

发现 $Z_c(3900)$ ——一个带电类粲偶素共振结构*

刘智青^{1,†} 沈成平^{2,3} 苑长征¹

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 北京航空航天大学宇宙中的核物理交叉研究中心 北京 100191)

(3 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

2013-07-07 收到

† email: zqliu@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20131006

Observation of a charged charmonium-like state $Z_c(3900)$

LIU Zhi-Qing^{1,†} SHEN Cheng-Ping^{2,3} YUAN Chang-Zheng¹

(1 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 International Research Center for Nuclei and Particles in the Cosmos, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3 School of physics, Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要 北京谱仪(BESⅢ)实验和 Belle 实验利用两种不同的方法对 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 过程进行了研究。在 π^+J/ψ 系统中,同时观测到了一个新的带电类粲偶素结构—— $Z_c(3900)$ 。 $Z_c(3900)$ 耦合到粲偶素末态,因此其内部夸克组分应该含有正反粲夸克;同时它还带有电荷,故不可能仅由正反粲夸克组成。 $Z_c(3900)$ 共振态中最少含有4个夸克,极有可能是一个奇特态强子。

关键词 $Z_c(3900)$, 粲偶素, 类粲偶素, 奇特态强子

Abstract Using data samples collected with the BESIII detector at an e^+e^- centre-of-mass energy of 4.26 GeV and with the Belle detector on or near the $\Upsilon(nS)$, $n=1, \dots, 5$, resonances, the $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ process was investigated through different approaches. Both detectors observed a charged charmonium-like state in the invariant mass distribution of π^+J/ψ . This new structure, called $Z_c(3900)$, couples strongly to a charmonium and is charged, so it cannot be a conventional charmonium state, but can be interpreted as an exotic hadron with at least four quarks.

Keywords $Z_c(3900)$, charmonium, charmonium-like state, exotic hadron

粒子物理学认为,构成物质世界的各种粒子是由最基本的夸克组成的。在夸克模型中,由3个夸克构成的粒子称为重子(如质子及中子),由夸克—反夸克对构成的粒子称为介子(如 π 介子)。将夸克或反夸克组合成重子或者介子的力很强,作用范围很小(约 10^{-15} m,原子核尺寸大小),叫做强相互作用力。重子和介子也因此被统称为

强子。目前,描述强相互作用力最好的理论是量子色动力学(简称QCD)。夸克模型能够解释目前实验上观测到的绝大多数粒子的结构,是一个被人们广泛接受的模型。但是在QCD的理论框架下,对强子的夸克组成却没有太多的限制。除了允许夸克模型中由3个夸克构成的重子和正反夸克对构成的介子,也不排除存在含有4个或4个以上夸克组成的多夸克态,强子和强子束缚在一起形成的强子分子态,以及夸克和传播强相互作用力的媒介粒子—胶子构成的夸克、胶子混杂态

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB825203)、国家自然科学基金(批准号:11235011,10935008,10825524)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

等,甚至可能存在完全由胶子构成的胶子球。这些除重子和介子以外的强子,通常被称为奇特态强子。虽然实验上人们一直在努力寻找,但是到目前为止,还没有确切的证据表明奇特态强子已经被找到。

近年来,随着粒子物理实验手段的不断改进,人们对奇特态强子的研究取得了很大的进展。特别是B介子工厂(是指位于美国斯坦福直线加速中心的BABAR实验、位于日本高能加速器研究机构的Belle实验)和 τ -粲工厂(是指北京正负电子对撞机BES III实验)的运行,使得人们在粲偶素能区发现了很多新的粒子。这些新发现的粒子,质量都很重,宽度比较窄,衰变末态中含粲偶素,因此其内部夸克组分含有正反粲夸克对。但是这些新发现的粒子却很难将其归类为普通的粲偶素,通常被称为类粲偶素。其中有一些类粲偶素性质看起来比较奇特,可能是奇特态强子的信号。例如,势模型在4 GeV以上预言的矢量态(具有自旋 (J) 、宇称 (P) 和电荷共轭宇称 (C) 量子数 $J^{PC}=1^{-}$)粲偶素态只有 $\psi(4040)$ 、 $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)^{[1,2]}$,它们在 R 值测量实验中已经被观测到了。但是,BABAR实验和Belle实验后来发现了类粲偶素 $Y(4008)$ 、 $Y(4260)$ 、 $Y(4360)$ 和 $Y(4660)^{[3]}$,它们都具有 $J^{PC}=1^{-}$ 。这样的话,矢量态粲偶素的个数就超过了势模型的预言,这说明它们不可能全部都是普通的粲偶素态。在底夸克偶素能区也有类似的发现。

