

在陶粲领域占有一席之地： 北京谱仪成果回顾

郑志鹏¹ 黄光顺² 吕晓睿³ 李海波^{1,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学技术大学 230026;
3. 中国科学院大学 100049)

在中国科学院高能物理研究所成立 50 周年之际,笔者以回顾北京谱仪三十多年来取得的丰硕成果的方式来表达祝贺。

一、引言

粒子物理是研究基本粒子之间相互作用、相互转化规律的科学,是基础物理的最前沿学科之一。物理学是一门以实验为基础的学科,高能量粒子加速器不仅促进了粒子物理学的快速发展,同时也为物理学其他学科,乃至化学、材料、生命和医学等基础和前沿技术研究提供了平台。自上个世纪五十年代第一台高能加速器在美国问世以来,中国老一辈物理学家赵忠尧、张文裕、王淦昌等就期待中国也能建造自己的高能加速器,有自己的高能物理研究基地。他们清楚地认识到高能物理是自然科学的前沿,中国必须在这一领域拥有自己的发展计划。早在 1957 年,中国科学家根据我国国情先后提出了不同的加速器建造方案,但是由于各种因素和困难都未能实现。

1972 年 9 月,张文裕、朱洪元、谢家麟等 18 位科学家联名上书中央,希望重视高能物理研究。周恩来总理给张文裕、朱光亚先生亲笔回信,指出“这件事再也不能延迟了,科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时要把理论研究和科学实验结合起来,高能物理研究和高能加速器的预制研究,应成为科学院要抓的主要项目之一”。1973 年初,中科院以原子能研究所一部为基础成立高能物理研究

所,张文裕先生担任所长。为了建设自己的加速器和高能实验装置,原先的一批核物理学家转为高能加速器和探测器及其电子学的研究方向。高能所开始建设完备的实验工厂,开展了加速器和探测器主要部件的预先研究,并加速培养相关人才,为以后建成高能物理实验基地和对撞机打下了基础。改革开放初期,从 1978 年开始到 1983 年,在邓小平等国家领导人的支持下,我国派出一批骨干去美国、西德、西欧核子研究中心和日本等国家和地区的高能实验室学习和工作。例如当时分别派了两个小组到丁肇中先生和莫玮教授的实验组学习;1979 年由李政道先生发起,派出几十位科研人员去美国大学和国立高能实验室访问学习。这些人才为我国后来自主建造正负电子对撞机和北京谱仪打下了坚实的基础。

邓小平同志 1979 年 1 月首次访问美国时,中美两国政府签订了科学技术合作协议,并签署了第一个科学技术合作项目,这就是中美高能物理合作执行议定书。基于此项目协议,李政道先生和斯坦福直线加速器中心的创始人潘诺夫斯基教授很快在 1979 年夏促成了第一次中美高能物理委员会会谈在北京的召开。1977 年,李政道、吴健雄、袁家骝给张文裕所长写信,提出建造正负电子对撞机的建议。1981 年初,李政道先生邀请朱洪元和谢家麟先生访问美国,与在美国访问的叶铭汉先生一起参加了在费米实验室的会议^[1](图 1)。会上潘诺夫斯基教授正式提出建造质心能量为 44 亿电子伏特(4.4



图1 北京谱仪(BES)建设时期,李政道先生与时任所长叶铭汉先生

GeV)的正负电子对撞机方案。为了进一步论证该方案,根据李政道先生的建议,在美国西海岸的斯坦福直线加速器中心开展了更详细的研讨,之后得到了邓小平同志的支持并亲自拍板,决定建造北京正负电子对撞机。1984年10月7日,在多方努力下,北京正负电子对撞机(BEPC)工程正式开工,对撞机上的探测装置“北京谱仪(BES)”探测器也正式开始建造(图2)。四年后,1988年10月24日,北京正负电子对撞机和北京谱仪顺利建成。邓小平同志和时任部分党和国家领导人兴致勃勃地参观了正负电子对撞机,接见了几百位参加BEPC的建设者和出席中美高能物理领域第八次合作会议的代表。在听取了关于对撞机建设情况的汇报后,邓小平同志发表即兴讲话:“过去也好,今天也好,将来也好,中国必须发展自己的高科技,在世界高科技



图2 BES建设时期的叶铭汉先生(中)、郑志鹏研究员(左)和李金研究员(右)

领域占有一席之地。”这一讲话的题目是《中国必须在世界高科技领域占有一席之地》,成为了我国科学和技术发展的里程碑。中国的高能物理实验基地的成功建造与李政道先生的支持是分不开的,与邓小平同志作为政治家高瞻远瞩、敏锐的眼光和果断的作风是分不开的。

北京谱仪(BES)是一个大型磁谱仪,由多种粒子探测器以及对应的前端电子学读出系统、触发判选、在线数据获取、离线数据重建和物理分析框架等系统组成。BEPC和BES的成功建造为我国培养了大批的加速器、探测器、电子学、大工程管理、制冷、机械制造、精密仪器和相关计算机科学方面的人才,标志着我国粒子物理没有自己的加速器设施的历史的终结。

在BES运行期间,由于高能物理实验国际合作的需求,1991年高能所计算中心与美国斯坦福加速器中心(SLAC)实验室及国际能源超级计算中心(NERSC)建立国内第一个网络连接,1994年5月高能所计算中心网络正式加入Internet互联网,成为中国第一个互联网节点。

北京谱仪自1989年运行以来的30多年,历经了第一代北京谱仪(BES)、第二代北京谱仪(BESII)以及在第二代全新的北京正负电子对撞机(BEPC-II)上的第三代北京谱仪(BESIII),产生了一批具有世界影响力的物理成果。1991年5月BES国际合作组成立,开始只有中国和美国的物理学家参加,共100多人,后逐步扩大,至2022年BESIII实验国际合作组拥有来自17个国家,83个研究单位的约600位物理学家,成为国际上具有影响力的大型实验装置。下面将对三代北京谱仪上的重要成果进行介绍。

二、第一代北京谱仪重大成果

陶轻子质量的精确测量

在标准模型电弱理论中,轻子普适性要求三代轻子的弱耦合强度相同。但在1992年之前,国际上

实验测量给出的第三代轻子陶(τ)轻子与第二代轻子缪(μ)轻子的弱耦合强度比值约为 $G_{\nu}/G_{\mu}=0.941\pm 0.025$ 。该结果与1的偏离意味着电弱理论的轻子普适性假设可能是存在问题的,这成为了当时粒子物理的一个重要的谜团。BES实验针对这一问题,推测很可能是当时实验对陶轻子质量测量不准确导致的,于是1991年在BEPC上进行实验,利用能量扫描技术,在正-反陶轻子对质量阈值附近获取数据,测量正-反陶轻子对产生截面随能量变化的关系曲线,进而获得陶轻子质量^[2]。BES在阈值附近的陶轻子质量测量方法在国际上是首创的,质量结果为 $1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.21$ MeV,比世界平均值低7.2 MeV,精确度提高了10倍。按照BES新的质量结果,结合新的陶轻子寿命和衰变分支比测量的结果,弱耦合强度比值与1很好地符合,验证了电弱理论的轻子普适性理论。BES合作组的陶轻子质量测量精度领先世界十余年,开启了精确测量的新时代,被粒子数据组评价为50年来高能物理的最重要实验数据之一。

