0	4.1 ± 2.2	3.4 ± 3.3	0.2 ± 2.6	8.4 ± 3.2	3.9 ± 4.5
$S1_{tz}$	1.41 ± 0.35	1.56 ± 0.91	2.24 ± 0.71	1.67 ± 0.41	1.07 ± 0.10	1.13 ± 0.10	6.76 ± 2.89
$S2_{tz}$	0.93 ± 0.30	0.87 ± 0.16	1.00 ± 0.09	0.80 ± 0.20	0.23 ± 0.13	0.19 ± 0.12	1.12 ± 0.12
β_{tz}	0.53 ± 0.74	0.19 ± 0.32	0.15 ± 0.12	0.39 ± 0.27	0.89 ± 0.09	0.95 ± 0.06	0.05 ± 0.05
τ_b	1.30 ± 0.09	1.36 ± 0.13	1.51 ± 0.15	1.35 ± 0.16	1.79 ± 0.25	1.37 ± 0.20	1.21 ± 0.19
n_{prompt}	781 ± 33	509 ± 27	424 ± 24	194 ± 17	157 ± 15	189 ± 17	108 ± 15
n_{bdecay}	332 ± 22	205 ± 18	161 ± 15	100 ± 12	79 ± 11	88 ± 12	66 ± 11
n_{tail}	7 ± 5	4 ± 4	2 ± 3	0 ± 1	3 ± 3	2 ± 4	0 ± 0

附录 B 效率表

表 B.0.1 直接产生的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的总的选择效率值 ϵ_{tot} 。

p_T (GeV/c)	$2 < y < 2.5$	$2.5 < y < 3$	$3 < y < 3.5$	$3.5 < y < 4$	$4 < y < 4.5$
2-3	0.031 ± 0.000	0.090 ± 0.001	0.115 ± 0.001	0.110 ± 0.001	0.065 ± 0.001
3-4	0.040 ± 0.001	0.115 ± 0.001	0.148 ± 0.001	0.136 ± 0.001	0.075 ± 0.001
4-5	0.055 ± 0.001	0.158 ± 0.001	0.192 ± 0.002	0.176 ± 0.002	0.091 ± 0.001
5-6	0.076 ± 0.001	0.207 ± 0.002	0.234 ± 0.002	0.218 ± 0.002	0.118 ± 0.002
6-7	0.098 ± 0.002	0.247 ± 0.003	0.273 ± 0.003	0.255 ± 0.003	0.142 ± 0.003
7-8	0.119 ± 0.002	0.284 ± 0.004	0.307 ± 0.004	0.288 ± 0.004	0.162 ± 0.004
8-9	0.147 ± 0.004	0.315 ± 0.005	0.331 ± 0.005	0.310 ± 0.006	0.185 ± 0.005
9-10	0.174 ± 0.005	0.349 ± 0.007	0.358 ± 0.007	0.335 ± 0.008	0.202 ± 0.007
10-11	0.189 ± 0.006	0.360 ± 0.009	0.369 ± 0.009	0.351 ± 0.010	0.210 ± 0.009
11-12	0.217 ± 0.009	0.388 ± 0.010	0.384 ± 0.011	0.381 ± 0.013	0.237 ± 0.012
12-13	0.220 ± 0.011	0.408 ± 0.013	0.403 ± 0.014	0.394 ± 0.015	0.282 ± 0.017
13-14	0.280 ± 0.014	0.432 ± 0.016	0.423 ± 0.017	0.406 ± 0.018	0.270 ± 0.019
14-15	0.281 ± 0.017	0.433 ± 0.018	0.454 ± 0.021	0.448 ± 0.025	0.257 ± 0.018
15-16	0.254 ± 0.019	0.464 ± 0.022	0.435 ± 0.025	0.406 ± 0.020	
16-17	0.275 ± 0.025	0.458 ± 0.025	0.434 ± 0.030		
17-18	0.306 ± 0.035	0.470 ± 0.032			0.299 ± 0.034
18-19			0.469 ± 0.022	0.417 ± 0.027	
19-20	0.346 ± 0.026	0.456 ± 0.028			

