

# 粲夸克偶素物理实验研究新结果\*

顾以藩 苑长征

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 北京谱仪合作组利用其在北京正负电子对撞机上采集的  $\psi(2S)$  大数据样本,通过  $\psi(2S)$  的辐射跃迁及强子跃迁过程,开展了粲偶素物理的广泛研究.测量了  $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$ 、 $\chi_{c2}$ 、 $\eta_c$  和  $J/\psi$  粒子的有关性质,寻找了  $\eta_c(2S)$  和  $h_c(1P)$  粒子.在一系列重要结果中有: $\chi_{c0}$  粒子的宽度与质量、 $\eta_c$  粒子的质量、 $J/\psi$  的轻子衰变分支比的精确测量结果以及  $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$ 、 $\chi_{c2}$  的许多衰变道的首次测量结果.

关键词 粲偶素,强衰变,宽度,质量,衰变分支比

## RECENT PROGRESS IN EXPERIMENTAL STUDIES OF CHARMONIUM PHYSICS

GU Yi-Fan YUAN Chang-Zheng

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

Abstract Using a large sample of  $\psi(2S)$  events, intensive studies of various charmonium states have been performed on the Beijing Spectrometer at the Beijing Electron-Positron Collider via radiative and hadronic transitions from the  $\psi(2S)$ . Among the important results are: new measurements of the total width and mass of  $\chi_{c0}$ , a new measurement of the mass of  $\eta_c$ , precision measurements of leptonic branching fractions of  $J/\psi$ , and first measurements of numerous branching fractions of hadronic decays of  $\chi_{c0}$ ,  $\chi_{c1}$  and  $\chi_{c2}$ .

Key words charmonium, hadronic decays, width, mass, decay branching fractions

粲夸克偶素(以下简称粲偶素)是一个重介子家族,其成员包括  $J/\psi$ 、 $\psi(2S)$ 、 $\eta_c(1S)$ 、 $\eta_c(2S)$ 、 $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$ 、 $\chi_{c2}$  和  $h_c(1P)$  等粒子.这些粒子均由一对正反粲夸克 ( $c\bar{c}$ ) 所组成,根据两个夸克自旋(1/2)的不同相对取向而为不同的总自旋  $S$  ( $S=0$  或  $1$ )、相对轨道角动量  $L$  ( $L=0$  或  $1$ ) 和总角动量  $J = L + S$  ( $S, L$  并决定宇称  $P = (-1)^{L+1}$  及电荷共轭宇称  $C = (-1)^{L+S}$ ) 等量子数所表征;按照光谱学的通常标记方法,它们分别属于  $1^3S_1$ 、 $2^3S_1$ 、 $1^1S_0$ 、 $2^1S_0$ 、 $1^3P_0$ 、 $1^3P_1$ 、 $1^3P_2$  和  $1^1P_1$  态,如图1所示.

粲偶素作为二体系统因其结构简单、生成截面大以及在进行唯象分析时适合于采用非相对论性近似与微扰处理而成为研究夸克间力——强相互作用的理想场所.但是,一直到90年代初,粲偶素的实验研究基本上只集中于  $J/\psi$  粒子,而对其他粒子的研究十分有限, $h_c(1P)$  和  $\eta_c(2S)$  粒子虽经理论预言却至今仍未得到确证.鉴于在正负电子对撞实验中只有量子数与光子相同( $J^{PC} = 1^{--}$ ) 的粒子态能够通

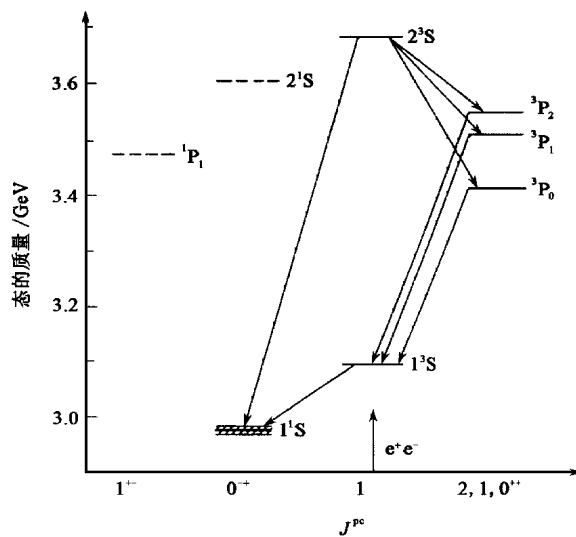


图1 粲偶素粒子质量谱

(横坐标标出粲偶素态的量子数,纵坐标标出态的质量;实线表示实验上已观察到的态,虚线表示的态尚待确证)

