

· 研究进展 ·

双粲重子实验研究进展

高原宁^{1*} 何吉波^{2*} 谢跃红³ 孙亮⁴

(1. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;
3. 华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079; 4. 武汉大学物理科学与技术学院, 武汉 430072)

[摘要] 双粲重子是夸克模型预言的由两个粲夸克和一个轻夸克组成的重子,其内部结构预期迥异于诸如质子和中子等普通重子,具有独特的性质,研究和寻找双粲重子是粒子物理理论和实验共同关注的重大课题。我们经过多年的努力,利用位于欧洲核子研究中心大型强子对撞机上的 LHCb 实验于 2016 年采集的质心能量为 13 万亿电子伏特的质子-质子对撞数据,在实验上首次观测到由两个粲夸克和一个上夸克组成的双粲重子,并测量了其质量和寿命。我们也通过该双粲重子的另一个衰变道证实了该发现。这些研究成果开创了一个新的粒子物理实验研究领域,将加深我们对于强相互作用和夸克模型的理解。

[关键词] 双粲重子;大型强子对撞机;LHCb 实验

粒子物理是研究宇宙万物的基本组成及其相互作用的学科。目前人们认识到自然界有四种基本相互作用力:重力、电磁、弱和强相互作用。粒子物理标准模型统一描述了除重力外的其他三种相互作用力。粒子物理标准模型包含夸克、轻子以及相应的相互作用力传播子。夸克之间的强相互作用力由胶子来传递,在标准模型中由量子色动力学(QCD)来描述。夸克与轻子之间的弱相互作用,以及带电粒子之间的电磁相互作用分别由 W/Z 玻色子和光子来传递,由电弱统一理论来描述。随着 2012 年位于欧洲核子研究中心(CERN)大型强子对撞机(LHC)上的 ATLAS 和 CMS 实验共同发现希格斯粒子(又被称为“上帝”粒子),粒子物理标准模型变得完整,成为粒子物理标准理论。

1 研究背景

粒子物理中的夸克模型由 Gell-Mann^[1] 和 Zweig^[2] 于 1964 年提出。根据夸克模型,物质由六种夸克组成,包括上夸克(up, u)、下夸克(down, d)、粲夸克(charm, c)、奇异夸克(strange, s)、顶夸克(top, t)和底夸克(bottom, b)。由两个正反夸克

组成的粒子被称为介子,三个夸克组成的粒子被称为重子。例如大家熟知的质子便是一种普通重子,由两个上夸克和一个下夸克组成;丁肇中先生于 1974 年发现的 J/ψ 介子由一对正反粲夸克组成。上夸克、下夸克和奇异夸克质量较轻,它们组成 SU(3)味多重态。当我们也考虑另一种重味夸克—粲夸克时,则可将味对称性扩展到 SU(4)群,如图 1 所示。由于粲夸克质量较大,该对称性相比于三种轻夸克对应的 SU(3)对称性破缺更大。本研究关注的双粲重子为图中所示,包括 Ξ_{cc}^{++} 重子(夸克组分: ccu)、 Ξ_{cc}^+ 重子(夸克组分: ccd)和 Ω_{cc}^+ 重子(夸克组分: ccs)及其电荷共轭态。与由三个轻夸克组成的质子(夸克组分: uud)和中子(夸克组分: udd)、一个重夸克(粲夸克或底夸克)和两个轻夸克组成的 Λ_c^+ 重子(夸克组分: udc)和 Λ_b^0 重子(夸克组分: udb)等不同,双粲重子由两个重夸克(粲夸克)和一个轻夸克组成,其内部结构预期迥异于普通重子,因而具有独特的性质,在研究夸克的三体束缚系统、理解强相互作用和夸克模型等占有特殊重要的地位,研究和寻找双粲重子是粒子物理理论和实验共同关注的重大课题。

