2020 年度陈嘉庚科学奖专辑

陈嘉庚科学奖——数理科学奖

高原宁

北京大学博雅讲座教授、中国科学院院士,主要从事粒子物理实验研究.近年来领导 LHCb 国际合作中国组在强子谱研究上得到重要成果.2015 年首次发现五夸克粒子,被评选为当年物理学领域的重大进展.2017 年发现双粲重子,成果入选 2017 年度“中国科学十大进展”.

获奖项目名称

实验发现五夸克态

获奖项目介绍

1964 年,盖尔曼和茨威格提出夸克模型以解释强子结构,认为强子可以分为两类:由一对正反夸克组成的介子,或由三个夸克组成的重子,质子和中子就是最常见的重子.夸克模型的提出者们同时也指出,可能存在有别于普通重子或介子的奇特强子,例如由 5 个夸克组成的粒子,但在其后的 50 年间没能得到实验证实.2015 年, LHCb 实验在底重子到粲夸克偶素、质子和奇异介子的衰变过程中,发现粲夸克偶素与质子的不变质量谱中存在明显的增强结构,通过达里兹图和全振幅分析,首次在实验上确认存在五夸克粒子.由于该衰变过程中包含大量奇异重子共振态的中间过程,这些结构很容易被认为是由这些共振态的复杂作用造成的.高原宁领导 LHCb 国际合作中国组采用达里兹图分析确认了结构是五夸克粒子的效应,并通过全振幅分析得到了五夸克粒子的质量和宽度.虽然量子色动力学是描述夸克间强相互作用的基本理论,但由于其在原子核尺度上表现出的非微扰性质,目前人类还不能从第一原理严格预言强子的性质,夸克如何组成强子依然是不解之谜.五夸克粒子的发现是对传统强子组成的重要突破,其内部结构有很多的可能性,如紧束缚的五夸克态、重子-介子分子态等,实验发现的五夸克粒子很可能是这些量子态的叠加.对五夸克粒子结构的研究成为国际高能物理研究的前沿,为理解强相互作用的本质打开了一个新窗口.

五夸克态的实验发现

高原宁^{1,2}

1. 北京大学核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学物理学院, 北京 100871

E-mail: yuaning.gao@pku.edu.cn

2020-08-24 收稿, 2020-08-30 修回, 2020-08-31 接受, 2020-09-01 网络版发表

国家自然科学基金(11575091)资助

摘要 2015年, 大型强子对撞机上的LHCb实验在 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变末态中, 发现 J/ψ 和 p 不变质量谱中存在明显的增强结构. 通过达里兹图分析, 首次在实验上确认存在由5个夸克组成的粒子. 全振幅分析表明, 至少需要两个五夸克态才能很好地描述数据, 这两个五夸克态被命名为 $P_c(4450)$ 和 $P_c(4380)$. 2019年, 利用 9 fb^{-1} 积分亮度的数据, 并采用重新优化了的选择条件, LHCb实验再次研究 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变末态的 J/ψ 和 p 不变质量谱, 发现了一个新的五夸克态 $P_c(4312)$, 同时观测到之前发现的 $P_c(4450)$ 是两个质量相邻窄共振态 $P_c(4440)$ 和 $P_c(4457)$ 的叠加. 发现包含粲夸克偶素的五夸克粒子是对传统强子组成的重要突破, 其内部结构有很多种可能性, 如紧束缚的五夸克态、重子-介子分子态等或者它们的叠加态. 作为国际高能物理学界的前沿方向, 对五夸克粒子结构的研究为探索强相互作用非微扰性质打开了一扇新的窗口.

