

# $\Psi(2S)$ 粒子及粲夸克偶素物理实验研究\* ——2001 年度国家自然科学基金获奖项目介绍

顾以藩

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 文章介绍 2001 年度国家自然科学基金二等奖获奖成果<sup>1)</sup>。在北京正负电子对撞机上采集了  $\Psi(2S)$  粒子大数据样本,开展了粲偶素物理的广泛研究,完成了 6 个粲偶素涉及质量、宽度和衰变分支比等大批重要参数的首次测量或高精度测量,通过对  $\Psi(2S)$  和  $J/\Psi$  强衰变性质的比较研究,观察到一系列反常现象,挑战现有理论图像,该项研究成果对量子色动力学的检验与发展具有重要意义,为我国粲偶素物理实验研究的继续发展并保持先进水平奠定坚实基础。

**关键词** 粲偶素,量子色动力学,质量,宽度,衰变分支比,反常

## EXPERIMENTAL STUDIES ON PHYSICS OF THE $\Psi(2S)$ PARTICLE AND OTHER CHARMONIUM STATES

GU Yi-Fan

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

**Abstract** Using the world's largest sample of  $\Psi(2S)$  events collected at the Beijing Electron-Positron Collider, extensive studies on all 6 charmonium states below charm threshold have been conducted. Of more than 50 results including measurements of mass, width and branching fraction, 21 parameters were measured for the first time, and a large part of the others were determined with the highest precision. A number of anomalies have been observed from a careful comparison of the branching fractions for various modes of exclusive hadronic decays of the  $J/\Psi$  and  $\Psi(2S)$ , which pose a significant challenge to the present understanding of hadronic decays. This study is of importance to the test and development of quantum chromodynamics, and provides a solid foundation for continuing experimental studies of charmonium physics at an advanced level in China. It was awarded a 2nd Class National Science Award in 2001.

**Key words** charmonium, QCD, mass, width, decay branching fraction, anomaly

### 1 立项背景

代表着当前粒子物理学最高理论成就的粒子物理标准模型成功地描述了涉及基本粒子(夸克、轻子和媒介子)及其相互作用(强、电磁和弱相互作用)的大量物理现象,并且作出了一系列正确的定量预言。但是,这个模型中描述强相互作用部分的理论——量子色动力学(QCD)仍是一个有待发展、完善的理论,其所面对的重大挑战乃是如何定量描述大距离亦即非微扰情况下的强耦合表现并达到足够(例如 $\sim 1\%$ )的精度水平。实现这个目标的意义不仅在于建立 QCD 理论的完整认识,而且也将推动粒子物理其他方面(例如超出标准模型的理论探索)乃至凝聚态物理与原子物理中的重要课题(例如近藤效应、甚高电离系统等)的研究。最近一些年来, QCD 理论在格点规范理论以及有效场理论如非相对论性量子色动力学(NRQCD)等方面取得了可喜进展;为了及时

验证理论并对理论的进一步发展作出正确导向,迫切需要大量新的和精度不断提高的实验数据。

粲夸克偶素(以下简称粲偶素)是粲夸克及反粲夸克组成的二体束缚态。在相应于质心系能量  $3.73\text{GeV}$  的粲阈以下,实验观察到了 6 个粲偶素成员  $\eta_c(1S)$ 、 $J/\Psi$ 、 $\Psi(2S)$ 、 $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$  及  $\chi_{c2}$  粒子,理论还预言了两个成员  $\eta_c(2S)$  及  $h_c(1P)$  粒子,有待进一步证实<sup>2)</sup>。

历史的经验表明:二体系统在人们关于基本相互作用的认知过程中发挥着重要作用。重夸克偶素

\* 国家自然科学基金重大项目(批准号:19290400);中国科学院重大基础科研项目(批准号:KJ85-H-10)

