

# Belle 实验上发现新的矢量粒子<sup>\*</sup>

王小龙<sup>1 †</sup> 沈成平<sup>1 2</sup> 苑长征<sup>1</sup> 王平<sup>1</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

(2 夏威夷大学 火奴鲁鲁 夏威夷 96822)

**摘要** Belle 实验在  $\Upsilon(4S)$  共振态及其附近采集了大量数据,利用初态辐射(ISR)的方法,测量了  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ ,  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$  和  $K^+K^-J/\psi$  等过程从阈值到 5.5 GeV 间的产生截面.证实了 BaBar 合作组发现的  $\Upsilon(4260)$  和  $\Upsilon(4360)$  的存在,并更新了其共振参数.同时发现了  $\Upsilon(4008)$  和  $\Upsilon(4660)$  两个共振结构.以上观测与已知的粲偶素粒子性质不同,可能是新的粲偶素态,也可能是粲偶素混杂态,或者由其他未知的动力学原因造成.

**关键词** 初态辐射 粲偶素 新粒子

## Observation of new resonant structures at Belle

WANG Xiao-Long<sup>1 †</sup> SHEN Cheng-Ping<sup>1 2</sup> YUAN Chang-Zheng<sup>1</sup> WANG Ping<sup>1</sup>

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

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

**Abstract** The cross sections for three initial-state radiation processes,  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ ,  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$ , and  $K^+K^-J/\psi$  have been measured between threshold and  $\sqrt{s} = 5.5$  GeV, using data on and off the  $\Upsilon(4S)$  resonance collected with the Belle detector at KEKB. The  $\Upsilon(4260)$  and  $\Upsilon(4360)$  observed by the BaBar collaboration are confirmed, and the resonance parameters improved. Two new resonant structures, the  $\Upsilon(4008)$  and  $\Upsilon(4660)$  have been observed for the first time. There are no known vector charmonium states that match these new observations, which must be either new charmonium states or charmonium hybrids, or are produced via other dynamics.

**Keywords** initial state radiation, charmonium, new resonance

自从 1974 年粲夸克被发现所引起的“十一月革命”以来,粲偶素(由一对正反粲夸克  $c\bar{c}$  组成的介子)由于其结构简单,且处于量子色动力学微扰和非微扰的过渡区域,在理论和实验上一直都是人们关注的热点之一.粲偶素能谱,在理论上可以用势模型来描述,如著名的 Cornell 势( $V(r) = -4\alpha_s/3r + br$ )较好地描述了粲阈以下的粲偶素能谱,如图 1 所示,这在整个 20 世纪被认为是一个强相互作用理论和实验一致的典范.

进入 21 世纪以来,两个 B 工厂(B 工厂是对对撞亮度很高,运行能区在底夸克偶素  $\Upsilon(4S)$  或以上能区,可以大量产生 B 介子对的实验装置的一种称呼),即在美国 SLAC 的 BaBar 实验,和在日本 KEK 的 Belle 实验,已经一共积累了超过  $1000 \text{ fb}^{-1}$  的数

据.在这样高的统计量下,通过 B 介子衰变,双粲偶素粒子产生,双光子对撞过程,以及初态辐射过程等方式,在粲偶素研究中也取得了很多新奇的发现,观测到一系列的新粒子,比如  $X(3872)$ ,  $X(3940)$ ,  $\Upsilon(4008)$ ,  $X(4160)$ ,  $\Upsilon(3940)$ ,  $\Upsilon(4260)$ ,  $\Upsilon(4360)$ ,  $\Upsilon(4660)$ ,  $Z(3930)$  以及  $Z^+(4430)$  等.其中  $\Upsilon(4008)$ ,  $\Upsilon(4260)$ ,  $\Upsilon(4360)$  与  $\Upsilon(4660)$  是通过初态辐射过程观测到的,因此自然具有矢量粒子的量子数,与早期正负电子湮灭实验单举强衰变中观测

<sup>\*</sup> 中国科学院“百人计划”(批准号:U-25)、国家自然科学基金(批准号:10491303,10775142)资助项目  
2008-01-08 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: wangxiaolong@ihep.ac.cn