\* 国家自然科学基金(批准号:19290400)资助重大项目  
2000-06-01 收到初稿,2000-09-28 修回

过  $e^+e^-$  的单个虚光子交换过程直接生成,量子数不同于光子的一些粲偶素粒子,如 P 波三重态(即  $^3P_{0,1,2}$  态)粒子  $X_{c0}$ 、 $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  等,需由  $\psi(2S)$  的辐射衰变或强衰变过程获得, $\psi(2S)$  就成为正负电子对撞机上这些粒子的重要的或唯一的来源.但是,多年以来,在正负电子对撞机上  $\psi(2S)$  数据的采集鲜有超出 100 万事例数的,再加上早期探测器性能上的局限性(大部分测量完成于 80 年代初以前),这就造成了已有的粲偶素实验结果无论在数量上还是在质量上均不尽人意的状态<sup>[1]</sup>.

最近一个时期以来,粲偶素粒子实验研究对于了解夸克间力与重夸克偶素衰变机制的重要意义由于强相互作用理论——量子色动力学(QCD)研究出现新的进展而得到了新的强调.在非相对论量子色动力学(NRQCD)的基础上提出的新因子化方案<sup>[2]</sup>,应用于重夸克偶素 S 波、P 波以至更高角动量态的产生与湮没过程的唯象分析,消除了微扰 QCD 计算中长期存在的红外发散问题,使重夸克偶素 P 波衰变率的严格计算可能实现.理论研究的进展迫切地要求对粲偶素粒子特别对其 P 波三重态的早期实验数据进行更新和充实,以便于在新的水平上检验微扰与非微扰 QCD 思想.

北京谱仪国际合作组在中方科学家的倡导和推动下于 1993 年底至 1995 年初分段完成了  $\psi(2S)$  数据的采集工作,建成当前世界上最大的  $\psi(2S)$  数据样本,合计  $\psi(2S)$  衰变事例数为 380 万,相当于在此之前美国 MARK II 实验采集数据的大约 4 倍、MARK III 实验的 10 倍以上,从而开启了在正负电子湮没过程中研究粲偶素物理的崭新阶段.最近几年来,北京谱仪合作组除了  $\psi(2S)$  粒子本身的研究<sup>[3]</sup> 以外,通过它的辐射跃迁及强子跃迁过程,研究了  $X_{c0}$ 、 $X_{c1}$ 、 $X_{c2}$ 、 $\eta_c$  和  $J/\psi$  粒子的有关性质,同时寻找了  $\eta_c(2S)$  和  $h_c(1P)$  粒子,取得一系列有意义的物理结果.

关于粲偶素 P 波三重态,理论上期待着  $X_{c0}$  粒子宽度的细致测量.长期以来,唯一的数据是在 80 年代由晶体球实验提供的<sup>[4]</sup>.该实验通过两种不同的测量途径得到两个一致性很差的  $X_{c0}$  宽度结果,  $8.8 \pm 1.3 \pm 1.5$  MeV 和  $(13-21)$  MeV,然后经过缺乏严格论证的处理,将它们合成一个误差很大的数据,为  $13.5 \pm 3.3 \pm 4.2$  MeV.1992 年,美国 E760 实验采用正反质子( $p\bar{p}$ )湮没实验技术借助于  $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  的  $\gamma J/\psi$  反应首次完成了  $X_{c1}$  与  $X_{c2}$  宽度的精确测

量,但是未能实现  $X_{c0}$  宽度的精确测量<sup>[5]</sup>.此项测量的困难在于其所需要采用的  $X_{c0} \rightarrow \gamma J/\psi$  反应的分支比很小(与  $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  相比小数十倍),而  $X_{c0}$  的宽度又大于  $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  数倍.人们寄希望于 E760 的下一代实验 E835,后者计划用改进的实验装置以及大大增强的积分亮度,以争取实现  $X_{c0}$  宽度测量的相对误差达到 25% 的目标<sup>[6]</sup>.

