

北京谱仪上的 J/ψ 物理

BES 合作组¹⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 利用 BES 上取得的 $9.0 \times 10^6 J/\psi$ 数据,进行了系统的 J/ψ 物理分析.证实了 $\xi(2230)$ 的存在,并首次发现 $\xi(2230)$ 的非奇异衰变模式.测量了 $f_0(980)$ 、 $f_2(1270)$ 的共振参数和极化.对 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 过程矩分析的结果表明 $f_j(1710)$ 是含有 0^{++} 和 2^{++} 两个态的宽结构.采用分波法测定了 $\eta(1440)$ 、 $f_0(1500)$ 的自旋宇称,得到它们的主要衰变模式.

关键词 J/ψ 衰变 胶子球 自旋宇称 极化参数

1 引言

J/ψ 为 c 和 \bar{c} 夸克组成的介子, $I^G J^{PC} = 0^- 1^{--}$, 质量为 $m = (3096.88 \pm 0.04) \text{MeV}$. 除辐射衰变 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c$ (分支比 $\sim 1.3\%$) 将 c, \bar{c} 夸克保持到末态中去之外, J/ψ 不论以其它任何方式衰变, 组成 J/ψ 粒子的 c, \bar{c} 夸克都会被湮灭掉. 正因为如此, J/ψ 的辐射衰变和强衰变一直被认为是研究强子结构和强相互作用的理想场所, 尤其是十分有利于研究轻夸克介子和寻找胶子球、混杂态和四夸克态. 自从 1974 年发现 J/ψ 粒子以来, 世界上许多大型实验组, 特别是 DM2 和 MarkIII 在 J/ψ 物理分析方面做了大量工作. 因此, 遗留下来的都是些非常棘手的问题. 对于当时年轻的 BES 合作组, 如何使自己的物理分析结果跻身国际前沿, 面临着相当大的困难.

鉴于在 BES 之前的 J/ψ 物理发展状况, 我们力求在选题方向和数据处理方法上有所突破. 在物理课题的选择方面, 首先通过分析一些分支比较大的衰变道, 在对数据质量有了清楚的了解之后, 将工作的重点集中到国际上最关注的课题上, 并由此展开 BES 的 J/ψ 物理分析. 在数据处理上, 从质量谱拟合出发, 针对不同反应道的具体特点, 分别采用螺旋度法、分波振幅法、矩分析法进行分析. 这些方法利用最大似然法估计或最小二乘法估计, 通过显著性检验, 测量衰变过程的极化参数以及共振态的自旋宇称.

北京谱仪自 1990 年至 1992 年共收集了 $9.0 \times 10^6 J/\psi$ 事例, 这些实验数据具有初态量子数确定、本底小且易于运动学拟合的优点. 经过细致的物理分析, 我们得到了丰富的

1998-05-14 收稿

1) 联系人: 胡敬亮 (中国高等科学技术中心, 世界实验室 北京 100080)

J/ψ 物理结果,尤其是在胶子球寻找这个领域里,取得了国际同行公认的成果.

2 主要研究结果

2.1 $f_0(980)$ 的实验研究

0^{++} 标量介子的行为和性质一直是人们关注和研究的热点之一,而 $f_0(980)$ 便是一个代表^[1]. 对于 $f_0(980)$ 究竟是普通的 $s\bar{s}$ 介子态,多夸克态还是 $K\bar{K}$ 分子态这一问题,始终没有定论^[2,3]. 因此,从实验上系统地研究,将有助于认识它的性质.

BES 从两个衰变道中均观察到 $f_0(980)$ 信号,并给出它的位置、宽度和过程的分支比^[4],见表 1.

