

BESIII实验首次观测到 $Y(4260) \rightarrow \gamma X(3872)$ 辐射跃迁*

刘智青^{1,†} 李科^{2,3} 莺长征² 黄性涛³

(1 德国美因茨大学 德国美因茨 55128)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(3 山东大学物理学院 济南 250100)

2014-02-25 收到

† email: zqliu@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140309

随着我国北京正负电子对撞机(BEPCII)上的北京谱仪(BESIII)实验和日本高能加速器研究机构(KEK)的Belle实验发现带电奇特强子态 $Z_c(3900)^{[1]}$ ，研究奇特态粒子成为粒子物理学研究领域中当前最热门的课题之一。究竟什么是奇特态粒子呢？这还得追溯到基本粒子的结构。

在粒子物理学中，物质最基本的组成单元是夸克。由夸克可以构成形形色色的粒子。在人们熟知的夸克模型中，粒子由3个夸克或者由正反夸克对构成。由3个夸克构成的粒子为重子，例如质子和中子；而由正反夸克构成的粒子为介子，例如 π 介子、 K 介子等。由于夸克组合成重子和介子是通过一种相互作用很强、作用范围很短(原子核尺寸，约 $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)的力(叫做强作用力)束缚在一起的，所以重子和介子通常也被称为强子。除了重子和介子外，自然界是否还存在其他形式的粒子？自20世纪60年代以来，人们一直在寻找这个问题的答案，但是却没有得到确切的结论。

目前，粒子物理学描述强相互作用最好的理论是量子色动力学(QCD)。在QCD中，强相互作用力将夸克束缚成强子时，对夸克的个数并没有严格的限制。可以存在由3个夸克构成的重子和正反夸克构成的介子，也可以存在由4个、5个夸克，甚至多个夸克构成的多夸克态；还可以存在由强子和强子通过相互作用束缚在一起的强子分子态；甚至还可以存在由传播强相互作用力的媒介子(胶子)和夸克束缚在一起的夸克胶子混杂

态，以及纯粹由胶子形成的胶子球。一直以来，粒子物理学实验都缺乏强有力的证据表明这些粒子是存在的。因此，除了常规的重子和介子以外，其他诸如多夸克粒子、强子分子态、夸克胶子混杂态和胶子球等，都称之为奇特态粒子。

人们寻找奇特态粒子的历史由来已久。直到近年来，随着粒子物理学实验手段的不断提高，寻找奇特态粒子的研究工作才有了较大的进展。特别是B介子工厂(美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)的BaBar实验、日本KEK的Belle实验)和 τ -粲工厂(北京正负电子对撞机上BESIII实验)的运行，为研究奇特态粒子提供了前所未有的机遇。2003年，Belle实验在研究 $B^\pm \rightarrow K^\pm (\pi^\pm \pi^\mp J/\psi)$ 衰变过程中，在 $\pi^\pm \pi^\mp J/\psi$ 质量谱上观测到了一个非常窄的共振结构—— $X(3872)^{[2]}$ 。该结构的质量 $M = (3872.0 \pm 0.6 \pm 0.5) \text{ MeV}$ ，宽度在90%置信度水平上小于2.3 MeV。在目前已知的或者理论可以预期的位于该质量区域的粲夸克偶素(由一对正反粲夸克构成的介子)谱上，无法找到与之对应的粒子。因此该粒子暂时以其质量命名。 $X(3872)$ 的发现，立刻吸引了人们的极大兴趣。实验上， $X(3872)$ 很快陆续被美国费米实验室(FNAL)的CDF实验^[3]、D0实验^[4]和SLAC的BaBar实验^[5]证实，并且对其性质展开了一系列的相关研究工作。最近，欧洲核子研究中心(CERN)的LHCb实验还确定了 $X(3872)$ 的量子数自旋、宇称和电荷共轭宇称 $J^{PC} = 1^{++[6]}$ 。理论上，人们对其结构进行了热烈的讨论，提出 $X(3872)$ 可能是四夸克态粒子、强子分子态等^[7]。

另外一个奇特态的候选者是 $Y(4260)$ 共振态。2005年，BaBar实验采用初态辐射的方法，

* 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, 10979033)、教育部世纪优秀人才支持计划(批准号：NCET-13-0342)资助项目

