

LHCb 上底介子谱学的实验研究现状与展望

郑凯琦^{1,2,3} 何吉波^{1,2,3} 许智豪²

(¹ 国科大杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 浙江 杭州 310024;

² 中国科学院大学, 物理科学学院, 北京 100049; ³ 中国科学院理论物理所, 北京 100190)

摘 要 底介子谱学的研究是高能物理中重要的研究课题之一。由于重夸克质量和寿命上的特殊, 重味系统中往往会出现特殊的现象。底介子作为开放味强子, 呈现出丰富的谱学结构。研究底介子谱学, 为深入理解强相互作用的束缚本质提供关键信息。LHCb 作为大型强子对撞机(LHC)上唯一针对重味物理而优化的实验, 致力于通过研究重味强子的稀有衰变和 CP 破坏来间接寻找超出粒子物理标准模型的新物理, 同时也是研究底强子谱学的优秀平台。在过去十几年里, LHCb 实验开展了多项底介子谱学研究, 报道了多个底介子激发态的首次发现, 并将已知底介子性质的测量精度提升至新水平。伴随着 LHCb 第一次大型升级的结束和运行三期结束临近, 本文综合性的总结介绍了 LHCb 实验多年来在底介子谱学方面的进展, 并进一步展望了未来 LHCb 的技术升级将为底介子谱学研究带来的前景。

关键词 底介子; 质量谱; 激发态; LHCb

DOI: 10.27024/j.wlygc.2026.04.07.02

STATUS AND PROSPECTS OF EXCITED BOTTOM MESONS AT LHCb

ZHENG Kaiqi^{1,2,3} HE Jibo^{1,2,3} XU Zhihao²

(¹ School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310024;

² School of Physics Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

³ Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract It has been one of the most significant subjects in the high energy physics experiment to study excited bottom meson spectroscopy. Due to the distinctive mass and lifetimes of heavy quarks, heavy-flavor systems display unique quantum phenomena. As open-flavor hadrons, bottom mesons exhibit a rich spectroscopic structure. Investigating bottom meson spectroscopy deepens our understanding of the confining nature of the strong interaction.

Being the sole LHC experiment specifically designed for heavy-flavor physics, LHCb is dedicated to indirectly searching for physics beyond the Standard Model (BSM physics) via the study of rare decays and CP violation of heavy-flavor hadrons, while also serving as an ideal platform for bottom hadron spectroscopy research. In the past 15 years, there have been a

收稿日期: 2026-03-25; 修回日期: 2026-04-07; 出版日期: 2026-05-20

通信作者: 郑凯琦, zhengkaiqi22@mails.ucas.ac.cn.

引文格式: 郑凯琦, 何吉波, 许智豪. LHCb 上底介子谱学的实验研究现状与展望[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 66-78.

Cite this article: ZHENG K Q, HE J B, XU Z H. Status and prospects of excited bottom mesons at LHCb[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 66-78. (in Chinese)

great amount of research on excited bottom mesons at LHCb, including the first observations of multiple excited bottom mesons and significantly enhancing measurement precision for known bottom mesons. With the recent completion of LHCb's first major upgrade and the approaching conclusion of Run 3 operations, this paper summarizes the experiment's groundbreaking contributions to bottom meson spectroscopy. Furthermore, it provides an outlook on the opportunities for bottom meson spectroscopy from future LHCb detector upgrades.

Key words bottom meson; spectroscopy; excited states; LHCb

在粒子物理标准模型(the Standard Model)中,最基本的粒子分为费米子和玻色子:费米子包括了夸克和轻子,构成了世界上所有物质的组成;而玻色子则承担着传播相互作用的角色,如光子(电磁力)、胶子(强相互作用)、W 和 Z 玻色子(弱相互作用)以及希格斯玻色子(Higgs Boson)。标准模型中的夸克模型包含了六种夸克,包括上夸克(u)、下夸克(d)、奇异夸克(s)、粲夸克(c)、底夸克(b)和顶夸克(t)。其中底夸克是带有电荷 $-\frac{1}{3}e$ 的第三代夸克,它属于重味夸克,其裸质量($m_b \approx 4.18\text{GeV}/c^2$)比质子质量的四倍还要大,且 Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 矩阵元 V_{cb} 和 V_{ub} 数值(决定了其弱相互作用的衰变率)^[1,2] 较小。两个或多个夸克通过强相互作用结合在一起而组成的亚原子粒子称为介子(重子数为零)和重子(重子数不为零),而介子和重子合称为强子。底强子顾名思义是指含有底夸克的强子,包括底介子(即含有底夸克的介子)、底重子、底夸克偶素($b\bar{b}$)以及含底夸克的奇特强子态等。底强子的平均寿命约为 10^{-12} 秒,介于粲强子(10^{-13} 秒)与奇异强子(10^{-10} 至 10^{-8} 秒)之间。底强子的动力学行为可以用标准模型中的量子色动力学(QCD)描述,在高能量标度下,由于 QCD 的渐近自由特性,可采用弱耦合微扰理论计算;但在低能量标度下由于耦合效应显著,微扰理论不再适用,此时则需要借助重夸克有效理论(HQET)、格点 QCD (Lattice QCD)等方法进行研究。目前的谱学研究旨在关注粒子内部结构,例如势场模型和自旋轨道耦合等性质。实验上的谱学研究则主要包括质量测量,自旋量子数测量(自旋结构)和衰变分支比测量(衰变模式关联性)。而由于底介子激发态分布密集,实验上确定量子数比较困难,因此不断搜寻新的激发态以及加深对已知态的理解成为了当

前谱学研究的主要任务。

盖尔曼和茨威格于 1964 年分别独立提出了夸克模型^[3,4]。底夸克的存在则是由日本物理学家小林诚和益川敏英在 1973 年提出^[2],以解释电荷宇称对称性破坏(以下简称 CP 破坏)现象。1977 年,由利·莱德曼主导的费米实验室 E288 实验团队在质子-核子碰撞下首次观测到底夸克存在的证据^[5],即观测到底夸克偶素衰变到一对 μ 子的显著信号。随后位于 DESY 的 DORIS 对撞机的 PLUTO 和 DASP2 合作组证实了这一发现^[6]。在之后的几十年中,底介子成为了研究 CP 破坏现象的重要实验对象,例如享有“B 工厂”之称的 Babar 和 Belle 实验都将 CP 破坏参数测量作为主要研究目标^[7,8]。

目前仍在运行的底物理实验设施有位于欧洲核子研究中心(CERN)大型强子对撞机(Large Hadron Collider,简称 LHC)上的 LHCb 实验(Large Hadron Collider beauty)和位于日本茨城县 SuperKEKB 上的 Belle II 实验。这两大实验的运行模式存在显著差异:SuperKEKB 是一个工作在底夸克偶素 $\Upsilon(4S)$ 质量点($\sim 10\text{GeV}$)附近的环形正负电子对撞机;而 LHC 是环形质子-质子对撞机,当前质心系对撞能量为 13TeV ,LHCb 是 LHC 上四个大型实验之一。这种运行模式的差异,直接导致两大实验中底强子的产生机制不同:Belle II 实验中的底强子主要通过正负电子对撞产物 $\Upsilon(4S)$ 的衰变产生,而 LHCb 实验中的底强子则是主要产生于质子-质子对撞中部分子的硬散射过程,以及底强子激发态的衰变。正是这些差异,使得 LHCb 和 Belle II 实验在味物理研究中形成了互补,共同推动底物理研究的发展。

LHCb 探测器由多个子探测器系统组成,包括顶点探测器(Vertex Locator,简称 VELO)、寻

迹系统、环成像切伦科夫探测器(RICH)、量能器和缪子探测器等^[9](如图1)。针对质子-质子对撞的特点,LHCb探测器进行了专门的优化设计:在质子-质子对撞中,由于参与硬散射的部分子动量存在不对称性,所产生的 $b\bar{b}$ 强子对的角分布在与束流线夹角最小时达到峰值,同时 b 侧和 $\bar{b}$ 侧的粒子动力学具有高度相关性。基于这一特征,LHCb探测器被设计为单臂前向探测器,其水平磁弯曲面上的角度接收范围约为 $10\sim 300\text{mrad}$,垂直面上的角度接收范围为 $10\sim 250\text{mrad}$ 。尽管LHCb探测器覆盖的立体角范围仅约4%,却能收集到所有产生的 $b\bar{b}$ 事例的27%,探测效率优势显著。LHCb探测器最初被设计用于测量在底强子衰变中的CP破坏参数和通过味物理研究间接寻找超出标准模型的新物理。由于其足够大的重味强子产生截面、优秀的径迹和顶点重建、优异的动量分辨率、独特的带电强子粒子鉴别能力,以及灵活高效的触发系统,LHCb探测器也适用于研究强子谱学、电弱物理等。

截止到2025年底,LHCb探测器采集的质子-质子对撞数据积分亮度的逐年增加趋势如图2所示。2011年LHCb实验采集了积分亮度为 1fb^{-1} ,质心能量为7TeV的质子-质子对撞数据;2012年LHCb实验采集了 2fb^{-1} 的质心能量为8TeV的质子-质子对撞数据;在2015—2018年期

