

# 从粲偶素到类粲偶素 ——北京谱仪实验物质 结构研究的魅力之旅

苑长征

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1991年9月1日,哈利·波特从伦敦乘坐霍格沃茨特快进入了他的魔法世界;9月2日,我辗转来到济南乘坐开往北京的列车,在位于北京西郊的中国科学院高能物理研究所,开始了我在粒子物理王国的探秘之旅。

在那之前两年,北京谱仪(BES)开始物理实验;当年的夏天,刚刚完成了900万 $J/\psi$ 事例的采集,正式成立了北京谱仪国际合作组,开始酝酿采集数据进行高精度的 $\tau$ 轻子质量测量。1992年夏天我完成研究生课程的学习正式开始进行研究工作,到现在已超过30年,这期间我从一个研究生成长为一个资深研究人员,见证了北京谱仪实验从第一代到第二代(BESII)、第三代(BESIII)的发展和取得的一系列成就。

在这篇文章中,我根据我的经历和我搜集的材料,尝试描述三代BES实验在粲偶素和类粲偶素研究方向上发展的大致脉络<sup>[1]</sup>。

粒子物理夸克模型认为常规强子,即介子是一对正反夸克、重子是三个夸克通过强相互作用形成的束缚态。在这个框架中,由一个粲夸克和一个反粲夸克组成的介子称为粲偶素,包括 $J/\psi$ 、 $\psi(2S)$ 、 $\eta_c(2S)$ 、 $h_c(1P)$ 等。因为粲偶素与原子物理中的氢原子结构类似,被认为是研究强相互作用的理想场所。类粲偶素是本世纪初以来发现的包含一对正

反粲夸克但却具有不同于预期粲偶素性质的一类粒子。因为粒子物理理论不排除常规强子以外其它粒子的存在,如混杂态(除夸克外还有激发的胶子)、分子态(两个或多个介子或重子束缚在一起)、多夸克态(含四个或更多夸克)、胶子球(只含胶子不含夸克)等,已发现的类粲偶素粒子中可能存在这些奇特态粒子,因而引起了理论和实验极大的关注。实验上发现的类粲偶素均以 $X(\text{xxxx})$ 、 $Y(\text{xxxx})$ 、 $Z(\text{xxxx})$ 表示(其中xxxx是以MeV为单位的质量值),类粲偶素也称为XYZ粒子。

## 一、走进粲偶素世界

1991年底开始的 $\tau$ 轻子质量精确测量是在BES上进行的第一个重要实验。虽然由于参加研究生课程的学习未能全程参加实验,我还是在各种规模的讨论会上得以体会在科学上有所发现时的极端兴奋和自豪,这也增强了我投身粒子物理实验研究的热情。

1992年夏,我完成课程学习进入实验室工作,首次面临的是研究方向的选择。BES实验刚在 $\tau$ 物理上取得重要进展,当然是一个不错的选择,但我的导师薛生田老师认为BES实验在 $\tau$ 物理研究上有很大的局限性,虽然对于 $\tau$ 质量的测量有很大优势,但在其它如寿命、分支比、耦合常数等的测量上却

严重受限于统计量。在这样的情况下,薛老师建议我进行粲偶素研究。“Mark III 实验利用 $\psi(2S)$ 衰变测量得到的 $J/\psi$ 轻子道衰变分支比与之前利用能量扫描得到的结果有很大差异,这个非常奇怪,我们应当理解这是什么原因。”薛老师说,“顾以藩老师在组织 $\psi(2S)$ 相关的研究,你跟他联系一下,参加他们的组会和讨论吧。”(图1)这个决定,将我带进了此后30年的粲偶素相关的研究领域。

BES 实验之前世界上用于 $\psi(2S)$ 研究的数据很少,但可以用 $\psi(2S)$ 数据进行的粲偶素研究内容却非常丰富,因为通过 $\psi(2S)$ 的强子跃迁或者辐射跃迁可以产生所有粲阈以下的粲偶素,包括当时尚未发现的 $\eta_c(2S)$ 和 $h_c(1P)$ 。

顾以藩老师 1992 年 6 月在承德召开的 BES 合作组会上提出了利用大约 1 个月时间采集 100 万  $\psi(2S)$  事例的提议没有得到批准,但在 1993 年 6 月在香山召开的 BES 合作组会上再次提议得到了有条件的批准:1 个月内采集 100 万  $\psi(2S)$  事例或采集不够的话最多运行 1 个月。幸运的是当年加速器和

探测器状态都非常稳定,从 1993 年 12 月 12 日起在 26 天时间内就完成了取数任务,这成为 BES 粲偶素物理研究的第一个专用的数据样本,我跟踪了整个数据采集过程并记录了加速器、探测器的状态和数据质量。