表1 $f_0(980)$ 的质量、宽度和分支比的测量

衰变过程	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow X f_0(980))$
$J/\psi \rightarrow \phi \pi^+ \pi^-$	969 ± 4	43 ± 8	$(2.9 \pm 0.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-$	985 ± 9	11 ± 6	$(1.3 \pm 0.8 \pm 0.2) \times 10^{-4}$

利用螺度法对 $J/\psi \rightarrow \phi f_0(980)$, $f_0(980) \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 过程的角分布进行拟合,结果表明 $f_0(980)$ 的自旋为 0^{++} . 这些结果为认识 $f_0(980)$ 提供了重要的实验信息,从它的衰变宽度较窄和反冲 ϕ 与反冲 ω 过程的分支比 $\sim 2:1$ 来看,它可能是一个 $K\bar{K}$ 分子态.

2.2 $f_2(1270)$ 的极化参数测量

通过螺度法分析 J/ψ 辐射衰变过程, BES 测得 $f_2(1270)$ 的共振参数和极化参数列于表 2.

表2 $f_2(1270)$ 的质量、宽度、分支比和极化的测量

衰变模式	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_2)$ ($\times 10^{-3}$)	x	y
$\pi^+ \pi^-$	1274 ± 8	185 固定	$(1.1 \pm 0.1 \pm 0.24)$	0.76 ± 0.03	0.06 ± 0.06
$\pi^0 \pi^0$	1260 ± 23	207 ± 112	$(1.08 \pm 0.1 \pm 0.4)$	0.76 ± 0.07	0.04 ± 0.07

理论上预言,在 J/ψ 辐射衰变过程中,如果 $f_2(1270)$ 是纯的 $q\bar{q}$ 介子, $x = 0.76$, $y = 0.54$; 如果假设 $f_2(1270)$ 含有胶子成分,则 $x = 0.75$, $y = 0.06$. BES 的结果显示出在 1270 MeV 附近还存在着含胶子成分的态的影响. 事实上,在不变质量谱上,已经观察到 $f_2(1270)$ 高质量端有个凸起,是否正是由此而引起 $f_2(1270)$ 与普通的 $q\bar{q}$ 介子之间在极化参数上的差异,还有待于进一步的研究.

此外,我们也对 $f_2(1270)$ 在强衰变 $J/\psi \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-$ 中的极化行为进行了研究^[5,6].

2.3 $\eta(1440)$ 的自旋宇称确定

自从 80 年代 MarkII 在 J/ψ 辐射衰变中发现该信号的存在^[7]以来,由于其分支比很大,一直被认为是 0^{-+} 的胶子球候选者,从而受到国际上的广泛关注. MarkIII 和 DM2^[8] 分别

对自己的数据进行分析,结果差异很大. 实验上,在 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi\pi$ 衰变中观察到的 $\eta(1440)$ 信号比在 $J/\psi \rightarrow \gamma K\bar{K}\pi$ 中观察到的信号位置要低. BES 运用分波法系统地研究了 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^+\pi^-$, $\gamma K^+K^-\pi^0$ 两个过程^[9], 在 $\eta\pi^+\pi^-$ 和 $K^+K^-\pi^0$ 的质量谱上都看到 $\eta(1440)$ 信号. 考虑到阈值效应在不同的衰变道中的作用会不同,采用一个 s 相关的 Breit-Wigner 公式来拟合上述两个反应道中的 $\eta(1440)$. 另外,在处理 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^+\pi^-$ 数据时,首次引入了 $\pi\pi S$ 波的相互作用(即 σ). 分析结果表明 $\eta(1440)$ 的自旋宇称为 0^{-+} , 通过 $\eta\sigma$ 和 $a_0(980)\pi$ 衰变到 $\eta\pi^+\pi^-$, 通过 K^*K 和 K_0K 衰变到 $K^+K^-\pi^0$ (这里的 K_0 表示 $K\pi S$ 波). 其位置、宽度和衰变分支比见表 3.

