

Belle 实验 $\Upsilon(5S)$ 数据中新类底偶素态的寻找*

陈海云¹ 何熊宏^{2,†} 沈成平¹

(1 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

2014-11-05 收到

† email: hexionghong@gmail.com

DOI: 10.7693/wl20150204

Search for new bottomonium-like state in Belle $\Upsilon(5S)$ data

CHEN Hai-Yun¹ HE Xiong-Hong^{2,†} SHEN Cheng-Ping¹

(1 School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 Belle 实验组利用在 $\Upsilon(5S)$ 共振峰上采集的大数据样本, 对 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\Upsilon(nS)$ 和 $\pi^+\pi^-\text{h}_b(mP)$ ($n=1, 2, 3, m=1, 2$)过程进行了研究, 在 $\pi^+\Upsilon(nS)$ 和 $\pi^+\text{h}_b(mP)$ 的系统中, 同时观测到了两个新的带电类底偶素结构—— $Z_b(10610)$ 和 $Z_b(10650)$ 。它们衰变到底偶素末态, 同时还带有电荷, 所以它们的组成成份中至少含有4个夸克。最近, 对 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma\Upsilon(1S)$ 过程也进行了研究, 在 $\omega\Upsilon(1S)$ 系统中对类 $X(3872)$ 的底偶素态 X_b 进行了寻找。

关键词 $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$, $X(3872)$, X_b , 底偶素, 类底偶素

Abstract Using data samples collected with the Belle detector at the $\Upsilon(5S)$ resonance, the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\Upsilon(nS)$ and $\pi^+\pi^-\text{h}_b(mP)$ ($n=1, 2, 3, m=1, 2$) processes were investigated. Two charged bottomonium-like states $Z_b(10610)$ and $Z_b(10650)$ were observed in the $\pi^+\Upsilon(nS)$ and $\pi^+\text{h}_b(mP)$ invariant mass distributions. Since they decay into bottomonium states and are charged, they must have at least four quarks in their composition. Very recently, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma\Upsilon(1S)$ was also studied, and a search for the $X(3872)$ -like state, X_b , was performed in the bottom sector.

Keywords $Z_b(10610)$, $Z_b(10650)$, $X(3872)$, X_b , bottomonium, bottomonium-like

目前, 粒子物理学家普遍认为, 夸克和轻子是组成物质世界的基本单元。所有的强子是由夸克和反夸克组合形成的。通过强相互作用, 三个夸克或三个反夸克形成一个重子, 一个夸克和一个反夸克形成一个介子。目前描述这种强相互作用最成功的理论模型是量子色动力学(QCD)。由一对正反粲夸克(cc)或一对正反底夸克(bb)形成的介子被称为粲偶素或底偶素, 它们是研究低能区QCD理论的理想载体。QCD理论也允许更复杂

的粒子结构存在, 如多于三个夸克的多夸克态、强子与强子束缚形成的分子态、夸克与胶子(强相互作用的媒介粒子)组成的混杂态以及由多个胶子形成的胶球态等, 这些统称为奇特强子态。21世纪以来, 随着实验数据的积累和实验技术的提高, 人们观测到了许多可能的奇特强子态候选者, 尤其是位于美国斯坦福直线加速器中心的BABAR实验、日本KEK的Belle实验以及我国北京正负电子对撞机上的BESIII实验。人们无法将这些奇特粒子简单地归于介子或者重子的范畴, 通常统称为XYZ粒子。但到目前为止, 没有足够

* 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: YWF-14-WLXY-013)、国家自然科学基金(批准号: 11475187)资助项目

的证据表明它们就是具有上述 QCD 容许的复杂结构。

2003 年, Belle 实验发现第一个 XYZ 粒子——X(3872)^[1]。随后 CDF、D0、BABAR、LHCb 和 CMS 等实验在不同的产生和衰变过程中都证实了它的存在。自从发现 X(3872) 以来, 人们对它的研究已经超过了 10 年, 包括它的质量、宽度、衰变过程以及表征粒子特征的自旋(J)、宇称(P)和电荷共轭宇称(C)量子数 J^{PC} 等都得到很好的测量, 但它的组成成份依然没有定论。它可能是四夸克态^[2]、分子态^[3]、夸克胶子混杂态^[4]、域效应^[5]以及夸克对与反夸克对的组合态^[6]等。X(3872) 的宽度很窄, 与粲偶素粒子 J/ψ 的激发态类似, 可通过强子跃迁或辐射跃迁衰变到 J/ψ 或 ψ' , 但由于其质量与理论预期并不相符等原因, 只能称它为一种类粲偶素粒子; 同时, 它的质量与 $D^0\bar{D}^0$ 的阈值极为接近, 衰变到 $D^0\bar{D}^0\pi^0$ 的几率非常高^[7], 很像 D^0 与 \bar{D}^0 通过极小的结合能形成的分子态^[3]。最新的 LHCb 实验测量结果更倾向于 X(3872) 是类夸克偶素 $\chi_{c1}(2P)$ 与 $D^0\bar{D}^0$ 分子态的混合态^[8]。