1994 年 6 月在杭州召开的 BES 合作组会上,我们  $\psi(2S)$  物理组成员展示了大量利用新数据得到的初步结果,合作组决定下一个运行年度继续采集更多  $\psi(2S)$  事例。这样到 1995 年夏天, BES 拥有了大约 400 万  $\psi(2S)$  事例,这是当时世界上最大的  $\psi(2S)$  数据样本,也是 2001 年国家自然科学二等奖项目“ $\psi(2S)$  粒子及次生粲夸克偶素物理的实验研究”所依据的主要的数据样本。

在硕士期间我完成了两项研究工作以精确测量  $J/\psi$  轻子对衰变的分支比,其一是利用  $\psi(2S)$  数据进行的测量,是我独立完成的,这是我硕士论文的主要工作,另一项是我与朱永生老师(图 1)合作完成的,利用了  $J/\psi$  能量扫描的数据进行测量。这两种方法测量的结果一致,并且比当时其它测量的精度

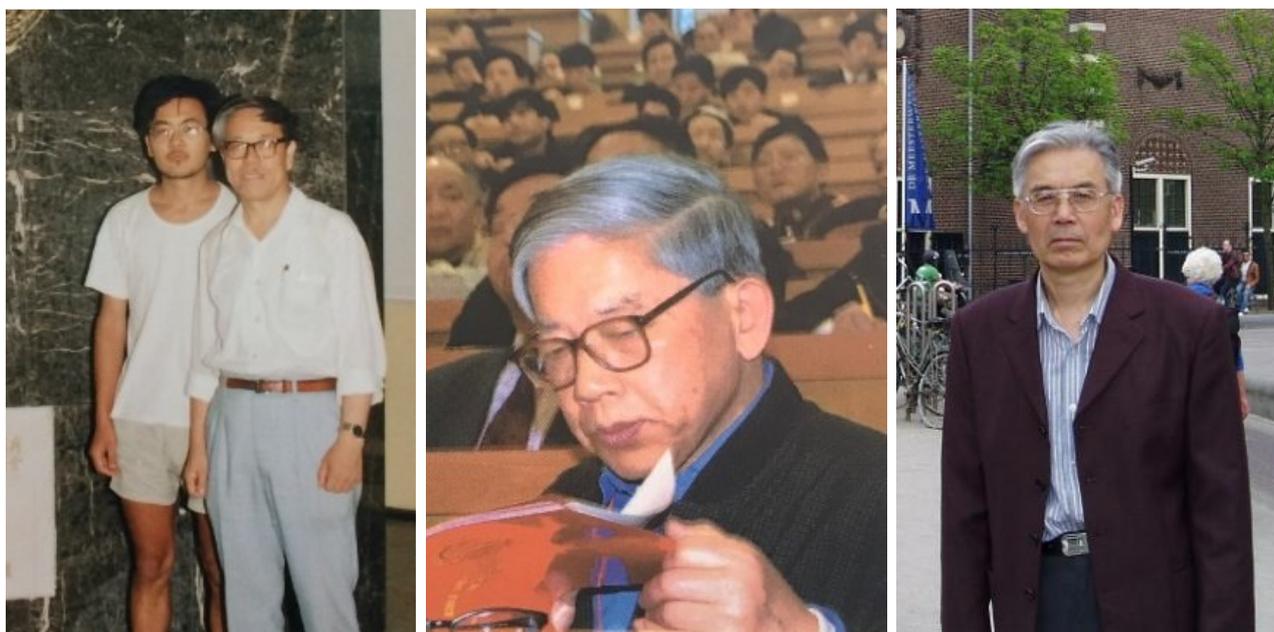


图1 我和我的硕士导师薛生田老师(左)、BES I 粲偶素组组长顾以藩老师(中)、BES II 粲偶素组组长朱永生老师(右)

都高。凭借第一项工作,1994年我获得硕士学位,第二项研究工作则使得我作为团队成员首次获得了中国科学院自然科学奖。

除了物理分析方面的工作,我参加了当时 $\psi(2S)$ 物理组的多项基础性的工作,包括数据质量检查、探测器的蒙特卡罗模拟、事例总数的测量等。我的工作得到了当时 $\psi(2S)$ 物理组组长顾以藩老师的高度认可,由于他当时不是博士生导师,我投考了我国著名科学家何泽慧先生的博士。