表3 $\eta(1440)$ 的质量、宽度和分支比的测量

衰变模式	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta, \eta \rightarrow X)$
$\eta\pi^+\pi^-$	1415 ± 10	44 ± 6	$(2.6 \pm 0.8) \times 10^{-4}$
$K^+K^-\pi^0$	1442 ± 10	66 ± 8	$(1.4 \pm 0.3) \times 10^{-3}$

在 $K^+K^-\pi^0$ 的质量谱上,还发现 $\eta(1440)$ 信号的低端存在着 $f_1(1420)$, 其质量位置为 $m = 1431 \pm 5 \text{ MeV}$, 衰变模式为 K^*K . 结合辐射衰变和强衰变的结果, $f_1(1420)$ 不是胶子球或四夸克态,很可能是一个混杂态; $\eta(1440)$ 不可能是 η 或 η' 的激发态,而有可能是一个 0^{-+} 的胶子球态和普通的介子态的混合.

2.4 $f_0(1500)$ 的性质分析

$f_0(1500)$ 作为 0^{++} 胶子球候选者在很多衰变道中被广泛研究. Crystall Barrel 合作组在 $p\bar{p}$ 湮没中观察到 $f_0(1500)$, 其主要衰变模式为 $\sigma\sigma$ ^[10]. 由于 $f_0(1500)$ 和其它标量介子态相比,宽度较窄 ($\sim 111 \text{ MeV}$)^[11], 而且它强烈地耦合到 $\sigma\sigma$, $\eta\eta$ 和 $\eta\eta'$, 故文献 [12] 认为 $f_0(1500)$ 可能为胶子球和 $q\bar{q}$ 态的混合.

Bugg 等人对 MarkIII 的 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 的数据重新分析后发现了 $f_0(1500)$ ^[13]. BES $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 数据的分波分析也证实了 $f_0(1500)$ 的存在. 两家的分析都表明 $f_0(1500)$ 主要衰变到 $\sigma\sigma$. 下面是 BES 得到的衰变分支比:

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500), f_0(1500) \rightarrow \sigma\sigma) = (4.1 \pm 0.6) \times 10^{-4}$$

文献 [14] 指出 $f_0(1500)$ 衰变到 $\sigma\sigma$ 的比例约为 50%, 根据 BES 上述的结果, 可得

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500)) \geq (8.2 \pm 1.2) \times 10^{-4}$$

进而利用文献 [14] 中的公式, 计算给出:

$$Br(f_0(1500) \rightarrow gg) = 0.66 \pm 0.15$$

这与 BES 的 $J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500) \rightarrow \gamma\pi^0\pi^0$ 得到的结果^[15] 是一致的, 表明 $f_0(1500)$ 包含有较大的胶子球成分.

综上所述, $f_0(1500)$ 在很多衰变道中被观察到, 从它的衰变模式和产生过程看, $f_0(1500)$ 可能为胶子球和普通介子态的混合.

值得一提的是, 在 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 数据的分析过程中, 在 1700 MeV 附近还拟合出一个 0^{++} 态和一个 2^{++} 态, 拟合得到的位置、宽度与用矩的方法分析 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+K^-$ 衰变的结果互相吻合.

2.5 $f_j(1710)$ 的结构分析

$f_j(1710)$ 是由 Crystal Ball 在 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta$ 中首先发现的^[16], 其后, 别的实验组在 J/ψ 强衰变、 pp 中心产生^[17] 等实验过程中同样看到了这个信号. 因为 $f_j(1710)$ 在 J/ψ 辐射衰变中丰富产生而在 $\gamma\gamma$ 碰撞、 K^-p 反应并不出现, 引起人们的兴趣. 此外, 对于 $f_j(1710)$ 的自旋宇称究竟是 0^+ 还是 2^+ 也是一个争论的焦点. 1993 年, BES 采用矩分析方法研究了 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ 数据. 结果表明, 在 1710 MeV 质量区间是有结构的, 低质量端为 2^{++} 的成分, 高质量端为 0^{++} 的成分^[18, 19]. 随后, BES 又将这两个成分的具体峰位和宽度确定下来^[20], 见表 4.