关键词 夸克, 强子, LHCb实验, 五夸克态

粒子物理学研究表明, 组成原子核的质子和中子具有更深层次的结构. 在1964年Gell-Mann^[1]和Zweig^[2]独立提出的夸克模型中, 质子和中子是由夸克组成的. 夸克模型的提出和证实使得人类对物质深层次的认识达到了新的高度. 除了质子和中子, 科学家在宇宙线和加速器实验上还发现了上千个由夸克组成的粒子, 它们被统称为强子. 已发现的强子大都可以按夸克模型分类为由一个夸克和一个反夸克组成的介子, 以及由3个夸克或3个反夸克组成的重子. 夸克模型提出时就在理论上探讨过由更多夸克组成强子的可能性, 如在普通介子中再加入一对正反夸克组成的四夸克介子、普通重子中再加入一对正反夸克组成的五夸克重子等, 后来这些超出传统夸克模型分类的组成被称为奇特强子. 虽然夸克模型在理论上很自然地预言了奇特强子的存在, 但其后的50多年间实验上一直不能确认奇特

强子的存在.

寻找奇特强子的困难首先来自其性质的不确定性. 当代科学家普遍相信量子色动力学是描述夸克间强相互作用的基本理论, 但由于其在原子核尺度上表现出的非微扰性质, 目前人类还不能从第一原理严格预言强子的性质, 这意味着理论上对奇特强子的性质只能给出定性的、或者比较粗糙的定量预言, 给实验发现和确认带来了很多不确定性. 奇特强子均是不稳定粒子, 需在高能对撞机实验上产生和研究. 由于比普通重子包含更多的夸克, 在高能对撞过程中奇特强子的形成更困难, 因而产额较低; 奇特强子较大概率会产生级联衰变, 末态的可能性多, 组成复杂, 不容易辨认. 理论上的不确定性和实验上的复杂性使得寻找奇特强子多年来都是粒子物理和核物理研究中最具挑战性的前沿课题之一.

引用格式: 高原宁. 五夸克态的实验发现. 科学通报, 2020, 65: 2933–2940

Gao Y. Discoveries of the pentaquark states (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2933–2940, doi: [10.1360/TB-2020-1061](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1061)

在20世纪60年代夸克模型建立时, 实验上只发现了质量比较轻的3种夸克, 分别称为下夸克(d)、上夸克(u)和奇异夸克(s). 1974年, 丁肇中(Samuel C. C. Ting)及其合作者^[3]和里克特(B. Richter)及其合作者^[4]分别在固定靶和对撞机上发现了 J/ψ 粒子, 从而确认了第4种夸克——粲夸克(c)的存在. 粲夸克的一个特点是质量远重于之前发现的轻夸克, 由一对正反粲介子组成的 J/ψ 粒子是一个窄共振态, 而且有比较高的概率衰变到一对正负电子或一对正负缪子, 在实验上具有明显的特征, 可以作为其他实验发现的探针. 这些特点也在其后四夸克态和五夸克态的发现中得到了利用. 目前实验上已经发现了6种夸克, 表1中给出了这6种夸克的基本性质^[5].

由于奇特强子对理解强相互作用本质上的重要作用, 50年来粒子物理与核物理实验在寻找奇特强子研究上做出了非常多的努力, 也间或有发现奇特强子的报道(2000~2008年间曾有多项实验宣布发现五夸克态), 但均没有得到公认的实验确认^[6]. 从2003年开始, 实验上发现了多个被称为“类粲偶素”的新粒子, 大大推动了关于奇特强子态的研究进展^[7], 其中2013年在北京正负电子对撞机上北京谱仪(BESIII)发现 $Z_c(3900)$ 具有非常特殊的意义: 因为这个粒子含有一对正反粲夸克且带有与电子相同或相反的电荷, 提示其中至少含有4个夸克——这极有可能是科学家们长期寻找的介子分子态或四夸克态^[8]. 随后, BESIII实验上又发现了几个极有可能是伴随态的粒子, 揭示了可能的四夸克物质谱系的存在.

1 五夸克态的实验发现

大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)的成功运行为人类探索微观世界提供了新的强大工具. LHC实验的最重要科学目标是探索超出当代粒子物理标准模型的新物理现象, 希格斯粒子的发现无疑是人类历史上最重要的科学成就之一. 在LHC的高能强子对撞过程中, 虽然理论预期可以产生大量的奇特强子态, 但由于对撞过程会伴随产生大量的末态粒子, 实验上辨识这些强子非常困难, 需要创新粒子探测和数据分析技术.