1994年秋,我成为何泽慧先生的博士研究生,但研究工作仍然在 $\psi(2S)$ 物理组跟随顾以藩老师进行。何先生对科学和人生的态度给我带来了深深的影响。1995年11月7日,顾老师和我一起到何先生的办公室讨论我的论文选题。我做了充分的调研,并复印了一张粲偶素能谱,列出了可能的研究课题以及意义和面临的问题(图2)。在我提到当时的选题——寻找粲偶素自旋单态 $\eta_c(2S)$ ——“理论上进行了很多计算,有可能在我们的实验上发现”时,何先生说:“你是一个实验家,不要只听理论家的话,你要让理论家跟着你走!”,并当场在那张粲偶素能谱上写下了“立足常规,着眼新奇!”。这对年轻的我来说无疑是当头棒喝,如醍醐灌顶为我指出了一个优秀科学家的认识高度,也促成了我寻找

更多的机会跟何先生作更多方面的交流。当时何先生的办公室在 高能所主楼,我除了定期汇报研究进展之外,每次到主楼办事,都会到何先生的办公室呆一会儿,听她讲她的学习、科研经历、她对科研的看法和对当时的研究项目的看法等。

我的博士论文答辩安排在1997年6月24日上午,进会议室之前何先生将我叫到一边,以她特有的口气轻描淡写地说:“不要怕,他们都不如你懂的!”——我通过论文答辩,获得博士学位,也以在粲偶素研究中的新发现获得中国科学院院长奖学金特别奖。

何泽慧先生推荐我到李政道主持的中国高等科学技术中心(CCAST)跟随叶铭汉院士继续从事BES物理研究。叶先生曾任高能所所长,后担任CCAST主任。叶铭汉先生曾是推动BES实验建设的主要负责人,他除了支持我继续深入粲偶素相关的研究,也支持我投入到当时进行中的BESII上R值精确测量实验中。在此期间我发表了人生第一篇《物理评论快报》(Physical Review Letters,简称PRL)文章“Study of the P-wave charmonium state  $\chi_{c1}$  in  $\psi(2S)$  decays”,发现利用 $\pi^+\pi^-$ 和 $K^+K^-$ 可以很好地标记 $\chi_{c0}$ 衰变并测量了 $\chi_{c0}$ 的总宽度,也发现了 $\chi_{c0}$ 与正反质子对的耦合;而在R值测量实验中,我提出并

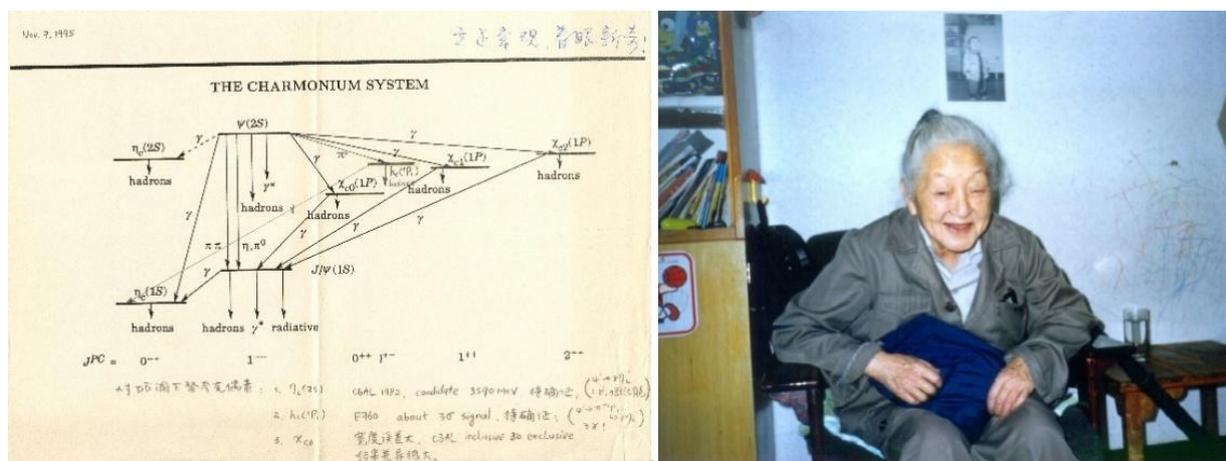


图2 1995年11月7日我跟何先生讨论博士论文开题时带的粲偶素能谱,右上角为她的题词,下部是我调研的论文课题(左)、1998年5月23日何先生在我博士后期间居住的中关村906楼CCAST公寓(右)

实施了只用电磁量能器信息通过巴巴散射和正负电子湮灭为两个光子过程测量积分亮度的新方法,首次在BES实验将测量误差降低到3%以下。这个方法继续得到发展,在BESII和BESIII实验得到广泛应用。目前在BESIII实验中,积分亮度的测量误差已降低到0.5%水平,为BESIII实验的粲偶素和类粲偶素研究提供了基础数据。在后来的文献调研中我惊奇地发现,首次在实验上发现巴巴散射和正负电子湮灭为光子这两个物理过程都是何先生在1945年完成的!当年的物理发现成为现在精确测量的基础。