进入新世纪,经过重大升级改造的BEPCII/BE-SIII开始了新的挑战,在陶轻子质量测量方面把目标设定为将精度再提高一倍,使误差从0.2 MeV(世界平均值)减小到0.1 MeV,这是一项非常艰巨的任务。为了更精确地验证轻子普适性,提高陶轻子质量测量的精度,2010年BESIII实验安装了束流能量测量系统,使束流能量的测量精度大幅度提高;同时获取了更高统计量的数据,预期BESIII将提高陶子质量精度到0.1 MeV,比BES精度再提高5~6倍。图3为纪念BES陶轻子精确测量发行的首日封,图4为不同实验和不同年代对陶轻子质量测量的结果,其中BES在1992年给出了第一个精确测量值。

粲夸克偶素衰变性质的研究

BES合作组于1995年完成了400万粲偶素 $\psi(2S)$ 事例的采集,这是当时世界上最大的数据样本,BES利用这一实验样本开展了对粲偶素衰变性

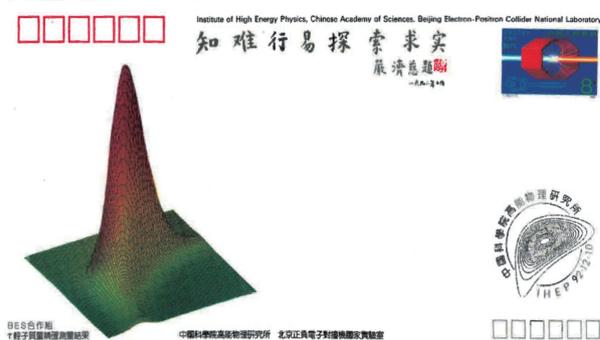


图3 纪念BES陶轻子质量测量发行的首日封

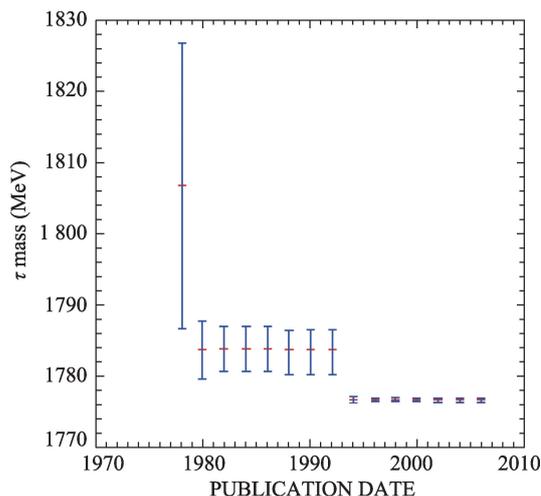


图4 粒子数据组给出的不同实验和不同年代对陶轻子质量测量,其中BES在1992年给出了第一个精确测量值

质的研究。 $\psi(2S)$ 可以衰变到三代轻子对,BES首次测量了 $\psi(2S)$ 到陶轻子对的分支比,结果可以用来精确检验标准模型的轻子普适性。按照量子色动力学(QCD)的预言,激发态 $\psi(2S)$ 与 J/ψ 强衰变分宽度之比近似等于它们衰变到轻子对的比值,约为14%。实验在很多衰变过程验证了这一预言。1983年,MARK II实验发现两个VP(矢量-赝标量)模式衰变 $\psi(2S)\rightarrow\rho\pi$ 和 $K^*\bar{K}$ 相对 J/ψ 衰变到同样末态有严重压制现象,这与QCD的预言约14%规则严重不符,当时称为“ $\rho\pi$ ”疑难。BES证实了VP压低模式,且在 $\psi(2S)$ 到矢量-张量(VT)末态过程中发现了新的反常压制。这些发现突破了人们多年来仅限于VP反常压制的认识,使得“ $\rho\pi$ ”疑难变得更为复杂,暗示我们对于非微扰QCD的理解还很不足,需要进一步深入的实验和理论研究。目前BESIII

已经获取了近30亿 $\psi(2S)$ 实验事例,希望在粲偶素衰变性质的研究上能有所突破^[3]。

三、第二代北京谱仪重大成果

1995年夏至1997年底,BEPC和BES实验经过小范围的升级改造,把BEPC的对撞亮度提高了3~4倍,北京谱仪BES升级为第二代的BESII,实验恢复运行后成功测量了2~5 GeV能量区间的“ R 值”^[4]。 R 值是正负电子对撞产生单举强子末态和正负电子湮没到正反缪轻子对玻恩截面的比值,这一比值可以被标准模型精确预言。

BESII实验测量把 R 值精度提高到6.6%,这些测量对于缪轻子反常磁矩的物理解释有重要意义,同时也对当时未发现的希格斯粒子质量给出强有力的约束,为希格斯粒子的寻找指明了方向。BESII首次观测到正反质子阈值附近的生长结构,并在其他末态中发现了对应的量子态 $X(1835)$ 。这些粒子态是没有被夸克模型预言的,是在BESII实验上首次被发现的。这些成果使得BESII实验在轻强子谱学和奇特态寻找方面迈出了新的一步。

R 值精确测量

R 值是正负电子对撞产生强子的零阶总截面与产生缪轻子对的零阶截面之比,由于双缪零阶截面可由量子电动力学理论计算,所以 R 值测量实际上就是强子产生总截面的测量。正负电子湮没过程中强子的产生根源在于正负电子湮灭产生的正反夸克对,夸克与轻子均为最基本的费米子,因而理论上 R 值取决于夸克的电荷(绝对值为1/3或2/3)及种类数,在零级近似下为特定能量下所能产生的所有种类夸克的电荷的平方和(考虑到缪轻子具有单位电荷)。夸克的自由度包括味道与颜色,其中味道有6种,颜色有红、绿、蓝3种。 R 值是重要的基本物理量,对粒子物理标准模型的发展和精确检验具有非常重要的意义。由于低能区(5 GeV以下)微扰QCD不适用,在电弱理论的精确计算中,涉及到强相互作用的贡献都需要用强子产生截面(即 R 值)作

为基本输入参数,其中最典型的例子如电磁跑动耦合常数和缪轻子反常磁矩的理论计算,都强烈依赖于低能区的 R 值^[5]。

在BESII工作的2~5 GeV能区,以往 R 值的实验测量误差为(15—20)%,是制约理论计算精度的主要因素,因此北京谱仪的 R 值测量工作受到国际高能物理界瞩目。由于理论计算的输入是以 R 值的积分形式出现,所以 R 值测量通常以一定能量间隔在多个能量点进行,故称为“扫描”测量。

