

Belle 实验观测到新类粲偶素结构^{*}

沈成平^{1,†} 苑长征²

(1 夏威夷大学 火奴鲁鲁 美国夏威夷 96822)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 利用在 $\Upsilon(nS)$ ($n=1,2,4,5$) 共振态及其附近采集的大量数据, Belle 实验测量了末态中含两个矢量粒子的双光子过程 $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ 和 $\omega J/\psi$. 在这两个过程中, 发现了两个窄共振结构 X(4350) 和 X(3915), 这两个新结构的性质目前尚不清楚, 可能是普通粲偶素粒子, 也可能是含一对粲夸克和一对轻夸克的四夸克态, 或含一对粲夸克和一个激发胶子的混杂态, 或是由其他未知的动力学原因造成的奇特结构. Belle 同时发现在 $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ 过程中, 不存在显著的 Y(4140) 的信号, 实验结果与将 Y(4140) 解释为四夸克态的部分理论预期有较大差异.

关键词 双光子过程, 类粲偶素, X(4350), X(3915), Y(4140)

New charmonium-like states observed in Belle data

SHEN Cheng-Ping^{1,†} YUAN Chang-Zheng²

(1 University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, America)

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

Abstract Two-photon processes $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ and $\omega J/\psi$ are studied for the first time using data on and off the $\Upsilon(nS)$ ($n=1,2,4,5$) resonances collected with the Belle detector at the KEKB. Two narrow resonances, X(4350) and X(3915), are observed in these two processes. There are no known charmonium states that match these new observations. They are either new charmonium states, charmonium hybrids or tetraquark states, or produced via other unknown dynamics. No signal for the Y(4140) structure reported by the CDF Collaboration in $B^+ \rightarrow K^+ \phi J/\psi$ decays is observed in the $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ process.

Keywords two-photon process, charmonium-like states, X(4350), X(3915), Y(4140)

粒子物理夸克模型认为, 介子是由 1 个夸克和 1 个反夸克, 重子是由 3 个夸克或 3 个反夸克通过强相互作用束缚在一起形成的. 虽然这个模型看起来很简单, 但其预言与很多实验事实一致, 表明夸克模型是相当成功的. 然而描述夸克之间强相互作用的标准动力学理论量子色动力学(QCD)并不排除上述由 2 个夸克或 3 个夸克组成的强子(介子和重子的统称, 也称常规强子)以外的粒子的存在, 如混杂态(除夸克外还有激发的胶子)^[1]、分子态(2 个或多个介子或重子束缚在一起)^[2]、多夸克态(含 4 个夸克或更多)^[3]、胶子球(只含胶子不含夸克)等.

虽然实验上对非常规强子的寻找一直没有停止, 但到目前为止, 并没有可靠的证据表明已观测到

它们的存在. 原因之一是实验信息依然不够丰富、不够系统, 而另一个原因是没有非常明确的区分非常规强子与常规强子的实验判据. 这表明在强子谱学方面实验上还需要更多的理论指导, 尤其是对非常规粒子态的确认, 这要求显著提高量子色动力学对低能强子谱计算的精度和可靠性.

进入 21 世纪以来, 在美国 SLAC 进行的 BaBar 实验和在日本 KEK 进行的 Belle 实验(因其能产生大量的 B 介子对而被称之为 B 工厂), 以其史无前例的大数据量和多种可能的研究手段, 对强子谱进

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10825524, 10935008)资助项目

2010-06-21 收到

[†] 通讯联系人. Email: shenpc@phy.hawaii.edu

行了广泛的研究,尤其是在衰变产物含有粲偶素粒子的研究中,发现了一系列新的粲偶素或类粲偶素态(物理,2008,37(7):504).这些新的发现向人们提出了是否已经有了非常规强子存在的问题,例如以上提到的混杂态、多夸克态、胶子球、分子态等.

粲偶素由一对正反粲夸克组成,它的组分夸克粲夸克质量约为 $1.5\text{GeV}/c^2$,粲偶素在研究夸克之间的强相互作用中有着很特殊的地位.因为 B 工厂在含粲偶素末态中发现了很多新粒子,它们中倾向于含一对 $c\bar{c}$ 夸克,因此很像粲偶素;而另一方面,这些态大都比较窄,尤其在同一个质量范围内有多个粒子的存在,与粲偶素理论的预言已明显不符,因而现在人们为这些粒子取了一个临时的名字——类粲偶素——以表示它们.人们在为这些未知的粒子命名时,一般用 X(粒子质量),Y(粒子质量)或 Z(粒子质量)表示,有时它们也被统称为 XYZ 粒子.类粲偶素的研究目前是国际上的一个热门领域,BaBar 和 Belle 实验,以及强子对撞机实验在该领域都做出了贡献.