2008年升级完成的北京正负电子对撞机和北京谱仪BES III实验是一个 τ -粲工厂,它在正负电子质心系能量为2—5 GeV之间运行,为深入研究(类)粲偶素粒子提供了一种更直接有效的研究方法。BES III采用直接正负电子对撞产生粲偶素或类粲偶素的方式,可以积累高统计量的数据样本,本底也比较容易控制。2012年12月14日至2013年1月14日,BES III探测器在质心系能量 $E_{\text{cm}}=4.26$ GeV处采集数据,该能量点对应于类

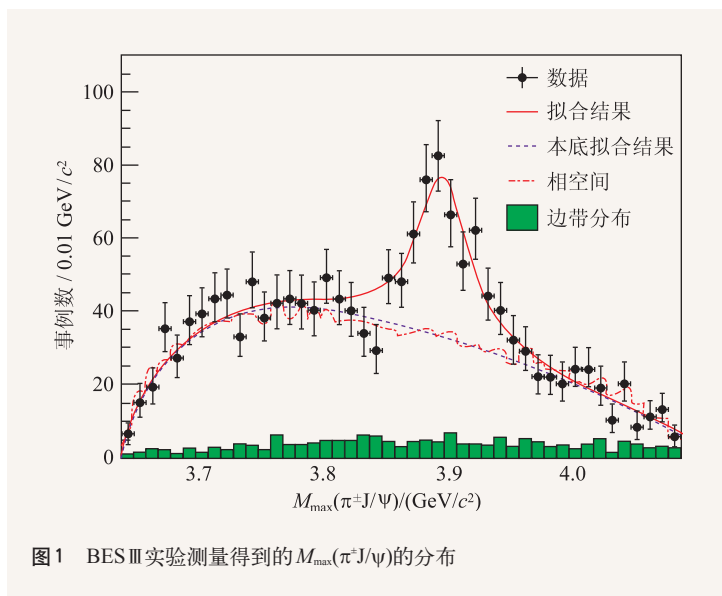


图1 BES III实验测量得到的 $M_{\text{max}}(\pi^+J/\psi)$ 的分布

粲偶素态 $Y(4260)$ 产生截面的峰值^[3]。BES III积累的数据样本亮度为 525 pb^{-1} ,约产生了33,000个 $e^+e^- \rightarrow Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 事例。 $Y(4260)$ 共振态质量位于 $D\bar{D}$ 阈值之上,却和粲偶素末态有很强的耦合。目前已知的 $Y(4260)$ 主要衰变模式为 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 。因此,可以尝试在该衰变过程中寻找新的可能的中间态类粲偶素。数据样本经过事例选择,得到了1595个 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 信号事例,样本纯度高达90%。

对选择出来的 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 信号事例进行分析,发现在该衰变过程中,存在丰富的中间共振结构。例如 $\pi^+\pi^-$ 可以先形成S波共振态 $\sigma(500)$ 和 $f_0(980)$ 等。另外, π^+J/ψ 的质量谱上存在一个明显的结构。经过仔细的检查,排除了 π^+J/ψ 质量谱上的结构来自 $\pi^+\pi^-$ 共振态及其干涉的可能性。图1显示了BES III实验测量得到的 π^+J/ψ 质量和 π^-J/ψ 质量中较大的一个—— $M_{\text{max}}(\pi^+J/\psi)$ 的分布。带误差棒的黑点代表数据,阴影直方图代表了本底事例的分布。可以看到,在数据中 $3.9 \text{ GeV}/c^2$ 处存在一个结构,而在本底事例中却没有。通过对 $M_{\text{max}}(\pi^+J/\psi)$ 分布进行拟合,可以得到该结构的质量 $M=3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9 \text{ MeV}/c^2$,宽度 $\Gamma=46 \pm 10 \pm 20 \text{ MeV}/c^2$ 。这里第一项误差为统计误差,第二项误差为系统误差。BES III将该新发现的结构称之为 $Z_c(3900)^{[4]}$ 。检查 $Z_c(3900)$ 信号的统计显著性,发现在各种本

底假设情况下都大于 8σ ，即这个结构是由本底涨落而形成的概率小于 10^{-16} 。

在类粲偶素态 $Y(4260)$ 粒子的衰变产物中寻找新的带电类粲偶素结构，不仅仅可以在BES III实验中进行，在Belle实验中同样可以进行。事实上，上面已经提到， $Y(4260)$ 粒子最初就是在B介子工厂实验中，利用和BES III实验完全不同的研究方法(初态辐射法)发现的^[3]。所谓初态辐射，是指正负电子在发生对撞的时候，从电子或者正电子上辐射出一个或多个光子，从而降低正负电子对撞能量。Belle实验的正负电子质心系能量约在10 GeV附近，如果辐射的光子能量达到5—6 GeV左右，那么正负电子质心系能量就会降低到了4—5 GeV，而这恰好就是类粲偶素 $Y(4260)$ 的产生能量。Belle实验从1999年开始运行，至2010年正式停机，总共积累了约 1000 fb^{-1} 的数据。图2(左)显示了Belle采用初态辐射技术，利用 967 fb^{-1} 数据样本选择出来的 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 信号事例的质量分布，可以看到明显的 $Y(4260)$ 信号。通过要求 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 质量位于4.15和4.45 GeV/c^2 之间，可以选择出689个 $Y(4260)\rightarrow\pi^+\pi^-J/\psi$ 衰变的信号事例，大约为BES III实验的一半。