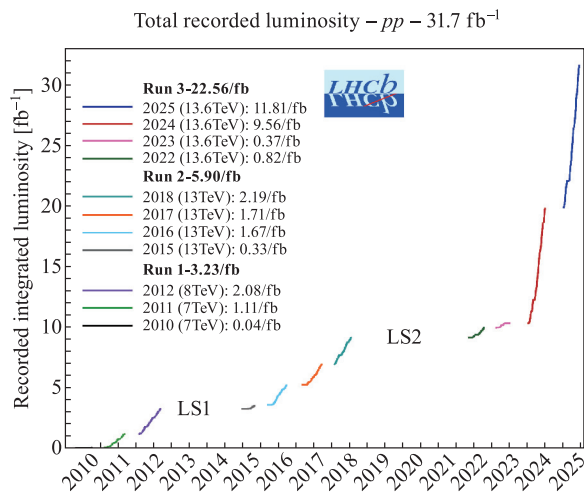


图2 LHCb探测器逐年增加的积分亮度^[11]

间(大型强子对撞机的运行二期,即Run-II),采集了 6fb^{-1} 的质心能量为13TeV的质子-质子对撞数据。根据运行一期与运行二期数据,目前已有多个底介子激发态被发现与测量。为获取更具突破性的研究成果并充分释放LHC在味物理领域的潜力,LHCb探测器的升级是不可或缺的。2022年,LHCb探测器完成了第一次升级(Upgrade Ia),这次升级的核心目标是在维持现有探测器优异物理性能的前提下,构建一个能在更高亮度环境下稳定运行的探测系统。此次升级策略的关键突破在于研制“无触发”电子学系统,该系

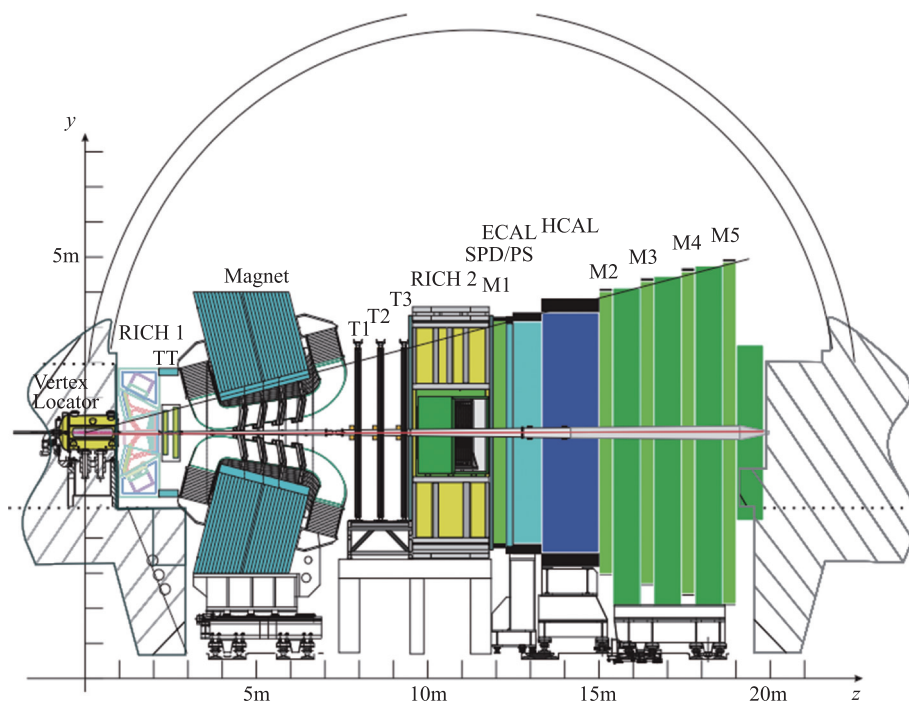


图1 LHCb探测器示意图^[10]

统可实现与 LHC 时钟频率(40MHz)同步的全探测器信号读取。而在硬件方面,硅像素传感器、上游探测器(UT)和环形切伦科夫探测器(RICH)都得到了大幅度的升级。升级后的探测器在 $2 \times 10^{33} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ 的瞬时亮度下运行,2024 单年积累的数据积分亮度达到近 10fb^{-1} ,已经超越运行一期和二期积累的数据量。升级后的触发系统使用来自每个子探测器的信息来处理每个事件(LHCb 的可见率估计达到 30MHz),以此来增强其决策的正确率以及最大化信号效率,尤其是纯强子衰变道的信号效率。新的触发策略使得强子触发效率相对于运行一期、二期提高 2 到 4 倍。目前, LHCb 正在运行第三期(Run-III),在 13.6TeV 的质心系能量下,2022—2025 年已经采集到 22.56fb^{-1} 的数据,相关分析工作正在紧锣密鼓地进行中。

接下来本文从研究背景及意义,发展现状与未来趋势两个方面阐述 LHCb 实验上底介子激发态的研究,首先详细归纳 LHCb 上对底介子激发态的研究现状,然后介绍 LHCb 探测器升级计划,最后结合 LHCb 的升级计划和相关理论研究对底介子谱学未来的发展进行展望,包括可能在 LHCb 上发现的新粒子,已发现迹象但统计学判据未达 5σ 的信号,以及有较高研究价值,可进一步改进其性质测量精度的激发态。

1 LHCb 上底介子激发态的研究现状

1.1 B 和 B_s 介子

在粒子物理中,底介子表示含有一个底夸克(或反底夸克)的介子($b\bar{q}$ 或 $\bar{b}q$),其中若 q 为 u 或 d 则为 B 介子;若 q 为 s 则为 B_s 介子;若 q 为 c 则为 B_c^+ 介子(下文所提到的 LHCb 实验观测到的所有底介子激发态都包含了它们的电荷共轭态)。包含轻夸克的底介子激发态(B^{*+}, B^{*0}, B_s^{*0})的性质可以由 HQET 描述。由于两个夸克之间的质量差远大于 QCD 质量标度($M_b \gg \Lambda_{\text{QCD}}$),这个理论可以假设 $M_b \rightarrow \infty$,而由此得出的解可以通过 $\frac{1}{M_b}$ 的幂式项来进行修正。在重夸克近似下,底介子的行为类似于氢原子,此时底夸克作为电磁场和色场的静态源,轻夸克在场中运动。底介子由三个量子数表征:两个夸克之间的相对轨道角动量 L ($L=0,1,2$ 时为 S,P,D),轻夸克的总角动量 $j_q = |L \pm 1/2|$,以及底介子的总角动量 $J = |j_q \pm 1/2|$,谱学记号

的形式是 $n^{2S+1}L_J$,其中 S 是夸克自旋的总和。粒子数据组(Particle Data Group,下称 PDG)记号形式(在本文中我们采用此种记号形式)为 $B_J^{(*)}(m)$ 或者 $B_J^{(*)}(nL)^{[12]}$,其中的 m 单位为 MeV/c^2 ,上标的 $*$ 用于标记具有自然自旋宇称的激发态(即 $J^P=0^+,1^-,2^+,\dots$),上标的'则用于区分相同量子数的两个不同态,电荷也会被特别指定,但同位旋对称性的近似程度很高,因此带电 B 介子与中性 B 介子的能谱几乎完全一致。

当 $L=0$ 时,有两种可能的 $(J;j_q)$ 组合,都是宇称奇性的,对应了基态($J=0, J^P=0^-$)和单激发态 $B^*(J=1, J^P=1^-)$ 。对于 $L=1$,则有四种可能的 $(J;j_q)$ 组合,都是宇称偶性的,这样的态统称为双激发态,即 B^{**} ,并且会强衰变到更轻的底介子和 π 介子。这些态以双重态形式存在(每个 j_q 对应两个 J 值),每个双重态包含一个自然自旋-宇称态和一个非自然自旋-宇称态。其中,自然自旋-宇称量子数的态(即 $P=(-1)^J$ 的态,除 $J^P=0^+$ 以外)可衰变到末态 $B\pi$ 或 $B^*\pi$ 。而非自然自旋-宇称态则受宇称守恒定律约束,不可以衰变到 $B\pi$ 末态,仅可以衰变到 $B^*\pi$ 末态。由于 LHCb 探测器上高能质子-质子对撞及其衰变产物中的光子太多,组合数太高, $B^* \rightarrow B\gamma$ 衰变中的软光子被“丢失”,在 $B\pi$ 谱中一个 B^{**} 双重态因此表现为三个峰:一个是自然自旋-宇称态衰变到 $B\pi$;另外两个峰则是非自然自旋-宇称态和自然自旋-宇称态分别衰变到“丢失”了一个光子的 $B^*\pi$, $B^*\pi$ 衰变的峰的位置会比真实 B^{**} 质量低,差值等于 B^* 和 B 的质量差,这样的“丢失”了光子的峰称为 feed-down 峰。但实验上,由于自然宽度和质量分辨率的存在,这些峰可能会发生重叠难以分辨。 B_0^* 和 B_1' 态通过 S 波衰变,因此它们的峰会相当宽。而 B_1 和 B_2^* 态只通过 D 波衰变,通过计算和实验验证它们的峰则都比较窄。更高激发态如 $B(2S), B^*(2S), B_2(1D)$ 和 $B_3^*(1D)$ 则预计宽度在 $100 \sim 300 \text{MeV}$ 范围内。