表 B.0.2 来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的总的选择效率值 ϵ_{tot} 。

p_T (GeV/c)	$2 < y < 2.5$	$2.5 < y < 3$	$3 < y < 3.5$	$3.5 < y < 4$	$4 < y < 4.5$
2-3	0.030 ± 0.000	0.086 ± 0.001	0.111 ± 0.001	0.105 ± 0.001	0.063 ± 0.001
3-4	0.039 ± 0.001	0.113 ± 0.001	0.142 ± 0.001	0.131 ± 0.001	0.074 ± 0.001
4-5	0.053 ± 0.001	0.155 ± 0.001	0.187 ± 0.001	0.172 ± 0.002	0.095 ± 0.001
5-6	0.072 ± 0.001	0.199 ± 0.002	0.227 ± 0.002	0.213 ± 0.002	0.114 ± 0.002
6-7	0.096 ± 0.001	0.241 ± 0.002	0.265 ± 0.002	0.248 ± 0.003	0.142 ± 0.003
7-8	0.117 ± 0.002	0.284 ± 0.003	0.297 ± 0.003	0.276 ± 0.004	0.164 ± 0.003
8-9	0.137 ± 0.002	0.311 ± 0.003	0.325 ± 0.004	0.311 ± 0.005	0.182 ± 0.004
9-10	0.160 ± 0.003	0.334 ± 0.004	0.353 ± 0.005	0.331 ± 0.006	0.205 ± 0.006
10-11	0.188 ± 0.004	0.353 ± 0.005	0.357 ± 0.006	0.348 ± 0.007	0.221 ± 0.008
11-12	0.197 ± 0.004	0.375 ± 0.006	0.371 ± 0.007	0.370 ± 0.009	0.243 ± 0.009
12-13	0.226 ± 0.005	0.391 ± 0.008	0.379 ± 0.009	0.363 ± 0.010	0.240 ± 0.012
13-14	0.238 ± 0.007	0.395 ± 0.008	0.397 ± 0.010	0.365 ± 0.013	0.254 ± 0.015
14-15	0.266 ± 0.008	0.432 ± 0.010	0.418 ± 0.012	0.365 ± 0.014	
15-16	0.270 ± 0.009	0.416 ± 0.013	0.420 ± 0.013	0.402 ± 0.013	0.275 ± 0.014
16-17	0.282 ± 0.011	0.434 ± 0.013	0.404 ± 0.016		
17-18	0.283 ± 0.012	0.424 ± 0.017			
18-19			0.431 ± 0.012	0.394 ± 0.015	0.280 ± 0.016
19-20	0.299 ± 0.011	0.446 ± 0.016			

附录 C 微分截面结果

表 C.0.1 直接产生的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的微分产生截面。第一项误差为统计误差，第二项为无关的系统误差，第三项为相关的系统误差。