2002-08-13 收到

1) 获奖人:顾以藩、李新华、苑长征、白景芝、陈宇

2) 关于  $\eta_c(2S)$  粒子在 B 介子衰变中观察到的最新报道见本刊 2002 年第 31 卷第 10 期第 690 页物理新闻

(如粲偶素和底偶素)提供了研究夸克之间强作用力的理想“实验室”。人们曾把粲偶素称为“QCD 氢原子”,用以表明它对于 QCD 理论的重要性——如当年氢原子在量子力学创建与发展过程中所曾起过的突出作用。对于考察微扰与非微扰 QCD 交界面的动力学,粲偶素物理有着特殊的重要意义,这种重要性更由于理论研究的最近进展而得到新的强调。

粲偶素虽然早在 20 世纪 70 年代即已发现,但是一直到 90 年代初,这个领域的实验研究在很大程度上仍旧停留在相当初级的阶段。从 1990 年版的粒子数据表可以看到,除了对  $J/\psi$  基于寻找胶子束缚态的目的继续于 20 世纪 80 年代间进行了大量衰变道的测量以外,其他粲偶素的绝大部分数据仍然是 80 年代以前的早期结果,许多还是当时的独家测量。这些结果多数基于不足 100 万  $\psi(2S)$  的数据样本,测量的统计误差和系统误差均大。例如  $\chi_{c0}$  总宽度的独家数据给出相对误差为 40%,而误差的估计本身也不可靠。即使是  $J/\psi$  的一些基本参数,也十分不如人意,以它的轻子分支比为例,相对误差高达 13%。由于数据样本小,  $\psi(2S)$  和  $\chi_{cJ}(J=0,1,2)$  的许多较小分支比的衰变道无法观察,仅有少数衰变道测定了分支比的上限值。

涉及粲偶素衰变性质的研究,早在 1983 年曾有关于“ $\rho\pi$  疑难”的报道,即  $J/\psi$  衰变中具有大分支比(1%量级)的  $\rho\pi$  和  $K^*+K^-+c.c.$  道在  $\psi(2S)$  衰变中却观察不到,与微扰 QCD 理论预期的常规图像明显相悖。此项原本饶有兴趣的发现以后在实验上再无新的进展,而相应的理论努力由于缺乏足够的实验资料也难以在阐释疑难方面取得成效。

鉴于粲偶素物理实验的上述态势、QCD 理论的近期进展以及由此而出现的研究机遇,由中美学者共同组建的北京谱仪合作组,应用我国建造的高能粒子加速器——北京正负电子对撞机与大型实验装置——北京谱仪所具备的能区优势以及性能特点,从 20 世纪 90 年代起不失时机地开展了粲偶素物理领域的实验工作,在粲偶素谱参数和衰变性质方面进行了系统测量和深入研究。

## 2 研究成果

### 2.1 实验方法

北京正负电子对撞机的工作能区为质心系能量 2—5GeV,适合于开展粲夸克与  $\tau$  轻子物理的研究。调节正负电子束能量,使其发生对撞的质心系能量为 3.686GeV,相应于  $\psi(2S)$  粒子的产生阈值;应用北京谱仪将对撞产生的末态粒子信息记录下来,形成原始数据,然后在具有强大运算能力的计算机系

统上将原始数据处理、转换成赋有定量物理内容的重建数据,再根据设定的物理目标和研究方案进行离线数据分析。鉴于在正负电子湮没反应中仅有量子数与光子相同的粒子态[如  $\psi(2S)$ ]能够直接生成,而具有其他量子数的粲偶素需由  $\psi(2S)$  粒子的辐射衰变或强衰变过程产生,  $\psi(2S)$  粒子就成为正负电子对撞机上这些粲偶素的重要的或惟一的来源。本研究项目先后采集了 380 万个  $\psi(2S)$  粒子事例,成为 20 世纪内世界上最大的  $\psi(2S)$  粒子样本。在实验过程中,物理研究人员与对撞机运行人员密切配合、精心操作,保证了这批数据的高质量获取。