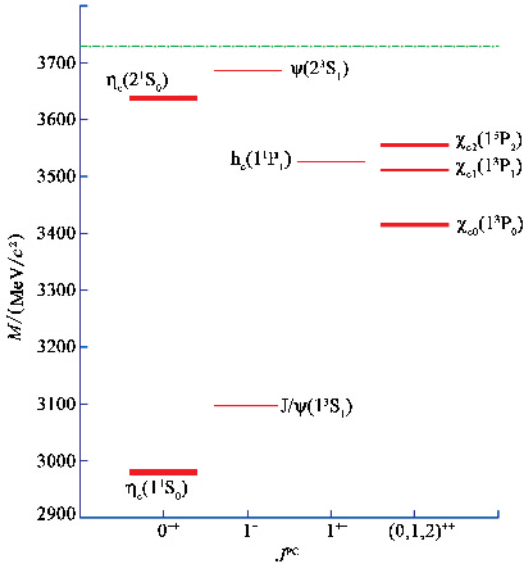


图1 D 阈以下的粲偶素能谱,理论计算和实验测量符合很好

到的  $\psi(4040)$ ,  $\psi(4160)$  和  $\psi(4415)$  在同一个能区内,但共振参数却有明显不同. 这些发现可能意味着这些粒子中一个或多个不是普通的粲偶素态.

初态辐射(initial state radiation,简称ISR)过程是指入射的电子或正电子辐射一个或多个光子(称为ISR光子)后再发生对撞,从而正负电子对系统的质心能量可以取得加速器的设定能量以下的值,但系统的量子数不变,即自旋、宇称和电荷共轭宇称仍为  $J^{PC} = 1^{--}$  (如图2所示). 初态辐射使得运行在高能量的加速器等同于同时运行在低能条件下,因而可以用于低能区截面的测量. 这一过程的缺点是在低能区的有效亮度较低,而且辐射的ISR光子以及辐射后的系统大部分沿束流方向前冲或者反冲,从而探测效率低. 这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,这是目前选择在B工厂研究ISR过程的原因.

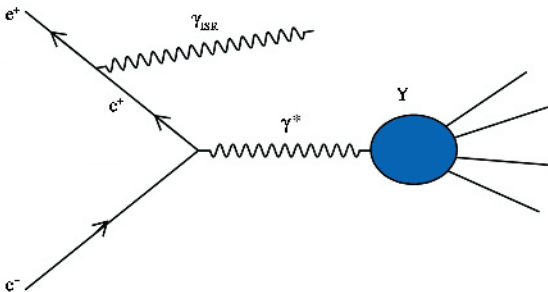


图2 初态辐射过程的费曼图,实心椭圆为矢量共振态

BaBar 合作组利用当时积累的  $232\text{fb}^{-1}$  数据在  $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}\pi^+\pi^-J/\psi$  ( $\gamma_{\text{ISR}}$ :ISR光子)过程中观测

到一个结构,命名为  $Y(4260)^{[1]}$ . 它的质量为  $4259 \pm 8_{-6}^{+2} \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $88 \pm 23_{-4}^{+6} \text{MeV}/c^2$ ,其中第一项为统计误差,第二项为系统误差. 同时还尝试在  $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}\pi^+\pi^-\psi(2S)$  中寻找  $Y(4260)$ ,结果在这一过程中发现一个结构<sup>[2]</sup>,质量为  $4324 \pm 24 \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $172 \pm 33 \text{MeV}/c^2$ ,其中的误差仅为统计误差. 这一结构既不与  $Y(4260)$  相符,也不与  $\psi(4415)$  相符. 随后,CLEO 在质心能量  $4.26 \text{GeV}$  上采集了  $13.2 \text{pb}^{-1}$  的数据,并测量了6个衰变道<sup>[3]</sup>. 在这几个衰变道中,显著性大于  $3\sigma$  的是  $\pi^+\pi^-J/\psi(11\sigma)$ ,  $\pi^0\pi^0J/\psi(5.1\sigma)$ ,和  $K^+K^-J/\psi(3.7\sigma)$ ,其中  $K^+K^-J/\psi$  只观测到3个事例.