表 4 0^{++} 和 2^{++} 的质量、宽度和分支比

自旋	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow \gamma X, X \rightarrow K^+ K^-)$
0^{++}	1718 ± 8	85 ± 24	$(0.8 \pm 0.1) \times 10^{-4}$
2^{++}	1696 ± 5	103 ± 18	$(2.5 \pm 0.4) \times 10^{-4}$
$\xi(1525)$	1516 ± 5	60 ± 23	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^{-4}$

上述结果中最引人注目的是 0^{++} 的成分, 它在 J/ψ 辐射衰变中的产额较高, 粘度非常大, 在 $K\bar{K}, \pi^+ \pi^-, \eta\eta, \pi^0 \pi^0$ 衰变终态中均被观察到, 这些性质都表现出含有胶子成分. 近几年来, 理论上对标量胶子球的质量计算也取得了进展, QCD 格点理论预言为 1.55—1.74 GeV. 目前, 欧洲和美国的粒子物理界正在为标量胶子球是 $f_0(1500)$ 还是 $f_j(1710)$ 高端的 0^{++} 成分而争执不下. 不过也有人认为这两者都不是纯的胶子球态, 而是 0^{++} 胶子球、 $s\bar{s}, n\bar{n}$ 介子态的混合^[21]. 至于 0^{++} 胶子球的最终确定, 还需要有更多的实验信息.

2.6 J/ψ 辐射衰变中的 $\xi(2230)$ 研究

自从 Mark III 在含有奇异夸克的衰变模式中发现 $\xi(2230)$ ^[22] 以后, BES 在同样的模式 (即 $K^+ K^-, K_s^0 \bar{K}_s^0$) 下证实了 $\xi(2230)$ 的存在. 更重要的是 BES 还发现了 $\xi(2230)$ 的非奇异夸克衰变模式 (即 $\pi^+ \pi^-, p\bar{p}$)^[23], 这对认识 $\xi(2230)$ 的性质, 特别是把它作为一个胶子球起着格外重要的作用. BES 的分析揭示出 $\xi(2230)$ 的一些重要的性质: 在辐射衰变中富有产生; 衰变宽度窄; 各衰变模式的分宽度较小; $\pi\pi, K\bar{K}$ 衰变模式呈现味对称性等. 这些性质, 恰恰是胶子球的典型特征, 用 $q\bar{q}$, 多夸克态, 混杂态等均难以解释.

表 5 $\xi(2230)$ 的质量、宽度和分支比的测量

衰变模式	质量 (MeV)	宽度 (MeV)	$Br(J/\psi \rightarrow \gamma \xi, \xi \rightarrow X)$
$\pi^+ \pi^-$	$2235 \pm 4 \pm 6$	$19^{+13}_{-11} \pm 12$	$(5.6^{+1.8}_{-1.6} \pm 2.0) \times 10^{-5}$
$K^+ K^-$	$2230^{+6}_{-7} \pm 16$	$20^{+20}_{-15} \pm 17$	$(3.3^{+1.6}_{-1.3} \pm 1.2) \times 10^{-5}$
$K_s^0 \bar{K}_s^0$	$2232^{+8}_{-7} \pm 15$	$20^{+25}_{-16} \pm 14$	$(2.7^{+1.1}_{-0.9} \pm 0.8) \times 10^{-5}$
$p\bar{p}$	$2235 \pm 4 \pm 5$	$15^{+12}_{-9} \pm 9$	$(1.5^{+0.6}_{-0.5} \pm 0.5) \times 10^{-5}$
$\pi^0 \pi^0$	2244 ± 35	20 固定	$(4.4 \pm 2.2) \times 10^{-5}$

其后, BES 在 J/ψ 的中性衰变道中首次发现 $\xi(2230) \rightarrow \pi^0 \pi^0$ ^[15], 所得结果与前期的带电道分析是一致的. 另外, 在 $\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-, \eta\eta'$ 和 $\eta' \eta'$ 衰变模式中也观察到 $\xi(2230)$ 信号存在的迹象. 通常, η 和 η' 与胶子有很强的耦合, 在 $\eta\eta'$ 和 $\eta' \eta'$ 中找到 $\xi(2230)$ 意味着它更符合