图2(右)显示了Belle实验在 $Y(4260)\rightarrow\pi^+\pi^-J/\psi$ 过程中测量得到的 $M_{\max}(\pi^+J/\psi)$ 分布。可以看到，在3.9 GeV/c^2 附近存在一个明显高于本底的共振

结构。通过拟合 $M_{\max}(\pi^+J/\psi)$ 分布，Belle实验给出其质量 $M=3894.5\pm 6.6\pm 4.5\text{ MeV}/c^2$ ，宽度 $\Gamma=63\pm 24\pm 26\text{ MeV}/c^2$ ，这里第一项误差为统计误差，第二项误差为系统误差。对该信号的统计显著性检查，发现在各种本底假设的情况下，统计显著性都大于 5.2σ (即来自本底涨落的概率小于 10^{-7})，因此是一个确定的新共振态信号。Belle实验将其命名为 $Z(3900)^{[4]}$ 。

对比BES III实验和Belle实验的测量结果， $Z_c(3900)$ 共振态的质量和宽度在误差范围内一致。采用不同实验的数据样本和完全不同的研究方法， $Z_c(3900)$ 共振态同时被两个国际合作组实验观测到，这有力地证明了该信号是真实的。BES III实验和Belle实验相继在前后一周时间内发布实验结果，使得人们对 $Z_c(3900)$ 共振态的本质问题产生了浓厚的兴趣。英国*Nature*杂志特别刊登题为“Quark quartet opens fresh vista on matter(夸克‘四重奏’开启物质世界新视野)”的新闻，报道该发现意味着宇宙中发现了奇特态物质^[6]。美国*Physical Review Letters*特别推荐，并邀请匹兹堡大学的著名强子物理学家Eric Swanson教授撰写题为“New Particle Hints at Four-Quark Matter(新粒子暗示存在四夸克物质)”的评论^[7]。 $Z_c(3900)$ 共振态的质量约3.9 GeV，衰变产物中有粲偶素态 J/ψ ，因此其内部含有一对正、反粲夸克对。然而由正、反粲夸克对构成的普通粲偶素都是电中性

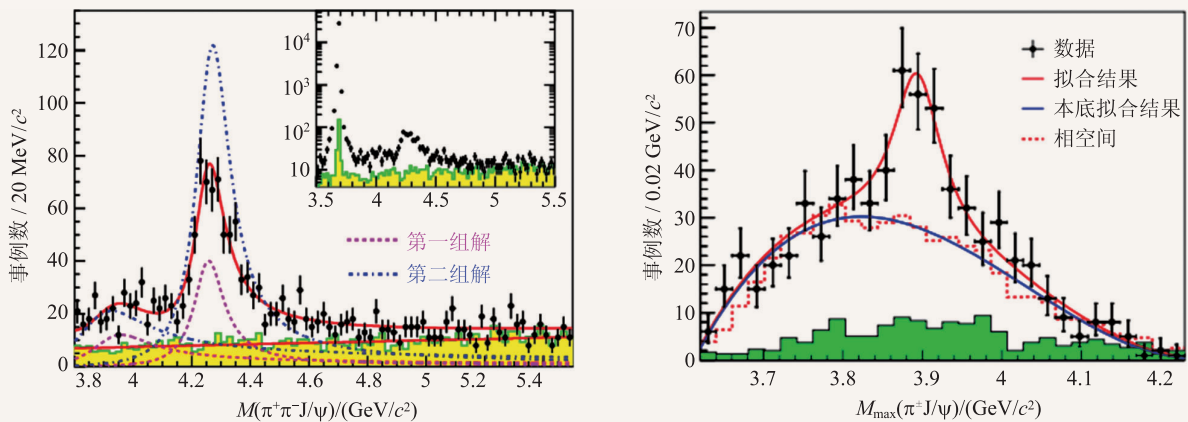


图2 Belle实验通过初态辐射方法得到的 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 信号事例的质量分布(左)和 $M_{\max}(\pi^+J/\psi)$ 分布(右)

的，而 $Z_c(3900)$ 共振态带有电荷，这说明 $Z_c(3900)$ 共振态不是一个普通的粲偶素。能够描述 $Z_c(3900)$ 共振态这种奇特性质的最小夸克组合是 4 个夸克。 $Z_c(3900)$ 很可能就是一个人们长期寻找的奇特态强子。