1998年春季BESII开始进行 R 值测量,第一轮 R 值扫描持续时间约一个月,在连续能区的6个能量点获取了数据,总积分亮度 0.928 pb^{-1} 。1999年春季BESII进行了第二轮细致扫描测量实验,历时约四个月,能量范围2.0—4.8 GeV,取数能量点85个,每个能量点的强子事例数1000个左右,总积分亮度 4.64 pb^{-1} 。2004年,BESII在2.6、3.07和3.65 GeV的3个能量点获取了较大统计量的 R 值测量数据,积分亮度达到 10 pb^{-1} 。BESII将2—5 GeV能区 R 值的测量误差从(15—20)%降低到平均6.6%,测量精度提高2—3倍,对粒子物理标准模型精确检验具有重要意义,因而被称为“北京革命”。引入BESII测量结果以后,电磁跑动耦合常数在 Z 玻色子能标来自5种较轻夸克的贡献的理论评估值由 0.0280 ± 0.0007 变为 0.02761 ± 0.00036 ,相应地2—5 GeV能区的 R 值对 Z 玻色子能标电磁跑动耦合常数的误差贡献从超过50%减小到30%左右。这一改进使希格斯粒子的理论拟合质量从 $62^{+53}_{-30} \text{ GeV}$ 变到 $98^{+58}_{-38} \text{ GeV}$,质量上限从170 GeV变到210 GeV,解决了当时欧洲核子中心大型正负电子对撞机(LEP2)实验未能找到希格斯粒子的困扰,对于LEP2停止运行转向LHC开工建设起到了推动作用。与此类似,此前缪轻子反常磁矩的实验值 $11659203(15) \times 10^{-10}$ 与标准模型预言值 $11659159.6(6.7) \times 10^{-10}$ 之间存在2.6倍标准偏差的差别,而采用BESII的 R 值做输入之后,其中强相互作用相关部分由 $(696.7 \pm 15.6) \times 10^{-10}$ 变为 $(698.75 \pm 11.11) \times 10^{-10}$,从而使得缪轻子反常磁矩的理论值与实验值的差别小于1.5倍标准偏差,在当

时被视为解决了一个危机。

进入 BESIII 时代, R 值工作继续开展, 目标是使测量精度再提高一倍左右, 即误差降低到 $\sim 3\%$ 。按照三阶段实验规划, 2012 年夏天首先进行了 R 值扫描试运行, 用了 8 天时间在 4 个能量点 2.2324、2.4、2.8 和 3.4 GeV 获取了 12 pb^{-1} 数据; 随后 2013 年底至 2014 年初历时一个半月完成重粲能区 3.85~4.6 GeV 精细扫描, 取数能量点 104 个, 总积分亮度约 800 pb^{-1} ; 2015 年初又历时四个月完成低能区 2.0~3.08 GeV 扫描, 取数能量点 21 个, 总积分亮度约 525 pb^{-1} 。十年磨一剑, 2022 年初 BESIII 的第一批 R 值测量结果发表, 能量覆盖范围为 2.23~3.67 GeV 连续能区, 给出了 14 个能量点的 R 值, 测量精度在 3.1 GeV 以下好于 2.6%、在 3.1 GeV 以上好于 3.0%, 在该能区再次领先世界。图 5 为纪念 R 值精确测量发行的邮政首日封。

新型强子态 $X(p\bar{p})$ 和 $X(1835)$ 的发现

J/ψ 的衰变是研究轻强子谱学的天然宝藏, 特别是 J/ψ 辐射衰变过程是富含胶子的过程, 是寻找和研究胶子球或其他新特强子态的黄金过程。 R 值扫描实验之后两年, BESII 采集了 5800 万高统计量 J/ψ 事例, 在此基础上通过 J/ψ 辐射跃迁衰变发现了一系列新的共振结构。2003 年 BESII 在 J/ψ 辐射衰变到质子-反质子过程中, 首次发现了质子-反质子阈值奇特增强结构 $X(p\bar{p})$, 质量约为 1860 MeV, 宽度小于 30 MeV; 2005 年 BESII 在 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \eta'$ 中发

现新共振结构 $X(1835)$ 。其后美国 CLEO 实验也分析了同样的物理过程, 确认了 $X(p\bar{p})$ 的存在。这两个新的结构的发现在国际上激发了理论和实验的广泛研究兴趣, 被认为可能是重子-反重子分子态或六夸克态等奇特强子态的候选者。

BESIII 进一步增加了 J/ψ 数据量, 截至目前收集了 100 亿 J/ψ 衰变事例数, 是国际上最高统计量的 J/ψ 数据。BESIII 利用部分 J/ψ 数据, 更高精度地确认了 $X(p\bar{p})$ 和 $X(1835)$ 的存在, 并进一步测定其自旋-宇称量子数为 0^+ 。同时在更高统计量的 $\pi^+ \pi^- \eta'$ 不变质量谱上, 在质子-反质子对质量阈值处发现有共振线形的突变, 这些精细结构可能暗示 $X(p\bar{p})$ 和 $X(1835)$ 之间的直接关联。此外 BESIII 在 $J/\psi \rightarrow \gamma \omega \phi, \gamma^3(\pi^+ \pi^-), \gamma K \eta, \omega \eta \pi^+ \pi^-$ 和 $\gamma \eta \phi$ 等过程的研究中, 均发现了质量和宽度接近 $X(1835)$ 共振参数的共振结构。以上这些新发现对进一步理解 $X(p\bar{p})$ 和 $X(1835)$ 的性质有重要帮助。

$\psi(3770)$ 的非 $D\bar{D}$ 衰变

$\psi(3770)$ 是粲介子对产生阈之上最轻的粲偶素态, 于 1977 年被 MARKI 实验组发现。 $\psi(3770)$ 被看作是以 D 波为主、混有少量 S 波成分的由正反粲夸克组成的 $c\bar{c}$ 束缚态。长期以来人们认为 $\psi(3770)$ 几乎 100% 衰变到粲介子对 $D\bar{D}$, 也正因此它是研究 D 介子性质的重要场所。理论上虽然预期存在 $\psi(3770)$ 的非 $D\bar{D}$ 衰变, 但分支比较小 ($\sim 2\%$), 且由于实验数据匮乏而一直没有结论, 直到 2001 至 2003

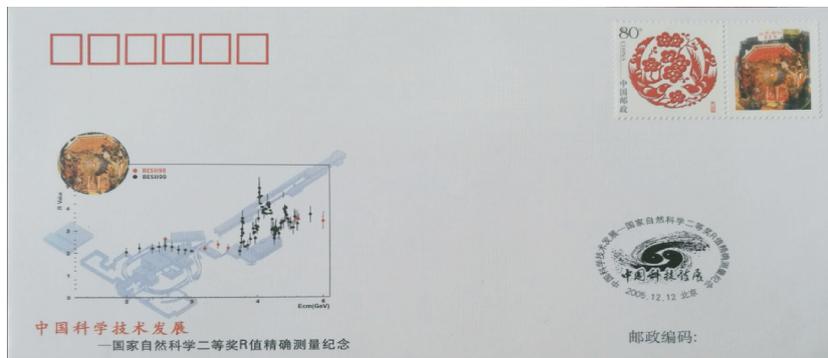


图 5 2005 年纪念 R 值精确测量邮政首日封

年之间 BESII 在质心能量 3.773 GeV 附近采集了积分亮度约 33 pb^{-1} 的数据, 才将 $\psi(3770)$ 非 $D\bar{D}$ 衰变研究推向新阶段。