在底夸克偶素家族(包括 Υ 、 η_b 、 h_b 及其激发态等)中, $\Upsilon(5S)$ 是质量较重($10.876 \text{ GeV}/c^2$)、宽度较大的(55 MeV)^[7]。一直以来, 实验上对底夸克偶素的研究主要来自 $\Upsilon(4S)$ 能量及以下的实验数据, 对 $\Upsilon(5S)$ 的了解很少。Belle 实验在 2005 年开始采集 $\Upsilon(5S)$ 共振态附近的实验数据, 截止到 2010 年为止, 获取的数据量达到 121 fb^{-1} , 相当于产生了大约 40000000 个 $\Upsilon(5S)$ 粒子。基于这些实验数据, 对 $\Upsilon(5S)$ 强子跃迁的研究给粒子物理学带来了许多惊喜和挑战。2008 年, Belle 实验组观测到了 $\Upsilon(5S)$ 通过 $\pi^+\pi^-$ 跃迁到 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S)$ 的过程, 而跃迁的几率是比 $\Upsilon(5S)$ 质量小的底夸克偶素之间通过 $\pi^+\pi^-$ 跃迁的几率的近 100 倍^[9]。进一步的实验分析发现, 底夸克对产生总截面中的 $\Upsilon(5S)$ 峰位和 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\Upsilon(nS)$ ($n=1, 2, 3$) 截面中的峰位有明显差别^[10]。人们开始意识到, $\Upsilon(5S)$ 共振态附近的结构可能比通常认识的更为复杂。

2012 年, Belle 实验又观测到 $\Upsilon(5S)$ 到 $\Upsilon(3S)$ 、 $h_b(1P)$ 和 $h_b(2P)$ 的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁, 并发现其跃迁几率也

远大于预期^[11], 这也是底偶素 $h_b(1P)$ 和 $h_b(2P)$ 首次被观测到。理论上, 相对于 $\Upsilon(nS)$, 由于是自旋反转的过程, $\Upsilon(5S)$ 到 $h_b(1P)$ 和 $h_b(2P)$ 的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁应该受到一定程度的压制, 而实验中并没有观测到明显的压制迹象。以上观测到的反常实验现象, 促使 Belle 实验组进一步研究上述 $\Upsilon(5S)$ 的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁过程中的共振结构, 尤其是 $\pi^+\Upsilon(nS)$ 和 $\pi^+h_b(mP)$ 系统的质量分布, 从而发现了带有电荷的 $Z_b(10610)$ 和 $Z_b(10650)$ ^[12]。图 1 显示了 $\pi^+\Upsilon(2S)$ 的不变质量分布及其中的 Z_b 态, 它们的质量分别接近 $B\bar{B}^*$ 和 $B^*\bar{B}$ 的质量阈值, 宽度分别为 18.4 MeV 和 11.5 MeV , 通过单个 π^+ 或 π^- , 可跃迁到 $\Upsilon(nS)$ 或 $h_b(mP)$, 也可跃迁到 $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ ^[13]。这是继带电的类粲偶素态 $Z_c(4430)$ 之后, 实验中又一次观测到带电荷的类夸克偶素共振态, 也是迄今为止, 唯一被发现的带电的类底偶素共振态。2013 年, Belle 实验在 $\pi^0\Upsilon(nS)$ 不变质量谱中也观测到了中性的 $Z_b(10610)$ ^[14], 从而确定了它们同位旋(粒子的特征量子数)矢量的性质。对它们的结构, 目前有几种不同的解释, 包括强子—夸克偶素态^[15], 分子态^[16], 四夸克态^[17]等。 Z_b 粒子的发现在一定程度上解释了 $\Upsilon(5S)$ 的 $\pi^+\pi^-$ 反常跃迁过程, 但也让 $\Upsilon(5S)$ 的成分变得更加扑朔迷离。