BESI在粲偶素方面的研究成果很好地总结了2001年国家自然科学奖项目“ $\psi(2S)$ 粒子及次生粲夸克偶素物理的实验研究”中(获奖人:顾以藩、李新华、苑长征、白景芝、陈宇)。以下摘录于2001年《国家科学技术奖励获奖项目公报》:

“该项研究应用我国自己建造的通用型粒子探测器—北京谱仪在北京正负电子对撞机上采集了当前世界上最大的 $\psi(2S)$ 数据样本,完成了包括 $\eta_c$ 、 $J/\psi$ 、 $\psi(2S)$ 、 $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$ 和 $\chi_{c2}$ 粒子在内的质量、总宽度、部分宽度以及衰变分支比等50余项重要参数的测量,还进行了 $\eta_c(2S)$ 及 $h_c(1P)$ 等粒子的寻找。其中21项衰变道的分支比数据属国际上首次测量,相当一部分数据具有当前国际最高精度。与测量工作同时,还指出了国外工作和国际粒子数据表中涉及数据处理及数据引用的多处重要错误,建议和订正了15项 $\psi(2S)$ 衰变数据。以上结果使粲夸克偶素物理领域的的数据面貌得到了明显改观。

根据测得的大量 $\psi(2S)$ 衰变数据资料,进行了基态粲夸克偶素粒子 $J/\psi$ 与其径向激发粒子 $\psi(2S)$ 强衰变性质的比较研究,在不同末态介子自旋-宇称组合模式的二介子衰变过程和辐射衰变过程中发现了一系列反常现象。这些结果大大扩展了早期文献曾经报道的粲夸克偶素强衰变疑难的物理内容,向现有理论认识提出挑战,引发了进一步探究粲夸克偶素强衰变机制的新的理论努力。自1997年以来,国际间接连提出了近十个理论模型,

尝试对新现象作出解释。

以上成果的获得得益于高质量大数据样本的建立,同时在实验构思、测量方法和数据分析技术等方面作出了重要创新和发展。与在国际上同期开展粲夸克偶素物理研究的10余家实验比较,本项目的综合研究能力以及所得成果的数量都居于领先地位,而对于遍举强衰变过程更具有独一无二的分析能力。它在近年来促使国际粲夸克偶素物理研究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。”

在1999年博士后即将出站时,我决定加盟法国科研中心粒子物理与核物理研究所直线加速器实验室Michel Davier教授的团队,参加在日内瓦欧洲核子研究中心的大型正负电子对撞机LEP上的ALEPH实验。这得到了叶先生的支持,尤其是他得知我将与Michel Davier合作时,他非常高兴:Michel Davier教授是法兰西科学院院士,在 $\tau$ 物理和正负电子对撞物理方面是国际知名专家,也是叶先生多年的好朋友;Michel Davier教授的水平,代表了当时高精度测量的国际水平。何泽慧先生对我的决定也很高兴:巴黎是何先生早年追随小居里夫妇从事核物理研究的地方,也是她和钱三强先生发现原子核三分裂和四分裂的地方。

1999—2001年,我参加ALEPH实验进行 $\tau$ 衰变系统研究,利用所有LEP1数据测量了 $\tau$ 衰变的分支比及能谱函数,应用于 $\mu$ 子反常磁矩和强作用耦合常数的测量、 $e$ - $\mu$ - $\tau$ 轻子普适性检验等。这是世界上最高精度的测量,文章在Physics Reports发表已经近二十年了<sup>[2]</sup>,仍然没有实验能超过这些测量的精度,预期未来十年也不会有测量能超过这个精度。跟Michel Davier的合作,让我深刻领会到进行高精度测量的精髓。这些训练和早年在小信号寻找方面的训练,造就了我在高能物理实验分析方面的全面技能。

2001年春,Michel Davier接到高能所的邀请,参加北京正负电子对撞机改造工程项目评审。临

行前,他对我说,这个项目不足以与美国的 CESRc 项目竞争,他不打算做正面推荐;可评审回来后,他的态度发生了 180 度的大转弯,因为在他参加评审时项目的内容发生了巨大的变化,由原来计划的亮度比 BEPC 提高十倍变成了提高百倍,具备了世界上最好的指标,拥有了绝对的国际竞争优势。同时,他建议我回到祖国,回到自己的优势领域,建设这个新的实验,做出新的发现。