p_T (GeV/c)	$2 < y < 2.5$	$2.5 < y < 3$	$3 < y < 3.5$	$3.5 < y < 4$	$4 < y < 4.5$
2-3	$258.94 \pm 4.30 \pm 5.69 \pm 13.65$	$249.75 \pm 2.57 \pm 1.94 \pm 12.56$	$209.38 \pm 2.13 \pm 1.52 \pm 10.45$	$176.17 \pm 1.85 \pm 1.44 \pm 8.79$	$134.70 \pm 1.89 \pm 1.54 \pm 6.81$
3-4	$203.44 \pm 3.09 \pm 3.99 \pm 10.71$	$178.59 \pm 1.81 \pm 1.51 \pm 9.25$	$152.16 \pm 1.48 \pm 1.17 \pm 7.74$	$124.24 \pm 1.31 \pm 1.04 \pm 6.33$	$88.45 \pm 1.39 \pm 1.11 \pm 4.61$
4-5	$133.04 \pm 2.02 \pm 2.70 \pm 7.38$	$114.15 \pm 1.15 \pm 1.01 \pm 6.24$	$98.83 \pm 0.94 \pm 0.82 \pm 5.37$	$76.58 \pm 0.84 \pm 0.70 \pm 4.16$	$58.92 \pm 0.95 \pm 0.83 \pm 3.35$
5-6	$79.87 \pm 1.24 \pm 1.68 \pm 4.65$	$71.01 \pm 0.72 \pm 0.68 \pm 4.10$	$58.13 \pm 0.59 \pm 0.55 \pm 3.32$	$46.83 \pm 0.55 \pm 0.49 \pm 2.67$	$33.67 \pm 0.62 \pm 0.55 \pm 2.07$
6-7	$48.64 \pm 0.82 \pm 1.15 \pm 3.39$	$42.88 \pm 0.49 \pm 0.48 \pm 2.96$	$35.81 \pm 0.42 \pm 0.40 \pm 2.47$	$28.32 \pm 0.38 \pm 0.37 \pm 1.94$	$18.73 \pm 0.41 \pm 0.37 \pm 1.35$
7-8	$30.98 \pm 0.59 \pm 0.79 \pm 2.43$	$25.58 \pm 0.34 \pm 0.35 \pm 1.97$	$21.03 \pm 0.29 \pm 0.29 \pm 1.61$	$15.87 \pm 0.26 \pm 0.24 \pm 1.22$	$11.54 \pm 0.30 \pm 0.28 \pm 0.92$
8-9	$18.35 \pm 0.40 \pm 0.50 \pm 1.07$	$15.58 \pm 0.24 \pm 0.25 \pm 0.89$	$12.87 \pm 0.22 \pm 0.21 \pm 0.73$	$9.60 \pm 0.19 \pm 0.18 \pm 0.54$	$5.97 \pm 0.20 \pm 0.18 \pm 0.36$
9-10	$10.86 \pm 0.28 \pm 0.33 \pm 0.69$	$9.50 \pm 0.18 \pm 0.19 \pm 0.60$	$7.47 \pm 0.16 \pm 0.14 \pm 0.47$	$5.74 \pm 0.14 \pm 0.14 \pm 0.36$	$3.57 \pm 0.15 \pm 0.12 \pm 0.25$
10-11	$7.49 \pm 0.22 \pm 0.28 \pm 0.38$	$6.06 \pm 0.14 \pm 0.15 \pm 0.30$	$4.61 \pm 0.12 \pm 0.11 \pm 0.23$	$3.73 \pm 0.11 \pm 0.10 \pm 0.19$	$2.23 \pm 0.12 \pm 0.10 \pm 0.12$
11-12	$4.31 \pm 0.15 \pm 0.18 \pm 0.23$	$3.88 \pm 0.11 \pm 0.10 \pm 0.20$	$3.15 \pm 0.10 \pm 0.09 \pm 0.16$	$2.23 \pm 0.08 \pm 0.07 \pm 0.12$	$1.65 \pm 0.09 \pm 0.09 \pm 0.13$
12-13	$3.15 \pm 0.13 \pm 0.16 \pm 0.28$	$2.51 \pm 0.09 \pm 0.08 \pm 0.22$	$1.86 \pm 0.07 \pm 0.06 \pm 0.16$	$1.35 \pm 0.07 \pm 0.05 \pm 0.12$	$0.64 \pm 0.06 \pm 0.04 \pm 0.07$
13-14	$1.62 \pm 0.09 \pm 0.08 \pm 0.10$	$1.60 \pm 0.07 \pm 0.06 \pm 0.09$	$1.24 \pm 0.06 \pm 0.05 \pm 0.07$	$0.88 \pm 0.05 \pm 0.04 \pm 0.05$	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.04 \pm 0.03$
14-15	$1.46 \pm 0.08 \pm 0.09 \pm 0.07$	$1.21 \pm 0.06 \pm 0.05 \pm 0.06$	$0.80 \pm 0.05 \pm 0.04 \pm 0.04$	$0.54 \pm 0.04 \pm 0.03 \pm 0.03$	$0.34 \pm 0.03 \pm 0.02 \pm 0.03$
15-16	$1.14 \pm 0.07 \pm 0.08 \pm 0.06$	$0.84 \pm 0.05 \pm 0.04 \pm 0.04$	$0.55 \pm 0.04 \pm 0.03 \pm 0.03$	$0.37 \pm 0.03 \pm 0.02 \pm 0.02$	
16-17	$0.79 \pm 0.06 \pm 0.07 \pm 0.04$	$0.55 \pm 0.04 \pm 0.03 \pm 0.03$			
17-18	$0.51 \pm 0.05 \pm 0.06 \pm 0.03$	$0.39 \pm 0.03 \pm 0.03 \pm 0.02$			
18-19	$0.31 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.02 \pm 0.02 \pm 0.02$	$0.21 \pm 0.01 \pm 0.01 \pm 0.01$	$0.15 \pm 0.01 \pm 0.01 \pm 0.01$	$0.08 \pm 0.01 \pm 0.01 \pm 0.01$
19-20					