Z_b 粒子的发现使人们开始进一步寻找带有电荷的类粲偶素粒子。2013 年是类粲偶素 Z_c 粒子的丰收年, 人们相继发现了 $Z_c(3900)$ 、 $Z_c(4025)$ 、 Z_c

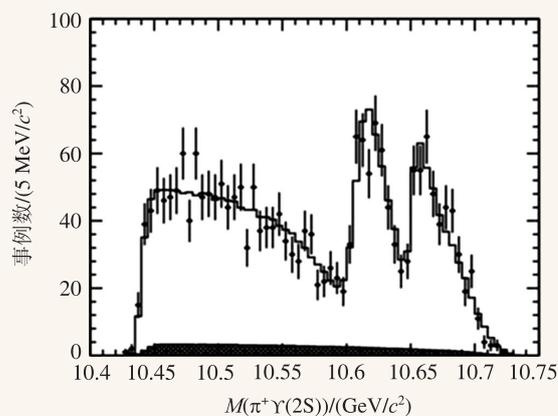


图 1 $\Upsilon(5S)$ 通过 $\pi^+\pi^-$ 跃迁到 $\Upsilon(2S)$ 过程中 $\pi^+\Upsilon(2S)$ 的质量谱。其中带误差棒的黑点是实验数据点, 实线是拟合结果, 阴影直方图代表本底。图中的两个峰分别为 $Z_b(10610)$ 和 $Z_b(10650)$

(4020)和 $Z_c(3885)$ 等。其中, $Z_c(3900)$ 几乎同时被 BESIII 和 Belle 实验组观测到^[18, 19],随后美国西北大学的实验小组利用 CLEO-c 的实验数据也证实了它的存在^[20]。与 Z_b 类似,它的质量接近 $D^*\bar{D}$ 的质量阈值,通过单个 π 跃迁到 J/ψ 。 $Z_c(3900)$ 的发现也被美国物理学会主编的 *Physics* 杂志评为 2013 年物理领域十一项研究成果热点之首。这些 Z_c 粒子的发现暗示,目前观测到的两个 Z_b 粒子并不是带电类底偶素的全部,它们也可能存在一个系列。

在底偶素能区,除了以上可能的 Z_b 奇特强子态,理论上也预言存在类似于 $X(3872)$ 的类底偶素^[21],这里称它为 X_b 。寻找这种奇特共振态,对进一步理解 $X(3872)$ 的属性以及 QCD 理论模型显得尤为重要和迫切。CMS 实验测量了 10—11 GeV/c^2 区

间 $\pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ 的不变质量谱,并没有观测到 X_b 信号^[22]。 X_b 和 $X(3872)$ 相似,具有 $J^C=1^{++}$ 的特征量子数,因此它可以通过 $\Upsilon(5S)$ 辐射跃迁产生。与 $X(3872)$ 到 J/ψ 的跃迁不同, X_b 与 $\Upsilon(1S)$ 的质量差较大,通过同位旋守恒的过程 $X_b\rightarrow\omega\Upsilon(1S)$ 的衰变几率要比通过同位旋破坏的过程 $X_b\rightarrow\rho^0\Upsilon(1S)\rightarrow\pi^+\pi^-\Upsilon(1S)$ 的衰变几率大得多^[23, 24]。所以,利用 Belle 实验获取的 $\Upsilon(5S)$ 的数据样本,中国小组成员分析了 $\Upsilon(5S)\rightarrow\gamma\omega\Upsilon(1S)$ 的过程,在 $\omega\Upsilon(1S)$ 的不变质量谱上寻找可能的 X_b 的态^[25]。经过所有的信号事例选择后,图 2 显示了 $\omega\Upsilon(1S)$ 的不变质量分布。理论预言 X_b 的质量应该在 10.55—10.65 GeV/c^2 范围内,而在这个质量范围内,没有观测到任何明显的结构存在。假设 X_b 的质量为 10.6 GeV/c^2 ,在 90% 置信水平下,测量得到的分支比连乘值 $\text{Br}(\Upsilon(5S)\rightarrow\gamma X_b)\text{Br}(X_b\rightarrow\omega\Upsilon(1S))$ 小于 2.9×10^{-5} 。