BESII 从两个层面对 $\psi(3770)$ 非 $D\bar{D}$ 衰变进行了研究。一是直接测量 $D\bar{D}$ (包括 $D^0\bar{D}^0, D^+D^-$) 产生截面, 并与 $\psi(3770)$ 产生总截面相比较, 其差距被归为非 $D\bar{D}$ 截面, 占比约为 15%, 这是一个相当意外的结果。二是寻找特定的非 $D\bar{D}$ 衰变道。2003 年 BESII 首次观测到了 $\psi(3770) \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 过程, 在国际上引起了强烈的反响和争议。2005 年 CLEO-c 证实了 BESII 的结果, 并进一步观察到了 $\psi(3770) \rightarrow \pi^0\pi^0J/\psi$ 和 $\psi(3770) \rightarrow \eta J/\psi$ 过程, 随后又相继发现 $\psi(3770) \rightarrow \gamma\chi_{c1}$ 和 $\psi(3770) \rightarrow \gamma\chi_{c0}$ 两个过程, BESIII 投入运行以后给予了证实。但这几个过程的分支比都很小, 不足以解释 15% 的非 $D\bar{D}$ 分支比, 为此 BESII 和 CLEO-c 均开展了大量寻找 $\psi(3770)$ 衰变到轻强子末态的研究, 但很遗憾未能有新的发现, 也成为一个待解之谜。如今在粒子数据手册 PDG 中, $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$ 的分支比为 (93 $^{+8}_{-8}$)%, 非 $D\bar{D}$ 衰变研究仍然是一个有趣的课题。

四、BEPCII/BESIII

原来的 BEPC 是一台单储存环对撞机, 而且在它的储存环里只有一对正负电子束团进行对撞, 因此对撞亮度较低, 单环设计也限制了对撞亮度的提高。随着谱学和重味夸克衰变的实验深入研究, 人们认识到在陶粲能区建造一台亮度更高的对撞机的重要性。在这种情况下, 美国康奈尔大学计划把原来运行在 10 GeV 的 CESR 对撞机改造到陶粲能区工作, 亮度预计可以达到 $3 \times 10^{32} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 这是我国原来 BEPC 亮度的 10 倍^[6]。为了提高国际竞争力, 继续保持我国粲物理和强作用研究在国际上的领先地位, 经过多次研讨会后, 我国提出要在高能所原址新建一台第二代北京正负电子对撞机 (BEPCII)。BEPCII 采用国际先进的双储存环、大交叉角对撞和多束团对撞模式, 它的设计亮度预计可以达到 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, 比 BEPC 提高 100 倍, 比美国康奈

尔大学的 CESR-c 提高了 10 倍。同时与 BEPCII 对应, 我国设计制造一台全新的北京谱仪, 称为 BE-III^[8]。BEPCII/BESIII 于 2008 年建成, 2009 年 8 月开始正式数据获取, 到目前为止已经运行了 14 年, 取得了丰硕的物理成果, 在(类)粲偶素谱学、轻强子谱学、粲介子衰变的精确测量和重子/超子物理等方面都取得了瞩目的成果, 在各个相关领域得到世界同行的关注。随着数据量的增加, BESIII 实验获得了许多预期外的实验结果, 吸引了更多的国内外高能实验物理学家参与 BESIII 实验项目^[7]。

重子形状因子及阈值增强效应

重子是强子的一种, 在简单夸克模型中由三个夸克组成, 其内部结构是核物理与粒子物理共同关注的重要研究课题。强子内部的电、磁结构可以用形状因子描述, 它是普通空间的电磁分布通过傅立叶变换到动量空间的映射, 有结构粒子的产生截面不同于类点粒子, 这种偏离就体现为形状因子, 可从实验上测量产生强子的角分布得到。核子(包括质子和中子)是最轻的重子, 是组成普通物质世界的基本单元, 但其基本性质如半径、自旋、磁矩等尚未被完全认识。BESIII 运行在 2.0—4.9 GeV, 能量范围覆盖所有自旋 1/2 八重态重子和自旋 3/2 十重态重子, 因此是重子研究的理想场所。重子对的产生截面理论上可以计算, 由于相空间和库仑相互作用共同因素, 在产生阈值附近中性重子对的截面为零, 而带电重子对的截面为非零的常数。

对于核子的情况, 以往的实验显示质子-反质子在阈值附近截面不为零, 而中子-反中子则缺乏实验数据。BESIII 以前所未有的精度发现二者在阈值附近的截面皆不为零, 给理论带来了挑战。BESIII 测量了质子的有效形状因子、电磁形状因子比值、磁形状因子并首次测量了电形状因子, 解决了以往实验结果长期以来不一致的问题。BESIII 的中子产生及结构研究同样达到了前所未有的水平, 测量了中子的有效形状因子并首次测量了电磁形状因子比值, 与质子-反质子研究结果相比, 得到

了光子-质子相互作用强于光子-中子相互作用的结论,解决了之前FENICE实验结果与理论预期冲突的困扰。BESIII的研究发现,中子与质子的有效形状因子均存在有趣的振荡现象,并且二者的振荡相位接近正交,见图6(右)。对于更重的超子对 $\Lambda\bar{\Lambda}$, $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$, $\Sigma^-\bar{\Sigma}^+$, $\Sigma^0\bar{\Sigma}^0$, $\Xi^-\bar{\Xi}^+$, $\Xi^0\bar{\Xi}^0$ 以及含粲重子对 $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$, BESIII测量了其产生截面在阈值处的行为,见图6(左)。研究确认了部分超子在阈值处的阶跃式跳变现象,并在统计量允许的情况下测量了相应重子的电磁形状因子。该系列研究均为世界上首次或精度最高的测量。对于重子产生过程出人意料的阈值处增强结构,现有理论尚无法解释,表明低能强子产生机制依然是未解之谜,而BEPIC/BE-SIII由于其独特的能量区,是目前唯一能开展此类精确研究的窗口^[8]。