1.1 LHCb实验

LHCb是LHC上4个高能粒子探测器之一^[9], 其最重要的物理目标包括研究含有重夸克强子的性质, 以及

表1 夸克

Table 1 Quarks

名称	符号	电荷 ^{a)}	质量(MeV/ c^2)
下(down)	d	$\frac{1}{3}e$	$4.67^{+0.48}_{-0.17}$
上(up)	u	$\frac{2}{3}e$	$2.16^{+0.49}_{-0.26}$
奇异(strange)	s	$-\frac{1}{3}e$	93^{+11}_{-5}
粲(charm)	c	$\frac{2}{3}e$	$(1.27 \pm 0.02) \times 10^3$
底(bottom)	b	$-\frac{1}{3}e$	$(4.18^{+0.03}_{-0.02}) \times 10^3$
顶(top)	t	$\frac{2}{3}e$	$(172.76 \pm 0.30) \times 10^3$

a) $e \approx 1.602 \times 10^{-19}$ C(电子电荷的绝对值)

通过精确测量B介子稀有衰变末态的性质研究CP破坏现象的物理机制等. LHCb国际合作有来自全世界18个国家、85个研究单位的近1400名科学家参加. 由于LHCb的物理目标与LHC上的其他实验不同, 其探测器的结构也非常独特. 在LHC的高能质子对撞反应中, 含c、b夸克强子集中产生在对撞区的前后两端, LHCb据此设计为单臂谱仪, 在保证较高收集效率的同时尽量降低造价, 探测器的示意图见图1. LHCb探测器虽然是LHC上4个粒子探测器中造价较低的一个, 但其上也集成了当代粒子探测技术的精华, 包含顶点探测器、触发和径迹探测器系统、用于高能粒子鉴别的切伦科夫探测器系统、电磁和强子量能器以及缪子探测器等, 有力地支撑了其科学目标的实现. 实际运行时, LHC在LHCb探测器的对撞区亮度为 $4 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 在这个亮度下, LHCb每年可收集 10^{12} 量级的含b夸克强子事例.

从2009年底LHC开始运行, LHCb便开始了数据获

图1 LHCb探测器
Figure 1 LHCb detector

取, 探测器的每个部分都达到或超过了设计指标^[10], 到2018年底已经获得了约9 fb⁻¹积分亮度的数据. 利用这些数据, LHCb国际合作组已经发表了500多篇科学论文.

1.2 五夸克态的实验发现

除了研究CP破坏现象, LHCb实验在强子谱研究上也取得了很多重要成果, 尤其在研究含b夸克重子(Λ_b 、 Ξ_b 等)上发挥了独特优势, 其中发现 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变道并由此精确测量了 Λ_b 重子的寿命就是这些重要成果之一^[11,12], 也为后来的五夸克态发现奠定了基础. 这个衰变过程有一些重要的特点: 末态含有J/ψ粒子, 在LHCb探测器中可以非常干净地通过双缪子末态进行重建; 包括J/ψ粒子衰变的两个缪子, 这个过程末态均是带电粒子, LHCb探测器可以高效地重建这些带电径迹并且精确测量它们的动量; LHCb探测器可以高效鉴别末态粒子的种类; 由于 Λ_b 重子具有较长的寿命, 在质子对撞中产生后会飞行一段距离后再衰变. 这在探测器中, 其衰变的带电径迹会交汇于一点, 在质子对撞顶点之外形成一个次级顶点, 这个特征可以用来有效地压制本底. 图2是LHCb探测器记录的一个典型的 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变过程.