### 2.2 粲偶素谱参数的系统测量

基于高质量的大数据样本,同时在物理构思、研究方法与分析技术等方面均有所创新和发展,本研究项目完成了 6 个粲偶素粒子的质量、总宽度、部分宽度以及衰变分支比等大批重要参数的高水平测量,其中 21 项分支比数据为国际上首次测量,大部分数据具有当前国际最高精度<sup>[1-10]</sup>。例如  $\chi_{c0}$  粒子质量的精确测量使世界平均值精度提高了 3 倍以上<sup>[1]</sup>;  $\chi_{c0}$  总宽度的测量较原来国际间惟一数据的精度改进将近一倍,而可靠性有了本质的提高<sup>[2]</sup>;  $J/\psi$  轻子分支比的高精度测量,使相对总误差达到 1.7%,世界平均值精度在不到一个年代里提高了将近 8 倍<sup>[3]</sup>。此外,还进行了  $\eta_c(2S)$  及  $h_c(1P)$  等粒子的寻找,确定了它们的产生率上限<sup>[11]</sup>。

与测量工作同时,本项目还指出了美国 E760 实验及国际权威性文献《粒子物理评论》(Review of Particle Physics)中涉及数据处理及数据引用的多处重要错误,并建议了两项供国际粒子数据组对有关数据进行重新拟合的输入数据<sup>[12]</sup>。新版的《粒子物理评论》收录了本项研究发表的 51 项结果以及根据建议订正了的 15 项粒子数据<sup>[13]</sup>。粲偶素物理领域的的数据面貌得到了明显改观。

### 2.3 粲偶素强衰变性质研究

基于新测得的  $\psi(2S)$  衰变数据,对于基态粲偶素粒子  $J/\psi$  与其径向激发粒子  $\psi(2S)$  的强衰变性质进行了比较研究。按照常规理论的预言,  $\psi(2S)$  与  $J/\psi$  衰变图样之间在部分子层次上具有相似性,两者具有相同衰变末态的分支比之间大约保持 15% 的关系。本项研究在不同末态介子组合模式的二体衰变过程和辐射衰变过程中证实了符合常规理论预言的若干正常衰变道的存在,同时观察到了多例异常现象<sup>[4-8]</sup>。它们是 4 例末态介子自旋-宇称组合为  $1^-2^+$  模式的  $\psi(2S)$  衰变道,相对于  $J/\psi$  的相应衰变道表现为反常压低<sup>[4,14]</sup>; 2 例末态为  $1^-0^-$  模式

的 $\Psi(2S)$ 辐射衰变道相对于 $J/\Psi$ 表现为反常压低<sup>[5]</sup>, 1例末态为 $1^+0^-$ 模式的 $\Psi(2S)$ 衰变道相对于 $J/\Psi(1S)$ 表现为反常增大<sup>[6]</sup>, 在末态为 $1^+0^-$ 模式的 $K_1\bar{K}$ 衰变过程中, 观察到 $J/\Psi$ 和 $\Psi(2S)$ 表现出相反的味 $SU(3)$ 破坏的 $K_1(1270)-K_1(1400)$ 不对称性, 无法通过调节单态-三重态轴矢量混合统一起来<sup>[6]</sup>, 在末态为 $1^-0^-$ 模式的衰变过程中, 测得 $\Psi(2S)$ 至 $\rho\pi$ 的衰变相对于 $J/\Psi$ 压低超过450倍的特大反常效应, 以及观察到末态介子的 $K\bar{K}^*$ 时 $J/\Psi$ 和 $\Psi(2S)$ 迥异的同位旋破坏效应等. 图1给出了实验结果与理论预言之间的比较. 图中纵坐标按序号列出不同末态介子组合模式的衰变道. 横坐标为按理论预期值归一的比值 $Q$ , 其中理论值设为1, 实验值表为——, 实验上限值表为 $\leftarrow$ . 从图可以看到: 衰变道1—4的实验值在测量误差范围内与理论预期值一致, 5, 6为末态介子自旋-宇称组合为 $1^+0^-$ 模式的反常衰变道, 7—12为 $1^-0^-$ 模式的反常衰变道, 13—16为 $1^-2^+$ 模式的反常衰变道, 其实验结果均显著偏离理论预期值.