B_s^0 介子的能谱与 B 介子相似, B 和 B_s^0 介子激发态的综述性讨论可以帮助我们宏观的建立对这一家族的图像,也可以给我们在实验上寻找新的激发态指明方向。图 3 给出了理论文献^[13-20]作出的部分 B 介子激发态的质量预言范围,其中两条水平线分别代表着 $B\pi$ 和 $B^*\pi$ 衰变阈值,灰(红)点表示实验测量值(部分实验观测到的激发态量子数未知,并未在该图中标出,具体列于第 3 节中的

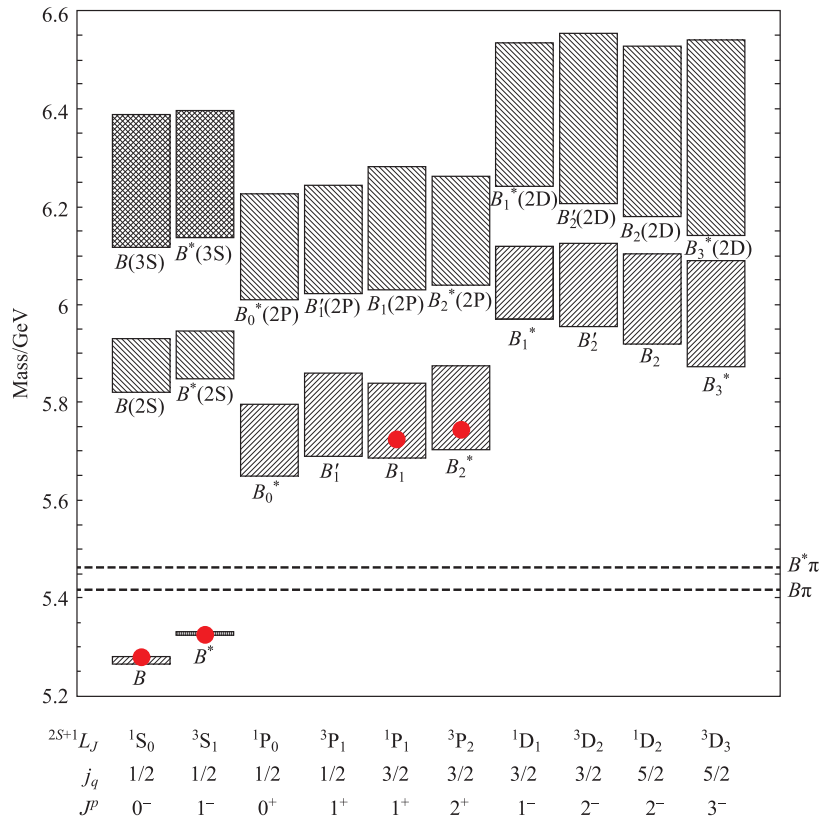


图3 分子激发态的质量预言^[13-20],方框对应各态质量的理论预言范围,灰(红)点表示实验测量值,水平线分别对应 $B\pi$ 衰变阈值与 $B^*\pi$ 衰变阈值

表1),可见仍有不少激发态等待实验的发现与测量。

1.1.1 B^+ 和 B^0 介子激发态

除了 B^* 以外,最先被观测到的 B^+ 和 B^0 介子激发态是 $1P$ 波的双激发态 $B_1(5721)^{0,+}$ 和 $B_2^*(5747)^{0,+}$ 粒子^[21-23],PDG 根据夸克模型给出 $B_1(5721)$ 和 $B_2^*(5747)$ 的量子数分别为 1^1P_1 和 1^3P_2 ^[12]。随后在 2015 年, LHCb 合作组利用 7TeV 和 8TeV 的 3fb^{-1} 运行一期数据,研究了 $B^0\pi^+$ 和 $B^+\pi^-$ 组合中 B^+ 和 B^0 介子激发态的质量分布^[24]。通过 $B^+\rightarrow\bar{D}^0\pi^+$, $B^+\rightarrow\bar{D}^0\pi^+\pi^+\pi^-$, $B^+\rightarrow J/\psi K^+$, $B^0\rightarrow D^-\pi^+$, $B^0\rightarrow D^-\pi^+\pi^+\pi^-$ 和 $B^0\rightarrow J/\psi K^0$ 衰变道重建 B^+ 和 B^0 介子。获得了大约 120 万个 B^+ 和 250 万个 B^0 事例,平均信号纯度略大于 80%。在伴随 π 介子的 $p_T > 2\text{GeV}/c$ 条件下的 $B^+\pi^-$ 和 $B^0\pi^+$ 质量谱如图 4 所示,共观测到了 10 个峰状结构。其中,6 个低质量窄峰对应于 CDF 和 D0 合作组曾观测到的 4 个 $B_1(5721)^{0,+}$ 和 $B_2^*(5747)^{0,+}$ 粒子^[21-23]: $B_1(5721)\rightarrow B^*\pi$ 和 $B_2^*(5747)\rightarrow B^{(*)}\pi$ 。他们对

$B_1(5721)^{0,+}$ 和 $B_2^*(5747)^{0,+}$ 四个态的质量和宽度做了精确测量,但实验上还未对这些态的量子数进行测量。

除了六个低质量峰外, LHCb 还观察到四个更宽的高质量结构,特别是在伴随 π 介子高横动量下。这些结构与四个新的 B 介子激发态相一致,标记为 $B_J(5840)^{0,+}$ 和 $B_J(5960)^{0,+}$ (首次观测到它的 CDF 合作组以及 PDG 标记它为 $B_J(5970)$, 本文只在提及此次实验时标记其为 $B_J(5960)$, 它们的质量和宽度是在它们的量子数的不同假设下拟合得到的。两篇理论文章^[25,26]都提到, $B_J(5840)$ 可能的两种量子数为 2^1S_0 和 2^3S_1 , $B_J(5960)$ 可能为 2^3S_1 或 1^3D_3 (具体情况在第 3 节中讨论), 它们的量子数还未确定。在 $B^0\pi^+$ 道中 $B_J(5840)^+$ 和 $B_J(5960)^+$ 的单峰和双峰假设的显著度分别为 4.6σ 和 4.8σ , 而 $B_2^*(5747)^{0,+}$ 的 feed-down 峰显著度则分别为 3.7σ (经过系统误差修正) 和 1.8σ 。

1.1.2 B_s^0 介子激发态

除了 B_s^* 以外,最先被观测到的 B_s^0 介子激发

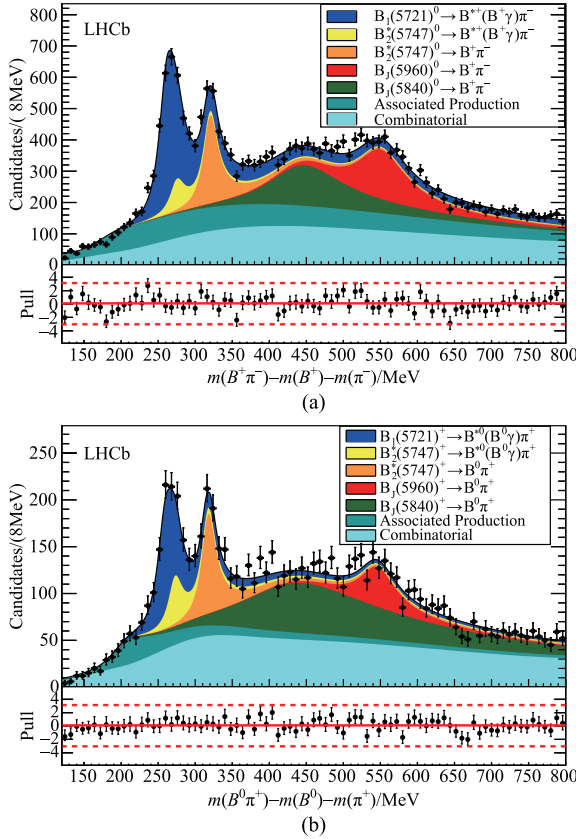


图4 $p_T(\pi) > 2\text{GeV}/c$ 条件下, 质量差分布

$$\Delta m \equiv m_{B\pi} - m_B - m_\pi$$

(a) $B^+\pi^-$ 质量谱; (b) $B^0\pi^+$ 质量谱^[24]

态是 CDF 和 D0 合作组观测到的 $B_{s1}(5830)^0$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0$ 粒子^[27,28], 它们被推定为 $j_q = 3/2$ 双重态 1^1P_1 和 1^3P_2 。随后在 2013 年, LHCb 合作组也观测到了这两个态, 他们使用积分亮度为 1fb^{-1} , $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$ 的数据, 用四个衰变道 $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^0(K^+\pi^-)\pi^+$, $B^+ \rightarrow \bar{D}^0(K^+\pi^-\pi^+\pi^-)\pi^+$ 和 $B^+ \rightarrow \bar{D}^0(K^+\pi^-)\pi^+\pi^-\pi^+$ 重建 B^+ 介子, 研究了 B^+K^- 的质量谱^[29]。如图 5(a) 所示为三个窄峰, 对应于衰变 $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow B^{*+}K^-$, $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^{*+}K^-$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^+K^-$ 。这是首次观察到 $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^{*+}K^-$ 衰变模式, 此衰变模式的信号的显著度为 8σ , 同时也是第一次测量 $B_{s2}^*(5840)^0$ 的自然宽度 $\Gamma(B_{s2}^{*0}) = 1.56 \pm 0.13 \pm 0.47\text{MeV}$, 其中第一项误差为统计误差, 第二项为系统误差(后续实验结果也由此顺序列出误差项)。这个自然宽度非零的显著度为 9σ 。两篇理论文章^[25,26]都提到这两个态很可能是 $B_1(5721)^0$ 和 $B_2^*(5747)^0$ 的奇异伴