最近美国费米实验室的 CDF 合作组在 $B^+ \rightarrow K^+ \phi J/\psi$ 过程中,在 $\phi J/\psi$ 质量谱上又观测到一个结构,命名为 $Y(4140)$ ^[4].它的质量为 $4143.0 \pm 2.9 \pm 1.2 \text{ MeV}/c^2$,宽度为 $11.7^{+8.3}_{-5.0} \pm 3.7 \text{ MeV}/c^2$,其中第一项误差为统计误差,第二项为系统误差.随后 Belle 合作组用更大的数据样本在相同的衰变模式中去寻找 $Y(4140)$,结果没有观测到明显的信号,但是 $Y(4140)$ 的产生率的上限并不和 CDF 合作组的结果相矛盾^[5].目前对于 $Y(4140)$ 已经有一些不同的理论上的解释,它们包括: $D_s^+ D_s^-$ 分子态^[6-13], 1^{-+} 粲偶素混杂态^[9],或者 $c\bar{c}s\bar{s}$ 四夸克态^[14].也有一些理论认为 $Y(4140)$ 不可能是传统意义上的粲偶素态 (χ_{c0}, χ_{c1})^[15] 或者 $D_s^+ D_s^-$ 分子态^[16,17],这是因为利用 QCD 的求和规则所预言的质量和实验上的测量值不相符.假设 $Y(4140)$ 是具有量子数 0^{++} 或者 2^{++} 的 $D_s^+ D_s^-$ 分子态,文献[6]预言了 $Y(4140)$ 的双光子宽度在 1keV 量级,这可以很好地在 Belle 实验上进行检验.

在 $3.90-3.95 \text{ GeV}/c^2$ 质量区间,Belle 合作组于 2005 年前后观测到了 3 个新的共振态.它们是:在 $e^+ e^- \rightarrow J/\psi X$ 过程观测到的 $X(3940)$;在 $B^- \rightarrow K^- \omega J/\psi$ 过程中观测到的 $Y(3940)$;以及在 $\gamma\gamma \rightarrow D\bar{D}$ 过程中观测到的 $Z(3930)$.由于这 3 种粒子在不同的反应过程中被观测到,所以人们通常认为它们是不同种类的粒子.由于 $X(3940)$ 和 $Y(3940)$

都是电荷共轭宇称为正的态,它们也可以在双光子对撞过程中产生.获得这些新的实验信息将有助于理解这些粒子的性质.

基于以上原因,Belle 对双光子对撞过程 $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ 和 $\omega J/\psi$ 进行了测量.

双光子对撞过程是指光子光子散射可以通过中间态相互作用进行.从实验角度上看,其反应过程为 $e^+ e^- \rightarrow e^+ \gamma e^- \gamma \rightarrow e^+ e^- X$,其中末态粒子系统 X 由 2 个光子碰撞产生.这种双光子对撞过程可写成 $\gamma\gamma \rightarrow X$,其费曼图显示在图 1 中.入射电子(正电子)辐射出来的光子,一般是在较小的角度之内,它携带了电子(正电子)的一小部分能量,但由于对撞机中的正负电子能量很高,所以能得到能量较高的光子束流.

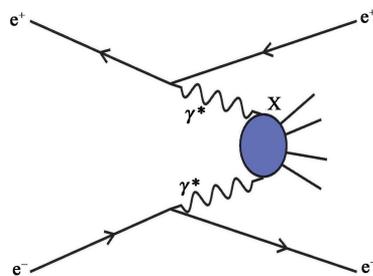


图 1 双光子过程的费曼图,实心椭圆为共振态

双光子系统的电荷共轭宇称 $C=+1$,双光子耦合的共振态的 C 宇称必须为偶,又按照杨氏定理,两个实光子与自旋为 1 态之间的耦合是禁戒的^[18],所以双光子对撞过程中产生的共振态量子数 $J^{PC}=0^{++},0^{-+},2^{++},2^{-+},\dots$.研究双光子过程要求加速器有很高的亮度以及探测器有很好的立体角覆盖和探测能力,这是利用 B 工厂数据进行研究的原因.