收稿日期:2018-08-24;修回日期:2018-09-07

* 通信作者,Email: gaoyan@tsinghua.edu.cn; jibo.he@ucas.ac.cn

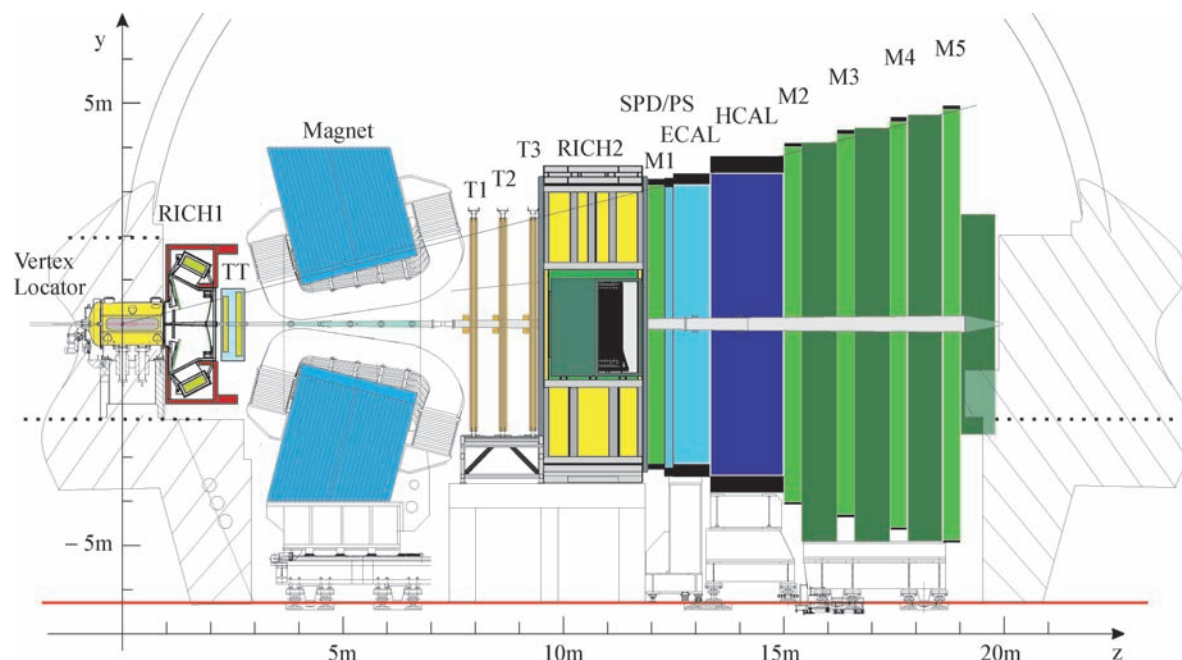


图 2 LHCb 探测器示意图^[22]

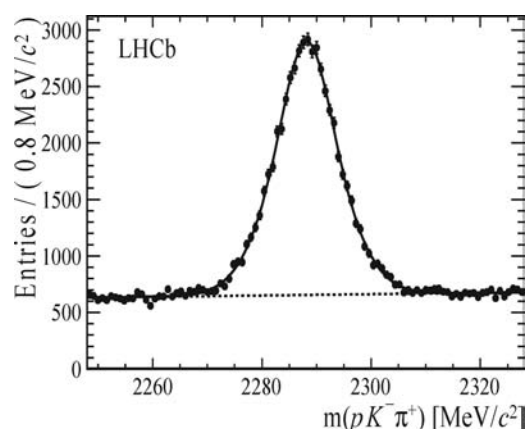


图 3 百分之五的 2011 年数据中的 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^- \pi^+$ 不变质量谱^[18]

虚线表示组合本底,实线表示 Λ_c^+ 重子信号和本底之和

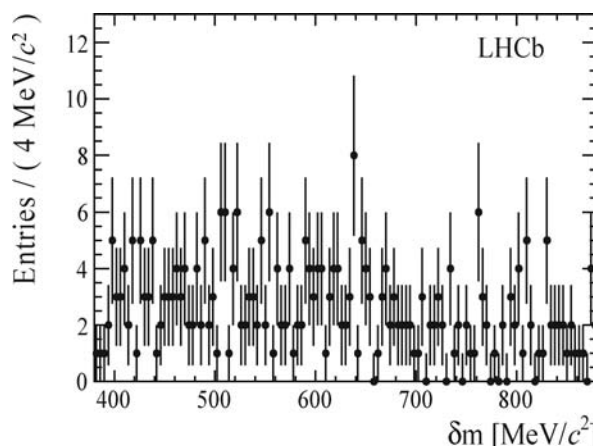


图 4 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 不变质量谱^[18]。横轴为 $m([pK^- \pi^+]_{\Lambda_c} K^- \pi^+) - m([pK^- \pi^+]_{\Lambda_c}) - m(K^-) - m(\pi^+)$ SELEX 实验组测得的质量 $3519 \text{ MeV}/c^2$ 对应于图中 $599 \text{ MeV}/c^2$