北京谱仪合作组设计了一套独特的测量方案,先于 E835 实验成功地实现了  $X_{c0}$  宽度的细致测量<sup>[7]</sup>.这套方案的基本构思是选用  $X_{c1}$  的两个赝标介子对( $\pi^+\pi^-$  和  $K^+K^-$ )衰变模式,考虑到  $X_{c1}$  以及预期存在的  $\eta_c(2S)$  粒子因宇称守恒的要求在这类衰变模式中是被禁戒的,因而不会造成  $X_{c0}$  及  $X_{c2}$  峰形的畸变,这样就可以根据与  $X_{c0}$  在同一质量谱中观察到的  $X_{c2}$  的峰形与其业已精确测定的宽度数值<sup>[5]</sup> 进行比较定出  $X_{c2}$  质量处的实际质量分辨率,以此标定由蒙特卡罗模拟计算得出的质量分辨函数,然后用于分析  $X_{c0}$  的实验宽度.北京谱仪合作组最后测定的  $X_{c0}$  宽度为  $14.3 \pm 2.0 \pm 3.0$  MeV,在测量精度上超出了 E835 实验的预期指标,较晶体球实验结果的误差降低一倍,而可靠性有了质的提高.E835 合作组的负责人第一次在国际会议上听到北京谱仪合作组的报道时,盛赞这是一个“非常漂亮(particularly beautiful)”的工作.

针对  $X_{c0}$ 、 $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  粒子强衰变数据资料十分缺乏的现状,北京谱仪合作组通过  $\psi(2S)$  的辐射衰变过程完成了  $X_{c0}$ 、 $X_{c1}$  和  $X_{c2}$  粒子衰变的全带电径迹末态的系统分析,给出了它们的 28 个衰变道分支比(或上限)数据,其中 10 个为首次测量<sup>[7,8]</sup>.在首次测量的数据中, $X_{c0} \rightarrow p\bar{p}$  衰变道的分支比是理论上和实验上都有兴趣的物理量,而已有的实验研究始终未能确定这个道的存在<sup>[4]</sup>.北京谱仪合作组首次观察到了  $X_{c0} \rightarrow p\bar{p}$  过程并测出它的衰变分支比为  $(15.9 \pm 4.3 \pm 5.3) \times 10^{-5}$ .不久前,E835 实验组报道了同样内容的测量结果,和北京谱仪结果比较存在着系统偏离.对此,费米实验室理论部主任 C. Quigg 评论指出:E835 的结果显得“逗弄人地(tantalizingly)大”<sup>[9]</sup>!在北京谱仪重新测量的其他 18 个衰变道分支比中,大部分结果较早期测量在精度上显著提高(最多可达 2—3 倍),而中心值则有系统性的移动<sup>[9]</sup>.

北京谱仪合作组还利用其所分析的许多  $X_{c0}$  衰变模式的不变质量分布测定  $X_{c0}$  粒子质量,得到了这

个量目前国际上最精确的数值  $3414.1 \pm 0.6 \pm 0.8 \text{ MeV}^{[8]}$ , 较国际粒子数据组 (PDG) 给出的世界平均值低  $3.2 \text{ MeV}$ , 而精度提高了将近 3 倍. 与此同时测定的  $\chi_{c1}$  及  $\chi_{c2}$  粒子质量, 分别为  $3509.4 \pm 0.9 \text{ MeV}$  和  $3556.4 \pm 0.7 \text{ MeV}$ , 则与业已精确测定的数值<sup>[4]</sup>在实验误差范围内符合.

在粲偶素 S 波单态方面, 国际上  $\eta_c(1S)$  粒子质量数据之间的分歧是一个突出的问题. PDG 给出的世界平均值是对内部一致性较差的 7 家实验结果拟合而得的, 其置信水平仅有  $0.1\%$ . 其间最新测量的两家数据 E760 与 DM2 的质量值相差几乎达 4 个标准偏差<sup>[4]</sup>. 为了澄清这个分歧, 要求新的细致测量. 北京谱仪合作组利用  $\psi(2S)$  的辐射衰变过程完成了这项测量任务, 同时从中寻找  $\eta_c(1S)$  粒子的径向激发态  $\eta_c(2S)$  粒子<sup>[1]</sup>. 北京谱仪测得的  $\eta_c(1S)$  质量为  $2975.8 \pm 3.9 \pm 1.2 \text{ MeV}$ ; 这个数值与 DM2 符合得很好, 而偏离 E760 结果约有 3 个标准偏差<sup>[8]</sup>.

在粲偶素 S 波三重态方面, 北京谱仪合作组通过  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$  过程获得大量由  $\pi$  介子对标记的  $J/\psi$  事例 (这是通过  $e^+ e^- \rightarrow J/\psi$  过程采集的  $J/\psi$  事例所不具备的优点), 完成了  $J/\psi$  轻子衰变分支比的直接精确测量, 结果为  $B(J/\psi \rightarrow e^+ e^-) = (5.90 \pm 0.05 \pm 0.10)\%$  和  $B(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (5.84 \pm 0.06 \pm 0.10)\%$ , 总误差小于  $2\%$ , 是这两个参数当前世界上最精确的测量结果<sup>[10]</sup>. 此项数据收入粒子数据表后, 使世界平均值精度有了成倍的提高.

