



LHCb实验上隐粲四夸克强子态研究进展

安刘攀*, 高原宁, 杨振伟, 张艳席

北京大学物理学院, 北京 100091

* 联系人, E-mail: anlp@pku.edu.cn

2025-08-29 收稿, 2025-11-21 修回, 2025-11-21 接受, 2025-11-25 网络版发表

国家重点研发计划(2024YFA1610501)和国家自然科学基金(12061141007, 12188102)资助

摘要 量子色动力学是描述强相互作用的基本理论, 然而从量子色动力学出发理解强相互作用的色禁闭机制仍是尚未解决的基本科学问题. 强子是夸克和胶子在强相互作用下形成的束缚态, 强子谱学是研究色禁闭动力学本质的理想途径. 相对于普通强子, 奇特多夸克态内部组分夸克可以存在多种色结构形式, 可以为理解色禁闭性质提供全新的信息. 自运行以来, 大型强子对撞机上的底夸克实验(LHCb)发现了一系列奇特多夸克态, 并深入研究了它们的性质, 为理解强相互作用作出了显著贡献. 本文将介绍LHCb实验上隐粲四夸克态的研究进展, 包括类粲夸克偶素态、含奇异夸克隐粲四夸克态以及全粲四夸克态等. 这些实验结果有助于构建奇特强子味道多重态, 帮助理解奇特多夸克态内部结构以及色禁闭机制.

关键词 色禁闭, 奇特强子态, 四夸克态, LHCb实验

探索世界的基本组元及其相互作用是粒子物理学的根本任务, 也是人类科学长久以来的追求. 自然界的基本相互作用包括电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用以及引力相互作用. 在粒子物理标准模型中, 强相互作用由量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)理论描述. 在低能区, QCD无法进行微扰计算, 极大地限制了人们对强相互作用的认知. 已知的参与强相互作用的基本粒子包括夸克和胶子. 强相互作用在低能区具有色禁闭性质, 使得夸克无法孤立存在, 只能束缚在强子内部. 色禁闭机制尚无法通过QCD理论进行解析推导, 是粒子物理学仍未能解决的基本问题. 该机制决定了强子内部的动力学结构及夸克的强子化过程, 其效应直接体现在强子的能谱和产生性质中, 因此, 强子是人们理解强相互作用在低能区的性质和色禁闭现象的重要探针.

夸克模型建立于20世纪60年代, 根据强子内组分夸克成分对强子进行了分类^[1,2]. 夸克有六种味道, 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), 粲夸克和底夸克属于重味夸克. 早期实验中发现的强子可以被归类为由正反夸克组成的介子和由三个夸克组成的重子, 统称普通强子. 在建立之初, 夸克模型就预言存在普通强子之外的奇特强子态, 其中含三个以上组分夸克的被称作多夸克态. 作为一种新的物质基本结构, 多夸克态具有比普通强子更为丰富的夸克组合形式, 一直是强子物理领域的研究焦点.

当前奇特强子研究的一个核心问题是, 能否用一个理论框架统一描述所有已观测到的奇特强子态. 遗憾的是, 学界还没有对此形成共识. 针对多夸克态的内部结构, 理论家们提出了多种模型, 其中强子分子结构模型和紧致多夸克结构模型具有较为广泛的研究. 强子分子模型认为多夸克强子态由普通的介子或重子通过交换轻介子被松散地结合在一起^[3]. 氦核即可看作是质子和中子形成的强子分子态, 但这种组合方式能否

引用格式: 安刘攀, 高原宁, 杨振伟, 等. LHCb实验上隐粲四夸克强子态研究进展. 科学通报, 2026, 71: 969–978

An L, Gao Y, Yang Z, et al. Progress on study of hidden-charm tetraquark states at LHCb (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 969–978, doi: [10.1360/CSB-2025-5439](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5439)

直接推广到任意多夸克强子态尚没有定论。紧致多夸克模型认为所有组分夸克被强相互作用力紧密束缚在一起^[4]。不同的结构会导致不同的强子态性质,比如强子分子态的尺度通常比紧致多夸克态更大;强子分子态的质量一般接近两个组分强子的质量之和,而紧致多夸克态不存在这种限制等。这些差别为多夸克态的实验研究提供了方向。

实验上如何区分普通强子和奇特强子呢?一类强子含三个以上的净组分夸克或具有普通强子不具备的自旋宇称量子数,显然可被归类为奇特强子态。重味夸克因质量很大,需要较高能量方可产生,其数目在强衰变中近似守恒,所以往往被认定为强子的净组分夸克;反之,轻夸克质量小,其对产生和湮灭极易发生,只有在贡献净量子数时,才会被视作净组分。因此,重味强子在此类分析中有很大的优势。另一类强子因质量、宽度或衰变性质和对普通强子的预期不符,或在普通强子谱中对应的位置已被占据而被认定为奇特强子态。这要求对普通强子谱的理论预言和实验观测都具有相当高的精度。重味强子因理论上适用非相对论性有效理论和势模型,且能级间隔大,实验上更易探测,极好地适配这一要求。基于上述原因,重味强子是奇特强子态研究的理想平台。在已观测到的重味奇特强子态中,隐粲四夸克态因其在现有高能实验的产生和探测中的综合优势,占据了半数之多。本文便将针对隐粲四夸克态作介绍。

奇特强子态的探索最初由正负电子对撞机上的实验主导,如日本高能加速器研究机构的KEKB对撞机上的Belle实验(已升级为BelleII),美国斯坦福直线加速器中心的PIP-II加速器上的Babar实验和中国科学院高能物理研究所的北京正负电子对撞机上的BES实验(已升级为BESIII)。而后,位于欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)的运行行为奇特强子态研究带来了新的机遇。尤其是LHC上的底夸克实验(LHCb),它具备顶尖的顶点重建和粒子鉴别能力^[5],对重味强子探测具有独特优势。这些实验中,隐粲四夸克态的产生机制主要有三种:强子对撞直接产生、正负电子对撞直接产生和底强子衰变。一般而言,强子的组分夸克越轻,产额越大,实验信息越丰富。按夸克组分由轻到重,已知隐粲四夸克态可被归为三类:组分为 $c\bar{c}q\bar{q}$ ($q = u/d$)的类粲夸克偶素粒子、含奇异夸克的四夸克态和全粲四夸克态($cc\bar{c}\bar{c}$)。本文将回顾LHCb实验上这三类隐粲四夸克强子态的研究成果,重点介绍近几年的研究进展。

1 类粲偶素四夸克态的研究

重味奇特强子态的实验探索始于类粲偶素四夸克态的发现。实验上,一般通过隐粲衰变(即衰变到一个粲偶素和任意数量的非粲强子)和开粲衰变(即衰变到一个粲强子和一个反粲强子)两类过程探测类粲偶素四夸克态。作为首个在实验中被观测到的重味奇特强子态, $\chi_{c1}(3872)$ 的隐粲和开粲衰变道均已被实验确认。它是目前实验测量最为丰富全面的奇特强子态,且一直是理论研究的热点。本节将首先介绍LHCb实验上 $\chi_{c1}(3872)$ 的研究,再分别介绍通过隐粲衰变和开粲衰变进行的类粲偶素四夸克态测量。