可以根据理论计算结果来产生运动学分布等性质和实际情况最为接近的蒙特卡洛模拟样本。而后利用这些蒙特卡洛样本来系统的研究国内理论家指出的双粲重子主要衰变道的信号特征,尽可能提高其在线触发效率和离线事例选择效率,从而提高寻找双粲重子的实验灵敏度。

2.2 寻找 Ξ_c^+ 重子

我们利用 LHCb 实验于 2011 年采集的积分亮度为 0.65 fb^{-1} 、质心能量为 7 万亿电子伏特 (7 TeV) 的质子-质子对撞数据,通过衰变道 $\Xi_c^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 来寻找 Ξ_c^+ 重子,这是 SELEX 实验组宣称

发现 Ξ_c^+ 重子所用的衰变道。我们在数据中重建了 $(818 \pm 7) \times 10^3$ 个 Λ_c^+ 重子信号,图 3 所示是 5% 的数据中的 Λ_c^+ 重子的不变质量分布。这是 SELEX 实验组得到的 Λ_c^+ 重子信号数 (1 630 个^[12]) 的 500 多倍。然而,如图 4 所示, $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 的不变质量谱中并没有明显的 Ξ_c^+ 重子信号。因此我们给出了 Ξ_c^+ 重子的产生截面和 Λ_c^+ 重子的产生截面的比值与 $\Xi_c^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 衰变分支比的乘积 $R \equiv \sigma(\Xi_c^+) / \sigma(\Lambda_c^+) \cdot B(\Xi_c^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+)$ 的上限。在 95% 置信度下, $R < 1.0 \times 10^{-2}$ (当 Ξ_c^+ 寿命为 100 飞秒时), $R < 2.9 \times 10^{-4}$ (当 Ξ_c^+ 寿命为 400 飞秒时)。该研究成果于

2013年12月以“Search for the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^+ ”为题发表在高能物理杂志 *JHEP* 上^[18]。

2.3 双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的发现及其性质的测量

2.3.1 双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的发现

我们通过和国内理论家讨论,基本确定 Ξ_{cc}^{++} 重子的寿命大约是 Ξ_{cc}^+ 重子寿命的3倍,这对于我们从强子对撞机上复杂的本底环境中选出信号非常有帮助。同时,他们也指出 Ξ_{cc}^{++} 重子最主要的衰变道为 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$,其衰变分支比能达到10%的量级^[9]。这使得该衰变道成为搜寻双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的黄金道,很快我们就在实验上获得突破。我们利用 LHCb 实验于2016年采集的积分亮度为 1.7 fb^{-1} 、质心能量为13万亿电子伏特(13 TeV)的质子-质子对撞数据,在 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 的不变质量谱中发现一个明显的共振峰,如图5所示。我们通过对该不变质量谱进行拟合,发现共振峰中含有 313 ± 33 个信号,显著度大于12倍标准方差。我们测得该粒子的质量为 $3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+)$ MeV/c^2 ,其中第一项误差为统计误差,第二项误差为系统误差,第三项误差为 Λ_c^+ 重子质量的测量精度^[3]有限导致的误差,这与大部分理论预言值,例如格点 QCD 给出的相对比较精确的值 $3610(23)(22) \text{ MeV}/c^2$ ^[23],在误差范围内一致。该共振峰在 LHCb 实验于2012年采集的积分亮度为 2.0 fb^{-1} 、质心能量为8万亿电子伏特(8 TeV)的质子-质子对撞数据中也非常明显,显著度达到了7倍标准方差,如图6所示。而在要求 Ξ_{cc}^{++} 候选者的不变衰变时间显著度大于5倍标准方差时,2016年数据中的信号峰仍非常明显,如图7所示。这说明该粒子是通过弱相互作用衰变,寿命相对较长,这和标准模型预言的 Ξ_{cc}^{++} 重子的性质一致。该研究成果于2017年9月以“Observation of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} ”为题,作为编辑推荐(Editor's Suggestion)发表在 *Physical Review Letters* 上^[19]。