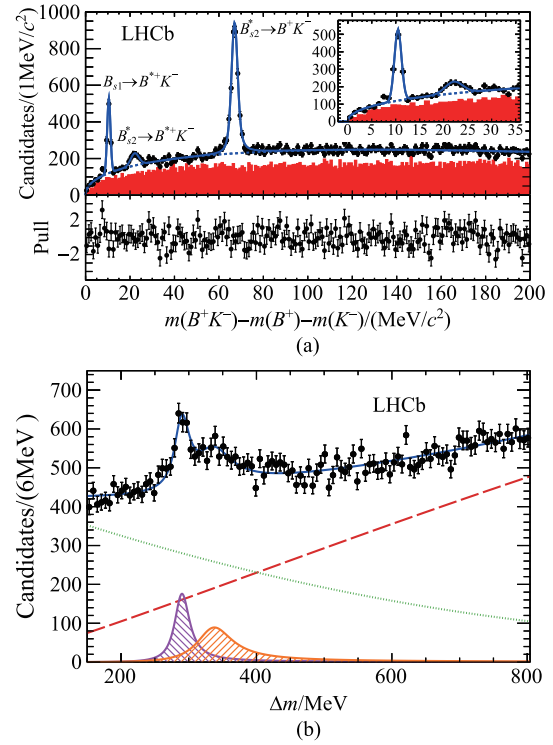


图5 B^+K^- 质量谱的质量差分布 $\Delta m \equiv m_{B^+K^-} - m_{B^+} - m_{K^-}$; 黑点为数据, 实心灰(蓝)线为最终拟合结果

(a) 灰(红)色阴影部分为 B^+K^- 分布, 从左到右三个峰分别为 $B_{s1}(5830)^0 \rightarrow B^{*+}K^-$, $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^{*+}K^-$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^+K^-$ ^[29]; (b) $p_T(K^-) > 2\text{GeV}/c$ 条件下基于双峰假设, 深(红)色虚线为组合本底, 浅(绿)色虚线为伴随产生, 深(紫)色阴影部分为第一个峰 m_1 , 浅(橙)色阴影部分为第二个峰 m_2 ^[30]

侣粒子(strange partner)。

8 年后的 2021 年, LHCb 合作组观测到了新的质量更大的 B_s^0 介子激发态。他们利用质心能量为 7, 8 与 13 TeV, 总积分亮度为 9fb^{-1} 的数据, 在 $B^\pm K^\mp$ 质量谱上观测到新的 B_s^0 介子激发态 $B_{sj}(6064)$ 和 $B_{sj}(6114)$ ^[30]。

如图 5(b) 所示, 研究人员发现双峰假设会比单峰假设置信度更高, 也更符合数据点分布, 假设这是 $B^\pm K^\mp$ 衰变道的双峰结构, 此双峰结构的质量和宽度分别为

$$\begin{aligned} m_1 &= 6063.5 \pm 1.2 \pm 0.8 \text{ MeV}/c^2 \\ \Gamma_1 &= 26 \pm 4 \pm 4 \text{ MeV} \\ m_2 &= 6114 \pm 3 \pm 5 \text{ MeV}/c^2 \\ \Gamma_2 &= 66 \pm 18 \pm 21 \text{ MeV} \end{aligned}$$

而假设这两个激发态衰变到 $B^{*\pm}K^\mp$ 末态而不是 $B^\pm K^\mp$, 其中 $B^{*\pm} \rightarrow B^\pm \gamma$, 由于软光子被“丢失”,

则上述质量实际上被低估了大约 $45\text{MeV}/c^2$, 即为 $B_{sJ}(6109)$ 和 $B_{sJ}(6158)$ 。研究报道了新激发态的总产生截面与分支比的乘积相比于之前发现的 B_{s2}^{*0} 的比值测量结果为 $0.87 \pm 0.15 \pm 0.19$ 。LHCb 研究人员认为这两个态可能属于 $2S$ 态或 $1D$ 态, 但受限于当前的信号统计量, 尚未确定其量子数。Garg 等人^[31] 预测, $B_{sJ}(6064)$ 可能为 2^3S_1 , $B_{sJ}(6114)$ 则较难确定, 其 J^P 可能是 $1^-, 2^-, 3^-$ 的 D 波激发态。陈兵等人^[32] 则预测 $B_{sJ}(6064)$ 为 1^3D_3 , $B_{sJ}(6114)$ 为 1^3D_1 。陈华星等人^[33] 也指出它们属于 $1D$ 态。

1.2 B_c 介子

在标准模型中, B_c 介子家族具有独特性。作为唯一一种由两种不同重夸克 ($b\bar{c}$) 组成的强子, B_c 介子因夸克质量的不对称性, 其能谱比重夸克偶素系统更复杂, 为探究强子内部重夸克动力学提供了独特且深刻的视角。此外, 它还是验证理论预言的核心基准, 尤其适用于检验格点 QCD 及其他各类基于 QCD 的计算结果。这类强子的研究极具科学价值, 为多能标 ($1/m_b, 1/m_c$ 及 $1/\Lambda_{\text{QCD}}$) 下重夸克动力学的探索提供了不可替代的平台。由于夸克味不同, 胶子湮灭过程被禁止, 使得 B_c 介子衰变宽度窄。且 B_c 介子激发态主要通过电磁跃迁或 π 介子跃迁衰变至 B_c 基态。质量低于 B - D 阈值 (即底介子-粲介子对衰变阈值, 约为 $7144 \sim 7149\text{MeV}/c^2$ ^[12]) 的 B_c 介子, 衰变宽度往往低于几百 keV。按照理论共识, 低于 B - D 阈值的 B_c 介子有两类 S 波态 ($J^P=0^-$ 和 1^-), 一类 $1P$ 多重态, 部分或全部 $2P$ 态 ($J^P=0^+, 1^+$ 和 2^+), 一组 D 波多重态 ($J^P=1^-, 2^-$ 和 3^-), 而最低的 F 波态非常接近该阈值^[34,35], 这样的态可能会因角动量势垒抑制大久保-茨威格-饭冢 (OZI) 规则^[4,36,37] 而具有较窄的衰变宽度。

相比于仅含一种重夸克的 B 介子和 B_s 介子, B_c 介子包含两种不同的重夸克, 其主要产生机制需要 $b\bar{b}$ 和 $c\bar{c}$ 对的同时产生, 产生难度比重夸克偶素更大, 产生截面极小, 产额大约是 B^+ 介子的 10^{-3} 量级。计入了 $B_c^*(1^3S_1)$, $B_c(1P)$ 和 $B_c(2S)$ 激发态的贡献后, 质心能量 $\sqrt{s}=14\text{TeV}$ 时, B_c 介子的遍举产生截面估算值为 $1\mu\text{b}$ ^[38,39]。这意味着 LHC 上每采集 1fb^{-1} 的数据, 预计可产生量级为 10^7 的 B_c 介子^[35], 足以支撑对 B_c 介子

家族的系统性研究。目前在 LHCb 实验上, B_c 介子已有基态, 部分 $2S$ 态以及部分 $1P$ 态被观测到。

率先尝试观测 B_c 介子激发态的是 LHCb 合作组: 2018 年, LHCb 合作组利用质心能量为 8TeV , 积分亮度为 2fb^{-1} 的数据, 在 $B_c^+\pi^+\pi^-$ 质量谱上试图观测 $B_c(2^1S_0)^+$ 态和 $B_c^*(2^3S_1)^+$ 态^[40], 但并未观测到这两个态的存在证据, 因此仅给出了其产生截面与对应衰变道分支比的乘积, 与 B_c^+ 基态产生截面的比值的上限。在 95% 置信水平下, 对于质量范围分别为 $[6830, 6890]\text{MeV}/c^2$ 的 $B_c(2^1S_0)^+$ 和 $[6795, 6890]\text{MeV}/c^2$ 的 $B_c^*(2^3S_1)^+$, 相对于 $B_c(2^1S_0)^+ \rightarrow B_c^+\pi^+\pi^-$ 和 $B_c^*(2^3S_1)^+ \rightarrow B_c^+\pi^+\pi^-$ 比值上限分别处于 $0.02 \sim 0.14$ 区间内。由高原宁等人在 2010 年的文章^[41] 中提到过的结论可知, 利用更多的数据 (如运行二期总计 6fb^{-1} 积分亮度), 就有可能观测到 $B_c(2S)^+$ 的存在证据。因此一年后, LHCb 合作组利用质心能量为 $7, 8$ 与 13TeV , 总积分亮度为 8.5fb^{-1} 的数据, 在同样的质量谱上观测到了这两个态^[42], 见图 6, 其中同号电荷样本 (same-sign) 指 $B_c^+\pi^+\pi^+$ 或 $B_c^+\pi^-\pi^-$ 组合重建得到的样本, 这种样本的行为特征被认为与数据中的组合本底一致。 $B_c^*(2^3S_1)^+ \rightarrow B_c^{*+}(\rightarrow B_c^+\gamma)\pi^+\pi^-$, $B_c^*(2^3S_1)^+$ “丢失”了光子, 其重建质量为 $M(B_c^*(2S)^+)_{\text{rec}} = M(B_c^*(2S)^+) - (M(B_c^{*+}) - B_c^+) = 6841.2 \pm 0.6 \pm 0.1 \pm 0.8\text{MeV}/c^2$, 最后一项误差取自于当时 B_c^+ 质量世界平均值的误差, 这个态的全局显著度达到了 6.3σ 。由于 B_c^* 宽度太窄, 目前仍未被观测到, $B_c^*(2^3S_1)^+$ 态的真实质量也无法由此计算得到。而 $B_c(2^1S_0)^+$ 态测得质量为 $6872.1 \pm$