## 二、从粲偶素到类粲偶素

在二十一世纪初离开欧洲回到北京面临的是一个不小的生活落差,当时的学术氛围也给年轻人造成了很多困扰。中国科学院的“百人计划”项目起了关键的作用,我以正研究员职称加入高能物理研究所,并拥有足够的启动经费参加正在运行的 BESII 和正在计划的北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)以及北京谱仪的升级(BESIII)。

初次踏入高能所整整 10 年之后,2001 年 9 月我回到高能所,负责在 BESII 上采集新的  $\psi(2S)$  数据进行粲偶素研究。BESII 实验  $\psi(2S)$  数据采集于 2001 年 11 月 22 日至 2002 年 3 月 13 日共 111 天,这个包括 1400 万  $\psi(2S)$  事例的数据样本直到 2006 年 CLEOc 采集 2400 万  $\psi(2S)$  事例一直是世界上最大的专用数据样本。除此之外,我们还首次提出并于 2003 年 1-2 月间采集了  $6.4 \text{ pb}^{-1}$  连续区数据用来研究非共振过程对粲偶素物理的影响。经过多年的发展,这已经成为共振态研究中的标准操作。

利用升级后的北京谱仪收集的高质量 1400 万  $\psi(2S)$  事例、 $\psi(2S)$  扫描数据和连续区数据,我们以前所未有的精度系统测量了粲偶素  $\psi(2S)$ 、 $\chi_{c0}$ 、 $\chi_{c1}$ 、 $\chi_{c2}$ 、 $J/\psi$  等的质量、宽度和衰变分支比等重要物理量,发现了大量新衰变模式,观察到新现象和新规律,并尝试发展新理论模型进行解释。尤其对微扰 QCD 预言的“12%规则”进行了深入研究,首次测量了所有基态矢量-赝标量、矢量-张量末态的压低因

子并发现了赝标量-赝标量末态的反常增强;排除了大部分解释“ $\rho\pi$ 疑难”的理论模型。首次提出并研究了连续振幅对物理结果的影响,开辟了利用共振态与连续态干涉进行物理研究的新领域;首次测量了  $\psi(2S)$  电磁与强衰变振幅间的相角,限定了  $\psi(3770)$  衰变中相角的范围;首家报道了五夸克态  $\theta(1540)$  未在粲偶素衰变中发现的证据,为最终确定  $\theta(1540)$  不是真实物理信号提供了重要信息。2010 年版“粒子物理手册”包含我们 189 项数据,其中 117 项为世界首次测量,116 项具有最高精度。这些研究成果在数量和质量上都具国际先进水平,大大扩展了粲偶素物理的研究领域,特别在  $\psi(2S)$  和  $\chi_c$  研究方面居于国际领先和主导地位,有力地推动了粲偶素衰变和产生机制及量子色动力学的理论和实验研究。

与 BESII 期间不同,BESII 的研究不仅面临来自 2003 年开始取数的美国 CLEOc 实验的直接竞争,也面临来自 1999 年开始运行的两个 B 工厂——美国的 BaBar 和日本的 Belle 实验——的巨大压力。由于这三个实验的探测器都是专为在更高能量的 B 物理研究设计的,跟 BESII 探测器比,不论在带电粒子还是在中性粒子的探测上都有很大的优势。在很多过程的分析中,CLEOc 实验采集的 300 万  $\psi(2S)$  事例已经可以与 BESII 实验 1400 万  $\psi(2S)$  事例达到的精度相当。两个 B 工厂则可以通过多种产生方式对粲偶素能谱、产生及衰变进行研究,尤其重要的是,Belle 实验开创了一个新领域——类粲偶素的研究。

2003 年,在 B 介子衰变中,Belle 实验在  $\pi^+\pi^-J/\psi$  末态中发现了一个非常窄的共振态,因为其质量为 3872 MeV 且不能轻易归为粲偶素粒子,被临时命名为 X(3872)。这个粒子质量与  $\bar{D}^0D^0$  阈值非常接近,也引起了它是分子态的猜测。这成为当年 9 月在费米实验室召开的第二届夸克偶素工作组(QWG)研讨会上的热门话题。

这个发现引起了 BESII 实验的关注,但除非 X(3872)是一个矢量粒子, BESII 可以通过类似 J/ψ 能量扫描的办法在其质量区域扫描以更精确测量其质量和宽度,否则限于加速器的亮度和已知的信息,很难找到好的研究方法。当然如果它是一个矢量粒子的话,也可以在更高能量数据中通过初态辐射过程产生,但 BESII 并没有高能的数据。我的硕士导师薛生田老师指出, BESI 在 4.03 GeV 采集过数据并且研究过类似的过程——这为我们检验 X(3872)是否是一个矢量态提供了契机:我和莫晓虎、王平一起分析了已有的数据,得到了 X(3872)与正负电子对耦合的上限,确定 X(3872)不可能是一个矢量粒子——这应当是利用 BES 数据最早进行的类粲偶素研究<sup>[3]</sup>。