表 C.0.2 来自 b 强子衰变的 $\psi(2S)$ 介子的在不同 p_T 和 y 区间内的微分产生截面。第一项误差为统计误差，第二项为无关的系统误差，第三项为相关的系统误差。

p_T (GeV/c)	$2 < y < 2.5$	$2.5 < y < 3$	$3 < y < 3.5$	$3.5 < y < 4$	$4 < y < 4.5$
2-3	$75.55 \pm 2.17 \pm 1.70 \pm 4.03$	$65.75 \pm 1.22 \pm 0.56 \pm 3.36$	$53.62 \pm 1.01 \pm 0.45 \pm 2.72$	$39.07 \pm 0.91 \pm 0.38 \pm 1.98$	$25.75 \pm 0.97 \pm 0.37 \pm 1.32$
3-4	$62.35 \pm 1.61 \pm 1.22 \pm 3.29$	$50.58 \pm 0.87 \pm 0.42 \pm 2.64$	$41.62 \pm 0.73 \pm 0.34 \pm 2.13$	$30.45 \pm 0.65 \pm 0.28 \pm 1.63$	$19.26 \pm 0.74 \pm 0.28 \pm 1.02$
4-5	$40.80 \pm 1.08 \pm 0.77 \pm 2.28$	$35.89 \pm 0.60 \pm 0.29 \pm 1.98$	$29.55 \pm 0.50 \pm 0.24 \pm 2.21$	$21.46 \pm 0.46 \pm 0.20 \pm 1.72$	$13.30 \pm 0.50 \pm 0.20 \pm 0.76$
5-6	$28.06 \pm 0.74 \pm 0.53 \pm 1.64$	$24.02 \pm 0.42 \pm 0.20 \pm 1.39$	$19.60 \pm 0.35 \pm 0.17 \pm 1.15$	$14.26 \pm 0.32 \pm 0.14 \pm 0.82$	$8.12 \pm 0.35 \pm 0.14 \pm 0.56$
6-7	$17.70 \pm 0.50 \pm 0.36 \pm 1.24$	$16.10 \pm 0.30 \pm 0.14 \pm 1.13$	$12.38 \pm 0.25 \pm 0.12 \pm 0.85$	$8.78 \pm 0.22 \pm 0.10 \pm 0.60$	$4.83 \pm 0.23 \pm 0.09 \pm 0.35$
7-8	$12.73 \pm 0.38 \pm 0.27 \pm 1.00$	$10.23 \pm 0.22 \pm 0.10 \pm 0.82$	$7.91 \pm 0.19 \pm 0.08 \pm 0.61$	$5.72 \pm 0.17 \pm 0.07 \pm 0.44$	$3.40 \pm 0.17 \pm 0.07 \pm 0.27$
8-9	$9.21 \pm 0.30 \pm 0.19 \pm 0.54$	$6.96 \pm 0.17 \pm 0.08 \pm 0.40$	$5.20 \pm 0.14 \pm 0.06 \pm 0.29$	$3.53 \pm 0.12 \pm 0.05 \pm 0.20$	$2.04 \pm 0.12 \pm 0.05 \pm 0.13$
9-10	$6.11 \pm 0.22 \pm 0.13 \pm 0.39$	$4.94 \pm 0.14 \pm 0.06 \pm 0.31$	$3.50 \pm 0.11 \pm 0.05 \pm 0.22$	$2.55 \pm 0.10 \pm 0.04 \pm 0.16$	$1.50 \pm 0.10 \pm 0.04 \pm 0.11$
10-11	$4.18 \pm 0.16 \pm 0.10 \pm 0.21$	$3.42 \pm 0.11 \pm 0.05 \pm 0.17$	$2.51 \pm 0.09 \pm 0.04 \pm 0.12$	$1.64 \pm 0.08 \pm 0.03 \pm 0.08$	$0.85 \pm 0.07 \pm 0.03 \pm 0.05$
11-12	$3.01 \pm 0.14 \pm 0.08 \pm 0.16$	$2.44 \pm 0.09 \pm 0.04 \pm 0.13$	$1.63 \pm 0.07 \pm 0.03 \pm 0.09$	$1.04 \pm 0.06 \pm 0.02 \pm 0.06$	$0.61 \pm 0.06 \pm 0.02 \pm 0.05$
12-13	$2.12 \pm 0.11 \pm 0.06 \pm 0.19$	$1.66 \pm 0.07 \pm 0.03 \pm 0.14$	$1.22 \pm 0.06 \pm 0.03 \pm 0.11$	$0.81 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.07$	$0.38 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.04$
13-14	$1.47 \pm 0.09 \pm 0.05 \pm 0.09$	$1.23 \pm 0.06 \pm 0.03 \pm 0.07$	$0.75 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.04$	$0.60 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.04$	$0.29 \pm 0.04 \pm 0.02 \pm 0.02$
14-15	$1.16 \pm 0.07 \pm 0.04 \pm 0.06$	$0.83 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.05$	$0.68 \pm 0.04 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.41 \pm 0.04 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.15 \pm 0.02 \pm 0.01 \pm 0.01$
15-16	$0.87 \pm 0.06 \pm 0.03 \pm 0.04$	$0.70 \pm 0.04 \pm 0.02 \pm 0.04$	$0.41 \pm 0.03 \pm 0.01 \pm 0.02$	$0.22 \pm 0.02 \pm 0.01 \pm 0.01$	
17-18	$0.58 \pm 0.05 \pm 0.02 \pm 0.03$	$0.39 \pm 0.03 \pm 0.02 \pm 0.02$			
18-19	$0.32 \pm 0.03 \pm 0.01 \pm 0.02$	$0.27 \pm 0.02 \pm 0.01 \pm 0.02$	$0.19 \pm 0.01 \pm 0.01 \pm 0.01$	$0.11 \pm 0.01 \pm 0.00 \pm 0.01$	$0.05 \pm 0.01 \pm 0.00 \pm 0.00$
19-20					