1.1 $\chi_{c1}(3872)$ 的测量

2003年,Belle实验在 $J/\psi\pi^+\pi^-$ 质量谱中发现一个位于3872 MeV/ c^2 附近的意料之外的窄峰结构^[6],因其性质未知,故命名为 $X(3872)$ 。此后数年间,各大实验相继发现了 $X(3872)$ 的多种其他衰变模式,无可争议地确认了 $X(3872)$ 的存在及其独特性—— $X(3872)$ 的质量极其接近 $D^0\bar{D}^{*0}$ 的阈值,且宽度极窄^[7]。2007年,CDF实验排除了 $X(3872)$ 具有 1^{++} 和 2^{+-} 之外的自旋-宇称-电荷共轭量子数(J^{PC})的可能^[8],2013年,LHCb实验进一步测定的 $X(3872)$ 量子数为 1^{++} ^[9]。由此, $X(3872)$ 被重命名为 $\chi_{c1}(3872)$ 。在粲夸克偶素谱系中,质量接近3872 MeV/ c^2 且量子数为 1^{++} 的唯一选项是 $\chi_{c1}(2P)$,而 $\chi_{c1}(3872)$ 的质量和宽度都显著低于理论模型对 $\chi_{c1}(2P)$ 的预言^[10,11]。此外,粲夸克偶素同位旋为0,而 $\chi_{c1}(3872)$ 衰变到同位旋为1的 $J/\psi\rho$ 末态的分支比远大于预期。当下,人们已普遍认同 $\chi_{c1}(3872)$ 是一个奇特强子态,但对其内部结构还没有达成共识。 $\chi_{c1}(3872)$ 是 $D^0\bar{D}^{*0}$ 的强子分子态,还是 $c\bar{c}q\bar{q}$ 的紧致四夸克态,抑或是二者与 $\chi_{c1}(2P)$ 组分的混合? LHCb实验由此对 $\chi_{c1}(3872)$ 的性质进行了一系列测量。

产生:不同的内部结构对应不同的产生机制,因此,对 $\chi_{c1}(3872)$ 产生截面的测量可以为探究其内部结构提供重要信息。LHCb实验对质心能量分别为8和13 TeV下质子-质子对撞前向区域内 $\chi_{c1}(3872)$ 相对于 $\psi(2S)$ 的产生截面进行了测量^[12],发现其截面比值随横动量增加而增大,说明在高横动量区间,对 $\chi_{c1}(3872)$ 产生过程

的压低程度小于 $\psi(2S)$. 在横动量大于10 GeV的范围内, $\chi_{c1}(3872)$ 的产生截面与将 $\chi_{c1}(3872)$ 看作 $D^0\bar{D}^{*0}$ 强子分子态和 $\chi_{c1}(2P)$ 态混合的模型预言相一致. 此外, LHCb还研究了 $\chi_{c1}(3872)$ 的产生截面对事例多重数的依赖关系^[13], 发现随着多重数的增加, 质子-质子对撞直接产生的 $\chi_{c1}(3872)$ 相对于 $\psi(2S)$ 的截面有显著压低, 而来自底强子衰变的 $\chi_{c1}(3872)$ 和 $\psi(2S)$ 截面之比和多重数没有明显关联. 这对甄别不同的理论模型有重要意义.

衰变: 衰变模式及其分支比也包含了奇特强子态内部结构的丰富信息, 比如 $\chi_{c1}(3872)$ 的衰变由 $D^0\bar{D}^{*0}$ 主导, 被认为是 $\chi_{c1}(3872)$ 具有显著强子分子态成分的有力证明. 如前文所言, $\chi_{c1}(3872)$ 衰变到 $J/\psi\rho$ 的过程破坏同位旋, 是 $\chi_{c1}(3872)$ 作为奇特强子态的一项显著特征. $\chi_{c1}(3872)$ 到同位旋为0的末态 $J/\psi\omega$ 的衰变有极大的运动学压低, 分支比却和 $J/\psi\rho$ 衰变接近, 且当前尚未观测到任何 $\chi_{c1}(3872)$ 的同位旋多重态, 说明 $\chi_{c1}(3872)$ 是同位旋单态. 对其同位旋破坏程度的测量, 可以极大地帮助人们理解其内部动力学结构. LHCb利用由 $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$ 衰变来的 $\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ 样本, 对 $\pi^+\pi^-$ 系统进行了分波分析^[14], 首次观测到占比为 $(1.9 \pm 0.4 \pm 0.3)\%$ 的 ω 贡献. ω 会与 ρ 发生干涉, 总贡献比例为 $(21.4 \pm 2.3 \pm 2.0)\%$. 结果表明, 在排除运动学效应后, $\chi_{c1}(3872)$ 与 $J/\psi\rho$ 和 $J/\psi\omega$ 的耦合常数之比为 0.29 ± 0.04 , 比对一般粲夸克偶素的预期值高一个量级, 再次印证了 $\chi_{c1}(3872)$ 的奇特性.

此外, 理论普遍认为 $\chi_{c1}(3872)$ 的辐射衰变分支比可以揭示其内部结构^[15]. BaBar实验首次发现了 $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ 的迹象, 并测量了其相对于 $J/\psi\gamma$ 的衰变分支比^[16]. LHCb实验利用一、二期全部数据, 在 $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)K^+$ 衰变中首次以五倍标准偏差的显著度观测到了 $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ 衰变^[17], 并测得其相对于 $J/\psi\gamma$ 的衰变分支比为 $1.67 \pm 0.21 \pm 0.12 \pm 0.04$, 符合对 $\chi_{c1}(2P)$ 和紧致四夸克态的预言. 不过也有文章提出辐射衰变对 $\chi_{c1}(3872)$ 的长程结构并不敏感^[18].

谱形: 谱形是共振态的基本性质, 共振态的质量和宽度测量都基于谱形研究. $\chi_{c1}(3872)$ 的典型特征即质量在当前精度下无法与 $D^0\bar{D}^{*0}$ 阈值区分, 以及宽度极小. 对于新发现的共振态, 实验上往往采用Breit-Wigner谱形

对其进行描述. 在LHCb进行相关测量之前, 实验测得 $\chi_{c1}(3872)$ 的Breit-Wigner质量为 $3871.68 \pm 0.17 \text{ MeV}/c^2$, 宽度仅有基于90%置信水平的上限值 1.2 MeV ^[7]. 利用一期取数中底强子衰变产生的 $\chi_{c1}(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ 数据以及一、二期收集的所有 $B^+ \rightarrow \chi_{c1}(3872)(\rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-)K^+$ 样本, LHCb对 $\chi_{c1}(3872)$ 粒子的Breit-Wigner质量和宽度进行了全新测量^[19,20], 更新后的世界平均值分别为 $3871.65 \pm 0.06 \text{ MeV}/c^2$ 和 $1.19 \pm 0.21 \text{ MeV}$, 精度被大大提升.