2005 年, BaBar 实验在对初态辐射产生过程研究中发现了一个新的矢量粒子, Y(4260), 引起了新一轮类粲偶素粒子研究的热潮。此时的 BESII 探测器已经拆除进行升级,于是我组织粲偶素组的部分成员利用 BESII 已发表的 R 值测量数据对 Y(4260)与正负电子对的耦合进行了测量,因为数据中没有明显的信号,我们确定了这种耦合的上限——自 2006 年发表直到现在,这是对这个量的唯一测量。

与此同时,北京正负电子对撞机重大改造工程在如火如荼地进行中,我作为 BES III 粲偶素物理组组长组织了物理模拟和研究,同时与中国科学院大学乔从丰教授组织撰写了《BES III 物理黄皮书》粲偶素物理部分,邀请 Ted Barnes 和 Steve Olsen 在理

论和实验上对粲偶素和类粲偶素能谱及性质进行了梳理,提出了在 BESIII 采集数据研究类粲偶素粒子的可能<sup>[4]</sup>。随着 2008 年北京正负电子对撞机重大改造工程的完成,类粲偶素的实验研究逐渐在 BES III 得到重视。

### 三、发现带电类粲偶素

BEPCII 加速器最初设计的能量最大值为 4.2 GeV 且亮度优化在 3.77 GeV, BESIII 早期的物理研究集中在 J/ψ、ψ(2S)和 ψ(3770)上。我们在 2008 年提出的粲偶素研究策略是利用 ψ(2S)数据精确测量粲偶素自旋单态 η<sub>c</sub>、η<sub>c</sub>(2S)和 h<sub>c</sub>(1P)的性质,并适时采集数据研究高质量粲偶素能谱和类粲偶素粒子。2009 年采集的第一批约 1 亿 ψ(2S)事例奠定了研究这些粲偶素自旋单态以及大量关于其它粲偶素衰变测量的基础。

2010 年 6 月我在沈阳召开的 BESIII 合作组会议上提出了第一个在 4.04 GeV 取数的类粲偶素研究计划<sup>[5]</sup>,并开始和 Matt Shepherd 担任粲偶素组召集人,这个取数建议在 10 月得到批准,于是我们在 11 月成立了一个下属的“XYZ 工作组”,由王亮亮、张景芝、Ryan Mitchell 担任召集人,每周三讨论取数的准备和类粲偶素物理研究的灵敏度以及未来的研究可行性。BES III 于 2011 年 5 月 3 日至 6 月 1 日在 4.01 GeV 采集了 482 pb<sup>-1</sup>数据,这是 BESIII 专为类粲偶素研究采集的第一个数据样本。2011 年 6

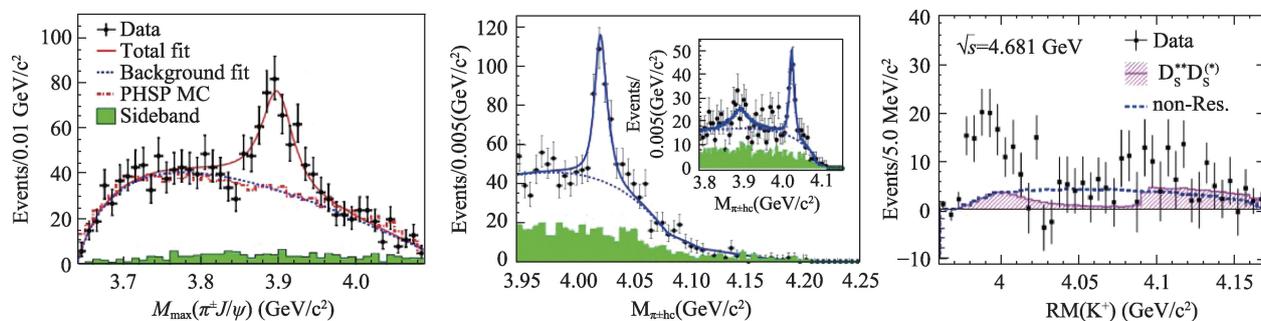


图3 BESIII 实验发现的带电类粲偶素 Z<sub>c</sub>(3900)(左)、Z<sub>c</sub>(4020)(中)和 Z<sub>c</sub>(3985)(右)

月的合作组会议上 Ryan Mitchell 报告了在  $Y(4260)$  附近采集 4 个数据点研究  $Y(4260)$  共振态线型和新衰变末态的 XYZ 取数建议,但限于 BEPCII 的最高能量约束,2011-12 年度仍运行在  $J/\psi$  和  $\psi(2S)$  共振峰上。