继利用 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 测量 Λ_b^0 重子的寿命后, 这个衰变道被用来测量高能质子对撞中 Λ_b^0 重子的产生截面. 到2014年底, LHCb探测器已经收集了约3 fb⁻¹积分

亮度的数据, 从中重建出了约26000个 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 事例. 在截面测量中, 发现在J/ψ粒子的不变质量谱上具有奇特的结构^[13], 如图3(a)所示. 如果假设此结构来源于衰变中间过程的共振态的贡献, 那么这个共振态的性质与五夸克态的理论预言是一致的. 事实上, 在LHCb实验上发现 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变过程时就已经观察到了这个奇特的结构, 但由于这个过程中包含很强的 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi \Lambda^*, \Lambda^* \rightarrow K^- p$ 贡献(这从图4(a)中可以看到), 当时误以为这个奇特结构是由 Λ^* 的“反射”造成的, 因此没有给予特别的重视. 历史上, 达里兹图方法曾多次用于分析粒子的三体衰变过程, 在 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 分析中又一次发挥了重要作用. 如图3(b)所示, 在Kp不变质量平方的高端($m_{Kp}^2 > 4 \text{ GeV}^2/c^2$)明显存在一个带子, 这来源于五夸克态的贡献, 而 Λ^* 的贡献几乎完全集中在质量平方的低端($m_{Kp}^2 < 4 \text{ GeV}^2/c^2$). 达里兹图分析虽然非常简单, 但得到的结论清晰可靠, 在五夸克态的发现中起到了关键的作用.

由达里兹图分析确认五夸克态的存在后, LHCb实验利用全振幅分析(也称分波分析)方法从实验数据中提取关于五夸克态的信息. 仔细考虑了中间态 Λ^* 的贡献后, 全振幅分析发现, 需要两个五夸克态的贡献才能正确地描述实验数据, 这两个五夸克态被命名为 $P_c(4450)$ 和 $P_c(4380)$, 其性质在表2中给出. 图4中给出了振幅分析结果与实验数据的比较, 可以看到在引入两

图2 LHCb探测器记录的 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$

Figure 2 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ event recorded by the LHCb detector

图 3 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ 衰变末态的不变质量分布^[13]. (a) J/ψ 不变质量分布; (b) 达里兹图

Figure 3 The invariant mass distributions of $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays^[13]. (a) Distribution of J/ψ invariant mass; (b) Dalitz plot

图 4 振幅分析结果(红色数据点)与实验数据(黑色数据点)的比较^[13]

Figure 4 Comparisons between the amplitude analysis (red points) and the data (black squares)^[13]

表 2 五夸克态的性质

Table 2 Properties of the pentaquarks

五夸克态	质量(MeV)	宽度(MeV)	统计显著性
$P_c(4450)$	$4449.8 \pm 1.7(\text{stat}) \pm 2.5(\text{syst})$	$39 \pm 5(\text{stat}) \pm 19(\text{syst})$	>12倍标准偏差
$P_c(4380)$	$4380 \pm 8(\text{stat}) \pm 29(\text{syst})$	$205 \pm 18(\text{stat}) \pm 86(\text{syst})$	>9倍标准偏差

个五夸克态贡献后, 振幅分析结果与实验数据很好地符合.

LHCb的实验结果具有很高的统计显著性, 这是之前关于五夸克态的实验结果所不可比拟的. 粒子物理实验通常以5倍标准偏差作为新粒子的发现标准, $P_c(4450)$ 和 $P_c(4380)$ 远超过了这个标准. 另外需要指出的是, 由于实验发现的五夸克态可以通过强作用衰变到含有 J/ψ 粒子的末态, 说明其内部含有正反粲夸克对, 而之前实验寻找的是只含有轻夸克的五夸克态. 总之, LHCb实验发现的是一种全新的、之前实验研究中还从未涉及的五夸克态.

五夸克态发现后, LHCb的实验最终完成了高能质子对撞中 Λ_b 重子产生截面的测量, 同时还测量了 Λ_b 重子到五夸克态的分支比^[14].