关于 $Z_c(3900)$ 共振态的性质，目前出现了许多有趣的讨论。 $Z_c(3900)$ 共振态质量略比 $\bar{D}D^*$ 阈值高，有可能是由 $\bar{D}D^*$ 通过微弱的相互作用形成的强子分子态^[8]。强子分子态模型还预言，在 \bar{D}^*D^* 质量阈值附近，也应该存在共振结构，这需要进一步的实验结果来验证。也有模型预言， $Z_c(3900)$ 共振态其实是一个由 4 个夸克构成的四夸克态^[9]，并预言应该存在一个 $Z_c(3900)$ 的伴随粒子，其质量约为 $3775 \text{ MeV}/c^2$ 。这也需要进一步的实验来鉴别。还有模型提出其他观点，认为这是由于初态辐射 π 介子造成的^[10]，或者认为是由于 D 介子三角圈效应造成的^[11]。

与之类似，Belle 实验在研究 $\Upsilon(5S) \rightarrow \pi^+\pi^-\Upsilon(1S, 2S, 3S)$ 和 $\pi^+\pi^-\text{h}_c(1P, 2P)$ 衰变过程中，在 $\pi^-\Upsilon(1S, 2S, 3S)$ 和 $\pi^-\text{h}_c(1P, 2P)$ 的质量谱上，发现了两个带电类底夸克偶素结构 $Z_b(10610)$ 和

$Z_b(10650)$ ^[12]。和 $Z_c(3900)$ 相比，它们具有非常类似的性质，可以纳入同一理论框架下讨论。另外，Belle 实验在 $B \rightarrow K\pi^+\psi(2S)$ 的衰变研究中，发现 $\pi^+\psi(2S)$ 的质量谱上存在一个结构 $Z^+(4430)$ ^[13]；在 $B \rightarrow K\pi^+\chi_{c1}$ 的衰变研究中，发现 $\pi^+\chi_{c1}$ 的质量谱上存在两个结构 Z_1 和 Z_2 ^[14]。但是遗憾的是， $Z^+(4430)$ 、 Z_1 和 Z_2 都没有得到 BABAR 实验的证实^[15]。

对于 $Z_c(3900)$ 的物理本质，目前还难以下一个确切的结论。研究清楚这个问题，还需要实验和理论的进一步努力。实验上，BES III 实验将继续采集更多的实验数据，利用这些数据样本将可以确定 $Z_c(3900)$ 共振态的自旋宇称量子数，并寻找其他的可能衰变模式。另外，还可以对理论模型预言的 $Z_c(3900)$ 的伴随态进行寻找，甄别四夸克态模型和强子分子态模型。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 Belle II 实验。Belle II 的亮度预计将会比 Belle 高两个数量级。届时，利用 Belle II 采集的海量数据样本，对 $Z_c(3900)$ 性质的理解以及带电类粲偶素的研究将会进入一个新的时代。

参考文献

- [1] Eichten E *et al.* Phys. Rev. D, 1980, 21: 203; Rev. Mod. Phys., 2008, 80: 1161; Eichten E, Quigg C. Phys. Rev. D, 1995, 52: 1726; Godfrey S, Isgur N. Phys. Rev. D, 1985, 32: 18
- [2] Particle Data Group, Beringer J *et al.* Phys. Rev. D, 2012, 86: 010001
- [3] BaBar Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 142001; Belle Collaboration, Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 182004; Belle Collaboration, Wang X L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 142002; BaBar Collaboration, Lees J P *et al.* Phys. Rev. D., 2012, 86: 051102(R)
- [4] BES III Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001
- [5] Belle Collaboration, Liu Z Q, Shen C P, Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002
- [6] Powell D. Nature, 2013, 498: 280
- [7] Swanson E. Physics, 2013, 6: 69
- [8] Guo F K *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 88: 054007; Wilbring E, Hammer H W, Meißner U G. arXiv:1304.2882
- [9] Maiani L, Piccinini F, Polosa A D *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 71: 014028; Ali A, Hambrock C, Wang W. Phys. Rev. D, 2012, 85: 0540011; Faccini R, Maiani L *et al.* Phys. Rev. D, 2013, 87: 111102
- [10] Chen D Y, Liu X, Matsuki T. Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 232001
- [11] Wang Q, Hanhart C, Zhao Q. arXiv:1303.6355
- [12] Belle Collaboration, Bondar B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 122001
- [13] Belle Collaboration, Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 142001
- [14] Belle Collaboration, Mizuk R *et al.* Phys. Rev. D, 2008, 78: 072004
- [15] BaBar Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 79: 112001; BaBar Collaboration, Lees J P *et al.* Phys. Rev. D, 2012, 85: 052003