合胶子球的性质。表 5 详细列出了上述系统研究的结果。

从表 5 中可以看出, $\xi(2230)$ 有许多的衰变道仍然没有被发现。BES 的 $\xi(2230)$ 研究将围绕其自旋宇称的测量、新的衰变模式的寻找继续开展下去。

3 总结

在过去的几年中, BES 利用自己的 J/ψ 数据作了大量的物理分析, 尤其是对一些重要的介子态和可能的胶子球态的特性进行研究。随着有关张量胶球候选者 $\xi(2230)$ 、标量胶球候选者 $f_0(1500)$ 和 $f_j(1710)$ 研究结果的陆续发表, BES 在胶子球寻找这一重要领域里已显示出很强的活力。在 BES 升级改进之后, 希望将 J/ψ 数据的统计量提高 3—5 倍。相信到那时, BES 将会在胶子球的确认、介子谱和胶子球谱的研究方面有更大的突破。

参 考 文 献

- 1 Augstin J E. Nucl. Phys., 1989, **B320**:1; Boyer T et al. Phys. Rev., 1990, **D42**:1350
- 2 Zou B S, Bugg D. Phys. Rev., 1994, **D50**:591
- 3 BES Collaboration, High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1995, **19**:289
(BES 合作组. 高能物理与核物理, 1995, **19**:289)
- 4 The 3rd Workshop on the τ -C factory, Spain, 1-6 June 1993, 487
- 5 BES Collaboration, High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1992, **16**:385
- 6 BES Collaboration, High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, **17**:97
(BES 合作组. 高能物理与核物理, 1993, **17**:97)
- 7 Scharre D et al. Phys. Lett., 1980, **B97**:963
- 8 Bai Z et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**:1328; Bai Z et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **65**:2507; Augustin J E et al. Phys. Rev., 1992, **D46**:1951
- 9 BES Collaboration, to be submitted to Phys. Lett.
- 10 Abele A et al. (CBAR), Phys. Lett., 1996, **B380**:453
- 11 Spanier Stefan, hep-ex/9801006
- 12 Amsler C, Close F E. Phys. Rev., 1996, **D53**: 295
- 13 Bugg D et al. Phys. Lett., 1995, **B353**:378
- 14 Close F E, Li Z P et al. hep-ph/9610280, Phys. Rev., 1997, **D55**:5749
- 15 Shen X Y. Talk at 7th International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron 97), NY, 25-30 Aug. 1997
- 16 Edwards C et al. Phys. Rev. Lett., 1982, **48**:458
- 17 Armstrong T A et al. Phys. Lett., 1986, **B167**:133; Phys. Lett., 1989, **B227**:186; Baltrusaitis R M et al. Phys. Rev., 1987, **D35**:2077
- 18 Yu Hong et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, **17**:193
(郁宏等, 高能物理与核物理, 1993, **17**:193)
- 19 Zheng Z P. Proceedings of XVI International Symposium on Lepton and Photon Interactions, Ithaca, NY 1993, 530
- 20 Bai J Z et al (BES Collab.). Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3959
- 21 Meyer C A. Private talk.
- 22 Baltrusaitis R M et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **56**:107
- 23 Bai J Z et al (BES Collab.). Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:3502

J/ ψ Physics at BES

BES Collaboration*

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract Based on 9.0×10^6 J/ ψ data collected at BES, a systematic physics analysis has been performed. We confirmed the existence of $\xi(2230)$ in $J/\psi \rightarrow \gamma K \bar{K}$ and observed for the first time the non-strange decay modes $\xi(2230) \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\pi^0 \pi^0$ and $p \bar{p}$. The resonance and polarization parameters of $f_0(980)$ and $f_2(1270)$ were measured. The moment study on $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$ revealed that the controversial $f_1(1710)$ is composed of two states, a 0^{++} and a 2^{++} . With the help of PWA method, the spin-parities for $\eta(1440)$ and $f_0(1500)$ were obtained, and their main decay modes were found.

Key words J/ ψ decay, glueball, spin-parity, polarization parameters

Received 14 May 1998

* Corresponding author: Hu Jingliang (CCAST, World Lab., Beijing 100080)