该研究成果发表后,美国物理学会的物理杂志配发了专论报道(APS Viewpoint)。该专论写道,新粒子的发现,从希格斯(Higgs)粒子到五夸克态,都是人们通过实验上长期的努力,来寻找标准模型预言的粒子。然而,这些发现并不仅仅是验证标准模型,他们的发现也会加深我们对于将亚原子粒子结合在一起的基本相互作用力的理解。该研究成果也被 *Nature* 杂志选为“研究亮点”(Research Highlights)^[24]介绍。此外,该成果还入选了两院院士评选的“2017年度世界十大科技进展新闻”以及

科学技术部评选的“2017年度中国科学十大进展”,并被世界各国媒体广泛报道。

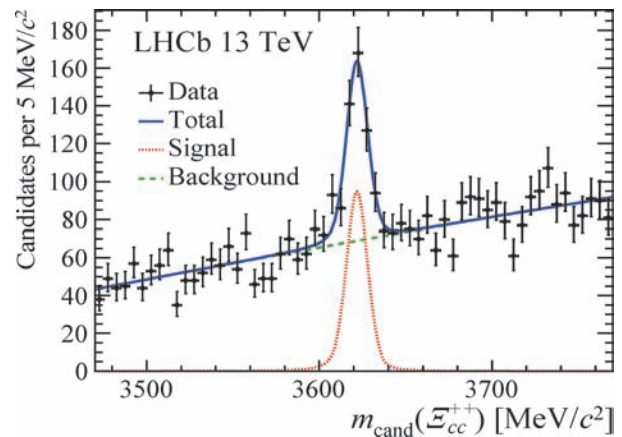


图5 2016年数据中的 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 不变质量谱分布及其拟合结果^[19]

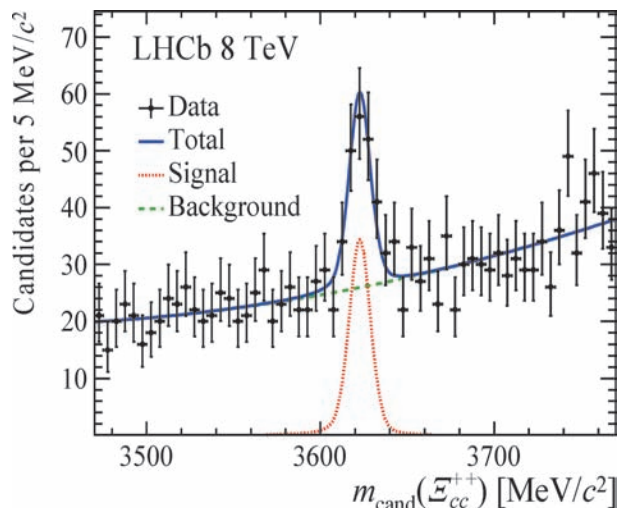


图6 2012年数据中的 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 不变质量谱分布及其拟合结果^[19]

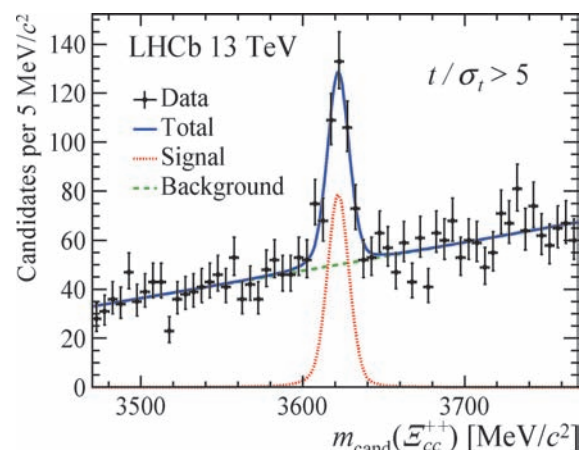


图7 在要求候选者的不变衰变时间显著度大于5倍标准方差后,2016年数据中的 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 不变质量谱分布及其拟合结果^[19]