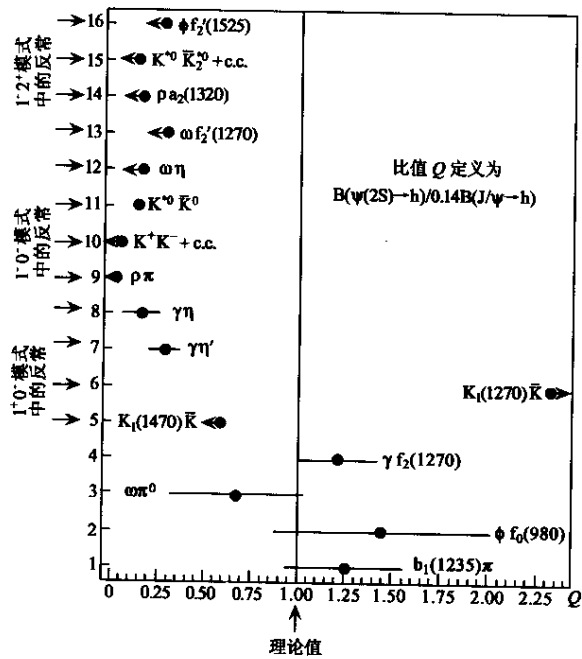


图1  $\Psi(2S)$ 相对于 $J/\Psi$ 衰变分支比之比值 $Q$ 的实验结果与理论预言比较

### 3 科学意义

上述研究成果应用于重夸克偶素物理和QCD理论与实验研究的多个方面, 揭示出一系列重要性质及物理涵义:

关于 $\Psi(2S)$ 强衰变性质的观测以及多种反常现

象的发现大大扩展了早期文献曾经报道的粲偶素强衰变疑难的物理内容, 提供了理论研究长时期盼的数据资料, 激发了国际理论界深入探讨粲偶素衰变机制的新一轮热潮. 自1997年以来, 已先后提出了不少于10个理论模型, 尝试对新现象作出解释<sup>[15-18]</sup>. 随着这些理论努力在细致性和定量程度上的提高, 实验结果中一些深层的性质正在逐步发掘出来, 例如反常出自 $\Psi(2S)$ 而非 $J/\Psi$ <sup>[17]</sup>; 反常压制表现于强衰变振幅而非电磁衰变振幅, 压制达到电磁衰变振幅的水平等<sup>[7, 18]</sup>.

新的实验结果对许多理论模型作出了判定性的检验<sup>[15, 17, 19]</sup>. 例如, 若干不出现反常压制的 $\Psi(2S)$ 二介子衰变道的首次观察, 否定了采用能量相关指数形状因子的模型<sup>[6-8]</sup>;  $\Psi(2S)$ 辐射衰变至 $\eta'$ 的分支比测量结果则以高出一个数量级的分歧排除了广义受阻M1跃迁模型(而与我国学者考虑了 $\eta'$ 与 $\eta_c(2S)$ 混合重要性的估算结果一致)等<sup>[5]</sup>.

$J/\Psi$ 和 $\Psi(2S)$ 的 $1^+0^-$ 和 $1^-0^-$ 介子对衰变数据与粒子数据表已有的相关数据被联合应用于振幅分析, 意外地发现 $J/\Psi$ 情况下3胶子振幅与单光子振幅之间存在着大的( $\pi/2$ )相对相角[而 $\Psi(2S)$ 情况下看来为小]<sup>[17, 20]</sup>. 理论界认为这是“一项未曾预期的重要结果”, 不仅对于了解这些衰变的本性而且对于探讨CP破坏衰变的可观测性从而了解CP破坏的起源都是十分重要的<sup>[21]</sup>.

$\Psi(2S)$ 衰变为 $\tau^+\tau^-$ 轻子对的分支比测量填补了国际上长期存在的空白, 虽然数据误差较大, 却首次实现了粲偶素系统中 $e, \mu, \tau$ 三代轻子性质的直接比较, 显示它们满足序贯轻子假设预期的关系<sup>[9]</sup>.  $\Psi(2S)$ 辐射衰变至赝标介子 $\eta'$ (或 $\eta$ )的分支比数据用于进行了 $J/\Psi$ 以外的粲偶素情况下关于赝标八重态-单态混合角的第一个独立估算, 与 $J/\Psi$ 及其他情况下给出的数值在实验误差范围内一致<sup>[5]</sup>.