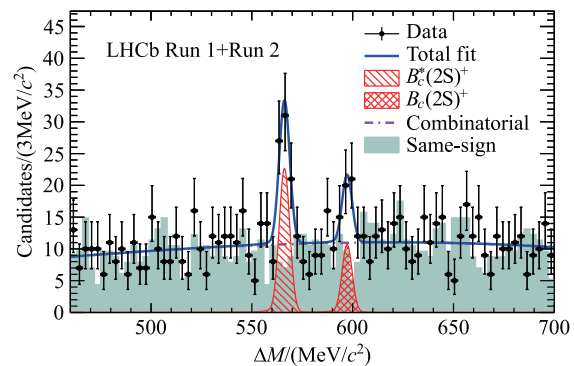


图6 $B_c^+\pi^+\pi^-$ 质量谱的质量差分布 $\Delta m \equiv m_{B_c^+\pi^+\pi^-} - m_{B_c^+}$; 斜纹阴影为 $B_c^*(2^3S_1)^+$ 态的 feed-down 峰, 格纹阴影为 $B_c(2^1S_0)^+$ 态的信号峰^[42]

$1.3 \pm 0.1 \pm 0.8 \text{ MeV}/c^2$, 不过其全局显著度仅有 2.2σ , 仅为可能观察到其实验迹象。

紧接着在 2025 年, LHCb 合作组利用质心能量为 7, 8 与 13 TeV, 总积分亮度为 9 fb^{-1} 的数据, 在 $B_c^+ \gamma$ 质量谱上观测到了 $B_c(1P)^+$ 态的两个窄峰^[43], 见图 7, 测得质量值分别为 $6704.8 \pm 5.5 \pm 2.8 \pm 0.3 \text{ MeV}/c^2$ 和 $6752.4 \pm 9.5 \pm 3.1 \pm 0.3 \text{ MeV}/c^2$, 其中最后一项误差取自于 B_c^+ 质量世界平均值的误差^[12], 这两个态的统计显著度均超过了 7 倍标准差。这是首次观测到 $B_c(1P)^+$ 激发态。

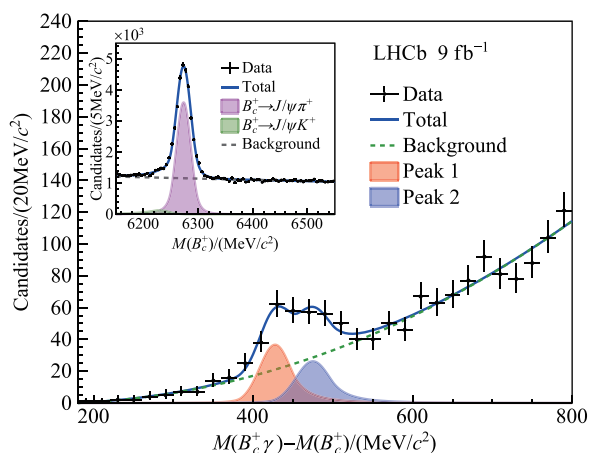


图 7 $B_c^+ \gamma$ 质量谱的质量差分布 $m_{B_c^+ \gamma} - m_{B_c^+}$: 浅(红)色阴影和深(蓝)色阴影分别为 $B_c(1P)^+$ 态的两个窄峰^[43]

基于当前的实验分辨率, 双峰假设是能够有效描述数据的最简模型, 仅从数据中提取更多信息存在较大难度。因此, 该研究提出一种包含六个峰的理论约束模型, 以进一步探索未分辨的 $B_c(1P)^+$ 态的特性。他们利用质心能量为 13 TeV, 总积分亮度为 6 fb^{-1} 的数据在相同的谱的相同位置上做了多个 $B_c(1P)^+$ 态的拟合分析^[44], 这些态的质量中心值取值由不同的理论文献^[35, 45-55] 给出获得多个拟合结果, 根据 Kolmogorov-Smirnov 检验准则^[56], 测试了这些理论和模型与前述的由数据决定的双峰假设的符合程度, 这些理论模型估算得到 p 值范围为 $15\% \sim 90\%$ 。其中由 Davies 等人根据格点 QCD 做出的预测^[45] 得到的拟合结果如图 8, 这是由第一性原理得出的计算结果, 这个结果具有最优 p 值, 被选作产额测量的基准方案。 $B_c(1P)^+$ 信号产额经测定为 153 ± 22 , 此结果仅包含统计误差, 已修正来自误鉴别的

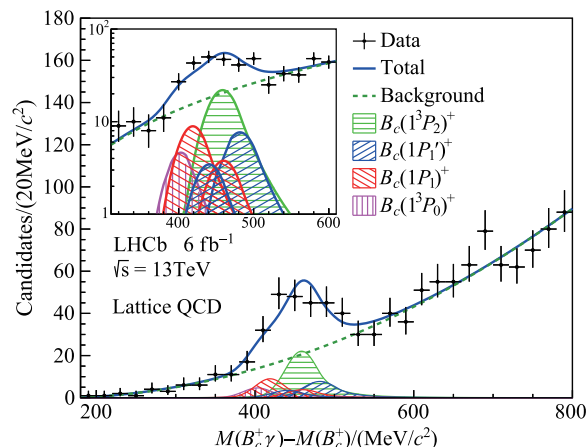


图 8 根据 Davies 等人的格点 QCD 计算结果^[45], $B_c^+ \gamma$ 质量谱的质量差分布 $m_{B_c^+ \gamma} - m_{B_c^+}$: 横线(绿色), 斜杠(蓝色), 反斜杠(红色)和竖线(紫色)阴影分别为 $B_c(1^3P_2)^+$, $B_c(1P_1')^+$, $B_c(1P_1)^+$ 和 $B_c(1^3P_0)^+$ ^[44]

$B_c^+ \rightarrow J/\psi K^+$ 候选事例的微小贡献。基于质心能量 13 TeV 的数据, 在 B_c^+ 介子的特定运动学区间 $p_T < 20 \text{ GeV}/c$, $2.0 < y < 4.5$ 内, $B_c(1P)^+$ 产生截面与衰变到基态的分支比, 与基态的产生截面的比值测得为 $R = 0.20 \pm 0.03 \pm 0.02 \pm 0.03$, 其中最后一项误差为理论误差。

2 LHCb 上底介子实验的展望

曾经的“粒子动物园”最终引出了夸克模型, 而从夸克模型出发我们又看到了今天的“强子动物园”。表 1 列出了目前已经观测到的底介子基态和激发态的量子数与质量, 以及第一次观测到它们的衰变道和实验室, 显然可见其中大部分激发态的量子数仍未确定(标为?), 理论预言的 B 介子基态及激发态质量如图 3 所示, 结合表 1 的实验结果来看: 一方面, 很多理论预言的共振态仍未被实验观测到, 特别是 D 波激发态; 另一方面, 很多已观测到的共振态的量子数也尚未得到确定。从实验的角度来说, 前者对应于新激发态的观测研究, 而后者则对应于对已有激发态的性质进行精确测量, 其中包括质量、自然宽度(寿命)和直接测量角量子数, 也包括同一激发态与不同衰变末态的耦合强度测量, 即衰变分支比的测量。