2.3.2 双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 寿命的测量

为了确立 Ξ_{cc}^{++} 重子的弱衰变性质,精确测量 Ξ_{cc}^{++} 重子的寿命必不可少,理论上计算 Ξ_{cc}^{++} 衰变分支比等也需要其寿命作为输入参数。由于我们在事例选择中不可避免的使用了寿命相关的选择条件,导致了事例选择效率随不变衰变时间有一定的依赖关系,选择得到的 Ξ_{cc}^{++} 重子的不变衰变时间分布不再是指数分布。在利用蒙特卡洛模拟样本来得到事例选择效率随不变衰变时间的依赖关系的同时,我们也采用测量与控制道 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 不变衰变时间分布比值的方法来测量 Ξ_{cc}^{++} 重子的寿命,进一步降低测量的系统误差。图 8 显示的是经过事例选择和本底减除的 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 信号和 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 信号的不变衰变时间分布^[20],图 9 显示的是利用蒙特卡洛模拟得到的 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 事例选择效率随不变衰变时间的依赖关系^[20]。通过联合拟合效率修正后的 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 的不变衰变时间分布,以及使用 Λ_b^0 重子寿命的世界平均值^[3],我们测得 Ξ_{cc}^{++} 重子的寿命为 $0.256^{+0.024}_{-0.022}(\text{stat}) \pm 0.014(\text{syst})\text{ps}$,其中第一项误差为统计误差,第二项误差为系统误差,这在理论预言的范围 0.2 到 1.05 皮秒^[13, 25-33]的下端。该研究成果以“Measurement of the lifetime of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} ”为题,作为编辑推荐(Editor’s Suggestion)发表在 *Physical Review Letters* 上^[20]。该研究成果也被选为在欧洲核子研究中心(CERN)研究进展主页和 LHCb 实验主页上进行介绍。

2.3.3 双粲重子衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 的观测

在利用双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 来深入研究其性质的同时,利用其他衰变道来独立的证实双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的发现也很重要。国内理论家通过计算发现衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 的衰变分支比较大^[9],因此我们利用 LHCb 实验于 2016 年采集的数据进行了搜寻。 $\Xi_c^+ \pi^+$ 不变质量谱如图 10 所示,在 $3620 \text{ MeV}/c^2$ 附近有一个明显的共振峰。我们通过对该不变质量谱进行拟合,得到共振峰中共含有 (91 ± 20) 个信号,显著度为 5.9 倍标准方差。我们测得其质量为 $3620.6 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.4(\text{syst}) \pm 0.3(\Xi_c^+) \text{ MeV}/c^2$,其中第一项误差为统计误差,第二项误差为系统误差,第三项误差为 Ξ_c^+ 重子质量的测量精度^[3]有限导致的误差,这与利用衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 测得的质量 $3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+) \text{ MeV}/c^2$ 在误差范围

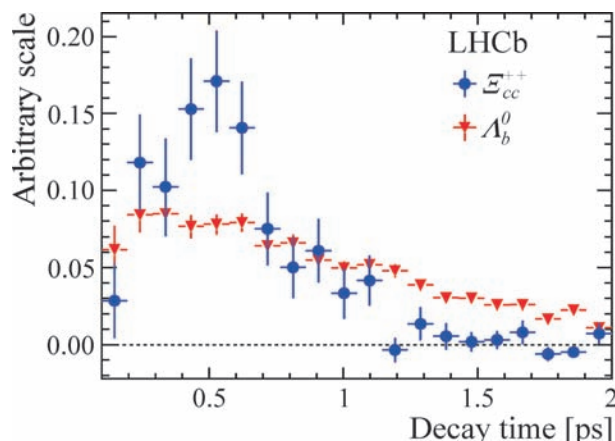


图 8 经过事例选择和本底减除的 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 信号和 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 信号的不变衰变时间分布^[20]