参考文献

- [1] GELL-MANN M. A Schematic Model of Baryons and Mesons[J]. Phys. Lett., 1964, 8: 214–215. DOI: [10.1016/S0031-9163\(64\)92001-3](https://doi.org/10.1016/S0031-9163(64)92001-3).
- [2] ZWEIG G. CERN Report[J]. 8419/Th412, 1964.
- [3] ABREU P, et al. [DELPHI Collaboration], Measurements of the Z partial decay width into c anti-c and multiplicity of charm quarks per b decay[J]. Eur. Phys. J., 2000, C12: 225–241. DOI: [10.1007/s100529900228](https://doi.org/10.1007/s100529900228).
- [4] BARATE R, et al. [ALEPH Collaboration], Study of charm production in Z decays[J]. Eur. Phys. J., 2000, C16: 597–611. DOI: [10.1007/s100520000421](https://doi.org/10.1007/s100520000421).
- [5] DYTMAN S A, et al. [CLEO Collaboration], Measurement of exclusive B decays to final states containing a charmed baryon[J]. Phys. Rev., 2002, D66: 091101. DOI: [10.1103/PhysRevD.66.091101](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.66.091101).
- [6] AAIJ R, et al. [LHCb Collaboration], Measurement of b -hadron production fractions in 7 TeVpp collisions[J]. Phys. Rev., 2012, D85: 032008. DOI: [10.1103/PhysRevD.85.032008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.032008).
- [7] GEORGI H. On-shell effective field theory[J]. Nucl. Phys., 1991, B361: 339–350. DOI: [10.1016/0550-3213\(91\)90244-R](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90244-R).
- [8] NEUBERT M. Heavy quark symmetry[J]. Phys. Rept., 1994, 245: 259–396. DOI: [10.1016/0370-1573\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)90091-4).
- [9] LICHTENBERG D B, TASSIE L J. Baryon Mass Splitting in a Boson-Fermion Model[J]. Phys. Rev., 1967, 155: 1601–1606. DOI: [10.1103/PhysRev.155.1601](https://doi.org/10.1103/PhysRev.155.1601).
- [10] ANSELMINO M, KROLL P, PIRE B. Diquarks in Exclusive Reactions at Large Momentum Transfer[J]. Z. Phys., 1987, C36: 89. DOI: [10.1007/BF01556169](https://doi.org/10.1007/BF01556169).
- [11] KROLL P, SCHWEIGER W. A Diquark Model for Proton - Anti-proton Annihilation Into Hyperon - Anti-hyperon[J]. Nucl. Phys., 1987, A474: 608. DOI: [10.1016/0375-9474\(87\)90596-3](https://doi.org/10.1016/0375-9474(87)90596-3).
- [12] MANNEL T, ROBERTS W, RYZAK Z. Baryons in the heavy quark effective theory[J]. Nucl. Phys., 1991, B355: 38–53. DOI: [10.1016/0550-3213\(91\)90301-D](https://doi.org/10.1016/0550-3213(91)90301-D).
- [13] LEINWEBER D B. Do quarks really form diquark clusters in the nucleon?[J]. Phys. Rev., 1993, D47: 5096–5103. DOI: [10.1103/PhysRevD.47.5096](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.47.5096).
- [14] EBERT D, FELDMANN T, KETTNER C, et al. A Diquark model for baryons containing one heavy quark[J]. Z. Phys., 1996, C71: 329–336. DOI: [10.1007/s002880050178](https://doi.org/10.1007/s002880050178).
- [15] FU-SHENG Y, WANG X X, LU C D. Nonleptonic Two Body Decays of Charmed Mesons[J]. Phys. Rev., 2011, D84: 074019. DOI: [10.1103/PhysRevD.84.074019](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.074019).
- [16] LI H N, LU C D, YU F S. Branching ratios and direct CP asymmetries in $D \rightarrow PP$ decays[J]. Phys. Rev., 2012, D86: 036012. DOI: [10.1103/PhysRevD.86.036012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.86.036012).