除了质量和宽度, 谱形还可以为我们提供共振态更深层的信息. 理论上, Breit-Wigner谱形只能用来描述远离阈值的窄共振结构. 为了将 $D^0\bar{D}^{*0}$ 的阈值效应考虑在内, LHCb首次尝试了采用Flatté谱形描述 $\chi_{c1}(3872)$ ^[19]. 测得的Flatté质量峰值为 $3871.69^{+0.00+0.05}_{-0.04-0.13} \text{ MeV}$, 和Breit-Wigner谱形相符; 半高宽为 $0.22^{+0.06+0.25}_{-0.08-0.17} \text{ MeV}$, 显著低于Breit-Wigner宽度. 值得注意的是, 在考虑探测器分辨率和本底贡献之后, 两种谱形的差别变得难以分辨, 这体现了使用合理的谱形描述共振态的重要性.

利用测得的Flatté谱形, LHCb进一步对 $\chi_{c1}(3872)$ 态进行了极点研究, 结果显示在 $D^0\bar{D}^{*0}$ 散射振幅中存在两个奇点(图1). 其中, 主导 $\chi_{c1}(3872)$ 谱形的奇点位于物理面(physical sheet)上, 表示 $\chi_{c1}(3872)$ 可能是一个 $D^0\bar{D}^{*0}$ 的准束缚态, 且结合能在90%置信水平上小于100 keV. 此外, 两个奇点位置的不对称性还传递了 $\chi_{c1}(3872)$ 内部结构的信息. 利用Weinberg的复合粒子构成理论^[21], 该分析测定 $\chi_{c1}(3872)$ 中紧致态的组分比例应低于33%的水平. 此后, Belle和BESIII实验先后用不同衰变道对 $\chi_{c1}(3872)$ 进行了谱形分析^[22,23], 得到的结果与LHCb基本一致.

1.2 隐粲衰变中的类粲偶素四夸克态

通过 $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ 衰变在隐粲系统 $J/\psi\phi$ 中寻找类粲偶素四夸克态是LHCb的一项标志性奇特强子态研究. 2009年, CDF实验在 $J/\psi\phi$ 系统中发现了 $X(4140)$ 迹象^[24,25], 数年后, CMS实验首次观测到了它^[26]. 这些早期分析都只对 $J/\psi\phi$ 的质量谱进行了简单拟合, 2017年, LHCb终于用第一运行期数据对 $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ 进行

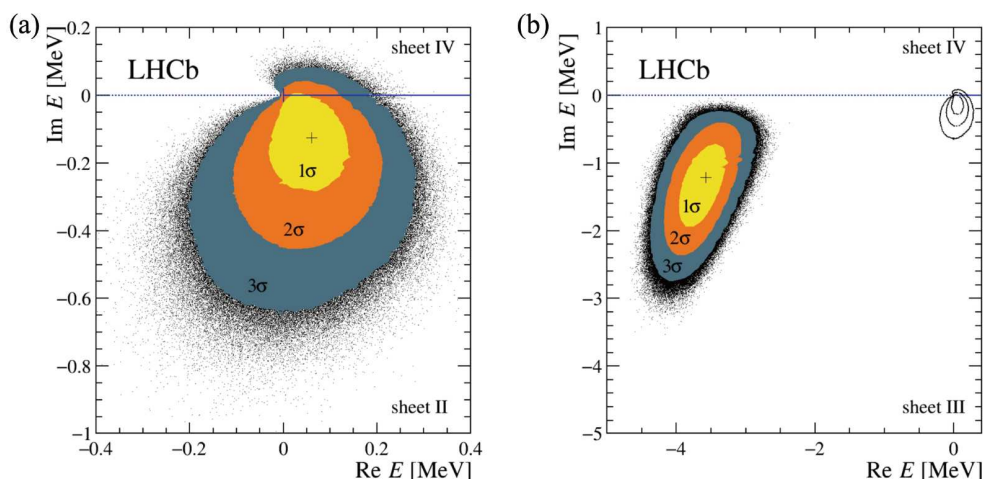


图 1 LHCb实验基于Flatté谱形测得的 $\chi_{c1}(3872)$ 在 $D^0\bar{D}^{*0}$ 散射振幅中的两个极点位置^[19]

Figure 1 Two pole positions of $\chi_{c1}(3872)$ in the $D^0\bar{D}^{*0}$ scattering amplitude obtained from the Flatté lineshape by the LHCb experiment^[19]

了首次全面分波分析^[27]，确认了 $X(4140)$ 的存在，并测得其量子数为 $J^{PC} = 1^{++}$ ，但其宽度较此前测量明显更大。此外，LHCb还在 $J/\psi\phi$ 系统中观测到了三个新的强子态： $J^{PC} = 1^{++}$ 的 $X(4274)$ 及 $J^{PC} = 1^{--}$ 的 $X(4500)$ 和 $X(4700)$ 。第二运行期取数完成后，LHCb实验上 $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ 的统计量又有了大幅提升，因此对其进行了全新的分波分析^[28]，除以更高显著度确认此前的4个 $X \rightarrow J/\psi\phi$ 强子态的贡献和量子数外，还观测到了新的共振态 $X(4685)$ 和 $X(4630)$ ，并确认前者量子数为 $J^P = 1^+$ 。随后，LHCb首次尝试对质子-质子对撞的衍射过程中的 $J/\psi\phi$ 质量谱进行了研究^[29]，其共振结构和此前 $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ 中的结果吻合， $X(4500)$ 和 $X(4274)$ 的显著度分别达到了5.5和4.3倍标准偏差。对 $J/\psi\phi$ 中这若干新隐粲强子态的归类，即它们是普通粲夸克偶素、强子分子态或紧致四夸克态，目前尚无定论。

除上述中性类粲偶素四夸克态外，实验上还观测到过若干带电的类粲偶素强子及其同位旋多重态，被命名为Z粒子。它们具有三个以上净组分夸克，是无可争议的隐粲四夸克态。典型的如 $Z_c(4430)^+$ ，在2008年被Belle实验首次观测到后^[30]，2014年LHCb实验终于利用 $B^0 \rightarrow \psi'\pi^- K^+$ 衰变道测定其量子数为 1^+ ^[31]。在其相似衰变道 $B^0 \rightarrow J/\psi\pi^- K^+$ 中，凭借比Belle和Babar实验大一个量级的数据样本，LHCb还在不依赖理论模型的条件发现了新的带电隐粲四夸克态存在的证明^[32]。