涉及 $\chi_{c0}, \chi_{c1}$ 和 $\chi_{c2}$ 粒子的一系列测量提供了当前QCD理论检验与发展迫切需要的数据. 其国际上首次严格测定的 $\chi_{c0}$ 宽度数据, 在正式发表前即被理论工作者应用于粲偶素P波态单举过程的唯象研究, 为NRQCD计算提供可靠验证, 首次展示了色八重态对QCD辐射修正的贡献及其重要性<sup>[22]</sup>.  $\chi_{c1}$ 的赝标介子对及重子对衰变分支比数据也在论文发表前即被应用于遍举粲偶素衰变的理论分析, 进一步肯定了色八重态在粲偶素P波态遍举过程中的重要地位<sup>[23]</sup>.

$\chi_{c0}$ 的赝标介子对衰变分支比数据, 还用于纯胶球的一个重要判据即其衰变的味道无关性的检

验<sup>[24]</sup>。这些数据连同也是本项目测得的  $\chi_{c0}$  的正反质子对衰变分支比结果,在当前粒子物理实验热点之一的胶球寻找与证认[例如关于  $\xi(2230)$  粒子的讨论]中发挥了重要的实际作用<sup>[24]</sup>。 $\chi_{c0}$  的  $p\bar{p}$  衰变分支比还是正反质子湮没实验需要的关键数据,并首次提供了甄别不同模型的可能性<sup>[2]</sup>。

$\chi_{c0}$  与  $\eta_c$  质量的高精度测量提供了势模型和格点 QCD 计算中自旋相关力强度的有用信息。其中  $\eta_c$  质量的结果澄清了国际间诸家实验数据之间的分歧,并得到了随后北京谱仪和 L3 实验新的测量结果的支持<sup>[13, 25]</sup>。

一些粲偶素参数还是重夸克实验与唯象研究不可缺少的基础参数或工具数据。例如  $J/\psi$  轻子衰变分支比的测量结果以其高精度主宰了当前的世界平均值<sup>[13]</sup>,已广泛应用于 B 介子的衰变测量与 CP 破坏研究、相对论重离子碰撞实验以及 QCD 唯象研究等方面。

#### 4 国际比较与反响

在国际同期开展粲偶素物理研究的十余家实验组中,本项目是惟一一家采用正负电子对撞在阈附近产生粲偶素的方法,其综合研究能力以及所得成果数量均居于领先地位,而遍举强衰变过程的分析能力更被公认在当前是独一无二的。

根据《粒子物理评论》2000 年版收录的粲偶素数据所作的统计表明,本项目收录数据(51 项)超出了其他实验组同期收录数据之和(41 项)<sup>[13]</sup>。本项研究在促使粲偶素物理研究近年来重新成为粒子物理活跃领域的过程中发挥了举足轻重的作用。

本项目主要论文发表在《物理评论通讯》(Physical Review Letters)等国际著名学术刊物上,迄今正面引用达 200 次以上,包括:对所得实验结果进行分析、提出理论诠释;用作理论计算的输入数据;用于检验理论预言及比较计算结果;提供实验测量所必需的基础参数以及与同类测量的结果进行比较等。

李政道教授在谈到我国高能物理实验研究情况时指出:“现在在北京正负电子对撞机……这个能区领域,全世界公认,中国是第一。”<sup>[26]</sup>国际粒子物理界一些学者指出:“北京谱仪合作组拥有‘世界上最大的  $\psi(2S)$  衰变样本”;“近年里完成了一大批  $\psi(2S)$  遍举衰变数据的测量<sup>[16]</sup>,它们‘和理论预期耀眼地矛盾’<sup>[18]</sup>”;“看来排除了迄今理论建议的所有可能的关于  $\rho\pi\pi$  疑难的解答<sup>[17]</sup>”;“理解和阐明这些数据是对理论的巨大挑战<sup>[16]</sup>”。《物理评论通讯》审稿人将