如引言中所述, 基于已经结束的 2025 年数据采集, LHCb 预期运行至 2026 年, 即运行三期采

表 1 已观测到的底介子的质量以及它们被首次报道发现的实验室

态	J^P	质量(MeV/c^2)	衰变道	实验室
$B^\pm$	0^-	5279.31 ± 0.15	$D\pi \& D^* \pi \pi$	CLEO
B_s^0	0^-	5366.82 ± 0.22		CUSB- II
B^0	0^-	$5279.58 \pm 0.15 \pm 0.28$	$D\pi \pi \& D^* \pi$	CLEO
B_c^+	0^-	6274.47 ± 0.32	$J/\psi \pi^+ \&$ $J/\psi^+ \nu$	OPAL
$B_c(6872)^+$	0^-	6871.2 ± 1.0	$B_c^+ \pi^+ \pi^-$	ATLAS
B^*	1^-	5324.65 ± 0.25	$B\gamma$	CUSB
B_s^*	1^-	$5415.4^{+1.8}_{-1.5}$	$B_s \gamma$	CUSB- II
$B_1(5721)^{*+}$	1^+	$5725^{+2.5}_{-2.7}$	$B^{*0} \pi^+$	LHCb
$B_1(5721)^0$	1^+	5726 ± 1.3	$B^{*+} \pi^-$	CDF
$B_{s1}(5830)$	1^+	$5828.40 \pm 0.04 \pm 0.04 \pm 0.41$	$B^* K$	LHCb
$B_{s2}^*(5840)^0$	1^+	$5839.99 \pm 0.05 \pm 0.11 \pm 0.17$	$B^* K$	LHCb
$B_c(6705)^+$	$?^?$	$6704.8 \pm 5.5 \pm 2.8 \pm 0.3$	$B_c^+ \gamma$	LHCb
$B_c(6752)^+$	$?^?$	$6752.4 \pm 9.5 \pm 3.1 \pm 0.3$	$B_c^+ \gamma$	LHCb
$B_J(5732)$	$?^?$	5695^{+17}_{-19}	$B^* \pi$	ALEPH
$B_2^*(5747)^+$	2^+	$5737.20 \pm 0.72 \pm 0.40 \pm 0.17$	$B^{*0} \pi^+$	LHCb
$B_{sj}^*(5850)$	$?^?$	5853 ± 15		OPAL
$B_2^*(5747)^0$	2^+	$5739.44 \pm 0.37 \pm 0.33 \pm 0.17$	$B^{*+} \pi^-$	LHCb
$B_J(5840)^+$	$?^?$	$5850.3 \pm 12.7 \pm 13.7 \pm 0.2$	$B\pi$	LHCb
$B_J(5840)^0$	$?^?$	$5862.9 \pm 5.0 \pm 6.7 \pm 0.2$	$B\pi$	LHCb
$B_J(5970)^+$	$?^?$	$5961 \pm 5 \pm 12$	$B^0 \pi^+$	CDF
$B_J(5970)^0$	$?^?$	$5978 \pm 5 \pm 12$	$B^+ \pi^-$	CDF
$B_{sj}(6064)^0$	$?^?$	$6063.5 \pm 1.2 \pm 0.8$	$B^+ K^-$	LHCb
或 $B_{sj}(6109)^0$	$?^?$	$6108.8 \pm 1.1 \pm 0.7$	$B^{*+} K^-$	LHCb
$B_{sj}(6114)^0$	$?^?$	$6114 \pm 3 \pm 5$	$B^+ K^-$	LHCb
或 $B_{sj}(6158)^0$	$?^?$	$6158.5 \pm 4 \pm 5$	$B^{*+} K^-$	LHCb

集约 27fb^{-1} 的数据,谱学研究,特别是受限于当下统计量的谱学研究,将随之进入一个新的阶段。根据泊松误差可以推算出,随着积分亮度增加,测量结果的统计误差会以平方根的形式减少,精度也随之提升。例如,对于同一个激发态的参数,若用运行一期和二期累计 9fb^{-1} 的测量结果对比运行一期时的测量结果,考虑到质心能量的提高带来的产生截面的提高之后,则前者的统计误差应大致为后者的 $1/\sqrt{5}$,若假设运行一期,二期及三期总共收集了 36fb^{-1} 亮度的数据,则统计误差应大致减少至一期结果的约 $1/\sqrt{23}$,即精度提升了近五倍。LHCb 实验在运行四期(2030—2033)预期采集约 30fb^{-1} 的质子-质子对撞数据。然后于

2034 年进行第二次升级,瞬时亮度进一步提高约一个数量级,目标是到 2041 年共采集约 300fb^{-1} 的质子-质子对撞数据。这会为底介子谱学研究带来新的机遇。按此计划,LHCb 至少能在未来 20 年内保持味物理实验研究的领先地位。

2.1 B^+ 和 B^0 介子激发态的展望

图 3 中,明确标出已有实验观测的 B 介子只有基态 B ,第一激发态 B^* ,以及对应于 $L=1$, $j_q=3/2$ 的 $B^{**}(1P)$ 双重态,其中 3P_1 和 1P_1 会混合形成 P_1 态和 P_1' 作为实际观测到的态

$$P_1 = {}^1P_1 \cos\theta_{nP} + {}^3P_1 \sin\theta_{nP}$$

$$P_1' = -{}^1P_1 \cos\theta_{nP} + {}^3P_1 \sin\theta_{nP}$$

LHCb 合作组已于 2015 年运用 3fb^{-1} 的运行一期

数据进行对于 $L=1, j_q=3/2$ 的 $B^{**}(1P)$ 双重态精确的质量和宽度测量,但需要注意的是 $B_2^*(5747) \rightarrow B^* \pi$ 的 feed-down 以及 $B_J(5840)^+$ 和 $B_J(5960)^+$ 仅为实验迹象,需要加入 LHCb 运行二期的数据确定它们的存在证据,并提高 $B_2^*(5747)$ 分支比的实验测量精度。 $B_1(5721)$ 和 $B_2^*(5747)$ 的量子数缺乏直接实验证据,需要利用 LHCb 运行一期和二期甚至三期数据直接产生 (prompt production) $B\pi^+\pi^-$ 末态的角分布,以确定它们的自旋量子数,以及对 $B_c^+ \rightarrow B^+\pi^+\pi^-$ 衰变过程进行达利兹图分析 (Dalitz plot analysis),以判断它们的宇称。部分理论模型还对 $B_1(5721)$ 的量子数归属存在争议,如陈兵等人^[32]指出它可能是 1^3P_1 态与 1^1P_1 态的混合态 (即 $1P_1$ 和 $1P_1'$ 态),而 Godfrey 与 Moats^[26]则指出它是 $1P_1$ 态。

对应于 $L=1, j_q=1/2$ 的 $B^{**}(1P)$ 双重态仍未被观测到,这两个态和 $B_1(5721), B_2^*(5747)$ 两个态质量比较接近,且衰变到 $B\pi$ 宽度很宽,大致在 200 MeV 上下^[13,20],不易分辨,加入运行三期数据有望观测到。而对应于 $L=0, j_q=1/2$ 的 $2S$ 态,还有 $1D$ 态,我们仍不可确定是否已观测到。对于已观测到的 $B_J(5840)$ 和 $B_J(5970)$ 的量子数归属问题,目前理论界存在不同观点,核心争议在于这两个态是否衰变到 $B\pi$ 末态,以及它们属于 $2S$ 态还是 $1D$ 态。由宇称守恒可知, 2^1S_0 态为非自然自旋-宇称态,不可衰变到 $B\pi$ 。由此可知,若能以较高置信度排除 $B_J(5840)$ 衰变到 $B\pi$ 的可能性,则 $B_J(5840)$ 和 $B_J(5970)$ 可分别认定为 2^1S_0 和 2^3S_1 态;若证实 $B_J(5840)$ 可衰变到 $B\pi$,则 $B_J(5840)$ 应被认定为 2^3S_1 态, $B_J(5970)$ 可能属于 $1D$ 态 (若证实 $B_J(5970)$ 可衰变到 $B\pi$ 则为 1^3D_1 态,反之则为 $1D_2'$ 态)^[26]。而于国梁和王志刚^[25]列举了他们计算的 $B_J(5840)$ 和 $B_J(5970)$ 不同量子数下的宽度,提出更倾向于它们分别属于 2^3S_1 态和 1^3D_3 态的观点。未来需要加入 LHCb 运行二期及三期的数据去进一步确定 $B_J(5840)$ 和 $B_J(5970)$ 衰变到 $B\pi$ 的存在证据 (即确认它们是否存在质量差为 45 MeV/c² 的双峰结构)。另外,对于 $B_J^*(5732)$ 这一激发态在 2000 年前后的观测,PDG 解读其可能为多个窄峰或宽峰的叠加,因此他们在总结表中忽略了这个态^[12],便不再多做评述。

2.2 B_s^0 介子激发态的展望

类似于 B 介子的 $B^{(*)}\pi$ 阈值, B_s^0 介子也有 $B^{(*)}K$ 阈值。低于 $B^{(*)}K$ 阈值的有 $L=1, j_q=1/2$ 的 $B_s^{**}(1P)$ 双重态 B_{s0}^* 和 B_{s1}' 这两个态还未被观测到,主要衰变道是 $B_s^0\pi^0$ 和 $B_s^*\pi^0$ ^[20], UKQCD 组的格点 QCD 理论给出的质量预测值分别为 $5752 \pm 31 \text{ MeV}/c^2$ 和 $5803 \pm 31 \text{ MeV}/c^2$ ^[57], Godfrey 的相对论性夸克模型预测质量值分别为 $5794.84 \text{ MeV}/c^2$ 和 $5824.84 \text{ MeV}/c^2$, 宽度预测分别为 128 MeV 和 77.3 MeV^[26], 这两个态有望利用 LHCb 运行数据在 $B_s\pi$ 谱上观测到。