Belle 利用 825fb^{-1} 数据,对双光子过程 $\gamma\gamma \rightarrow \phi J/\psi$ 中 $\phi J/\psi$ 不变质量从阈值到 $5 \text{ GeV}/c^2$ 的范围进行了测量^[19],在 $\phi J/\psi$ 的不变质量分布中,没有观测到 $Y(4140)$ 的信号,但是在 $4.35 \text{ GeV}/c^2$ 处观测到一个增长结构,如图 2 所示.它的质量为 $4350.6^{+6.1}_{-5.1} \pm 0.7 \text{ MeV}/c^2$,宽度为 $13^{+18}_{-9} \pm 4 \text{ MeV}/c^2$,被命名为 $X(4350)$.信号显著性为 3.2σ . $X(4350)$ 的质量和文献[14]以及文献[20]所预言的值一致,在那里 $X(4350)$ 可以被解释为具有量子数 2^{++} 的 $c\bar{c}s\bar{s}$ 四夸克态和 $D_s^+ D_s^-$ 分子态.最近的文献[21]和文献[22]还讨论了 $X(4350)$ 是激发的粲偶素态 χ_{c2} 和 $D_s^* D_{s0}$ 分子态的可能性.同时测得的 $Y(4140)$ 的双光子宽度和它到 $\phi J/\psi$ 的分支比的连乘的值远小于文献[6]所预言的值.如果文献[6]中的假设都正

确的话,这表明 $Y(4140)$ 很可能不是 $D_s^{*+} D_s^{*-}$ 分子态.

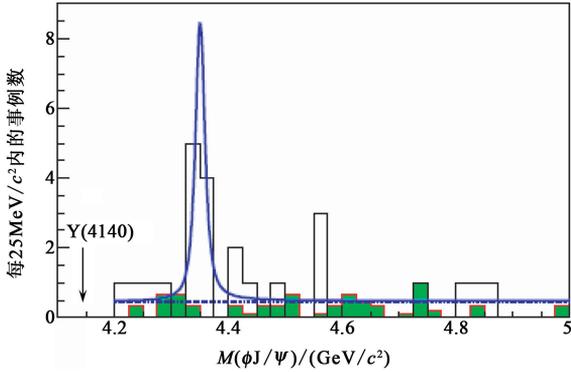


图2 $\phi J/\psi$ 不变质量的分布. 实线为拟合结果, 虚线为拟合的本底贡献. 空白直方图为真实数据, 阴影直方图代表本底事例. 图中箭头指向所期待的 $Y(4140)$ 共振态的位置

Belle 利用 694fb^{-1} 数据, 对双光子过程 $\gamma\gamma \rightarrow \omega J/\psi$ 中 $\omega J/\psi$ 不变质量从阈值到 $4.3\text{GeV}/c^2$ 的范围进行了测量^[23], 在 $3.9\text{GeV}/c^2$ 处观测到一个明显的增长结构, 如图3所示. 它的质量为 $3915 \pm 3 \pm 2\text{MeV}/c^2$, 宽度为 $17 \pm 10 \pm 3\text{MeV}/c^2$, 被命名为 $X(3915)$. 信号显著性达到 7.7σ . 测得的 $X(3915)$ 的双光子宽度和它到 $\omega J/\psi$ 的分支比的连乘的值远大于传统的粲偶素态所预期的值, 但是却和假设 $X(3915)$ 是 $D^* \bar{D}^*$ 束缚态所预言的值相符合^[6].

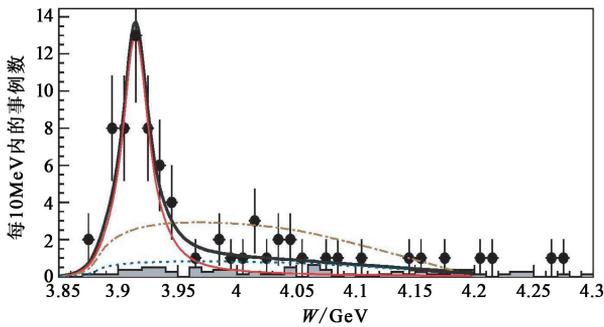


图3 $\omega J/\psi$ 不变质量的分布. 黑点为数据, 阴影直方图代表本底事例. 粗实线为拟合结果, 虚线为拟合的本底

$X(3915)$ 是否就是 $3.90\text{--}3.95\text{GeV}/c^2$ 质量区间内的3个XYZ粒子之一呢? 虽然 $X(3915)$ 和 $Z(3930)$ 同在双光子过程中产生, 但二者的质量差别却达 $15\text{MeV}/c^2$, 远大于实验测量误差; 而且最近 BaBar 合作组在双光子过程 $\gamma\gamma \rightarrow D \bar{D}$ 中确认了 $Z(3930)$ 的存在^[24], 信号的显著性为 5.8σ , 测得的质量和宽度的值和 Belle 的 $Z(3930)$ 实验结果一致, 但其质量要比 $X(3915)$ 的质量要大. 而最近 BaBar 关于 $Y(3940)$ 测量的结果^[25] 则表明其质量和宽度都明显低于 Belle 的测量值, 与 $X(3915)$ 的参数非常一致. 很有可能, $X(3915)$ 和 $Y(3940)$ 是同一个粒

子, 但如何解释这个粒子与 $\omega J/\psi$ 有很强的耦合仍是一个困难^[26].