在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 产生过程中发现了一个新的结构 $Y(4260)^{[8]}$ 。实验测量得到该粒子的质量为 $M = (4259 \pm 8^{+2}_{-6})$ MeV, 宽度 $\Gamma = (88 \pm 23^{+6}_{-4})$ MeV。该粒子同时也被 Belle 实验采用相同的实验方法观测到^[9]。 $Y(4260)$ 是在正负电子湮灭过程中产生的, 因此它是一个矢量态的粒子。然而, 在该质量区域, 已知的矢量态粲夸克偶素只有 3 个—— $\psi(4040)$ 、 $\psi(4160)$ 和 $\psi(4415)^{[10]}$, 并且都主要衰变成粲介子对(D 介子及其激发态粒子)。这和 $Y(4260)$ 粒子在 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 中发现却没有在粲介子对末态中出现截然不同。 $Y(4260)$ 粒子的这种奇特性质同样也吸引了大量的讨论, 有观点认为, 它可能是夸克胶子混杂态的候选者等^[7]。 $X(3872)$ 粒子和 $Y(4260)$ 粒子的质量皆位于粲夸克偶素区域, 但却表现出和普通的粲偶素不同的奇特性质。因此, 它们通常也被称为类粲偶素粒子。

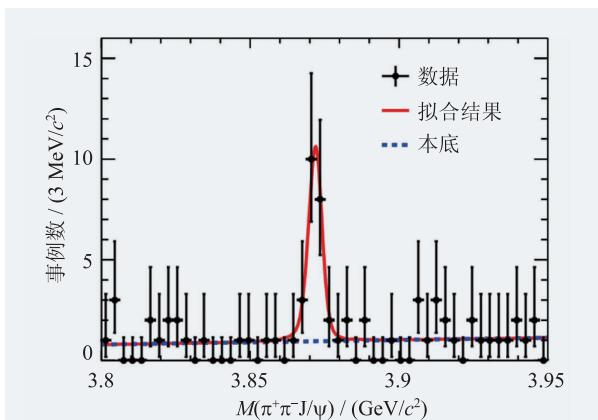


图 1 BESIII 通过辐射跃迁过程产生的 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 不变质量分布(M 代表粒子质量)

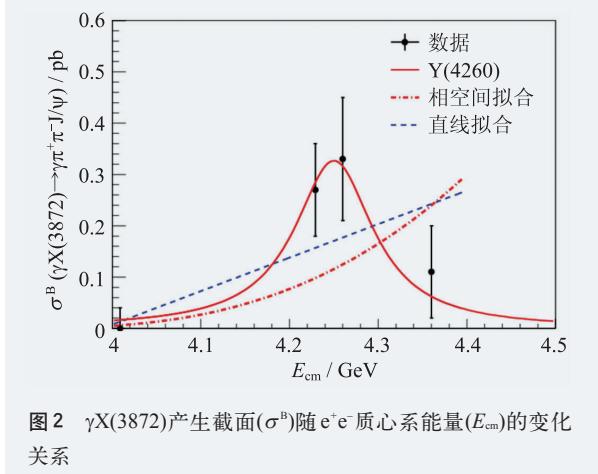


图 2 $\gamma X(3872)$ 产生截面(σ^B)随 e^+e^- 质心系能量(E_{cm})的变化关系

从 2012 年底开始, BESIII 实验开始在 4.26 GeV 及其附近的能量点积累数据。目前, 在 4 GeV 以上共积累了约 3 fb^{-1} 的数据样本, 是当前世界上在该能量区域最大的数据样本。利用该数据样本, BESIII 实验也对 $X(3872)$ 粒子进行了寻找与研究。由于 $X(3872)$ 粒子具有 $J^{PC}=1^{++}$, 而 BESIII 实验通过 e^+e^- 对撞产生的都是 $J^{PC}=1^{--}$ 的矢量态, 因而可以通过辐射跃迁的方式来寻找 $X(3872)$ 粒子。寻找 $X(3872)$ 粒子的黄金衰变道是 $\pi^+\pi^-J/\psi$, 相对于其他衰变道, 该衰变道简单易重建、本底低、分支比相对较大。图 1 显示了 BESIII 实验通过辐射跃迁过程产生的 $\pi^+\pi^-J/\psi$ 的不变质量谱^[11]。从图中可以明显地看到, 在 3.87 GeV 处有 $X(3872)$ 粒子的信号。通过对 $X(3872)$ 粒子拟合, 得到该信号的统计显著性为 6.3σ (这里 σ 代表标准正态分布的一倍标准偏差), 即来自本底涨落的概率小于 10^{-9} 。