Belle 实验目前拥有世界上最高的正负电子对撞亮度和最大的数据量,其亮度最高时达到  $1.7 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,积分亮度超过  $700 \text{fb}^{-1}$ ,为 BaBar 实验所用数据量的3倍,因而可以对以上发现真实与否作出证明.

对于  $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}\pi^+\pi^-J/\psi$  过程,Belle 利用了  $548 \text{fb}^{-1}$  数据量,测量了从阈值到  $5.5 \text{GeV}$  范围内  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  的产生截面<sup>[4]</sup>,在  $\pi^+\pi^-J/\psi$  的不变质量分布中观测到两个明显的增长结构,一个在  $4.25 \text{GeV}/c^2$  附近,和 BaBar 合作组观测到的  $Y(4260)$  一致. 同时发现了一个很宽的增长结构  $Y(4008)$ ,如图3(a)所示. 在  $4.25 \text{GeV}/c^2$  处的共振态的质量为  $4247 \pm 12_{-32}^{+17} \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $108 \pm 19 \pm 10 \text{MeV}/c^2$ ,与 BaBar 的测量一致,但质量稍小,主要因为新共振结构的影响; $Y(4008)$  的质量为  $4008 \pm 40_{-28}^{+114} \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $226 \pm 44 \pm 87 \text{MeV}/c^2$ ,是世界上首次测量.

对于  $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}\pi^+\pi^-\psi(2S)$  过程,Belle 利用  $673 \text{fb}^{-1}$  数据,对从阈值到  $5.5 \text{GeV}$  的范围测量了  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\psi(2S)$  的产生截面<sup>[5]</sup>,并非常清楚地观测到两个共振态信号,即  $Y(4360)$  和  $Y(4660)$ ,如图3(b)所示.  $Y(4360)$  的质量为  $4361 \pm 9 \pm 9 \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $74 \pm 15 \pm 10 \text{MeV}/c^2$ , $Y(4660)$  的质量为  $4664 \pm 11 \pm 5 \text{MeV}/c^2$ ,宽度为  $48 \pm 15 \pm 3 \text{MeV}/c^2$ ,信号显著性为  $5.8\sigma$ . 从  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$  不变质量谱上看,Belle 观测到的  $Y(4360)$  与 BaBar 的  $Y(4324)$  一致,但 BaBar 由于只用了一个共振态拟合而得到了不准确的共振参数,而  $Y(4660)$  则是一个新观测到的粒子,在 BaBar 的数据中,只有非常微弱的信号. 在 Belle 的测量中, $Y(4660)$  衰变产生的  $\pi^+\pi^-$  不变质量明显集中在  $1 \text{GeV}/c^2$  附近,很有可能是来源于

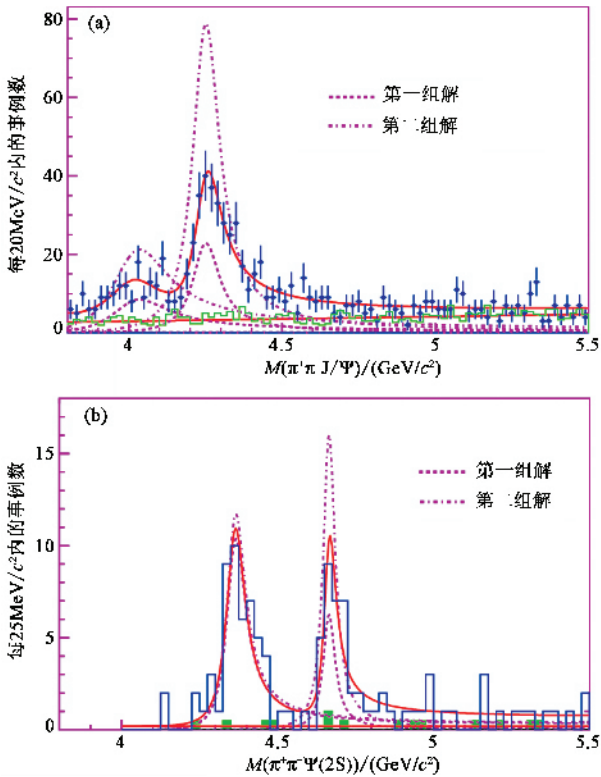


图3  $\pi^+\pi^-J/\psi$  (a),  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$  (b) 不变质量的分布以及拟合结果