2012 年夏天加速器最高能量升级到 4.6 GeV,使得 BESIII 在高能量下数据采集成为可能。经过 XYZ 工作组的深入讨论,2012 年夏季合作组会上提出的取数计划优化为在  $Y(4260)$  和  $Y(4360)$  的峰上各采集  $500 \text{ pb}^{-1}$  数据以寻找  $h_c(2P)$ 、带电类粲偶素以及其它新的衰变末态等,这个计划得到合作组的批准。

2012 年 12 月 14 日北京谱仪实验首次在 4.26 GeV 采集数据,加速器和探测器都非常稳定,到 2013 年 1 月 14 日仅用一个月时间就完成了预期 45 天的数据采集。之后的数据刻度、重建、检查和分析在非常紧张的状态下进行,在 2 月的 XYZ 工作会议上就不断地有新的结果展示出来,尤其是发现了新粒子的迹象后,整个实验组都处于极度兴奋当中,各种检查、各种分析、各种确认,分析备忘录的准备、审查、文章的撰写、修改、审查等等,所有这些都在这两个月内完成了——在这批数据中发现了一个新的共振结构,命名为  $Z_c(3900)$ ! (见图 3)——3 月 24 日,我将文章提交到预印本库 arXiv<sup>[5]</sup>,刘智青将文章提交到《物理评论快报》;3 月 26 日,BES III 国际合作组向全世界发布了这个消息!

BESIII 新发现的  $Z_c(3900)$  是一个带电的类粲偶素粒子。粲偶素含有一个粲夸克和一个反粲夸克,都是中性的,不带电荷;但  $Z_c(3900)$  含有一个粲夸克和一个反粲夸克且带有和电子相同或相反的电荷,提示其中至少含有四个夸克,不可能是常规强子。日本的 Belle 实验也于 3 月 30 日报道在 4.17 GeV 数据中发现了相同的粒子<sup>[6]</sup>;4 月 10 日美国 CLEO-c 实验在 4.17 GeV 数据中也报道证实了  $Z_c(3900)$  的存在<sup>[7]</sup>。在短短的 17 天时间内,这个新发现得到实验证实,它是第一个在实验上确证的至少含 4 个夸克的新的强子形式,在粒子物理学领域

引起了强烈的反响。

BESIII 的论文<sup>[5]</sup>和 Belle 的论文<sup>[6]</sup>于 2013 年 6 月 17 日在同一期《物理评论快报》上发表,第二天《自然》(nature)杂志就此发表了题为“Quark quartet opens fresh vista on matter(夸克‘四重奏’打开了物质世界一扇崭新的大门)”的报道,称找到一个四夸克构成的粒子意味着宇宙中存在奇特态物质。论文被 PRL 编辑推荐并邀请著名强子物理学家 Eric Swanson 作了题为“New Particle Hints at Four-Quark Matter(新粒子暗示存在四夸克物质)”的焦点评论。认为  $Z_c(3900)$  对于理解强子的基本结构非常重要。“如果四夸克解释得到确认,粒子家族中就要加入新的成员,我们对夸克物质的研究就需要扩展到新的领域。”

$Z_c(3900)$  的发现也使得 BESIII 物理研究进入了一个崭新的阶段,BESIII 合作组调整了数据采集计划,在 2012-13 和 2013-14 两个运行年度采集了 3.8~4.6 GeV 之间大约  $5 \text{ fb}^{-1}$  的数据,这成为 BESIII 类粲偶素研究上一系列发现的基础:2013 年 12 月发表了发现另一个带电类粲偶素  $Z_c(4020)$  的结果(图 3),论文也被 PRL 编辑推荐;之后又在 PRL 杂志上发表了一系列文章:发现  $Z_c(3900)$  和  $Z_c(4020)$  到粲介子对的衰变模式;发现了  $Z_c(3900)$  和  $Z_c(4020)$  的中性伴子;发现了  $X(3872)$  的新产生和衰变模式;发现了  $Y(4260)$  的精细结构;确定了  $Z_c(3900)$  的自旋宇称等,BES III 上的类粲偶素研究走到了国际前列。

2013 年 12 月 30 日,美国物理学会主编的《物理》杂志公布了当年物理学领域十一项重要成果<sup>[8]</sup>，“发现四夸克物质”位列榜首：“以前的实验表明,强子一般由两个或三个夸克组成。今年夏天,在中国的 BES III 合作组和在日本的 Belle 合作组宣布,在 4.17 GeV 高能正负电子对撞中发现了一个‘神秘粒子’,其中含有四个夸克。虽然人们对这个被称为  $Z_c(3900)$  的粒子的性质有多种解释,但‘四夸克态’的解释得到更多关注。”该发现还入选 2013 年度“中国科学十大