- [17] BURAS A J, GERARD J M, RUCKL R. 1/n Expansion for Exclusive and Inclusive Charm Decays[J]. Nucl. Phys., 1986, B268: 16. DOI: [10.1016/0550-3213\(86\)90200-2](https://doi.org/10.1016/0550-3213(86)90200-2).
- [18] FUKUGITA M, INAMI T, SAKAI N, et al. Nonleptonic Decays of Kaons in the 1/N-C Expansion[J]. Phys. Lett., 1977, B72: 237–239. DOI: [10.1016/0370-2693\(77\)90711-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(77)90711-0).
- [19] TADIC D, TRAMPETIC J. Weak Meson Decays and the $1/N^-c$ Expansion[J]. Phys. Lett., 1982, B114: 179. DOI: [10.1016/0370-2693\(82\)90142-3](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90142-3).
- [20] BAUER M, STECH B. Exclusive d Decays[J]. Phys. Lett., 1985, B152: 380. DOI: [10.1016/0370-2693\(85\)90515-5](https://doi.org/10.1016/0370-2693(85)90515-5).
- [21] BLOK B YU, SHIFMAN M A. Towards a Theory of Weak Hadronic Decays of Charmed Particles[J]. Sov. J. Nucl. Phys., 1987, 45: 135.
- [22] BLOK B YU, SHIFMAN M A. Weak Nonleptonic Decays of Charmed Mesons in QCD Sum Rules[J]. Sov. J. Nucl. Phys., 1987, 45: 301.
- [23] BLOK B YU, SHIFMAN M A. Weak Nonleptonic Decays of Charmed Mesons: Theory Versus Experiment[J]. Sov. J. Nucl. Phys., 1987, 45: 522.
- [24] CHENG H Y, TSENG B. Nonleptonic weak decays of charmed baryons[J]. Phys. Rev., 1992, D46: 1042. DOI: [10.1103/PhysRevD.55.1697](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.1697), [10.1103/PhysRevD.46.1042](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.46.1042).
- [25] CHENG H Y, TSENG B. Cabibbo allowed nonleptonic weak decays of charmed baryons[J]. Phys. Rev., 1993, D48: 4188–4202. DOI: [10.1103/PhysRevD.48.4188](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.48.4188).
- [26] ASNER D M, et al. Physics at BES-III[J]. Int. J. Mod. Phys., 2009, A24: S1–794.
- [27] SHARMA K K, VERMA R C. A Study of weak mesonic decays of Lambda(c) and Xi(c) baryons on the basis of HQET results[J]. Eur. Phys. J., 1999, C7: 217–224. DOI: [10.1007/s100529801008](https://doi.org/10.1007/s100529801008).
- [28] KORNER J G, KRAMER M. Exclusive nonleptonic charm baryon decays[J]. Z. Phys., 1992, C55: 659–670. DOI: [10.1007/BF01561305](https://doi.org/10.1007/BF01561305).
- [29] ZENCZYKOWSKI P. Quark and pole models of nonleptonic decays of charmed baryons[J]. Phys. Rev., 1994, D50: 402–411. DOI: [10.1103/PhysRevD.50.402](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.50.402).
- [30] IVANOV M A, KORNER J G, LYUBOVITSKIY V E, et al. Exclusive nonleptonic decays of bottom and charm baryons in a relativistic three quark model: Evaluation of nonfactorizing diagrams[J]. Phys. Rev., 1998, D57: 5632–5652. DOI: [10.1103/PhysRevD.57.5632](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.57.5632).
- [31] XU Q P, KAMAL A N. Cabibbo favored nonleptonic decays of charmed baryons[J]. Phys. Rev., 1992, D46: 270–278. DOI: [10.1103/PhysRevD.46.270](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.46.270).
- [32] XU Q P, KAMAL A N. The Nonleptonic charmed baryon decays: $B(c) \rightarrow B(3/2+, \text{decuplet}) + P(0-) \text{ or } V(1-)$ [J]. Phys. Rev., 1992, D46: 3836–3844. DOI: [10.1103/PhysRevD.46.3836](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.46.3836).
- [33] FAYYAZUDDIN, RIAZUDDIN. On the relative strength of W exchange and factorization contributions in hadronic decays of charmed baryons[J]. Phys. Rev., 1997, D55: 255–258. DOI: [10.1103/PhysRevD.55.255](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.255), [10.1103/PhysRevD.56.531](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.531).
- [34] AVERY P, et al. Study of the decays $\lambda(c)^+ \rightarrow \Xi^0 K^+$, $\lambda(c)^+ \rightarrow \sigma^+$