高于 $B^{(*)}K$ 阈值已有 $L=1, j_q=3/2$ 的 $1P$ 双重态 $B_{s1}(5830)^0$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0$, 以及 $B_{sJ}(6064)$ 和 $B_{sJ}(6114)$ 在 BK 谱上被观测到。LHCb 合作组使用积分亮度为 1 fb^{-1} 的数据,在 B^+K^- 的质量谱研究了 $B_{s1}(5830)^0$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0$ ^[29]。 $B_{s2}^*(5840)^0$ 的宽度以及质量进行精确测量结果中,系统误差超过了中心值的 30%,意味着继续增加统计量的收益有限。但仍可以从其他的衰变道,例如 $B_s^{(*)}\bar{K}^0$, 对相应激发态进行观测,由此带来的相对分支比信息也能加深我们对其内部结构的理解。另有 2021 年 LHCb 合作组利用总积分亮度为 9 fb^{-1} 的数据,在 $B^\pm K^\mp$ 质量谱上观测到新的 B_s^0 介子激发态 $B_{sJ}(6064)$ 和 $B_{sJ}(6114)$ ^[30]。这两个态的宽度测量不够精确,未进行量子数的实验测量,后续实验需要加入运行三期数据进行角分布和达利兹图分析,还需要更多的理论模型对这些态的量子数进行计算。且尚不明确它们是否衰变至 B^*K 而非 BK 末态,需要增加运行三期数据确定其是否可衰变至 B^*K 和 BK 末态 (自然自旋-宇称态),拥有双峰结构,还是仅可衰变至 B^*K 末态 (非自然自旋-宇称态),即单峰结构。另外,PDG 还记载了 1995 年 OPAL 合作组观测到的 $B_{sJ}^*(5850)$ ^[58], 局限于有限的数量量和分辨率,这个态很可能只是 $B_{s1}(5830)^0$ 和 $B_{s2}^*(5840)^0$ 的叠加,因此不多作赘述。

增加更高积分亮度数据 (运行三期,甚至四期、五期) 在 BK 谱上会有更多激发态能观测到,譬如 $2S$ 双重态质量预测范围 $[5976, 6013] \text{ MeV}/c^2$; $L=2, j_q=5/2$ 的 $1D$ 双重态 $B_{s2}'^*$ 和 B_{s3} 质量预测范围分别为 $[6113, 6196] \text{ MeV}/c^2$ 和 $[6067, 6191] \text{ MeV}/c^2$ ^[14,20,59-62]。

2.3 B_c^+ 介子激发态的展望

截止 2026 年初,在 LHCb 探测器上, B_c^+ 介子激发态已有 2S 态和部分 1P 态被观测到。

2019 年, LHCb 合作组运用积分亮度为 8.5fb^{-1} 数据,在 $B_c^+\pi^+\pi^-$ 质量谱上观测到了 $B_c(2^1S_0)^+$ 态和 $B_c^*(2^3S_1)^+$ 态^[42],产额分别为 24 ± 9 和 51 ± 10 ,产额较低,其中 $B_c(2^1S_0)^+$ 的显著度尚不足 3σ 。然而 CMS 合作组同年早些时候已运用了质心能量为 13TeV,积分亮度为 143fb^{-1} 的数据在相同的道上观测到这两个态^[63],并且这两个态的显著度均超过了 5σ 。因此 LHCb 合作组的结果中 $B_c(2^1S_0)^+$ 的显著度不足只是有限的的数据量所致,随着运行三期的加入,保守估计积分亮度总计约 36fb^{-1} ,有望大幅度提高这两个态性质的测量精度。

2025 年, LHCb 合作组运用积分亮度为 9fb^{-1} 数据对 $B_c^+\gamma$ 谱观测 $B_c(1P)^+$ 态^[43]。他们运用了量能器光子(calorimeter photon),而不是转换光子(converted photon)来重建光子,牺牲能量分辨率以换取统计量。有望在加入 LHCb 的运行三期和四期数据后运用转换光子(在偶极磁铁之前就发生了电子对产生 $\gamma\rightarrow e^+e^-$ 的光子)来重建光子^[64,65],虽牺牲统计量,但提升能量分辨率以分辨重叠在一起的四个 $B_c(1P)^+$ 态。

一直未被观测到的 1^3S_1 态 B_c^* 由于其与基态的质量差仅有约 67MeV ^[35],其衰变中的光子能量较小,比较“软”,对于目前的 LHCb 探测器来说难以探测,需要在增加运行三期和四期的数据后运用转换光子,才可能观测到。 B_c^* 质量的测量影响了 B_c^+ 系统中仅能衰变到 B_c^* 的激发态的质量测量,如目前已观测到的 2^3S_1 态。此外,质量区间在 $[7020,7050]\text{MeV}/c^2$ 的四个 1D 态也可能在 $B_c^+\gamma$ 谱上观测到,衰变总宽度约为 $80\sim 100\text{keV}$ ^[35,46-49,66],考虑到 1D 态比 1P 态小得多的产生截面,也许需要加入运行三期、四期甚至五期才有望观测到。

3 结语

本文结合理论,从实验的视角总结了底介子谱学这一领域的现状。由于 LHCb 探测器对重味强子探测的特殊优化,其在底介子的谱学研究中

具有特殊的地位。LHCb 实验精确测量的结果能作为理论的输入和约束,从而帮助我们更好地理解微观世界。本文对于 LHCb 探测器上底介子实验进行评述,并展望了 LHCb 探测器的升级给未来底介子实验带来的变化与机遇,譬如大幅增长的数据量带来更精确的物理性质测量结果,以及更多新的激发态:

(1) 对于 $B(1P)$ 双重态 B_0^* 和 B_1' ,建议在 $B\pi$ 道的 $5710\sim 5760\text{MeV}/c^2$ 区间进行搜寻,宽度都较宽,约在 200MeV 上下。

(2) 对于 $B_s(1P)$ 双重态 B_{s0}^* 和 B_{s1}' ,建议在 $B_s^0\pi^0$ 道的 $5740\sim 5830\text{MeV}/c^2$ 区间进行搜寻,宽度较宽,约在 100MeV 上下。

(3) 对于 $B_s(2S)$ 双重态,建议在 BK 道的 $5970\sim 6020\text{MeV}/c^2$ 区间进行搜寻。

(4) 对于 $B_s(1D)$ 双重态 B_{s2}' 和 B_{s3} ,建议在 BK 道的 $6060\sim 6200\text{MeV}/c^2$ 区间进行搜寻。

(5) 对于 $B_c(1D)$ 四个态,建议在 $B_c\gamma$ 道的 $7020\sim 7050\text{MeV}/c^2$ 区间进行搜寻,衰变宽度约为 $80\sim 100\text{keV}$ 。

而在今天的强子谱学这一领域,理论研究是超前于实验研究的。在这种背景下,实验的结果显得尤为重要,不论是作为约束条件还是作为唯象模型的输入参数,都将使得我们对于微观世界的理解更加系统和深入。

参 考 文 献

- [1] CABIBBO N. Unitary symmetry and leptonic decays[J]. Physical Review Letters, 1963, 10(12): 531-533.
- [2] MAKOTO K, TOSHIHIDE M. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction[J]. Progress of Theoretical Physics, 1973, 49(2): 652-657.
- [3] GELL-MANN M. A schematic model of baryons and mesons[J]. Physics Letters, 1964, 8(3): 214-215.
- [4] ZWEIG G. An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking: Version 2[R]. 1964; 22-101.
- [5] HERB S W. Observation of a dimuon resonance at 9.5GeV in 400GeV proton-nucleus collisions[J]. Physical Review Letters, 1977, 39(5): 252-255.
- [6] ROBINSON A L. Particle physics: New evidence from Germany for fifth quark[J]. Science, 1978, 200(4345): 1033-1034.
- [7] AUBERT B, et al. The BaBar detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2002, 479(1): 1-116.