对缪反常磁矩贡献的研究

2021年4月7日,美国费米实验室新一代缪轻子反常磁矩实验宣布了最新的缪轻子反常磁矩实验结果,实验精度达到百万分之0.46(0.46 ppm)。这个结果利用了费米实验室预期总获取数据的6%。与之前布鲁克海文国家实验室的测量结果联合考虑,得到最新的缪轻子反常磁矩实验结果与标准模型的预言偏离4.2倍标准偏差,暗示偏差偶然发生的几率仅为几万分之一。这是低能区可能存在超出标准模型新物理的直接实验证据。目前缪轻子反常磁矩的实验测量和理论计算精度大体相当,但是费米实验室未来的实验精度将达到0.14

ppm,甚至更小,这将给理论计算带来挑战。其中理论精度的改善依赖于精确测量强子产生截面作为输入量,BESIII实验可以在这方面做出直接贡献。

理论上,缪轻子磁矩的贡献可通过缪轻子与光子的作用顶点计算。在只考虑点粒子的作用顶点时,朗德因子 $g=2$ 。但是该作用顶点会受到更多量子效应,包括电磁、弱和强相互作用的高阶量子效应的影响。一般来说,反常磁矩来自高阶的电磁、弱和强作用贡献,其中电磁相互作用对于缪轻子反常磁矩的贡献最大,计算也最精确。弱相互作用对缪轻子反常磁矩的修正来源于 W/Z 及希格斯玻色子的贡献,由于其有较重的质量,该修正相对于电磁相互作用被严重压低(压低约亿分之一),在标准模型理论框架下可以将弱相互作用的贡献计算到三阶,误差主要来自未知的高阶贡献。电磁和弱作用的理论计算误差都很小,两者的计算误差仅贡献了理论计算误差的2%左右,剩下的98%的理论计算误差来自强作用的贡献。

但是强相互作用的贡献是最难计算的,包括强真空极化和光子-光子散射致强子过程(简称光子-光子强散射)两部分。由于QCD微扰特性仅在高能标下适用,而对缪轻子反常磁矩的强作用的贡献主要来自低能标,因此对于这部分贡献必须要用非微扰计算方法,如利用色散关系或从第一性原理出发的格点QCD理论计算。在强真空极化中,正负电子对湮没到 $\pi^+\pi^-$ 过程贡献了强真空极化的近70%,也就是这部分贡献了最大的理论计算误差(目前达到约0.37 ppm),是缪轻子反常磁矩测量中最重要的

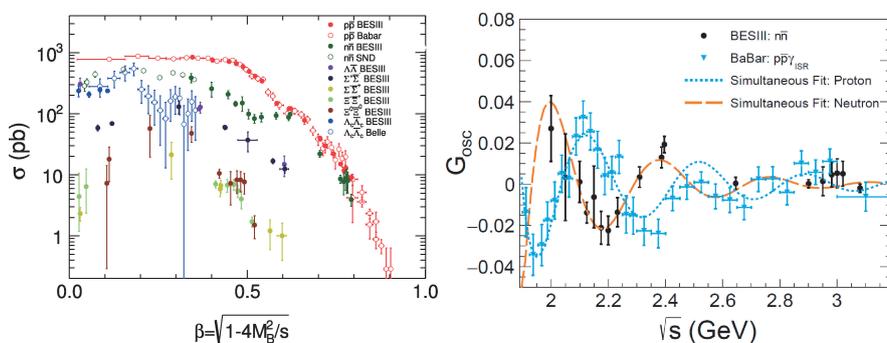


图6 BESIII上重子对产生截面测量(左)及核子有效形状因子震荡现象(右)

物理过程。国际上,有很多实验都对 $\pi^+\pi^-$ 截面进行了精确测量,实验方式通常有两种,一种是能量扫描方法,即在多个对撞能量点扫描直接测量 $\pi^+\pi^-$ 截面;第二种方法是用初态辐射方法,即初态的电子和正电子以一定几率辐射出带有一定能量的光子,使辐射后正负电子系统的总能量降低。初态辐射方法指在固定能量点收集较大亮度数据,在初态辐射出光子后的连续有效能量上测量 $\pi^+\pi^-$ 截面。BESIII实验利用BEPCCII在3.773 GeV收集的2.93 fb⁻¹数据,通过初态辐射方法测量了能量范围为600~900 MeV的 $\pi^+\pi^-$ 截面,BESIII实验方式给出的真空极化的精度在1%左右,BEPCCII将继续在3.773 GeV能量取数,预计积分亮度达到20 fb⁻¹,使得真空极化的精度预期达到0.5%左右。相应地,总的实验结果将对缪轻子反常磁矩的理论计算带来大约0.15 ppm的误差,换算到总的强真空极化,可以把误差从0.37 ppm降到0.20 ppm^[9]。

轻强子谱学研究新进展

强子态是夸克和胶子通过强相互作用所组成的束缚态,它表现了夸克和胶子间的相互作用性质。虽然人们对于强子谱已进行了很多研究,但对于这种相互作用的了解相对来说还很贫乏,特别是QCD预言的多夸克态、强子分子态、胶球和混杂态等新型强子态尚未被确认。

J/ψ 的辐射衰变是丰胶子的过程,被认为是胶球或混杂态大量产生的场所。由于普通量子数的胶球或混杂态很容易和普通介子发生混合,这为确切判断其是否为新型强子态带来很大挑战——需要通过研究其产生和衰变的多种信息,并与普通介子态进行比较,联合确定。此外,实验寻找具有奇特量子数的共振态,可以很好地与普通介子态区分开,是明确判断奇特强子态的重要指标。BESIII利用100亿 J/ψ 衰变数据,对 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 过程进行分波分析,在 $\eta\eta'$ 不变质量谱上发现了一个同位旋标量的奇特强子态 $\eta_1(1855)$ 。因为 $\eta_1(1855)$ 具有奇特量子数 1^{+-} ,所以它不属于普通介子态,必然是一种新型强

子态。 $\eta_1(1855)$ 的质量与格点QCD对混杂态的预言一致,同时理论上也有四夸克态或者分子态等的解释。

根据格点QCD计算,标量胶球质量在1.5~1.7 GeV,张量胶球在2.3~2.4 GeV,赝标量胶球在2.3~2.6 GeV。BES、BESII和BESIII实验利用 J/ψ 的辐射衰变系统开展了研究胶球的工作。BESII实验对 J/ψ 辐射衰变到 $\pi^+\pi^-$ 、 $\pi^0\pi^0$ 、 K^+K^- 和 K_sK_s 分别开展了分波分析,研究了 $f_0(1500)$ 和 $f_0(1710)$ 等标量胶球候选态。BESIII实验发表了 J/ψ 辐射衰变 $\eta\eta$ 和 K_sK_s 的分波分析结果,均发现了显著的 $f_0(1710)$ 态;在 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0\pi^0$ 的模型无关振幅分析中也看到1.7 GeV处的 0^+ 增强结构。此外在以上过程的研究中也看到了质量约为2.1 GeV,可能含有标量胶球成分的 f_0 激发态。BESIII实验在 J/ψ 辐射衰变 $\eta\eta$ 、 K_sK_s 和 $\phi\phi$ 中,观测到一个可能的张量胶球候选态 $f_2(2340)$;在 J/ψ 辐射衰变 $\pi^+\pi^-\eta'$ 中发现了 $X(2120)$ 、 $X(2370)$ 和 $X(2600)$ 等赝标量胶球的候选态。以上成果都处于国际胶球研究的前沿,为确认胶球和深入了解胶球的性质做出了重要贡献。目前对这些共振态的性质还没有确切结论,需要进一步开展更高统计量、更多衰变末态的系统性研究,尤其还要跟理论计算,包括格点QCD计算结合,最终揭示它们的本质^[9]。