- K+ K- and lambda(c)+ —> xi- K+ pi+[J]. Phys. Rev. Lett., 1993, 71: 2391–2395. DOI: [10.1103/PhysRevLett.71.2391](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.2391).
- [35] PATRIGNANI C, et al. Review of particle physics[J]. Chin. Phys., 2014, C38: 090001. DOI: [10.1088/1674-1137/38/9/090001](https://doi.org/10.1088/1674-1137/38/9/090001).
- [36] ALBRECHT H, et al. Evidence for W exchange in charmed baryon decays[J]. Phys. Lett., 1995, B342: 397–401. DOI: [10.1016/0370-2693\(94\)01513-C](https://doi.org/10.1016/0370-2693(94)01513-C).
- [37] ZUPANC A, et al. [Belle Collaboration],Measurement of the Branching Fraction $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+)$ [J]. Phys. Rev. Lett., 2014, 113(4): 042002. DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.042002](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.042002).
- [38] ABLIKIM M, et al. [BESIII Collaboration],Measurements of absolute hadronic branching fractions of Λ_c^+ baryon[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 052001. DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.052001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.052001).
- [39] LANSBERG J P. On the mechanisms of heavy-quarkonium hadroproduction[J]. Eur. Phys. J., 2009, C61: 693–703. DOI: [10.1140/epjc/s10052-008-0826-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-008-0826-9).
- [40] KRAMER M, 1. Quarkonium production at high-energy colliders[J]. Prog. Part. Nucl. Phys., 2001, 47: 141–201. DOI: [10.1016/S0146-6410\(01\)00154-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6410(01)00154-5).
- [41] BRAMBILLA N, et al. Heavy quarkonium: progress, puzzles, and opportunities[J]. Eur. Phys. J., 2011, C71: 1534. DOI: [10.1140/epjc/s10052-010-1534-9](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-010-1534-9).
- [42] CACCIARI M, GRECO M, NASON P. The P(T) spectrum in heavy flavor hadroproduction [J]. JHEP, 1998, 9805: 007. DOI: [10.1088/1126-6708/1998/05/007](https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/05/007).
- [43] AAIJ R, et al. Measurement of J/ψ production in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV[J]. Eur. Phys. J., 2011, C71: 1645. DOI: [10.1140/epjc/s10052-011-1645-y](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-011-1645-y).
- [44] AAIJ R, et al. Measurement of $\psi(2S)$ meson production in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV[J]. Eur. Phys. J., 2012, C72: 2100. DOI: [10.1140/epjc/s10052-012-2100-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-012-2100-4).
- [45] KNÜNZ V. Quarkonium production and polarization in pp collisions the CMS detector[J]. PoS, 2015, Beauty2014: 012.
- [46] KHACHATRYAN V, et al. Measurement of J/ψ and $\psi(2S)$ prompt double-differential cross sections in pp collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV[J]. Phys. Rev. Lett., 2015, 114(19): 191802. DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.191802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.191802).
- [47] BELYAEV I, et al. Handling of the generation of primary events in Gauss, the LHCb simulation framework[J]. J. Phys. Conf. Ser., 2011, 331: 032047. DOI: [10.1088/1742-6596/331/3/032047](https://doi.org/10.1088/1742-6596/331/3/032047).
- [48] SKWARNICKI T. A study of the radiative cascade transitions between the Upsilon-prime and Upsilon resonances[Z]. [S.l.]: Institute of Nuclear Physics, Krakow, 1986.
- [49] CRAMER K S. Kernel estimation in high-energy physics[J]. Comput. Phys. Commun., 2001, 136: 198–207. DOI: [10.1016/S0010-4655\(00\)00243-5](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(00)00243-5).
- [50] DE CIAN M, HANSMANN-MENZEMER S, JAEGER A, et al. Measurement of the track finding efficiency: Lhcb-pub-2011-025. cern-lhcb-pub-2011-025[R/OL]. Geneva: CERN, 2012. <http://cds.cern.ch/record/1402577>.