BESIII 实验不仅观测到了 $X(3872)$ 信号, 还对不同 e^+e^- 质心系能量点的 $\gamma X(3872)$ 产生截面做了测量。图 2 中的数据点显示了在四个大样本数据能量点处的测量结果。对测量的截面随能量的变化分别用 $Y(4260)$ 谱形、辐射跃迁相空间和直线进行拟合, 我们发现 $Y(4260)$ 粒子的谱形与数据吻合得最好(置信度水平达到 92%, 而用辐射跃迁相空间拟合的置信度为 3%, 用直线描述的置信度为 6%)。另外, 非相对论量子色动力学对 $\gamma X(3872)$ 过程在该能量区域的产生截面做了计算, 发现连续态过程的产生截面比当前 BESIII 实验的测量结果小一个数量级^[12]。所有这些证据强烈地支持实验上观测到的 $\gamma X(3872)$ 事例来自于 $Y(4260)$ 粒子的衰变。这样的话, $\gamma X(3872)$ 也就变成了 $Y(4260)$ 粒子以前从来没有观测到的一种新的衰变模式。

BESIII 实验首次观测到 $Y(4260) \rightarrow \gamma X(3872)$ 辐射跃迁, 对人们理解类粲偶素粒子的性质有重要的启示作用。在该辐射跃迁过程中, 初态的 $Y(4260)$ 粒子和末态的 $X(3872)$ 粒子都是具有奇特性质的类粲偶素, 而该过程意外地将二者联系起来; 另外, 2013 年 BESIII 实验^[13] 和 Belle 实验^[14] 在 $Y(4260) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 衰变中发现了带电类粲夸克偶素 $Z_c(3900)$ 。尽管目前对 $Z_c(3900)$ 粒子还有

许多尚待研究的地方，然而人们在某种程度上已经开始相信 $Z_c(3900)$ 是第一个具有确切证据的奇特态强子。奇特态类粲偶素 $X(3872)$ 、 $Y(4260)$ 和 $Z_c(3900)$ 的集中出现及其之间存在的关联似乎向人们暗示，它们的组成有一定的相似性。将奇特类粲偶素粒子纳入一个统一的框架下讨论，很可能将

成为人们彻底理解奇特态类粲偶素的一种新的研究途径。目前，理论上已经有了初步尝试，比如文献[15]中提出了 $Y(4260)$ 是 $\bar{D} D_1$ 分子态的模型^[15]，并对 $Z_c(3900)$ 和 $X(3872)$ 的产生进行了计算。实验上，BESIII 计划在 4 GeV 以上采集更多的实验数据，将在更深层次上为研究奇特态类粲偶素做出贡献。

参考文献

- [1] 刘智青, 沈成平, 苑长征. 物理, 2013, 42(10): 720
- [2] Belle Collaboration, Choi S K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 262001
- [3] CDF Collaboration, Acosta D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 072001
- [4] D0 Collaboration, Abazov V M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 162002
- [5] BABAR Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 71: 071103
- [6] LHCb Collaboration, Aaij R *et al.* Eur. Phys. J. C, 2012, 72: 1972
- [7] Brambilla N *et al.* Eur. Phys. J. C, 2011, 71: 1534
- [8] BaBar Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 142001
- [9] Belle Collaboration, Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 99: 182004
- [10] Particle Data Group, Beringer J *et al.* Phys. Rev. D, 2012, 86: 010001
- [11] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 092001
- [12] Chao K T *et al.* arXiv:1310.8597
- [13] BESIII Collaboration, Ablikim M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252001
- [14] Belle Collaboration, Liu Z Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 252002
- [15] Guo F K *et al.* Phys. Lett. B, 2013, 725: 127

ILOPE—北京光电展

市 场 由 而 宽 阔

ILOPE-2014

www.ilope-expo.com

垂询电话: 010-8460 0344

北京国际光电产业博览会 暨

第十九届中国国际激光·光电子及 LED 光电显示产品展览会

北京·中国国际展览中心(三元桥) 2014年10月15日-17日

主办单位

中国国际贸易促进委员会
中国国际展览中心集团公司
中国光学光电子行业协会

承办单位

中国光学光电子行业协会
中展集团北京华港展览有限公司

支持单位

中国工业和信息化部
中国兵器工业集团公司
美国光电子协会
德国光学、医疗精密设备协会

展品范围

激光与红外产品及设备
光电材料与元件

中国科技部
北京市科学技术委员会
日本光产业技术振兴会
财团法人光电子科技工业协进会

中国科学院
北京光机产业基地
德国工商总会
北京市市政工程总公司(集团)

中国物理学会
美国光学工程学会
韩国光产业振兴会

LED & OLED & FPD

光通讯设备