$f_0(980)$  的衰变。

鉴于 CLEO 合作组在质心系能量 4.26 GeV 处观测到 3 个  $K^+K^-J/\psi$  事例, Belle 利用  $673\text{ fb}^{-1}$  数据对  $e^+e^- \rightarrow \gamma_{\text{ISR}}K^+K^-J/\psi$  过程进行了测量<sup>[6]</sup>。首次观测到  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-J/\psi$  事例的产生, 并发现在  $K^+K^-J/\psi$  不变质量的分布中只有两个  $K^+K^-J/\psi$  事例在 4.26 GeV/c<sup>2</sup> 附近, 虽然由此计算得出的产生截面与 CLEO 的结果在误差范围内一致, 但并不支持有明显的  $Y(4260)$  信号存在。Belle 在同样的数据样本中观测到  $e^+e^- \rightarrow K_S^0K_S^0J/\psi$  过程和  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-J/\psi$  的产额相比与同位旋对称的预言一致。

Belle 测量的以上 3 个过程的截面见图 4, 可以看到明显的共振结构以及不同过程间的截面差别。为得到更准确的共振参数, 除了需要更大的数据样本外, 几个过程联合起来考虑也许是必要的。需要指出的是, BaBar 的实验数据中也有  $Y(4008)$  和  $Y(4660)$  信号, 假如 BaBar 参考 Belle 的实验结果对  $\pi^+\pi^-J/\psi$  以及  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$  的不变质量谱重新拟合, 可能会得到与 Belle 相近的结果, 这将有利于对这几个态的更深一步的认识。

由于目前发现的 4—5 GeV/c<sup>2</sup> 间矢量粒子(4 个 Y 态和 3 个  $\psi$  态)明显多于粲偶素势模型的预言

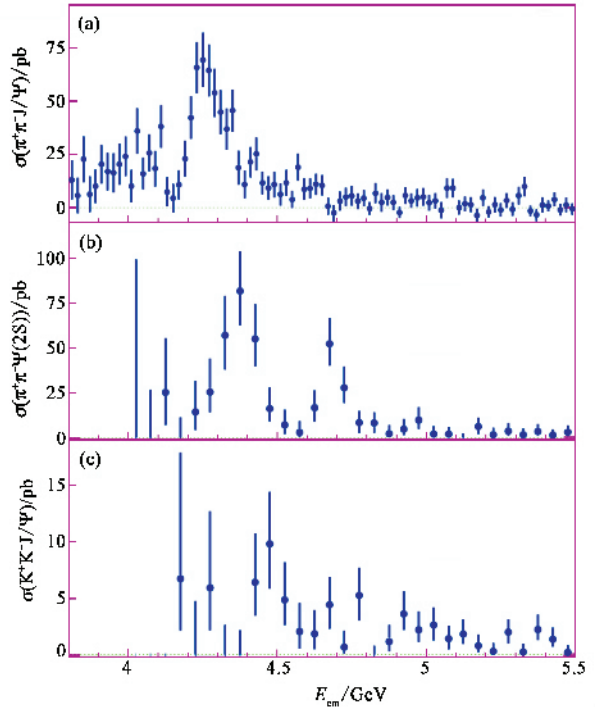


图4  $\pi^+\pi^-J/\psi$  (a),  $\pi^+\pi^-\psi(2S)$  (b) 和  $K^+K^-J/\psi$  (c) 的产生截面结果