2 五夸克态的实验研究

五夸克态的发现是奇特重子研究上的一个重大突破, 关于五夸克态还有很多问题有待回答. LHCb最新的研究^[15]利用了迄今为止LHCb探测器采集的所有数据, 共计 9 fb^{-1} . 采用重新优化的事例选择条件后, 大幅提高了信号的接收效率, 用于这次实验分析的数据有效统计量大约是2015年数据样本的9倍. 在新的高统计

样本的实验分析中,关于五夸克态的一些更细致的结构得以显现.图5给出了经新分析得到的 $J/\psi p$ 不变质量谱,可以清楚地确认一个新的五夸克态 $P_c(4312)$ 的发现,而之前发现的 $P_c(4450)$ 则分裂为两个质量相邻的五夸克态 $P_c(4440)$ 和 $P_c(4457)$.

新的实验结果为理解五夸克态的内部结构提供了重要的信息.对于五夸克的内部结构,理论上有很多的猜测,紧束缚的五夸克态^[16–22]和粲重子-反粲介子分子态^[23–32]是两种最受关注的可能.目前发现的这3个五夸克态的宽度都很窄,质量略低于粲重子和反粲介子质量之和,这些性质与粲重子-反粲介子分子态的预期一致.然而,目前实验结果也不能排除紧束缚的五夸克态的可能性.如果从量子力学的基本原理来考虑,实验发现的五夸克态最有可能是紧束缚的五夸克态和粲重子-反粲介子分子态的叠加态,未来理论和实验研究所需得到的是这两种可能状态所占的比重.

对于实验上发现的 $J/\psi p$ 不变质量的峰结构,也有理论指出这可能是由三角图的贡献所致^[33–36].实验研究表明,这种理论图像只能比较粗略地描述 $P_c(4457)$ 处的行为,但无法描述 $P_c(4312)$ 和 $P_c(4440)$ 处的数据.这个结果排除了所发现的质量峰结构是某种动力学效应的可能性.

3 总结与展望

五夸克态的实验发现为探索量子色动力学的非微

图5 $J/\psi p$ 不变质量谱中的3个五夸克态信号^[15]

Figure 5 Three pentaquarks shown in the invariant mass spectrum of $J/\psi p$ ^[15]

扰性质、理解强相互作用的本质打开了一个新窗口.随着LHCb实验的进展,预期对五夸克态的性质有更深入的了解.为了进一步理解五夸克态的内部结构,测量已发现五夸克态的自旋宇称量子数是非常必要的.之前LHCb实验对 $P_c(4450)$ 和 $P_c(4380)$ 的自旋宇称量子数有过初步的测量结果,但最新的实验发现表明,必须对 $P_c(4312)$ 、 $P_c(4380)$ 、 $P_c(4440)$ 和 $P_c(4457)$ 同时进行全振幅分析,才能得到关于这些五夸克态自旋宇称量子数的可靠结果,相关研究正在进行当中.

参考文献

- Gell-Mann M. A schematic model of baryons and mesons. *Phys Lett*, 1964, 8: 214–215
- Zweig G. An SU 3 model for strong interaction symmetry and its breaking. Report No. CERN-TH-401, 964
- Aubert J J, Becker U, Biggs P J, et al. Experimental observation of a heavy particle J. *Phys Rev Lett*, 1974, 33: 1404–1406
- Augustin J E, Boyarski A M, Breidenbach M, et al. Discovery of a narrow resonance in e^+e^- annihilation. *Phys Rev Lett*, 1974, 33: 1406–1408
- Particle Data Group. Review of particle physics. *Prog Theor Exper Phys*, 2020, 2020: 083C01
- Liu T, Mao Y, Ma B Q. Present status on experimental search for pentaquarks. *Int J Mod Phys A*, 2014, 29: 1430020
- Olsen S L, Skwarnicki T, Zieminska D. Nonstandard heavy mesons and baryons: Experimental evidence. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 015003
- Ablikim M, Achasov M N, Ai X C, et al. Observation of a charged charmoniumlike structure in $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ at $\sqrt{s}=4.26$ GeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 252001
- Alves A A, Andrade L M, Barbosa A F, et al. The LHCb Detector at the LHC. *J Instrum*, 2008, 3: S08005
- Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. LHCb detector performance. *Int J Mod Phys A*, 2015, 30: 1530022
- Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Precision measurement of the Λ_b^0 baryon lifetime. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 102003
- Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Precision measurement of the ratio of the Λ_b^0 to $\bar{B}^0$ lifetimes. *Phys Lett B*, 2014, 734: 122–130
- Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Observation of J/ψ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 072001
- Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Study of the production of and hadrons in pp collisions and first measurement of the branching fraction. *Chin Phys C*, 2016, 40: 011001
- Aaij R, Beteta C A, Adeva B, et al. Observation of a narrow pentaquark state, $P_c(4312)^+$, and of two-peak structure of the $P_c(4450)^+$. *Phys Rev Lett*,