虽然在 10.55—10.65 GeV/c^2 范围内没有观测到任何 X_b 信号存在的迹象,然而在 10.42 GeV/c^2 处有一个明显的峰,进一步研究发现,该峰来自 $\Upsilon(5S)\rightarrow\omega\chi_{b1}\rightarrow\omega\gamma\Upsilon(1S)$ 过程(即具有相同的末态,但中间态的过程不同),这意味着我们首次观测到清楚的 $\Upsilon(5S)$ 通过 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 或 ω 强子跃迁到 χ_{b1} 的过程。图 3 显示了 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 的不变质量的分布,可以观测到清楚的 ω 信号,除此之外,在 0.9 GeV/c^2 附近还有一些事例不是来自 ω 衰变,我们称这些为非 ω 事例。伴随 ω 和非 ω 的 $\gamma\Upsilon(1S)$ 的质量谱分别显示在图 4(a)和图 4(b)中,可以看到有明显的 χ_{b1} 和 χ_{b2} 的信号。由于 χ_{b0} 到 $\gamma\Upsilon(1S)$ 的衰变分支很小^[7],所以几乎没有 χ_{b0} 的信号。实验的测量结果再一次表明 $\Upsilon(5S)$ 性质的奇特:第一,测量得到 $\Upsilon(5S)$ 通过 $\pi^+\pi^-\pi^0/\omega$ 跃迁到 χ_{b1} 和 χ_{b2} 的分支比在 10^{-3} 量级,这与 $\Upsilon(5S)$ 到 $\pi^+\pi^-\Upsilon(nS)$ 的分支比处于同一数量级,这种反常可能是由于 $\Upsilon(5S)$ 的质量在 $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ 质量阈值之上,从而使 $\Upsilon(5S)$ 的强子跃迁得到增强(所谓的圈图效应)^[26];第二, $\Upsilon(5S)$ 到 $\omega\chi_{b1}$ 和 $\omega\chi_{b2}$ 的分支比的比值跟重味夸克对称理论^[27]的预期存在很大差异,可能的解释包括 $\Upsilon(5S)$ 共振态附近存在 $B^{(*)}\bar{B}^{(*)}$ 分子态^[28],或者 $\Upsilon(5S)$ 不是纯 S 波态,而是 S 波和 D 波的混合^[27];最后,观测到的明显的非 ω 信号的

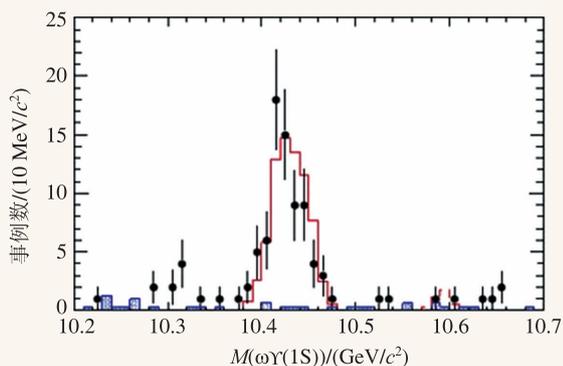


图 2 $\Upsilon(5S)\rightarrow\gamma\omega\Upsilon(1S)$ 的过程中 $\omega\Upsilon(1S)$ 的不变质量谱。其中带误差棒的黑点是实验数据点,实线来自模拟的 $\Upsilon(5S)\rightarrow\omega\chi_{b1}$ 过程的贡献,阴影直方图代表本底

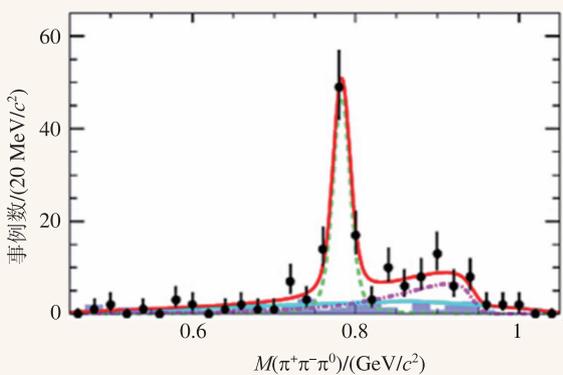


图 3 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 不变质量的分布。其中带误差棒的黑点为实验数据点,阴影直方图代表本底事例,实线为拟合结果,绿色虚线和粉红色虚线分别代表 ω 和非 ω 的信号形状