此外，仍有若干Z粒子，如 $Z_c(3900)$ 和 $Z_c(4020)$ 尚未被强子对撞实验观测到。确认它们的存在并测量其性质同样是LHCb实验的重要目标。

1.3 开粲衰变中的类粲偶素四夸克态

隐粲四夸克态也可以衰变到显粲介子对。LHCb曾在 $B^+ \rightarrow D^+D^-K^+$ 的分波分析中发现了隐粲共振态 $\chi_{c0}(3930) \rightarrow D^+D^-$ 的贡献^[33]，其质量和宽度与此前Belle实验在 $J/\psi\omega$ 衰变中发现的 $X(3915)$ 共振态一致^[34]。此后，LHCb又对 $B^+ \rightarrow D_s^+D_s^-K^+$ 衰变进行了研究，在 $D_s^+D_s^-$ 阈值附近发现了显著的峰状结构^[35]，可以由一个共振态 $X(3960)$ 解释（图2），其自旋宇称和 $\chi_{c0}(3930)$ 同为 0^{++} ，且二者质量和宽度在误差范围内一致。考虑到 D^+D^- 和 $D_s^+D_s^-$ 的不同阈值带来的动力学效应，多组理论认为 $X(3960)$ 和 $\chi_{c0}(3930)$ 是同一个粒子^[36-40]。但它到 $D_s^+D_s^-$ 的衰变宽度显著大于 D^+D^- ，而从真空激发出 $s\bar{s}$ 的概率显然低于 $u\bar{u}$ 或 $d\bar{d}$ ，这表明 $X(3960)$ 很有可能具有 $c\bar{c}s\bar{s}$ 的夸克组分，是一个奇特强子态。多组理论计算表明， $X(3960)$ 与 $D_s^+D_s^-$ 强子分子态的特点相符^[36-38]，也有计算结果显示，它可以被描述为一个 $c\bar{c}s\bar{s}$ 的紧致四夸克态^[39]。不过，也有理论家认为 $X(3960)$ 来自普通粲夸克偶素 $\chi_{c0}(2P)$ 的贡献^[40]。未来，LHCb将尝试发掘 $X(3960)$ 的其他衰变模式，如 $D^0\bar{D}^0$ 、 $J/\psi\omega$ 和 $\chi_{c0/2}(1P)\pi^+\pi^-$ 等来进一步研究其

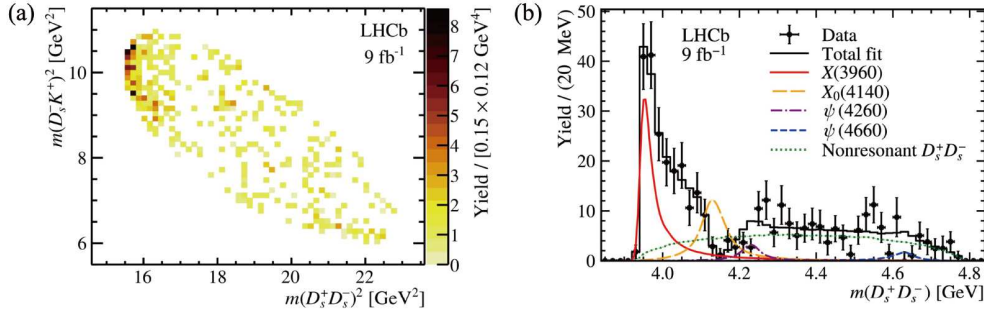


图2 LHCb实验 $B^+ \rightarrow D_s^+ D_s^- K^+$ 信号样本分布^[35]. (a) 达里兹分布, 在 $D_s^+ D_s^-$ 阈值处有明显带状结构; (b) $D_s^+ D_s^-$ 不变质量的振幅拟合结果, $D_s^+ D_s^-$ 阈值结果可以由 $X(3960)$ 描述

Figure 2 Layout of the $B^+ \rightarrow D_s^+ D_s^- K^+$ signal distributions from LHCb^[35]. (a) Dalitz distribution showing a band at $D_s^+ D_s^-$ threshold; (b) invariant mass distribution of $D_s^+ D_s^-$ overlaid with the amplitude fit result, where the threshold enhancement is described by $X(3960)$

性质.

近期, LHCb实验又对 $B^+ \rightarrow D^{*+} D^- K^+$ 衰变进行了分波分析^[41], 在 $D^{*+} D^-$ 系统中观测到了4个(类)粲偶素共振态, 分别为 $\eta_c(3945)(J^{PC} = 0^{-+})$ 、 $h_c(4000)(J^{PC} = 1^{+-})$ 、 $\chi_{c1}(4010)(J^{PC} = 1^{++})$ 和 $h_c(4300)(J^{PC} = 1^{+-})$, 其中 $\chi_{c1}(4010)$ 尤为受到关注. 它具有 χ_{c1} 的量子数, 质量介于 $\chi_{c1}(3872)$ 和 $\chi_{c1}(4140)$ (即 $X(4140)$)之间, 表明它可能有奇特强子态成分^[42].

2 含奇异夸克隐粲四夸克态的研究

在实验上确认类粲偶素四夸克态的存在后, 根据SU(3)味道对称性, 人们很自然地期待存在含奇异夸克的隐粲四夸克态. 在LHCb实验利用一、二期全部数据对 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 进行的分波分析中^[28], 除了此前介绍的 $J/\psi \phi$ 系统中的系列共振态之外, 还需要添加新的共振态成分才能描述信号分布(图3). 其中, $Z_{cs}(4000)^+ \rightarrow J/\psi K^+$ 的贡献显著度超出了五倍标准偏差. $Z_{cs}(4000)^+$ 带有正电荷且包含 s 夸克, 是一种全新且显然有四夸克态成分的强子态, LHCb还测定了其量子数为 $J^P = 1^+$. 稍早于此, BESIII实验在 $e^+ e^- \rightarrow K^+(D_s^- D^{*0} + D_s^{*-} D^0)$ 过程中也发现了组分为 $c\bar{c}s\bar{u}$ 的四夸克态 $Z_{cs}(3985)^+$ ^[43], 其质量接近 $Z_{cs}(4000)^+$ 但宽度明显更小, 二者是否为同一粒子还有待进一步研究. 和 $\chi_{c1}(3872)$ 类似, 理论界对 Z_{cs}^+ 存在紧致多夸克结构^[44-46]和强子分子结构^[47]两种主流观点.

对 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 的测量结果启发LHCb对其同位旋对称的衰变道 $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 也进行了研究^[48]. 因

为 K_S^0 的重建选择效率显著低于 K^+ , $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 的统计量有限. 因此, LHCb基于同位旋对称对 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 和 $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 进行了联合拟合(图4), 假设除 $Z_{cs}(4000)$ 外的分波在两个衰变道中完全一致. 拟合结果显示, $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 中存在与 $Z_{cs}(4000)^+$ 质量和宽度均一致的中性 Z_{cs} 强子态, 显著度高达4倍标准偏差. 同位旋多重态的存在对于理解 Z_{cs} 的内部结构具有重要意义. 值得一提的是, BESIII实验也在 $e^+ e^- \rightarrow K_S^0(D_s^+ D^{*-} + D_s^{*+} D^-)$ 中发现了 $Z_{cs}(3985)^-$ 的中性同位旋多重态的存在迹象^[49].