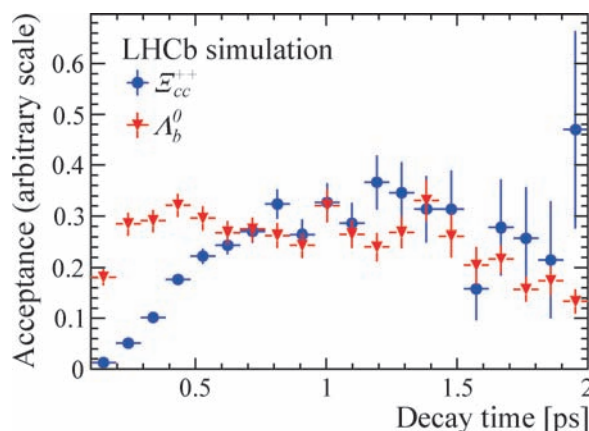


图 9 利用蒙特卡洛模拟得到的 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 和 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 事例选择效率随不变衰变时间的依赖关系^[20]

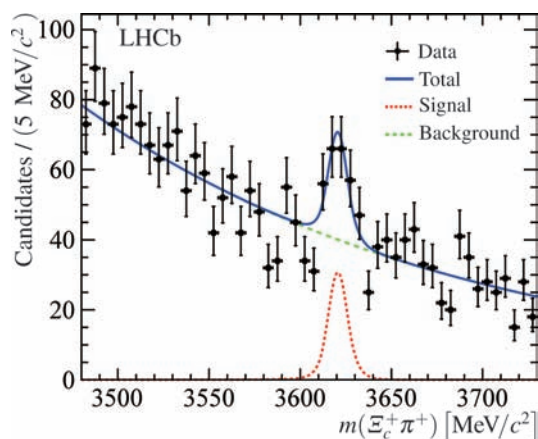


图 10 2016 年数据中的 $\Xi_c^+ \pi^+$ 不变质量谱分布及其拟合结果^[21]

内一致。我们将这两个测量结果取平均,得到了 Ξ_{cc}^{++} 重子的质量为 $3\,621.24 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 0.31(\text{syst}) \text{ MeV}/c^2$ 。我们测得 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 和 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 总的衰变分支比的比值

$$\frac{B(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+) \times B(\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)}{B(\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+) \times B(\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+)}$$

$$= 0.035 \pm 0.009(\text{stat}) \pm 0.003(\text{syst}),$$

这和理论预言值^[9]在误差范围内一致。该研究成果被选为在 LHCb 实验主页上报道,发表在 *Physical Review Letters* 上^[21]。

3 总结与展望

双粲重子是夸克模型预言的由两个粲夸克和一个轻夸克组成的重子。我们通过多年的准备和努力,搜寻过美国费米实验室 SELEX 实验组报道的双粲重子 Ξ_{cc}^+ , 未能证实其发现。在国内理论家长期强有力的支持下,我们在带双电荷的双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的搜寻取得突破,通过衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 发现了 Ξ_{cc}^{++} 重子,开创了一个新的粒子物理实验研究领域。我们精确测量了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 的质量和寿命,确立了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 通过弱相互作用衰变的性质。我们也在国内理论家建议的另一个衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 中证实该发现,测得的质量和用 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 衰变道得到的测量结果在误差范围内一致。我们测量了这两个衰变道 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_c^+ \pi^+$ 和 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 总的衰变分支比的比值,测量结果和理论预言值在误差范围内一致。

相关研究成果以我们作为通讯作者发表在 *Physical Review Letters* 上,我们团队成员受邀在国际轻子光子会议、国际高能物理会议和国际粲物理会议等高能物理顶级会议报告相关研究成果。

这些研究成果是通过分析 LHCb 实验于 2016 年采集的积分亮度为 1.7 fb^{-1} 、质心能量为 13 万亿电子伏特的质子-质子对撞数据而得到。LHCb 实验于 2011 年初至 2012 年底采集了积分亮度为 3.0 fb^{-1} 、质心能量为 7 或 8 万亿电子伏特的质子-质子对撞数据,2015 年初至 2018 年底预期共采集积分亮度为 5 fb^{-1} 、质心能量为 13 万亿电子伏特的质子-质子对撞数据。考虑到质心能量不同导致的产生截面的差异,总的数据量是已发表结果所用数据的 4 倍。利用这些数据,可以将 Ξ_{cc}^{++} 重子的质量、寿命和产生截面的测量精度提高两倍。而 Ξ_{cc}^+ 重子的质量和产生截面预期和 Ξ_{cc}^{++} 重子相近,寿命预期约为 Ξ_{cc}^{++} 重子的三分之一,考虑到理论预言的其主