- [51] AAIJ R, et al. Measurement of the track reconstruction efficiency at LHCb[J]. JINST, 2015, 10(02): P02007. DOI: [10.1088/1748-0221/10/02/P02007](https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/02/P02007).
- [52] AAIJ R, et al. The LHCb trigger and its performance in 2011[J]. JINST, 2013, 8: P04022. DOI: [10.1088/1748-0221/8/04/P04022](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/04/P04022).
- [53] AAIJ R, et al. Absolute luminosity measurements with the LHCb detector at the LHC[J]. JINST, 2012, 7: P01010. DOI: [10.1088/1748-0221/7/01/P01010](https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/01/P01010).
- [54] SHAO H S, HAN H, MA Y Q, et al. Yields and polarizations of prompt J/ψ and $\psi(2S)$ production in hadronic collisions[J]. JHEP, 2015, 1505: 103. DOI: [10.1007/JHEP05\(2015\)103](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2015)103).

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历

李培荣

已发表 (或正式接受) 的学术论文:

1. “Measurements of absolute hadronic branching fractions of Λ_c^+ baryon”, [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. **116** 052001 (2016)
2. “Observation of a neutral charmoniumlike state $Z_c(4025)^0$ in $e^+e^- \rightarrow (D^*\bar{D}^*)^0\pi^0$ ”, [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. **115**, no. 18, 182002 (2015)
3. “Observation of a charged charmoniumlike structure in $e^+e^- \rightarrow (D^*\bar{D}^*)^\pm\pi^\mp$ at $\sqrt{s} = 4.26\text{GeV}$ ”, [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. **112**, no. 13, 132001 (2014)
4. “Recent charmed baryon results at BESIII”, Pei-Rong Li, Nuclear and Particle Physics Proceedings, Volumes 270-272, January-March 2016, Pages 123-126

参加的研究项目及获奖情况:

可以随意添加新的条目或是结构。

致 谢

博士五载忙碌而充实，值此论文即将付梓之际，向五年来所有给予关心和帮助的老师、同学表示感谢！

感谢我的博士导师郑阳恒教授对我的指导，郑老师严谨的科研态度，对物理的不懈追求使我受益良多。吕晓睿教授是我进入高能物理实验研究领域的领路人。他科研上的严谨，学术上的自由，知识上的广博，生活上的关心无不对我产生了巨大的影响。吕老师是我硕士阶段的导师，自己在科研上取得的点滴成绩无不是吕老师亲自指导的结果。感谢吕老师五年间给我的巨大帮助。从两位老师身上学到的知识、科研思路等，对我有着深远的影响。

感谢张长春，朱永生，谢一冈，刘倩，刘宏邦，李蕾，何吉波，李海波，娄辛丑，刘怀民，孙胜森，张景芝等交流合作过的老师，他们对科研工作的专业精神使我备受鼓舞。感谢办公室的兰江西老师帮助我们处理各种事务以及生活上的关心，兰老师睿智的处事方式值得我不断学习。感谢管颖慧，张瑞，徐庆年，刘佩莲，刘凯等师兄师姐手把手的帮助。和你们的讨论使我不断突破自己对问题的认识，醍醐灌顶似的解惑释疑让整个世界都变得美好了起来。还要感谢科研上愉快合作的小伙伴儿北京大学的刘兰雕博士，这是个聪明机智的少年。感谢博士期间周围的同学和好友：肖栋，卢宇，周兴玉，鞠旭东，季冬，孙震，程实，陆振烟等等。感谢我的师弟师妹王滨龙，刘晓霞，秦佳佳，王丹，张宇，周亦雄以及郑老师课题组的所有同学，谢谢他们对我的支持和帮助。

最后，要感谢家人对我的呵护，父母给了我这世界上最无私的爱！他们总是默默地支持我，为了我的点滴进步而无限欢喜，此论文是儿子送给你们最好的礼物。爱情带给我无限的甜蜜也教会了我责任，感谢我的女朋友田冉冉同学几年来的陪伴与支持，你是我前进道路上的不竭动力。