类粲偶素粒子研究

四夸克强子态研究是强子物理的重要课题,对检验QCD非微扰理论和理解色禁闭机制有重要意义。当前粲夸克偶素能谱中基于势模型理论预言的部分粒子尚未被实验找到,同时在实验上也发现了一系列很难用传统的夸克模型来解释的类粲偶素粒子,俗称为XYZ粒子,其中一部分类粲偶素粒子很可能是含有四夸克成分的四夸克强子态^[9]。

2013年BESIII实验在4.26 GeV能量附近分析了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$ 过程,在 $\pi^+ J/\psi$ 质量谱上发现了一个新的共振结构 $Z_c(3900)^+$ 。因为其内部含有一对正反粲夸克且带单位电荷,这显示其中至少含有四个夸克成份 $c\bar{c}u\bar{d}$,极有可能是科学家们长期寻找的

四夸克态。同年 BESIII 实验在同样能量点上先后在 $D^*\bar{D}^*$ 和 π^+h_c 末态上发现了更重的新四夸克态 $Z_c(4025)^+$ 和 $Z_c(4020)^+$ 。他们的质量接近, 夸克成分与 $Z_c(3900)$ 一致, 很可能是同一个 $Z_c(3900)^+$ 的质量较高的激发态。此外, BESIII 实验还在 $D^*\bar{D}$ 的阈值附近发现了 $Z_c(3885)^+$ 四夸克态, 由于其质量宽度和 $Z_c(3900)$ 非常接近, 所以 $Z_c(3885)^+$ 很可能是 $Z_c(3900)^+$ 的一种新衰变模式。国际物理学界高度评价了 BESIII 实验在 2013 年的这一系列发现, 美国物理学会主编的《物理》杂志在公布的 2013 年国际物理领域重要成果中, 将 BESIII 实验“发现四夸克物质”位列十一项成果之首。以上结果见图 7。此后 BESIII 实验又积累了更多实验数据, 陆续发现了这些带电 Z_c 粒子的中性伙伴粒子, 确定了他们都是同位旋三重态, 并利用详尽的振幅分析技术, 精细测量了 $Z_c(3900)$ 的质量和宽度, 并确定了其自旋-宇称量子数为 1^+ 。

2021 年 BESIII 实验在 4.68 GeV 能量附近通过分析 $e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^-D^{*0} + D_s^+ - D^0)$ 反应过程, 在 $D_s^-D^{*0}$ 和 $D_s^+ - D^0$ 的质量阈值附近发现一个带电的新奇特四夸克态 $Z_{cs}(3985)^-$, 其内部结构至少含有 $c\bar{c}u\bar{d}$ 四个夸克, 是国际上首次发现含有奇异夸克的隐粲四

夸克态。该成果被《物理评论快报》选为当期“Feature in Physics”和编辑推荐文章, 并在美国物理学会网站上以“New Tetraquark Spotted in Electron-Positron Collisions”为题报道。其后 BESIII 实验又在相同能区发现了其中性伴随四夸克粒子存在的证据, 表明了 $Z_{cs}(3985)$ 的同位旋为 1/2。图 7 给出了 $Z_{cs}(3985)$ 的质量拟合图。

BESIII 实验在 3.8 GeV 以上能区进行了精细的能量扫描取数, 测量了多个含粲偶素末态和含粲强子末态的产生截面, 并发现了多个类粲偶素态。特别是在 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 的截面线型分析中, 发现之前实验上报道的 $Y(4260)$ 结构并非简单的单峰结构, 很可能是由质量较低的 $Y(4220)$ 和质量接近 $Y(4360)$ 的两个共振结构叠加形成的, 对进一步理解 $Y(4260)$ 性质提供了重要的数据。新的类粲偶素态 $Y(4220)$, 以及 B 工厂报道的 $Y(4360)$ 和 $Y(4660)$ 在 BESIII 实验的多个含粲偶素末态的截面线型中得到证实, 并首次发现 $Y(4220)$ 衰变到粲介子末态 $\pi^+D^0D^{*-}$ 过程。此外, BESIII 实验首次在正负电子湮没过程中发现了辐射产生 $X(3872)$ 的过程, 并发现了新的衰变模式 $X(3872) \rightarrow \pi^0\chi_{c1}, \omega J/\psi$ 和 $D^0\bar{D}^{*0}$, 有助于理解 $X(3872)$ 的本质性质。

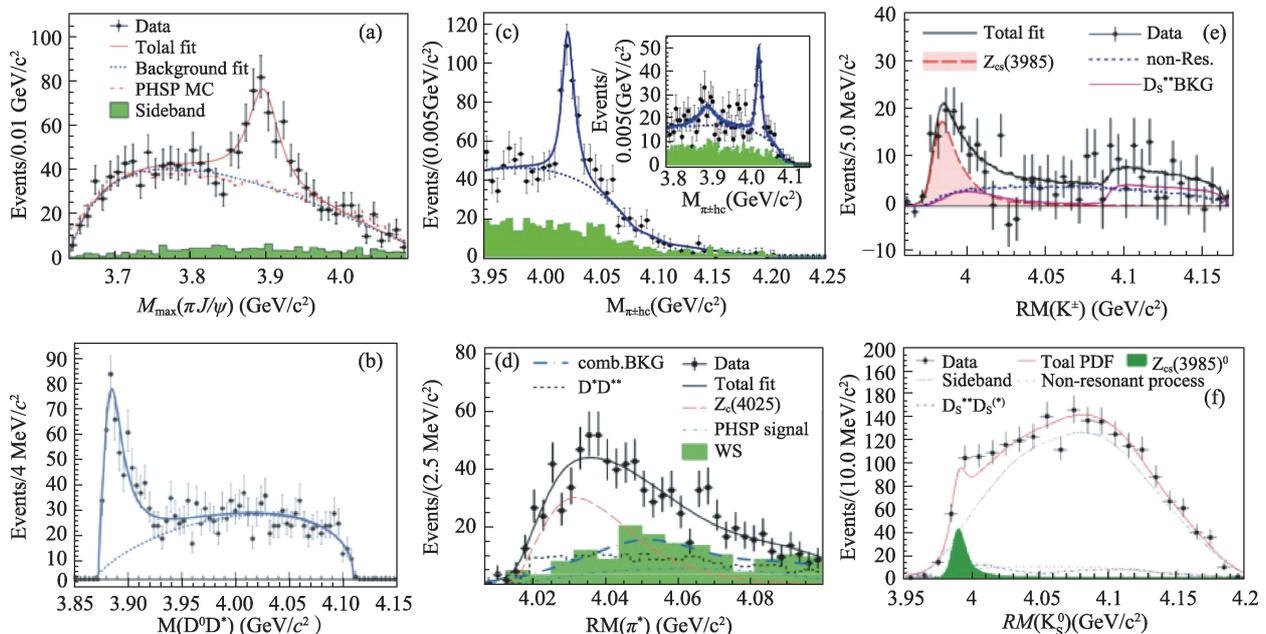


图 7 BESIII 实验上发现 $Z_c(3900)^+$ (a), $Z_c(3885)^+$ (b), $Z_c(4020)^+$ (c), $Z_c(4025)^+$ (d), $Z_{cs}(3985)^-$ (e) 及中性 $Z_{cs}(3985)^0$ (f)