北京谱仪的以上实验成果向粲偶素物理的理论研究及时提供了迫切需要的输入数据.  $\chi_{c0}$  粒子宽度以及  $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$  和  $\chi_{c2}$  粒子衰变分支比的测量结果一经报道立即为理论工作者所引用, 它们确认了色八重态在 P 波粲偶素衰变单举过程中的重要性以及考虑高阶修正、完善 NRQCD 计算的需要<sup>[11]</sup>, 也引出了色八重态在遍举过程中和色单态具有同样重要性的论断<sup>[12]</sup>.  $\chi_{c0} \rightarrow p \bar{p}$  衰变分支比数据首次提供了检验理论模型计算并对不同模型作出判定的可能性<sup>[7]</sup>.  $\eta_c(1S)$  和  $\chi_{c0}$  等粒子的质量数据提供势模型和格点 QCD 计算中自旋-轨道项、张量项以及超精细劈裂项大小的有用信息<sup>[13]</sup>. 此外,  $\chi_{c0} \rightarrow p \bar{p}$  衰变分支比还是  $p \bar{p}$  湮没实验中诠释粲偶素结果的关键数据,  $J/\psi$  轻子衰变分支比数据则已为并且将为正在国际范围内积极开展的重夸克物理(粲物理、底物理

等)以及相对论核碰撞物理的实验研究所广泛利用<sup>[14]</sup>.

当前国际上从事粲偶素物理研究的实验工作, 除了北京谱仪实验以外, 还有在更高能量的正负电子对撞机——欧洲粒子物理研究中心的 LEP 和美国 Cornell 大学的 CESR 上的 DELPHI、L3、OPAL 和 CLEO 实验以及在费米国家实验室的反质子累积环上的 E760 实验、E835 实验和其他固定靶实验等. 虽然这些实验各有特点和长处, 但是从综合的研究能力来比较, 北京谱仪以其所采集的巨大的、干净的数据样本并能探测、分析众多衰变模式而为同行所瞩目, 其所得到的成果在数量上明显地居于各家之首, 在质量上也多处于国际前列, 几年来的研究已使这个领域的面貌大为改观. 有关论文发表于《Physical Review Letters》及其他国际学术刊物<sup>[7,8,10]</sup>, 得到了广泛引用. 涉及  $\eta_c(1S)$ 、 $J/\psi$ 、 $\psi(2S)$ 、 $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$  和  $\chi_{c2}$  等粲偶素粒子的 50 余条数据为国际粒子数据组汇编的《Review of Particle Physics》(2000 年版) 所收录<sup>[15]</sup>. 作为国际学术界反响的一个代表性例子, 《Physical Review Letters》的审稿人在对于北京谱仪合作组报道  $\chi_{c0}$  等粒子研究结果的论文审查意见中写道:“来稿是报道 P 波态粲偶素最新重要成果的优秀论文... 这些结果是高质量的. 它们得自北京正负电子对撞机上的北京谱仪合作组所采集的非常高的统计性的  $\psi(2S)$  衰变事例样本; 其 370 余万的  $\psi(2S)$  事例数令人高度赞叹. P 波态粲偶素的研究以及这些新结果的意义所在已经在论文引言中作了很好的说明. 我们对于非相对论 QCD 理论的细致了解将接受这些新数据最好的检验, 其结果将会影响到我们对于 QCD 理论以及关于强子化过程的总体认识.”

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 中国科学院高能物理研究所. 北京谱仪正负电子物理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1998. 215—265, 292—307 [ Institute of High Energy Physics, CAS.  $e^+ e^-$  Physics at Beijing Spectrometer. Nanning: Guangxi Science & Technology Publishers, 1998. 215—265, 292—307 (in Chinese) ]
- [ 2 ] Bodwin G T, Braaten E, Lepage G P. Phys. Rev., 1992, D46: R1914
- [ 3 ] 顾以藩, 李新华. 物理, 1999, 58: 257 [ GU Yi Fan, LI Xin Hua. Wuli (Physics), 1999, 58: 257 (in Chinese) ]
- [ 4 ] Caso C *et al.* (PDG) Review of Particle Physics. Eur. Phys. J., 1998, C3: 1
- [ 5 ] (E760 Collaboration) Nucl. Phys., 1992, B373: 35

(下转第 80 页)

1) 实验寻找未见  $\eta_c(2S)$  粒子存在的确定证据, 详见苑长征博士学位论文(中国科学院高能物理研究所, 1997 年).