进展”、中国科学院“十二五”25项重大科技成果及标志性进展、中国科学院改革开放四十年“40项标志性重大科技成果”等。

#### 四、路漫漫其修远兮

为保持在本领域尤其在类粲偶素粒子研究领域的国际领先优势,BESIII粲偶素研究团队在2014年冬季BESIII合作组会上提出了在BES III实验上采集数据的“大计划”以深入研究粲偶素和类粲偶素性质<sup>[9]</sup>:在4 GeV以上直至4.6 GeV甚至更高能量上每10 MeV采集约500 pb<sup>-1</sup>数据以系统研究已知的XYZ粒子并寻找可能的新的XYZ粒子!这个计划在之后的8年间得到了合作组大力的支持,已经又采集了15 fb<sup>-1</sup>数据。而在这期间,又发现了新的矢量粒子Y(4390)和Y(4500)、发现了D波粲偶素 $\psi(1^3D_2)$ 、发现了Z<sub>c</sub>(3900)的奇异夸克伴随态Z<sub>cs</sub>(3985)(图3)、发现了X(3872)、Y(4260)和Z<sub>c</sub>(3900)之间的关联等。

在2019年9月组织的《BESIII物理白皮书》<sup>[10]</sup>国际评审中,评审委员会对粲偶素与类粲偶素研究方面的成果给出了高度评价:“BESIII粲偶素物理取得了重大科学发现,其发现的有明确特征的奇特共振态Z<sub>c</sub>(3900)和Z<sub>c</sub>(4020),都是世界级的发现。此外,观察到了此前认为是Y(4260)粒子的非平庸的截面形状、辐射产生过程 $e^+e^- \rightarrow \gamma X(3872)$ 使得BESIII成为这一领域新的参与者(这一领域直到不久前还一直由B工厂和LHCb所主导)。”

评审委员会还指出:“粲偶素物理研究非常重要,BESIII在这方面具有独特的优势。我们认为升级BEPCC对成功地继续BESIII关于粲偶素物理的研究至关重要……此研究方案将会从BEPCC与BESIII的升级中特别获益。”

2021年7月,中国科学院复函同意了北京正负电子对撞机对撞能量和取数效率升级:在未来的四年里将能量升高到5.6 GeV,亮度升高到 $1.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (能量4.7 GeV处)。这在BESIII上研究粲偶素和类粲偶素提供了新的契机。

下一个发现在哪里?这个问题谁都无法给出肯定的回答。但发现一定来自于不懈的探索,让我们期待我国在基础研究中作出新的发现,为科学发展作出贡献!

#### 参考文献

- [1] Minghan Ye and Changzheng Yuan, 30 Years of BES Physics, World Scientific Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1142/11757>.
- [2] S. Schael et al. [ALEPH Collaboration], Branching ratios and spectral functions of tau decays: Final ALEPH measurements and physics implications, Phys. Rept. 421 (2005) 191-284.
- [3] C. Z. Yuan, X. H. Mo and P. Wang, The Upper limit of the  $e^+e^-$  partial width of X(3872), Phys. Lett. B 579 (2004) 74-78.
- [4] D. M. Asner et al., Physics at BES-III, Int. J. Mod. Phys. A 24 (2009) S1.
- [5] M. Ablikim et al. [BESIII Collaboration], Observation of a Charged Charmoniumlike Structure in  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  at  $\sqrt{s}=4.26$  GeV, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 252001 [arXiv:1303.5949 [hep-ex]].
- [6] Z. Q. Liu et al. [Belle Collaboration], Study of  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  and Observation of a Charged Charmoniumlike State at Belle, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 252002 [arXiv: 1304.0121 [hep-ex]].
- [7] T. Xiao, S. Dobbs, A. Tomaradze and K. K. Seth, Observation of the Charged Hadron Z<sub>c</sub><sup>±</sup>(3900) and Evidence for the Neutral Z<sub>c</sub><sup>0</sup>(3900) in  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$  at  $\sqrt{s}=4170$  MeV, Phys. Lett. B 727 (2013) 366-370 [arXiv:1304.3036 [hep-ex]].
- [8] M. Rini and J. Thomas, Physics 6 (2013) 139.
- [9] C. Z. Yuan, Study of the XYZ states at the BESIII, Front. Phys. (Beijing) 10 (2015) 101401.
- [10] M. Ablikim et al., Future Physics Programme of BESIII, Chin. Phys. C 44 (2020) 040001.