根据 $Z(3930)$ 衰变产物的角分布分析, Belle 和 BaBar 都发现 $Z(3930)$ 的 J^{PC} 的值倾向于 2^{++} . 所有这些测量, 使得目前我们倾向于认为 $Z(3930)$ 是 $\chi_{c2}(2P)$ 态; 一种可能的对 $X(3915)$ 的解释是, 它是 $\chi_{c0}(2P)$ 态, 但这需要更多的实验数据和更深入的理论分析.

利用最近收集的大约 100M 的 $\Upsilon(1S)$ 事例, Belle 合作组通过辐射衰变过程对这些 XYZ 的粒子^[27] 进行了寻找, 然而并没有观测到 $X(3872)$, $X(3915)$ 以及 $Y(4140)$ 的信号, 只是给出了相应的产生率的上限. 对这些粒子性质的认识, 还有待其他实验如 BESIII, LHCb 等提供更多数据.

综合目前的实验研究结果, 包括最近 Belle 发现的 $X(4350)$ 和 $X(3915)$ 两个新的窄共振结构, 我们发现, 夸克模型很难描述所有的新粒子, 表明这些态中的一个或多个很有可能不是常规强子. 由夸克模型发展起来的量子色动力学允许超出夸克模型的新型强子的存在, 可以比夸克模型更准确地描写强子. 但是目前它对混杂态、多夸克态、分子态等粒子的性质, 如质量和衰变宽度(寿命)的精确计算能力还是有限的, 使得我们仍然无法判断这些新粒子的具体分类. 在大幅度提高基于量子色动力学的理论计算的可靠性和精度的前提下, 有望既能对普通介子和重子等强子进行正确分类, 又能对新型强子的质量和衰变宽度以及其他性质进行精确的预言, 以真正理解强子谱.

参考文献

- [1] Barnes T, Close F E *et al.* Phys. Rev. D, 1995, 52:5242
- [2] Voloshin M B, Okun L B. JETP Lett., 1976, 23:333; Rujula A De, Georgi H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1977, 38:317; Tornqvist N A. Z. Phys. C, 1994, 61:525
- [3] Maiani L F, Piccinini F *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 71:014028
- [4] CDF Collaboration, Aaltonen T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102:242002
- [5] Belle Collaboration, Yuan C Z. arXiv:0910.3138
- [6] Branz T, Gutsche T, Lyubovitskij V E. Phys. Rev. D, 2009, 80:054019
- [7] Liu X, Zhu S L. Phys. Rev. D, 2009, 80:017502
- [8] Ding G J. Eur. Phys. J. C, 2009, 64:297
- [9] Mahajan N. Phys. Lett. B, 2009, 679:228
- [10] Liu X, Ke H W. Phys. Rev. D, 2009, 80:034009
- [11] Zhang J R, Huang M Q. J. Phys. G, 2010, 37:025005
- [12] Albuquerque R M, Bracco M E, Nielsen M. Phys. Lett. B, 678:186

- [13] Molina R, Oset E. *Phys. Rev. D*, 2009, 80:114013
- [14] Stancu F. J. *Phys. G*, 2010, 37:075017
- [15] Liu X. *Phys. Lett. B*, 2009, 680:137
- [16] Wang Z G. *Eur. Phys. J. C*, 2009, 63:115
- [17] Wang Z G, Liu Z C, Zhang X H. *Eur. Phys. J. C*, 2009, 64:373
- [18] Yang C N. *Phys. Rev.*, 1950, 77:242
- [19] Belle Collaboration, Shen C P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104 :112004
- [20] Zhang J R , Huang M Q. *arXiv:0905.4672*
- [21] Liu X, Luo Z G, Sun Z F. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 122001
- [22] Ma Y L. *arXiv:1006.1276*
- [23] Belle Collaboration, Uehara S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104:092001
- [24] BABAR Collaboration, Aubert B *et al.* *Phys. Rev. D*, 2010, 81:092003
- [25] BABAR Collaboration, Aubert B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:082001
- [26] Olsen S L. *arXiv:0909.2713*
- [27] Shen C P. *Chinese Phys. C*, 2010, 34:615