3 全粲四夸克态的发现

既然实验上已经发现了诸多含双重味夸克的四夸克态, 是否存在全重味的四夸克态呢? 历史上, 在粲夸克被观测到^[50,51]后不久, 就有理论学家预言存在全粲四夸克态($cc\bar{c}\bar{c}$)^[52]. 因为完全由重夸克组成, 全粲四夸克态的研究具有独特意义. 一是由于其质量较大, 强子内部的重夸克可以被视作非相对论性粒子, 大大简化了理论处理的复杂程度; 二是由于组分夸克都是重夸克, 在强子分子态的图像下, 无法通过交换轻强子这样的已知机制将两个粲夸克偶素束缚在一起. 受限于全粲四夸克态严苛的产生条件, 直到LHC运行, 对它的实验探索才成为了可能.

双 J/ψ 末态是寻找全粲四夸克态的黄金衰变道. LHCb利用全部的第一期和第二期运行数据, 对双 J/ψ 的不变质量谱进行了分析^[53]. 在 $6.9 \text{ GeV}/c^2$ 附近观测到一个窄峰 $X(6900)$, 并在两倍于 J/ψ 介子质量上端看到一个较宽的凸起结构(图5). 在超过5倍标准差的显著性

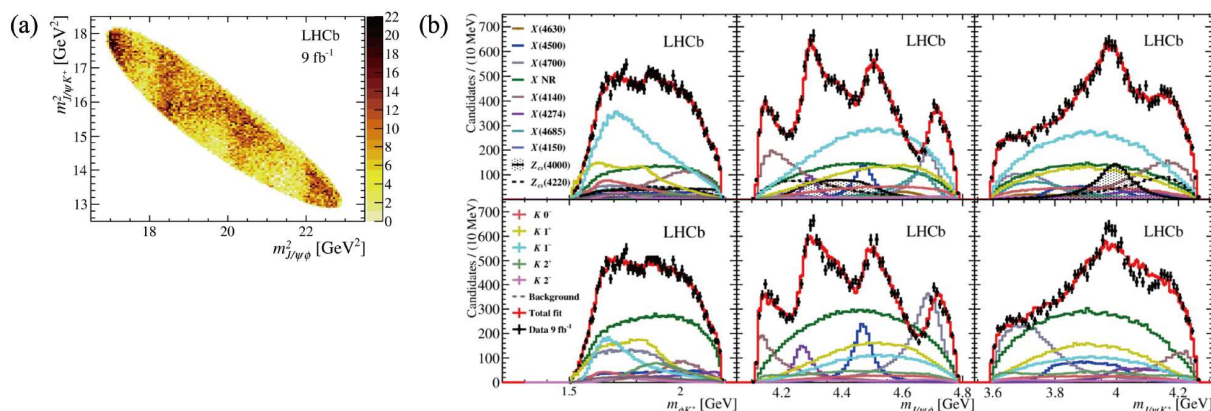


图3 LHCb实验 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 信号样本分布^[28]. (a) 达里兹分布, 展现了丰富的共振结构. (b) 振幅分析示意图. 黑色数据点为数据, 红色实线为拟合结果. 第一行包含新发现的四夸克态; 第二行只包含此前已知奇特强子态, 和数据有明显偏差

Figure 3 Layout of the (a) Dalitz distribution with rich resonant structures and (b) amplitude analysis of $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ from LHCb^[28]. The black dots with error bars represent the data, and red solid lines is the fit including new tetraquark states, while the bottom ones include only existing ones, thus showing obvious deviation from the data distribution

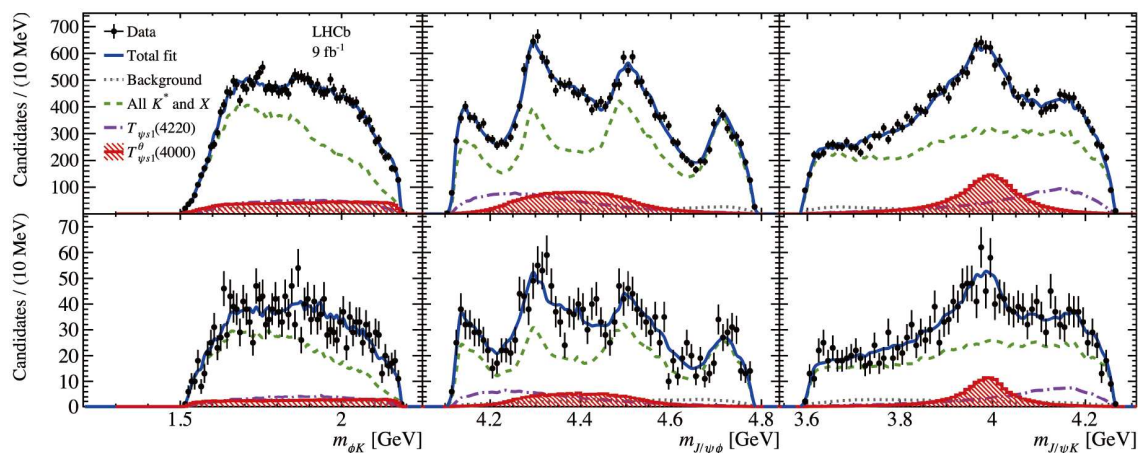


图4 LHCb实验 $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 和 $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ 的联合分波拟合结果. $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ 中有显著的 Z_{cs} 中性贡献^[48]

Figure 4 Layout of the joint amplitude fit to $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ and $B^+ \rightarrow J/\psi \phi K^+$ at LHCb, showing a significant neutral Z_{cs} component^[48]

水平上确认了新共振态的存在. 根据理论预言, 相应质量区间可能存在多个全粲四夸克态, 自旋宇称量子数相同的态之间会发生干涉. LHCb在不同的假设下对双 J/ψ 不变质量分布的成分进行了研究, 确认 $X(6900)$ 符合共振态谱形, 是全粲四夸克态的候选者. 这一发现此后已被ATLAS和CMS实验所证实^[54,55], 且CMS实验还观测到了一个新的全粲四夸克共振态 $X(6600)$.

$X(6900)$ 的发现引起了理论界的广泛关注, 多组团队根据不同模型对其成因进行了解读^[56-67]. 虽然 $X(6900)$ 的质量接近 $\chi_{c0}\chi_{c1}$ 的阈值, 但它的宽度近百 MeV, 不符合对强子分子态的直观预期. 考虑到重夸克之间的相互作用一般由交换胶子的短程力主导, 多数

理论认为它是紧致四夸克态^[56-63], 也有理论认为它可能是胶子与四粲夸克的混杂态^[64]. 此外, 几组基于耦合道散射模型的计算结果与LHCb观测到的双 J/ψ 不变质量谱相符^[65-68], 但文章也支持真正的四粲夸克共振态的存在. 近期, CMS实验利用三期数据, 确认了 $X(6600)$ 和 $X(6900)$, 并首次观测到 $X(7100)$ ^[69], 还测定三者的量子数为 $J^{PC} = 2^{++}$ ^[70], 为理解全粲四夸克体系提供了新的信息^[71]. 但要到 $X(6900)$ 等全粲四夸克态的内部结构下定论, 尚需更进一步的实验和理论探索.