- 2019, 122: 222001. arXiv: 1904.03947
- 16 Maiani L, Polosa A D, Riquer V. The new pentaquarks in the diquark model. *Phys Lett B*, 2015, 749: 289–291
 - 17 Lebed R F. The pentaquark candidates in the dynamical diquark picture. *Phys Lett B*, 2015, 749: 454–457
 - 18 Li G N, He X G, He M. Some predictions of diquark model for hidden charm pentaquark discovered at the LHCb. *J High Energy Phys*, 2015, 12: 128
 - 19 Ghosh R, Bhattacharya A, Chakrabarti B. A study on $P_c^*(4380)$ and P_c^* in the quasi particle diquark model. *Phys Part Nuclei Lett*, 2017, 14: 550–552
 - 20 Wang Z G. Analysis of $P_c(4380)$ and $P_c(4450)$ as pentaquark states in the diquark model with QCD sum rules. *Eur Phys J C*, 2016, 76: 70
 - 21 Zhu R, Qiao C F. Pentaquark states in a diquark–triquark model. *Phys Lett B*, 2016, 756: 259–264
 - 22 Ali A, Ahmed I, Aslam M J, et al. Mass spectrum of the hidden-charm pentaquarks in the compact diquark model. *J High Energy Phys*, 2019, (10): 256
 - 23 Karliner M, Rosner J L. New exotic meson and baryon resonances from doubly heavy hadronic molecules. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 122001
 - 24 Chen R, Liu X, Li X Q, et al. Identifying exotic hidden-charm pentaquarks. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 132002
 - 25 Chen H X, Chen W, Liu X, et al. Towards exotic hidden-charm pentaquarks in QCD. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 172001
 - 26 Liu Y R, Chen H X, Chen W, et al. Pentaquark and tetraquark states. *Prog Particle Nucl Phys*, 2019, 107: 237–320
 - 27 Chen H X, Chen W, Liu X, et al. A review of the open charm and open bottom systems. *Rep Prog Phys*, 2017, 80: 076201
 - 28 Chen H X, Chen W, Liu X, et al. The hidden-charm pentaquark and tetraquark states. *Phys Rep*, 2016, 639: 1–121
 - 29 Guo F K, Hanhart C, Meißner U G, et al. Hadronic molecules. *Rev Mod Phys*, 2018, 90: 015004
 - 30 Roca L, Nieves J, Oset E. LHCb pentaquark as a $\bar{D}^*\Sigma_c - \bar{D}^*\Sigma_c^*$ molecular state. *Phys Rev D*, 2015, 92: 094003
 - 31 He J. $\bar{D}\Sigma_c^*$ and $\bar{D}^*\Sigma_c$ interactions and the LHCb hidden-charmed pentaquarks. *Phys Lett B*, 2016, 753: 547–551
 - 32 Huang H, Deng C, Ping J, et al. Possible pentaquarks with heavy quarks. *Eur Phys J C*, 2016, 76: 624
 - 33 Guo F K, Meißner U G, Wang W, et al. How to reveal the exotic nature of the $P_c(4450)$. *Phys Rev D*, 2015, 92: 071502
 - 34 Meißner U G, Oller J A. Testing the $\chi_{c1}p$ composite nature of the $P_c(4450)$. *Phys Lett B*, 2015, 751: 59–62
 - 35 Liu X H, Wang Q, Zhao Q. Understanding the newly observed heavy pentaquark candidates. *Phys Lett B*, 2016, 757: 231–236
 - 36 Mikhasenko M. A triangle singularity and the LHCb pentaquarks. 2015, arXiv: 1507.06552