有关来稿称作“优秀论文”,指出:“这些结果是高质量的”;“现时对于非相对论 QCD 理论的细致了解将接受它们的充分检验,其结果将影响到我们关于 QCD 理论以及强子化的总的看法”。

本项研究为我国粲偶素物理实验研究的继续开展并保持先进水平奠定了坚实的基础。最近,在北京正负电子对撞机上顺利进行了新一轮实验,已经采集了 1400 万  $\psi(2S)$  粒子数据提供分析研究,作为较远期的目标,对撞机计划进行重大改造,新的粒子谱仪也将着手建造。我国在  $\tau$  轻子-粲夸克物理能区的实验研究前景是令人鼓舞的。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,1999 ,D60 :072001
- [ 2 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. Lett. ,1998 ,81 : 3091
- [ 3 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,1998 ,D58 :092006
- [ 4 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. Lett. ,1998 ,81 : 5080
- [ 5 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,1998 ,D58 :097101
- [ 6 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 : 1918
- [ 7 ] Gu Y F ( representing the BES Collaboration ). DPF'96 :The Minneapolis Meeting ,V. 2 :986
- [ 8 ] Li X H ( on behalf of the BES Collaboration ). Nucl. Phys. Proc. Suppl. ,1999 ,75B :181
- [ 9 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,2002 ,D65 :052004
- [ 10 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,1996 ,D54 :1221 ; Errat. 1998 ,D57 :3187
- [ 11 ] 苑长征. 博士学位论文. 中国科学院高能物理研究所,北京,1997; 谢跃红. 博士学位论文. 中国科学院高能物理研究所,北京,1998; Yuan C Z. PhD Thesis. IHEP, CAS, 1997; Xie Y H. PhD Thesis. IHEP, CAS, 1998 ( in Chinese )]
- [ 12 ] Gu Y F ,Li X H. Phys. Lett. ,1999 ,B449 :361
- [ 13 ] Particle Data Group ( Groom D E *et al.* ). Review of Particle Physics. Eur. Phys. Jour. ,2000 ,C15 :1
- [ 14 ] Gu Y F ,Tuan S F. Int. J. Mod. Phys. Lett. ,1995 ,A10 :615
- [ 15 ] Gu Y F ,Li X H. Phys. Rev. ,2001 ,D63 :114019
- [ 16 ] Chernyak V. Workshop on “  $e^+e^-$  Collisions from  $\phi$  to  $J/\psi$  ” ,1—5 March ,1999 ,Novosibirsk ,hep-ph/9906387
- [ 17 ] Suzuki M. Phys. Rev. ,2001 ,D63 :054021
- [ 18 ] Gerard J M ,Weyers J. Phys. Lett. ,1999 ,B462 :324
- [ 19 ] Gu Y F ,Tuan S F. Nucl. Phys. ,2000 ,A675 ( 1—2 ) :404
- [ 20 ] Suzuki M. Phys. Rev. ,1998 ,D57 :5717 ;Phys. Rev. ,1999 ,D60 : 051501
- [ 21 ] Achasov N ,Gubin V V. Phys. Rev. ,2000 ,D61 :117504
- [ 22 ] Huang H W ,Chao K-T. Phys. Rev. ,1996 ,D54 :6850 ;Maltoni F. hep-ph/0007003
- [ 23 ] Bolz J *et al.* Phys. Lett. ,1997 ,B392 :198 ;Eur. Phys. J. ,1998 , C2 :705 ;Wong S M H ,Nucl. Phys. ,2000 ,A674 :185
- [ 24 ] Seth K K. Nucl. Phys. ,2000 ,A675 :25
- [ 25 ] BES Collaboration ( Bai J Z *et al.* ). Phys. Rev. ,2000 ,D62 :072001
- [ 26 ] 李政道. 李道政文录. 浙江文艺出版社,1999. 2 [ Lee T D. Essays of T. D. Lee. Zhejiang Literature and Art Press, 1999. 2 ( in Chinese )]