除了全粲四夸克态, 多种理论模型还预言存在组分为 $bb\bar{b}\bar{b}$ 、 $bb\bar{c}\bar{c}$ 和 $b\bar{b}c\bar{c}$ 的全重四夸克态^[60-63].

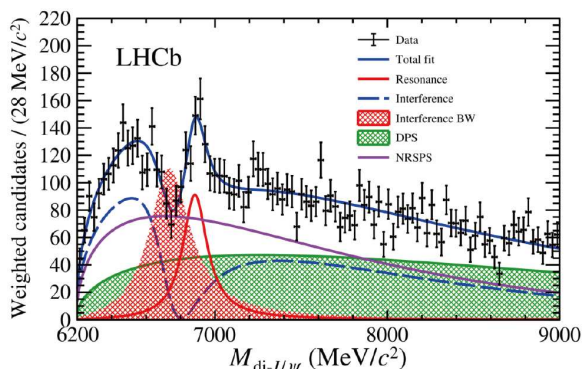


图5 LHCb实验双 J/ψ 不变质量谱与含干涉效应假设下的拟合结果^[53]

Figure 5 Invariant mass spectrum of J/ψ -pair signals from the LHCb experiment, overlaid with the fit result considering interference effect^[53]

$X(6900)$ 的测量为这些理论计算提供了关键信息,而理论预言又为下一阶段的实验研究指引了方向.此前,LHCb实验已经观测到了 $J/\psi + \psi(2S)$ 和 $J/\psi + Y$ 的关联产生,并对二者进行了截面测量^[72,73].随着实验数据的不断积累,LHCb将把不变质量谱的研究推广到 $J/\psi + \psi(2S)$ 和 $J/\psi + Y$ 乃至更多全重味介子末态,这有望为全重四夸克态的研究带来新的突破.

4 总结与展望

总而言之,LHCb实验对隐粲四夸克态的研究作出

了重要贡献,发现了多种全新隐粲四夸克态,包括全粲四夸克态和含奇异夸克的隐粲四夸克态等,推动了对已知奇特强子态如 $\chi_{c1}(3872)$ 的基本性质测量.虽然对奇特强子态的研究在稳步推进,但是我们距离对奇特强子态的内部结构模型达成共识仍任重道远.对实验测量结果最丰富的 $\chi_{c1}(3872)$ 而言,人们从最初的质量、产额测量,到测定其量子数,再到细致的谱形研究,对其了解逐步加深,却依然无法对它的本质下定论,更不必说其他仅被初步观测到的奇特强子态.这种现状为未来的奇特强子态研究留下了巨大的提升空间.

随着第三运行期取数的进行,LHCb将累积更多实验数据.针对隐粲四夸克态,一方面,LHCb将对已知粒子作进一步研究,如利用 $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \bar{D}^{*0} D^0$ 衰变提取 $\chi_{c1}(3872)$ 的谱形信息;测定全粲四夸克态的量子数等.另一方面,LHCb将持续探索新的奇特强子态,这是对不同理论模型的直接检验.同时,正如介子和重子的陆续发现促成了夸克模型的诞生,一个更完整的奇特强子谱有望为我们揭示奇特强子内部结构的深层规律.

自运行以来,LHCb实验展现了在强子谱学研究中的突出优势,为奇特强子态研究带来了诸多突破.我们期待LHCb实验为粒子物理领域展现更多惊喜,也期盼在理论与实验的共同努力下,终有一天可以解开强子内部结构之谜.

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. Version 1, CERN-TH-401, CERN, Geneva, 1964
- Dong X K, Guo F K, Zou B S. A survey of heavy-heavy hadronic molecules. *Commun Theor Phys*, 2021, 73: 125201
- Maiani L, Polosa A D, Riquer V. A theory of X and Z multiquark resonances. *Phys Lett B*, 2018, 778: 247–251
- Collaboration T L, Alves Jr A A, Filho L M A, et al. The LHCb detector at the LHC. *J Inst*, 2008, 3: S08005
- Choi S K, Olsen S L, Abe K, et al. Observation of a narrow charmoniumlike state in exclusive $B^\pm \rightarrow K^\pm \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 262001
- Workman R L, Burkert V D, Crede V, et al. Review of particle physics. *Prog Theor Exp Phys*, 2022, 2022(8): 083C01
- Abulencia A, Adelman J, Affolder T, et al. Analysis of the quantum numbers J^{PC} of the $X(3872)$ particle. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 132002
- Aaij R, Abellán Beteta C, Adeva B, et al. Determination of the $X(3872)$ meson quantum numbers. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 222001
- Barnes T, Godfrey S, Swanson E S. Higher charmonia. *Phys Rev D*, 2005, 72: 054026
- Choi S K, Olsen S L, Trabelsi K, et al. Bounds on the width, mass difference and other properties of $X(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays. *Phys Rev D*, 2011, 84: 052004
- Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellán Beteta C, et al. Measurement of $\chi_{c1}(3872)$ production in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ and 13 TeV. *J High Energ Phys*, 2022, 2022: 131
- Aaij R, Abellán Beteta C, Ackernley T, et al. Observation of multiplicity dependent prompt $\chi_{c1}(3872)$ and $\psi(2S)$ production in pp collisions. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 092001
- Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellán Beteta C, et al. Observation of sizeable ω contribution to $\chi_{c1}(3872) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ decays. *Phys Rev D*, 2023,