( $3^3S_1, 2^3D_1, 4^3S_1, 3^3D_1, 5^3S_1$ ), 目前理论上对这些新粒子的性质有各种各样的猜测。文献 [7, 8] 作了很好的总结: 包括普通粲偶素, 粲偶素混杂态, 介子分子态, 重子分子态, 多夸克态等。文献 [9] 认为,  $Y(4260)$  可能是  $\Lambda_c \bar{\Lambda}_c$  重子偶素, 并试图将  $Y(4360), Y(4660)$  也纳入同样的框架中。文献 [10] 则认为不能排除  $Y(4360)$  是粲偶素混杂态。当然, 目前我们对强相互作用的理解甚至不能排除可能的末态相互作用<sup>[11]</sup> 或介子对的阈值效应<sup>[12]</sup> 等。对这些共振结构的进一步理解还需要更多的努力, 尤其是严格的理论计算, 而不仅仅是推测。

综上所述, 基于世界上最大的数据样本, Belle 利用初态辐射过程测量了  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi, \pi^+\pi^-\psi(2S)$  和  $K^+K^-J/\psi$  从各自阈值到 5.5 GeV 的产生截面, 在确认了  $Y(4260)$  和  $Y(4360)$  存在的同时, 还发现了  $Y(4008)$  和  $Y(4660)$  两个新的共振结构。这些结构与已知的粲偶素态不一致, 可能是新的粲偶素态, 也有可能是其它性质的粒子或新的动力学机制造成的, 其性质有待理论上的解释。

### 参考文献

- [ 1 ] BaBar Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95:142001
- [ 2 ] BaBar Collaboration, Aubert B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007,

98 212001

011105( R )

[ 3 ] CLEO Collaboration , He Q *et al.* Phys. Rev. D , 2006 , 74 : 091104( R )  
 [ 4 ] Belle Collaboration , Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 99 : 182004  
 [ 5 ] Belle Collaboration , Wang X L *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007 , 99 : 142002  
 [ 6 ] Belle Collaboration , Yuan C Z *et al.* Phys. Rev. D , 2008 , 77 :

[ 7 ] Swanson E S. Phys. Rept. , 2006 , 429 : 243  
 [ 8 ] Klempt E , Zaitsev A. Phys. Rept. , 2007 , 454 : 1  
 [ 9 ] Qiao C F. arXiv 0709.4066 [ hep - ph ]  
 [ 10 ] Ding G J , Zhu J J , Yan M L. Phys. Rev. D , 2008 , 77 : 014033  
 [ 11 ] Voloshin M B. hep - ph/0602233  
 [ 12 ] Bugg D , arXiv 0709.1254 [ hep - ph ]



# 北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌、硫化锌、多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金,及介质反射镜。直径 5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶。直径 5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径 5mm—200mm。(紫外、可见、红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址:北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室

电话:010-88096218/88096217 传真:010-88096216 网址:[www.goldway.com.cn](http://www.goldway.com.cn)

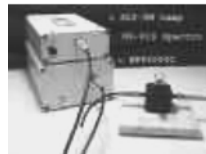
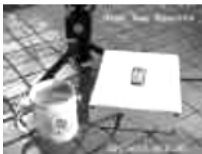
联系人:陈锦先生、施楠小姐、曾安小姐

E-mail: [kevinchen@goldway.com.cn](mailto:kevinchen@goldway.com.cn), [shinan@goldway.com.cn](mailto:shinan@goldway.com.cn), [zengan@goldway.com.cn](mailto:zengan@goldway.com.cn)

独家代理销售加拿大 GENTEC-EO 生产的激光功率能量计及光束分析仪,其产品具有功率、能量探测头规格全,宽光谱响应,探头损伤阈值高、灵敏度高,SOLO 显示器自动识别每个探头,带有自动校准功能,光束分析仪定量、定性分析激光束等特点。



独家代理销售美国 STELLARNET 生产的微型光纤光谱仪,其产品具有多种型号规格可选,坚固耐用、轻巧便携,波长范围覆盖 190—2200nm,适合于实验室、现场及野外的光谱测量。



联系人:栗曼珊 [sumanshan@goldway.com.cn](mailto:sumanshan@goldway.com.cn) 联系电话:010-84562860 84562550 传真:010-84569901



北京欧普特科技有限公司 <http://www.goldway.com.cn>

北京朝阳区酒仙桥东路一号, M7 栋东五层, 100016