粲介子衰变精细测量

1974年粲夸克的发现是粒子物理标准模型建立的重要里程碑。在标准模型中,粲量子数在强作用和电磁作用中是守恒的,这导致最轻的粲介子和粲重子(包括中性 D^0 介子,带电的 D^+ 和 D_s^+ 介子,以及 A_c^+ 重子)只能通过弱作用衰变。粲强子的衰变寿命正比于弱作用常数(费米常数)和CKM矩阵元乘积的平方,研究粲介子或粲重子的不同衰变类型对于理解粲夸克弱衰变有重要意义。特别是纯轻子衰变(比如 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$)和半轻子衰变过程(如 $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$),对于精确测量CKM矩阵元参数,理解初末态强子内部夸克强相互作用机制有不可替代的作用。

BES实验早期在粲介子方面开展了探索性研究,并取得了很好的成果,比如BES实验在国际上首次使用近阈4.03 GeV数据得到3个 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选信号,提取了绝对分支比并估计了 D_s^+ 介子衰变常数;BESII实验利用3.773 GeV阈值数据也开展了 D 介子纯轻子和半轻子衰变的研究,但总体上都受限于数据的统计量。

BEPCII/BESIII实验在对撞亮度和探测器性能方面都有很大的提高,这使得BESIII在粲强子对产生阈值附近能量点能够进行高亮度取数,并且拥有非常干净的粲强子产生环境,因此可以大幅提升研究粲强子衰变的能力。阈值处正反粲强子是处于量子纠缠状态的,同时分析两个粲强子的衰变可以在实验上测量正反粒子的干涉量,从而可以得到强相互作用和弱作用的相对相角等更加丰富的物理信息。在阈值附近取数可以保证只有成对的粲强子产生,并没有其他任何多余的粒子伴随,因此利用这一特性,实验上可以用单标记技术,得到一束“四动量”和“量子态”已知的“粲强子束流”,进而可以研究它的衰变。标记一个粲强子,观测另外一个粲强子衰变称为“双标记”技术,这允许我们模型无关地研究粲强子衰变的绝对分支比,这里“绝对”的含义是测量不依赖于正反粲强子的总产额,不依赖于单标记粲强子的衰变信息,也不会受限于粲强子产生环境的不确定性。以上这些是BESIII实验在

粲物理研究方面相较于其他对撞实验上粲强子研究的独特优势,是其他任何实验不可替代的。BES-III不仅可以做到对物理量的“绝对”测量,而且可以大幅度压低噪声本底,是对撞物理实验中的“低本底”实验,是精确测量的代表。总体上,BESIII实验目前对CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$,粲强子的形状因子和衰变常数,以及分支比的绝对测量结果是世界上最好的,也是系统误差最小的,是重味物理领域的最精确实验测量和检验之一,可以对电弱理论、格点QCD和唯象模型计算提供精确无偏的刻度和检验。这些实验研究是粲物理乃至重味物理学的核心课题。

BESIII实验在3.773 GeV和4.178 GeV能量点分别积累了世界上统计量最高的粲介子 $D_{(s)}$ 阈值数据,系统地开展了相关研究工作,取得了一系列亮点成果。在含轻子衰变方面,主要成果包括:1)利用 $D_{(s)}^+$ 介子的纯轻子衰变,开展 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 和 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu$ 多个道联合分析,给出了最精确的粲介子 D^+ 和 D_s^+ 衰变常数和 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 测量结果,精度分别达到最好的2.8%和1.1%,进而精确检验格点QCD的计算;2)利用粲介子的电子和缪轻子道的半轻子衰变过程,测量了 D 介子衰变形状因子 $f_+^{D \rightarrow K}$ 和 $f_+^{D \rightarrow \pi}$,精度分别为0.6%和1.5%,是世界上最精确的测量,被用于刻度格点QCD计算,并比较了电子道和缪轻子道的分支比差别,首次在粲能区开展轻子普适性精确检验。图8给出了以上相关测量结果的比较。

正负电子对撞产生的正反粲强子是处于量子纠缠状态的,利用双标记实验技术,可以在实验上测量干涉量,从而可以得到强相互作用和弱作用相对相角。BESIII实验在3.773 GeV的数据可以给出世界上最好的中性粲介子的相对强相角测量,而这些测量对于研究含 b 夸克介子衰变中的CP破坏相位角 γ 有重要作用。LHCb实验和Belle II实验对 γ 角的精细测量,强烈地依赖BESIII实验强相角测量结果的输入。目前BESIII实验已发表 $K_s^0 \pi^+ \pi^-$ 、 $K_s^0 K^+ K^-$ 、 $K \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 和 $K \pi^+ \pi^0$ 等的强相角测量结果,将LHCb实验上 γ 角测量的相关误差降至0.9度,保证了未来