Summary for “五夸克态的实验发现”

Discoveries of the pentaquark states

Yuanning Gao^{1,2}¹ State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;² School of Physics, Peking University, Beijing 100871, ChinaE-mail: yuanning.gao@pku.edu.cn

Protons and neutrons are not fundamental particles, instead are formed by quarks. Thousands of multi-quark particles were discovered in cosmic rays or particle accelerators. However, within the past decades after the quark model was proposed by Gell-Mann and Zweig, only two categories of strongly interacting particles were known: Baryons (such as protons and neutrons) that are made from three quarks, and mesons that are made from one quark and one antiquark. But what other configurations of quarks and antiquarks can form a particle? This question is theoretically difficult to answer. Yet new particles with different combinations of quarks keep popping up in experiments. In 2015, the best evidence for the existence of an exotic type of particle called as pentaquark, a never-before-seen formation of five quarks, was discovered by physicists working on the Large Hadron Collider beauty (LHCb) experiment at European Organization for Nuclear Research (CERN). The detection of this particle is a major breakthrough in learning more about the nature of the strong forces that bound quarks together.

In a sample of about 26000 $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays collected by the LHCb detector, a significant enhancement structure was observed in the $J/\psi p$ mass distribution. The pentaquark signal populated well separatedly from those contributions of $\Lambda^* \rightarrow K^- p$ on the “Dalitz” plot using the $K^- p$ and $J/\psi p$ invariant mass-squared as independent variables. The amplitude analysis revealed two pentaquark states were needed to describe dataset. They were formally named as $P_c(4450)^+$ and $P_c(4380)^+$ with statistical significances greater than 9 standard deviations: One has a mass of $(4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5)$ MeV and a width of $(39 \pm 5 \pm 19)$ MeV, while the other is wider, with a mass of $(4380 \pm 8 \pm 29)$ MeV and a width of $(205 \pm 18 \pm 86)$ MeV. Both pentaquarks that LHCb physicists observed decaying strongly into a J/ψ particle and a proton, must have a minimal quark content of $c\bar{c}uud$, and thus are charmonium pentaquarks.

Recently the analysis has been reoptimized based on the data collected to date. A sample of $2.5 \times 10^5 \Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays was selected, nine times more than those used in the previous analysis. A new pentaquark state $P_c(4312)$ was discovered with a mass near 4312 MeV. The $P_c(4450)$ state was found to be the superposition of two nearby states at 4440 and 4457 MeV respectively.

In an attempt to interpret the discoveries by the LHCb experiment, the pentaquark was conjectured as a tightly bound system of all five quarks, or a weakly bound “molecular” system of a baryon and a meson.

Accurate description of a multi-quark system using the theory of the strong force and quantum chromodynamics (QCD) is an extremely difficult problem. In fact, there are many combinations how five quarks are bound within the pentaquark. The five quarks could be tightly bound within a single structure, for example. Another possibility is that a quark and an antiquark are bound together to form a meson and the remaining three quarks form a baryon. The meson and baryon could then be bound to each other to create a structure resembling a subatomic molecule.

Exploring the structure of pentaquarks as one of novel frontiers in high energy physics paves a new era to study the nature of strong interactions, which is an important stepping-stone in our good understanding of the strong force, the least well known of the four forces in nature.

quark, hadron, LHCb experiment, pentaquark

doi: [10.1360/TB-2020-1061](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1061)