事例可能含有来自 $Z_b \rightarrow \rho \chi_b$ 过程的贡献^[28]，这需要将采用更大的实验数据样本来证实。

日本高能加速器研究机构目前正在将 Belle 实验升级成超级 B 介子工厂 BelleII 实验，前期的软件和硬件准备工作即将完成，预期 2016 年 10 月开

始采集数据。根据计划，BelleII 将在 2020 年前收集 50 倍于 Belle 的实验数据，总的积分亮度达 50 ab^{-1} ，而且可能会获取更高能量在 $\Upsilon(6S)$ 共振态附近的

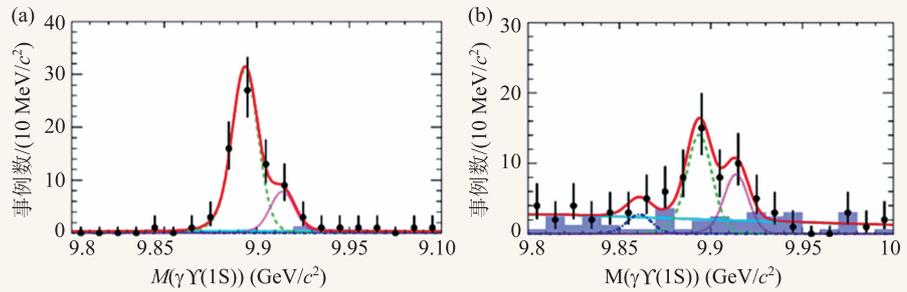


图4 伴随(a) ω 和(b)非 ω 产生的 $\gamma\Upsilon(1S)$ 不变质量的分布。其中带误差棒的黑点为实验数据点，阴影直方图代表本底事例，实线为拟合结果，绿色虚线、粉红色虚线和蓝色虚线分别代表 χ_{b1} 、 χ_{b2} 和 χ_{b0} 的信号形状

实验数据样本。届时，利用 BelleII 采集的海量数据样本，寻找新的类底偶素态的研究将会进入一个新的时代。

参考文献

- [1] Belle Collaboration, Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 262001
- [2] Matheus R D, Narison S, Nielsen M *et al.* Phys. Rev. D, 2007, 75: 014005; Barnea N, Vijande J, Valcarce A. Phys. Rev. D, 2006, 73: 054004
- [3] Swanson E S. Phys. Lett. B, 2004, 588: 189
- [4] Li B A. Phys. Lett. B, 2005, 605: 306
- [5] Rosner J L. Phys. Rev. D, 2006, 74: 076006
- [6] Maiani L, Piccinini F. Phys. Rev. D, 2005, 71: 014028
- [7] Particle Data Group, Olive K A *et al.* Chin. Phys. C, 2014, 38: 090001
- [8] LHCb collaboration, Aaij R. Nucl. Phys. B, 2014, 886: 665
- [9] Belle Collaboration, Chen K F *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 112001
- [10] Belle Collaboration, Chen K F *et al.* Phys. Rev. D, 2010, 82: 091006(R)
- [11] Belle Collaboration, Adachi I *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 032001
- [12] Belle Collaboration, Bondar A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 122001
- [13] Belle Collaboration, Adachi I *et al.* arXiv: 1209.6450
- [14] Belle Collaboration, Krokovny P *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 88: 052016
- [15] Danilkin I V, Orlovsky V D, Simonov Y A. Phys. Rev. D, 2012, 85: 034012
- [16] Bugg D. Europhys. Lett., 2011, 96: 11002
- [17] Karliner M, Lipkin H J. arXiv: 0802.0649
- [18] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001
- [19] Belle Collaboration, Liu Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002
- [20] Xiao T, Dobbs S, Tomaradze A *et al.* Phys. Lett. B, 2013, 727: 366
- [21] Hou W S. Phys. Rev. D, 2006, 74: 017504
- [22] CMS Collaboration, Chatrchyan S *et al.* Phys. Lett. B, 2013, 727: 57
- [23] Li G, Wang W. Phys. Lett. B, 2014, 733: 100
- [24] Guo F K, Hidalgo-Duque C, Nieves J *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 88: 054007
- [25] Belle Collaboration, He X H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 142001
- [26] Chen D Y, Liu X, Matsuki T. Phys. Rev. D, 2014, 90: 034019
- [27] Guo F K, Meißner U G, Shen C P. Phys. Lett. B, 2014, 738: 172
- [28] Li X, Voloshin M B. Phys. Rev. D, 2014, 90: 014036