- [8] ABASHIAN A, et al. The Belle Detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2002, 479(1): 117-232.
- [9] BELYAEV I, CARBONI G, HARNEW N, et al. The history of LHCb[J]. The European Physical Journal H, 2021, 46(1): 6.
- [10] ALVES A A, et al (LHCb Collaboration). The LHCb Detector at the LHC[J]. Journal of Instrumentation, 2008, 3(8): S08005.
- [11] FEDERICO A, RICHARD J, RENAUD L G, et al. LHCb Operations Plots[EB/OL]. 2026. <https://lbggroups.cern.ch/online/OperationsPlots/index.htm>.
- [12] NAVAS S, et al. (Particle Data Group). Review of particle physics [J]. Physical Review D, 2024, 110 (3): 030001.
- [13] PIERRO M D, EICHTEN E. Excited Heavy-Light Systems and Hadronic Transitions[J]. Physical Review D, 2001, 64(11): 114004.
- [14] EBERT D, FAUSTOV R N, GALKIN V O. Heavy-light meson spectroscopy and Regge trajectories in the relativistic quark model[J]. The European Physical Journal C, 2010, 66(1-2): 197-206.
- [15] ZENG J, ORDEN J W V, ROBERTS W. Heavy mesons in a relativistic model[J]. Physical Review D, 1995, 52(9): 5229-5240.
- [16] GUPTA S N, JOHNSON J M. Quantum chromodynamic potential model for light heavy quarkonia and the heavy quark effective theory [J]. Physical Review D, 1995, 51(1): 168-182.
- [17] LAHDE T A, NYFALT C J, RISK A D O. Spectra and M1 decay widths of heavy light mesons[J]. Nuclear Physics A, 2000, 674(1-2): 141-166.
- [18] DAI Y B, HUANG C S, JIN H Y. Heavy mesons spectra from relativistic B-S equations to the order $1/M$ [J]. Physics Letters B, 1994, 331(1-2): 174-180.
- [19] DEVLANI N, RAI A K. Spectroscopy and decay properties of B and B_s mesons[J]. The European Physical Journal A, 2012, 48(7): 104.
- [20] COLANGELO P, FAZIO F DE, GIANNUZZI F, et al. New meson spectroscopy with open charm and beauty[J]. Physical Review D, 2012, 86(5): 054024.
- [21] AALTONEN T, et al. (CDF Collaboration). Measurement of resonance parameters of orbitally excited narrow B^0 mesons[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(10): 102003.
- [22] ABAZOV V M, et al. (D0 Collaboration). Properties of $l=1$ B_1 and B_2^* mesons[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(17): 172001.
- [23] AALTONEN T, et al. (CDF Collaboration). Study of orbitally excited b mesons and evidence for a new $b\pi$ resonance[J]. Physical Review D, 2014, 90(1): 012013.
- [24] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Precise measurements of the properties of the $B_1(5721)^{0,+}$ and $B_2^*(5747)^{0,+}$ states and observation of $B^{+,0}\pi^{-,+}$ mass structures[J]. Journal of High Energy Physics, 2015, 2015(5): 24.
- [25] YU G, WANG Z. Analysis of the excited bottom and bottom-strange states $B_1(5721)$, $B_2^*(5747)$, $B_{s1}(5830)$, $B_{s2}^*(5840)$, $B_J(5840)$ and $B_J(5970)$ in B meson family[J]. Chinese Physics C, 2020, 44(3): 033103.
- [26] GODFREY S, MOATS K. Spectroscopic Assignments of the Excited B Mesons[J]. The European Physical Journal A, 2019, 55(5): 84.
- [27] AALTONEN T, et al. (CDF Collaboration). Observation of orbitally excited B_s mesons[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(8): 082001.
- [28] ABAZOV V M, et al. (D0 Collaboration). Observation and properties of the orbitally excited B_2^* meson [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(8): 082002.
- [29] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). First observation of the decay $B_{s2}^*(5840)^0 \rightarrow B^{*+} K^-$ and studies of excited B^0 mesons[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(15): 151803.
- [30] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Observation of new excited B^0 states[J]. The European Physical Journal C, 2021, 81(7): 601.
- [31] GARG R, GUPTA P, UPADHYAY A. Placing of the recently observed bottom strange states $B_{sJ}(6063)$ and $B_{sJ}(6114)$ in bottom spectra[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2023, 2023(7): 073B03.
- [32] CHEN B, LUO S, WEI K, et al. b-hadron spectroscopy study based on the similarity of double bottom baryon and bottom meson [J]. Physical Review D, 2022, 105 (7): 074014.
- [33] CHEN H X, CHEN W, LIU X, et al. An updated review of the new hadron states[J]. Reports on Progress in Physics, 2023, 86(2): 026201.
- [34] MARTÍN-GONZÁLEZ B, ORTEGA P G, ENTE M D R, et al. Toward the discovery of novel B_c states: Radiative and hadronic transitions[J]. Physical Review D, 2022, 106(5): 054009.
- [35] GODFREY S. Spectroscopy of B_c mesons in the relativized quark model[J]. Physical Review D, 2004, 70(5): 054017.
- [36] OKUBO S. φ -meson and unitary symmetry model [J]. Physics Letters, 1963, 5(2): 165-168.
- [37] IIZUKA J. A systematics and phenomenology of meson family[J]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 1966, 37-38: 21-34.
- [38] BRAMBILLA N, et al. (Quarkonium Working Group). Heavy Quarkonium Physics[R]. 2004.
- [39] CHANG C H, WU X G. Uncertainties in estimating hadronic production of the meson B_c and comparisons between

- TEVATRON and LHC[J]. The European Physical Journal C, 2004, 38(3): 267-276.
- [40] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Search for excited B_c^+ states[J]. Journal of High Energy Physics, 2018, 2018(1): 138.
- [41] GAO Y, HE J, ROBBE P, et al. Experimental prospects of the B_c studies of the LHCb experiment[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(6): 061302.
- [42] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Observation of an excited B_c^+ state[J]. Physical Review Letters, 2019, 122(23): 232001.
- [43] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Observation of Orbitally Excited B_c^+ States[J]. Physical Review Letters, 2025, 135(23): 231902.
- [44] AAIJ R, et al. (LHCb Collaboration). Study of $B_c(1P)^+$ states in the $B_c^+\gamma$ mass spectrum[J]. Physical Review D, 2025, 112(11): 112003.
- [45] DAVIES C T H, HORNBOSTEL K, LEPAGE G P, et al. B_c spectroscopy from lattice QCD[J]. Physics Letters B, 1996, 382(1-2): 131-138.
- [46] GERSHTEIN S S, KISELEV V V, LIKHODED A K, et al. B_c spectroscopy[J]. Physical Review D, 1995, 51(7): 3613-3627.
- [47] GUPTA S N, JOHNSON J M. B_c spectroscopy in a quantum-chromodynamic potential model[J]. Physical Review D, 1996, 53(1): 312-314.
- [48] FULCHER L P. Phenomenological predictions of the properties of the B_c system[J]. Physical Review D, 1999, 60(7): 074006.
- [49] EBERT D, FAUSTOV R N, GALKIN V O. Properties of heavy quarkonia and B_c mesons in the relativistic quark model[J]. Physical Review D, 2003, 67(1): 014027.
- [50] EICHTEN E J, QUIGG C. Mesons with beauty and charm: New horizons in spectroscopy[J]. Physical Review D, 2019, 99(5): 054025.
- [51] LI Q, LIU M S, LU L S, et al. Excited bottom-charmed mesons in a nonrelativistic quark model[J]. Physical Review D, 2019, 99(9): 096020.
- [52] WANG G L, WANG T, LI Q, et al. The mass spectrum and wave functions of the B_c system[J]. Journal of High Energy Physics, 2022, 2022(5): 6.
- [53] LI T Y, TANG L, FANG Z Y, et al. Higher states of the B_c meson family[J]. Physical Review D, 2023, 108(3): 034019.
- [54] LI X J, LI Y S, WANG F L, et al. Spectroscopic survey of higher-lying states of B_c meson family[J]. The European Physical Journal C, 2023, 83(11): 1080.
- [55] HAO W, ZHU R. Beauty-charm meson family with coupled channel effects and their strong decays[J]. Chinese Physics C, 2024, 48(12): 123101.
- [56] SMIRNOV N V. On the estimation of the discrepancy between empirical curves of distribution for two independent samples[J]. Bulletin of Mathematics University of Moscow, 1939, 2(2): 3-14.
- [57] GREEN A M, KOPONEN J, MICHAEL C, et al. Excited b mesons from the lattice[J]. Physical Review D, 2004, 69(9): 094505.
- [58] AKERS R, et al. (OPAL Collaboration). Observations of π -B charge-flavor correlations and resonant $B\pi$ and BK production[J]. Zeitschrift für Physik C, 1995, 66(1): 19-30.
- [59] JAKHAD P, RAI A K. Unified spectroscopic study of bottom mesons and doubly bottom baryons using a relativistic flux-tube model [J]. Physical Review D, 2025, 112(7): 074011.
- [60] GODFREY S, MOATS K, SWANSON E S. B and B_s Meson Spectroscopy[J]. Physical Review D, 2016, 94(5): 054025.
- [61] SUN Y, SONG Q T, CHEN D Y, et al. Higher bottom and bottom-strange mesons[J]. Physical Review D, 2014, 89(5): 054026.
- [62] LI Q, NI R H, ZHONG X H. Towards establishing an abundant B and B_s spectrum up to the second orbital excitations[J]. Physical Review D, 2021, 103(11): 116010.
- [63] SIRUNYAN A M, et al. Observation of Two Excited B_c^+ States and Measurement of the $B_c^+(2S)$ Mass in pp Collisions at $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ [J]. Physical Review Letters, 2019, 122(13): 132001.
- [64] CHATRCHYAN S, et al. (CMS Collaboration). Measurement of the Relative Prompt Production Rate of χ_{c2} and χ_{c1} in pp Collisions at $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ [J]. The European Physical Journal C, 2012, 72(8): 2251.
- [65] HAYRAPETYAN A, et al. (CMS Collaboration). First Exclusive Reconstruction of the B^{*+} , B^{*0} , and B_s^{*0} Mesons and Precise Measurement of Their Masses[J]. Physical Review Letters, 2026, 136(3): 031902.
- [66] EICHTEN E J, QUIGG C. Mesons with beauty and charm: Spectroscopy [J]. Physical Review D, 1994, 49(11): 5845-5856.