- 108: L011103
- 15 Swanson E S. Diagnostic decays of the $X(3872)$. *Phys Lett B*, 2004, 598: 197–202
- 16 Aubert B, Bona M, Karyotakis Y, et al. Evidence for $X(3872) \rightarrow \psi(2S)\gamma$ in $B^\pm \rightarrow X(3872)K^\pm$ decays and a study of $B \rightarrow c\bar{c}\gamma K$. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 132001
- 17 Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellan Beteta C, et al. Probing the nature of the $\chi_{c1}(3872)$ state using radiative decays. *J High Energy Phys*, 2024, 2024: 121
- 18 Guo F K, Hanhart C, Kalashnikova Y S, et al. What can radiative decays of the $X(3872)$ teach us about its nature? *Phys Lett B*, 2015, 742: 394–398
- 19 Aaij R, Abellán Beteta C, Ackernley T, et al. Study of the lineshape of the $\chi_{c1}(3872)$ state. *Phys Rev D*, 2020, 102: 092005
- 20 Aaij R, Abellán Beteta C, Ackernley T, et al. Study of the $\psi_2(3823)$ and $\chi_{c1}(3872)$ states in $B^+ \rightarrow (J/\psi\pi^+\pi^-)K^+$ decays. *J High Energy Phys*, 2020, 2020: 123
- 21 Weinberg S. Elementary particle theory of composite particles. *Phys Rev*, 1963, 130: 776–783
- 22 Hirata H, Iijima T, Kato Y, et al. Study of the lineshape of $X(3872)$ using B decays to $D^0\bar{D}^{*0}K$. *Phys Rev D*, 2023, 107: 112011
- 23 BESIII Collaboration. A coupled-channel analysis of the $X(3872)$ lineshape. 2023, arXiv: 2309.01502
- 24 Aaltonen T, Adelman J, Akimoto T, et al. Evidence for a narrow near-threshold structure in the $J/\psi\phi$ mass spectrum in $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ decays. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 242002
- 25 Aaltonen T, González B Á, Amerio S, et al. Observation of the $Y(4140)$ structure in the $J/\psi\phi$ mass spectrum in $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ decays. *Mod Phys Lett A*, 2017, 32: 1750139
- 26 Chatrchyan S, Khachatryan V, Sirunyan A M, et al. Observation of a peaking structure in the $J/\psi\phi$ mass spectrum from $B^\pm \rightarrow J/\psi\phi K^\pm$ decays. *Phys Lett B*, 2014, 734: 261–281
- 27 Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Observation of $J/\psi\phi$ structures consistent with exotic states from amplitude analysis of $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ decays. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 022003
- 28 Aaij R, Abellán Beteta C, Ackernley T, et al. Observation of new resonances decaying to $J/\psi K^+$ and $J/\psi\phi$. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 082001
- 29 Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellan Beteta C, et al. Observation of exotic $J/\psi\phi$ resonant structure in diffractive processes in proton-proton collisions. *Phys Rev Lett*, 2025, 134: 031902
- 30 Choi S K, Olsen S L, Adachi I, et al. Observation of a resonancelike structure in the $\pi^+\psi'$ mass distribution in exclusive $B \rightarrow K\pi^+\psi'$ decays. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 142001
- 31 Aaij R, Adeva B, Adinolfi M, et al. Observation of the resonant character of the $Z(4430)^-$ state. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 222002
- 32 Aaij R, Abellán Beteta C, Adeva B, et al. Model-independent observation of exotic contributions to $B^0 \rightarrow J/\psi K^+\pi^-$ decays. *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 152002
- 33 Aaij R, Abellán Beteta C, Ackernley T, et al. Amplitude analysis of the $B^+ \rightarrow D^+D_s^-K^+$ decay. *Phys Rev D*, 2020, 102: 112003
- 34 Choi S K, Olsen S L, Abe K, et al. Observation of a near-threshold $\omega J/\psi$ mass enhancement in exclusive $B \rightarrow K\omega J/\psi$ decays. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 182002
- 35 Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellan Beteta C, et al. Observation of a resonant structure near the $D_s^+D_s^-$ threshold in the $B^+ \rightarrow D_s^+D_s^-K^+$ decay. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 071901
- 36 Xin Q, Wang Z G, Yang X S. Analysis of the $X(3960)$ and related tetraquark molecular states via the QCD sum rules. *AAPPS Bull*, 2022, 32: 37
- 37 Bayar M, Feijoo A, Oset E. $X(3960)$ seen in $D_s^+D_s^-$ as the $X(3930)$ state seen in D^+D^- . *Phys Rev D*, 2023, 107: 034007
- 38 Mutuk H. Molecular interpretation of $X(3960)$ as $D_s^+D_s^-$ state. *Eur Phys J C*, 2022, 82: 1142
- 39 Guo D, Wang J Z, Chen D Y, et al. Connection between near the $D_s^+D_s^-$ threshold enhancement in $B^+ \rightarrow D_s^+D_s^-K^+$ and conventional charmonium $\chi_{c0}(2P)$. *Phys Rev D*, 2022, 106: 094037
- 40 Agaev S S, Azizi K, Sundu H. Resonance $X(3960)$ as a hidden charm-strange scalar tetraquark. *Phys Rev D*, 2023, 107: 054017
- 41 Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellan Beteta C, et al. Observation of new charmonium or charmoniumlike states in $B^+ \rightarrow D^{*+}D^{\mp}K^+$ decays. *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 131902
- 42 Xiao C W, Wu J J. Searching for bound states in the open strangeness systems. 2024, arXiv: 2406.08313
- 43 Ablikim M, Achasov M N, Adlarson P, et al. Observation of a near-threshold structure in the K^+ recoil-mass spectra in $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^+D^{*0} + D_s^{*-}D^0)$. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 102001
- 44 Giron J F, Lebed R F, Martinez S R. Spectrum of hidden-charm, open-strange exotics in the dynamical diquark model. *Phys Rev D*, 2021, 104: 054001
- 45 Jin X, Wu Y, Liu X, et al. Strange hidden-charm tetraquarks in constituent quark model. *Eur Phys J C*, 2021, 81: 1108
- 46 Maiani L, Polosa A D, Riquer V. The new resonances $Z_{cs}(3985)$ and $Z_{cs}(4003)$ (almost) fill two tetraquark nonets of broken $SU(3)_f$. *Sci Bull*, 2021, 66: 1616–1619
- 47 Yang Z, Cao X, Guo F K, et al. Strange molecular partners of the $Z_c(3900)$ and $Z_c(4020)$. *Phys Rev D*, 2021, 103: 074029