要衰变道 $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+$ 的衰变分支比,我们在目前所有数据中可能观测到 Ξ_{cc}^+ 重子的迹象。

LHCb 实验将于 2019 年初至 2020 年底进行升级,升级后的亮度相比提高 5 倍,计划到 2030 年左右共采集积分亮度为 50 fb^{-1} 、质心能量为 13(或 14) 万亿电子伏特质子-质子对撞数据,届时我们将极有希望发现另外两种双粲重子 Ξ_{cc}^+ 和 Ω_{cc}^+ , 以及搜寻双粲重子的激发态。若能得到基金的持续有力的支持,LHCb 中国组将在双粲重子的实验研究方面继续保持领跑地位,为加深我们对于强相互作用和夸克模型的理解等提供非常有价值的信息。

致谢 本研究得到了中国科学院理论物理研究所张肇西院士、中国科学院高能物理研究所吕才典研究员、重庆大学吴兴刚教授、兰州大学于福升教授和上海交通大学王伟教授等长期强有力的理论支持。本研究得到了国家自然科学基金(项目批准号:11161140590,11575091,11435003,11425524)、国家重点研发计划项目“大型强子对撞机 LHCb 实验的物理研究”(项目编号:2017YFA0402100),中组部“青年千人计划”等资助。

参 考 文 献

- [1] Gell-Mann M. A schematic model of baryons and mesons. *Physics Letters*, 1961, 8(3): 214-215.
- [2] Zweig G. An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking. Part 1, CERN-TH.401.
- [3] Particle Data Group, Patrignani C, et al. Review of particle physics. *Chinese Physics C*, 2016, 40(10): 100001.
- [4] Chang CH, Ma JP, Qiao CF, et al. Hadronic production of the doubly charmed baryon Ξ_{cc} with intrinsic charm. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2007, 34(5): 845.
- [5] Chang CH, Qiao CF, Wang JX, et al. Estimate of the hadronic production of the doubly charmed baryon Ξ_{cc} in the general-mass variable-flavor-number scheme. *Physical Review D*, 2006, 73(9): 094022.
- [6] Chang CH, Wang JX, Wu XG. GENXICC: a generator for hadronic production of the double heavy baryons Ξ_{cc} , Ξ_{bc} and Ξ_{bb} . *Computer Physics Communications*, 2007, 177(5): 467-478.
- [7] Chang CH, Wang JX, Wu XG. GENXICC2.0: an upgraded version of the generator for hadronic production of double heavy baryons Ξ_{cc} , Ξ_{bc} and Ξ_{bb} . *Computer Physics Communication*, 2010, 181(6): 1144-1149.
- [8] Li RH, Lü CD, Wang W, et al. Doubly-heavy baryon weak decays: $\Xi_{bc}^0 \rightarrow p K^-$ and $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Sigma_c^{++} (2520) K^-$. *Physics Letters B*, 2017, 767: 232-235.
- [9] Yu FS, Jiang HY, Li RH, et al. Discovery potentials of doubly charmed baryons. *Chinese Physics C*, 2018, 42(5): 051001.

- [10] Shi YJ, Wang W, Xing Y, et al. Weak decays of doubly heavy baryons: Multi-body decay channels. *The European Physical Journal C*, 2018, 78(1): 56.
- [11] Wang W, Xing ZP, Xu J. Weak decays of doubly heavy baryons: SU(3) analysis. *The European Physical Journal C*, 2017, 77(11): 800.
- [12] SELEX collaboration, Mattson M, et al. First observation of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^+ . *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 112001.
- [13] Kiselev VV, Likhoded AK. Baryons with two heavy quarks. *Physics-Usppekhi*, 2002, 45(5): 455–506.
- [14] SELEX collaboration, Ocherashvili A, et al. Confirmation of the doubly charm baryon Ξ_{cc}^+ (3520) via its decay to $p D^+ K^-$. *Physics Letters B*, 2005, 628(1–2): 18–24.
- [15] Ratti SP, Link J, Reyes M, et al. New results on c -baryons and a search for cc -baryons in FOCUS. *Nuclear Physics-Section B-PS-Proceedings Supplements*, 2003, 115(115): 33–36.
- [16] BaBar collaboration, Aubert B, et al. Search for doubly charmed baryons Ξ_{cc}^+ and Ξ_{cc}^{++} in BABAR. *Physical Review D*, 2006, 74(1): 011103.
- [17] Belle collaboration, Chistov R, et al. Observation of new states decaying into $\Lambda_c^+ K^- \pi^+$ and $\Lambda_c^+ K_S^0 \pi^-$. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16): 162001.
- [18] LHCb collaboration, Aaij R, et al. Search for the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^+ . *Journal of High Energy Physics*, 2013, 2013(12): 90.
- [19] LHCb collaboration, Aaij R, et al. Observation of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} . *Physical Review Letters*, 2017, 119(11): 112001.
- [20] LHCb collaboration, Aaij R, et al. Measurement of the lifetime of the doubly charmed baryon Ξ_{cc}^{++} . *Physical Review Letters*, 2018, 121(5): 052002.
- [21] LHCb collaboration, R. Aaij et al. First observation of the doubly charmed baryon decay $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Xi_{cc}^+ \pi^+$. *Physical Review Letters*, 2018, 121(16): 162002.
- [22] LHCb collaboration, Alves Jr AA, et al. The LHCb detector at the LHC. *Journal of Instrumentation*, 2008, 3(08): S08005.
- [23] Brown ZS, Detmold W, Meinel S, et al. Charmed bottom baryon spectroscopy from lattice QCD. *Physical Review D*, 2014, 90(9): 094507.
- [24] Nature, New particle has twice the charm. <https://www.nature.com/articles/d41586-017-03246-2>.
- [25] Fleck S, Richard JM. Baryons with double charm. *Progress of Theoretical Physics*, 1989, 82(4): 760–774.
- [26] Guberina B, Melić B, Štefančić H. Inclusive decays and lifetimes of doubly-charmed baryons. *The European Physical Journal C-Particles and Fields*, 1999, 9(2): 213–219.
- [27] Kiselev VV, Likhoded AK, Onishchenko AI. Lifetimes of doubly charmed baryons: Ξ_{cc}^+ and Ξ_{cc}^{++} . *Physical Review D*, 1999, 60(1): 014007.
- [28] Likhoded AK, Onishchenko AI. Lifetimes of doubly heavy baryons. 1999, arXiv: hep-ph/9912425.
- [29] Onishchenko AI. Inclusive and exclusive decays of doubly heavy baryons. in 5th International Workshop on Heavy Quark Physics, Dubna, Russia, April 6–8, 2000, arXiv: hep-ph/0006295.
- [30] Anikeev K, et al. B physics at the Tevatron: Run II and beyond, in Workshop on B physics at the Tevatron: Run II and beyond, Batavia, Illinois, September 23–25, 1999, arXiv: hep-ph/0201071.
- [31] Chang CH, Li T, Li XQ, et al. Lifetime of doubly charmed baryons. *Communications in Theoretical Physics*, 2008, 49(4): 993.
- [32] Karliner M, Rosner JL. Baryons with two heavy quarks: masses, production, decays, and detection. *Physical Review D*, 2014, 90(9): 094007.
- [33] Berezhnoy AV, Likhoded AK. Doubly heavy baryons. *Physics of Atomic Nuclei*, 2016, 79(2): 260–265.

Recent advances in experimental studies of the doubly charmed baryons

Gao Yuanning¹ He Jibo² Xie Yuehong³ Sun Liang⁴

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079;

4. School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract The doubly charmed baryons are formed by two charm quarks and one light quark, as predicted by the quark model. They are expected to have different internal structures than those of the normal baryons such as the proton and the neutron, therefore have unique properties. Study and search for the doubly charmed baryons is the key research topic both for the theoretical and experimental particle physics. After enormous efforts in the past years, we have discovered the doubly charmed baryon containing two charm quarks and one up quark for the first time, and measured its mass and lifetime. Such discovery is also confirmed with another decay mode of the doubly charmed baryon. These studies are using proton-proton collision data at a center-of-mass energy of 13 TeV, taken by the LHCb experiment on the LHC at CERN in 2016. These achievements open a new research field in the experimental particle physics, which will deepen our understanding of the hadronic interaction and the quark model.

Key words Doubly charmed baryon; Large Hadron Collider; LHCb