- 48 Aaij R, Abdelmotteleb A S W, Abellan Beteta C, et al. Evidence of a $J/\psi K_S^0$ structure in $B^0 \rightarrow J/\psi \phi K_S^0$ decays. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 131901
- 49 Ablikim M, Achasov M N, Adlarson P, et al. Evidence for a neutral near-threshold structure in the K_S^0 recoil-mass spectra in $e^+e^- \rightarrow K_S^0 D_s^+ D^{*-}$ and $e^+e^- \rightarrow K_S^0 D_s^{*+} D^-$. *Phys Rev Lett*, 2022, 129: 112003
- 50 Aubert J J, Becker U, Biggs P J, et al. Experimental observation of a heavy particle J . *Phys Rev Lett*, 1974, 33: 1404–1406
- 51 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
- 52 Chao K T. The $(cc)(\bar{c}\bar{c})$ (diquark-antidiquark) states in e^+e^- annihilation. *Z Phys C-Particles Fields*, 1981, 7: 317–320
- 53 LHCb collaboration. Observation of structure in the J/ψ -pair mass spectrum. *Sci Bull*, 2020, 65: 1983–1993
- 54 Aad G, Abbott B, Abeling K, et al. Observation of an excess of dicharmonium events in the four-muon final state with the ATLAS detector. *Phys Rev Lett*, 2023, 131: 151902
- 55 Hayrapetyan A, Tumasyan A, Adam W, et al. New structures in the $J/\psi J/\psi$ mass spectrum in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2024, 132: 111901
- 56 Chen H X, Chen W, Liu X, et al. Strong decays of fully-charm tetraquarks into di-charmonia. *Sci Bull*, 2020, 65: 1994–2000
- 57 Becchi C, Ferretti J, Giachino A, et al. A study of $cc\bar{c}\bar{c}$ tetraquark decays in 4 muons and in $D^{(*)}\bar{D}^{(*)}$ at LHC. *Phys Lett B*, 2020, 811: 135952
- 58 Karliner M, Rosner J L. Interpretation of structure in the di- J/ψ spectrum. *Phys Rev D*, 2020, 102: 114039
- 59 Wang Z G. Tetraquark candidates in LHCb's di- J/ψ mass spectrum. *Chin Phys C*, 2020, 44: 113106
- 60 Bedolla M A, Ferretti J, Roberts C D, et al. Spectrum of fully-heavy tetraquarks from a diquark+antidiquark perspective. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 1004
- 61 Lü Q F, Chen D Y, Dong Y B. Masses of fully heavy tetraquarks $QQ\bar{Q}\bar{Q}$ in an extended relativized quark model. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 871
- 62 Zhu R. Fully-heavy tetraquark spectra and production at hadron colliders. *Nucl Phys B*, 2021, 966: 115393
- 63 Ke H W, Han X, Liu X H, et al. Tetraquark state $X(6900)$ and the interaction between diquark and antidiquark. *Eur Phys J C*, 2021, 81: 427
- 64 Wan B D, Qiao C F. Gluonic tetracharm configuration of $X(6900)$. *Phys Lett B*, 2021, 817: 136339
- 65 Gong C, Du M C, Zhao Q, et al. Nature of $X(6900)$ and its production mechanism at LHCb. *Phys Lett B*, 2022, 824: 136794
- 66 Dong X K, Baru V, Guo F K, et al. Erratum: Coupled-channel interpretation of the LHCb Double- J/ψ spectrum and hints of a new state near the $J/\psi J/\psi$ threshold [Phys. Rev. Lett. 126, 132001 (2021)]. *Phys Rev Lett*, 2021, 127: 119901
- 67 Dong X K, Baru V, Guo F K, et al. Coupled-channel interpretation of the LHCb double- J/ψ spectrum and hints of a new state near the $J/\psi J/\psi$ threshold. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 132001
- 68 Wang J Z, Chen D Y, Liu X, et al. Producing fully charm structures in the J/ψ -pair invariant mass spectrum. *Phys Rev D*, 2021, 103: L071503
- 69 CMS Collaboration. Observation of a family of all-charm tetraquark candidates at the LHC. CMS-PAS-BPH-24-003
- 70 CMS Collaboration. Determination of the spin and parity of all-charm tetraquarks. 2025, arXiv: 2506.07944
- 71 Zhu F, Bauer G, Yi K. Experimental road to a charming family of tetraquarks ... and beyond. *Chin Phys Lett*, 2024, 41: 111201
- 72 LHCb Collaboration. Measurement of associated J/ψ - $\psi(2S)$ production cross-section in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. 2023, arXiv: 2311.15921
- 73 LHCb Collaboration. Associated production of prompt J/ψ and Y mesons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *J High Energ Phys*, 2023, 93: 2023

Summary for “LHCb实验上隐粲四夸克强子态研究进展”

Progress on study of hidden-charm tetraquark states at LHCb

Liupan An^{*}, Yuanning Gao, Zhenwei Yang & Yanxi Zhang

School of Physics, Peking University, Beijing 100091, China

^{*} Corresponding author, E-mail: anlp@pku.edu.cn

At the low-energy scale, quarks are always confined inside hadrons. Such a color confinement phenomenon is not yet fully understood in quantum chromodynamics (QCD), while hadron spectroscopy is a crucial way to probe it. In particular, the past decades have witnessed the prosperity of exotic hadrons composed of more than three valence quarks, which provide new insights into the color confinement regime. The LHCb experiment at the Large Hadron Collider (LHC) has been making remarkable contributions to the studies on exotic hadrons. This review presents the progress of studies on hidden-charm tetraquark resonances from the LHCb experiment.

First is the study of hidden-charm states composed of $c\bar{c}q\bar{q}$ ($q = u/d$), in particular, the $\chi_{c1}(3872)$ state. As the first discovered and most widely studied heavy exotic state, the $\chi_{c1}(3872)$ state has attracted lots of interest, but there is yet no consensus on its nature. LHCb performed a series of analyses targeting a better understanding of its internal structure, including measurements of its production cross-sections in proton-proton collisions, its decay properties, and its lineshape. In particular, LHCb tried for the first time to describe $\chi_{c1}(3872)$ with a Flatté lineshape to take into account its proximity to the $D^0\bar{D}^{*0}$ threshold, and performed a pole study. LHCb has also been investigating other hidden-charm states through both hidden-charm and open-charm decay modes. Using hidden-charm decay modes, LHCb observed a series of X states in the $J/\psi\phi$ system of the $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ decay, as well as in the $J/\psi\phi$ spectrum from diffractive processes of proton-proton collisions. LHCb also studied the $B^0 \rightarrow \psi'\pi^- K^+$ decay, leading to the measurement of the spin-parity number of $Z_c(4430)^+$ and the identification of new exotic contributions. As for open-charm decays, LHCb saw a huge threshold enhancement in the $D_s^+D_s^-$ system from the $B^+ \rightarrow D_s^+D_s^-K^+$ decay. It can be modelled by a $X(3960)$ resonance with spin-parity 0^{++} , which could be a strong candidate for a $c\bar{c}s\bar{s}$ tetraquark. Besides, four charmonium states are observed from the amplitude analysis of $B^+ \rightarrow D^{*\pm}D^\mp K^+$, out of which $\chi_{c1}(4010)$ is likely to have an exotic contribution.

Second is the study on hidden-charm tetraquark states containing a strange quark. In the amplitude analysis of the $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ decay, LHCb observed a significant contribution from $Z_{cs}(4000)^+ \rightarrow J/\psi K^+$, which is a manifestly exotic tetraquark state containing a strange quark. Its spin-parity is determined to be 1^+ . It is still to be investigated whether it is the same state as $Z_{cs}(3985)^-$ that which was observed earlier by BESIII $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^-D^{*0} + D_s^{*-}D^0)$. Later, LHCb extended the study to the $B^0 \rightarrow J/\psi\phi K_S^0$ decay, the isospin symmetric mode of $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$, and performed a joint amplitude study of the two modes. A neutral Z_{cs} state is found $B^0 \rightarrow J/\psi\phi K_S^0$ with a significance larger than three standard deviations. Its mass and width are consistent with those of $Z_{cs}(4000)^+$, so they are likely isospin partners.

Finally is the discovery of the four-charm tetraquark state. Theories predict the existence of four-charm tetraquark states as early as right after the observation of the charm quark. The operation of LHC makes it possible to experimentally explore it, for which the J/ψ -pair mode is considered a golden channel. In the invariant-mass spectrum of J/ψ -pair candidates, LHCb observed a peaking structure around $6.9 \text{ GeV}/c^2$, which was interpreted as a new resonance named $X(6900)$, and a wide bump above the J/ψ -pair mass threshold. The $X(6900)$ state is a candidate for a four-charm tetraquark, and has been confirmed by the ATLAS and CMS experiments afterwards.

In summary, LHCb continues to promote the studies on heavy exotic hadrons by both discovering new resonances and deepening the understanding of existing states. Along with the current third running period, LHCb will accumulate a much larger statistic. We can thus expect more exciting outcomes from LHCb on exotic hadrons in the future.

color confinement, exotic hadron, tetraquark, LHCb experiment

doi: [10.1360/CSB-2025-5439](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5439)