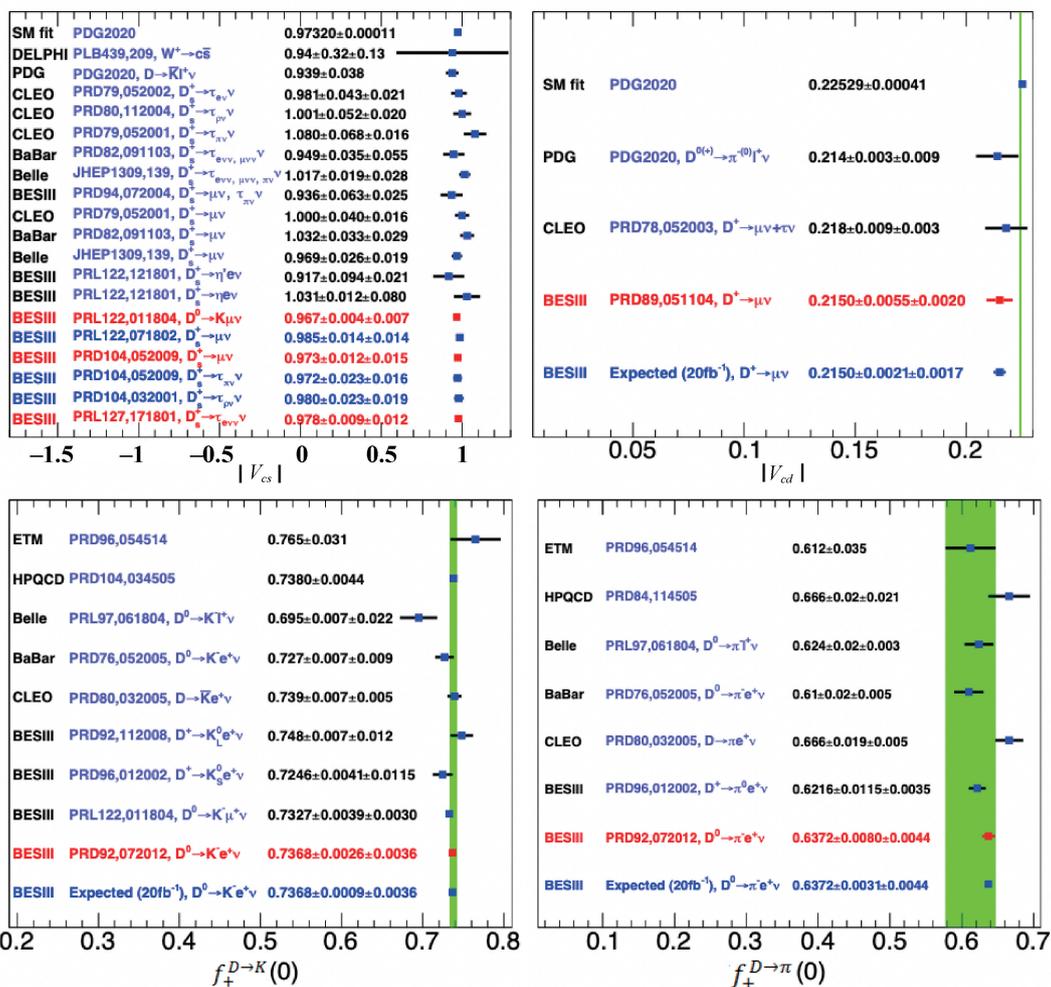


图8 BESIII实验上CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$ 、 $f_+^{D \rightarrow K}$ 和 $f_+^{D \rightarrow \pi}$ 精确测量

十年 LHCb 实验和 Belle II 实验 γ 角的强相角输入的精度要求。这是 BESIII 实验对重味物理 CP 破坏测量的重要贡献,是不可替代的。

此外在强子衰变方面, BESIII 实验系统研究了 $D_{(s)}$ 两体衰变到含有赝标量介子、标量介子、矢量介子、轴矢量介子和张量介子的过程, 检验和约束 QCD 有效模型的计算, 促进了非微扰 QCD 理论研究的发展。这些精确测量可以为标准模型预言粲重子衰变中的 CP 不对称提供重要的实验输入, 使得标准模型的预言变得相对精确, 从而可以与实验做比较, 来检验 CP 破坏的来源和可能的物理的贡献。这是 BESIII 实验在 CP 破坏测量方面的重要贡献。

开拓粲重子研究新契机

实验上发现首个含粲的重子 Λ_c^+ 是在 20 世纪 70 年代末, 其夸克成分为 udc 。不同于前述的粲介子的系统性研究, 实验上关于粲重子 Λ_c^+ 的衰变性质研究非常有限, 很多关键的衰变过程完全没有实验数据, 或者已经测量的结果精度也不高。由于 Λ_c^+ 是最轻的粲重子, 它的衰变分支比不准确, 整体上造成了粲重子相关理论模型发展缓慢。改变发生在 2013 年, 此时 BESIII 实验首次在 $\Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ 对的阈值能量 4.6 GeV 处获取了 10 万对 $\Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ 事例, 并首次在实验上实现了阈值处的 Λ_c^+ 衰变的系统研究。

如同粲介子阈值研究的特点和优势, BESIII 实验利用这些数据完成了多项开创性的 Λ_c^+ 衰变绝对

分支比测量工作,主要特色工作包括:1)世界上首次在阈值上精确测量了 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 的绝对分支比,精度达到6%,与当时日本 Belle 实验结果精度相当,比之前世界平均值的精度提高5倍。同时另外11个强子衰变分支比的精度比世界平均值提高3到6倍;2)利用双标记和丢失中微子质量的方法,世界上首次直接测量了半轻子衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow Ae^+\nu$ 和 $\Lambda\mu^+\nu$ 的绝对分支比,精度大大好于之前通过间接方法测量的结果,也触发了国际上粲重子半轻子衰变的首个格点QCD计算;3)通过单标记方法首次发现卡比玻压低衰变过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^-\pi^+$,并测量了 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 和 $p\phi$ 的分支比;4)利用丢失中子质量方法,首次发现了 Λ_c^+ 衰变到含中子末态的过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK^-\pi^+$;5)首次精确测量粲重子单举衰变到 Λ 超子或电子等过程,给出 c 夸克弱衰变 s 夸克的重要信息。图9显示了 Λ_c^+ 衰变到 $pK^-\pi^+$ 和半轻子衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow Ae^+\nu$ 的信号。BESIII实验还发表了多项 Λ_c^+ 强子衰变分支比最精确或首次测量的结果。这些进展触发了国际上关于粲重子的理论和实验研究的新热点,尤其是促进了理论上预言双粲重子 Ξ_{cc} 的性质,为LHCb上首个双粲重子 Ξ_{cc} 的发现提供了重要支持。

国际上普遍关注 BESIII 实验上的粲重子衰变研究,期待更多 Λ_c^+ 衰变的实验精确测量。为了进一步加强 BESIII 实验在 Λ_c^+ 衰变研究方面的能力,BEPCII在2020年完成了提升最高能量和实现连续注入模式的升级,成功在4.6~4.95 GeV范围内积累了约10倍的 Λ_c^+ 对数据。基于这些新的数据,BESIII实验发表了更多新的结果,包括:1)发现新的 Λ_c^+ 半

轻子衰变模式 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$,更精确测量半轻子衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow Ae^+\nu$ 中的形状因子,首次实验上利用粲重子半轻子衰变提取 $|V_{cs}|$;2)利用丢失中子质量方法,首次发现了 Λ_c^+ 衰变到含中子末态的卡比玻压低过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$ 。利用这些新数据的更多粲重子衰变研究正在开展或将陆续开展,将为推动粲重子的相关理论和实验研究发挥重要作用。

Λ_c^+ 作为最轻的粲重子,大部分其他的粲重子和底夸克重子的衰变末态中都包含 Λ_c^+ ,因此 Λ_c^+ 弱衰变的精确测量结果是研究粲重子和底夸克重子谱学以及它们性质的重要输入。历史上,美国CLEO实验为粲介子(特别是全面刷新了 $D_{(s)}$ 介子衰变的实验数据)的研究提供大量原创性的工作和结果。BESIII实验的粲重子成果,使BESIII实验在粲重子的系统研究中获得重要的历史地位,全面刷新了粒子物理手册PDG的相关实验数据,使多数分支比结果由“相对测量”改为“绝对测量”。因此粲重子 Λ_c^+ 的研究成果是BES实验运行30多年来的新亮点,是对国际重味物理领域的另一个独特贡献。

低能区碎裂函数研究

由于夸克禁闭效应,实验观测的末态粒子都是色单态强子,它的产生信息反映了参与对撞的初始核子中的夸克分布信息和到夸克到强子末态过程的碎裂函数信息的叠加。随着实验精度的不断提升,尤其是电子-离子对撞机项目的快速发展,为了精确抽取核子中不同夸克和胶子的分布函数,人们对碎裂函数测量精度的要求达到前所未有的高

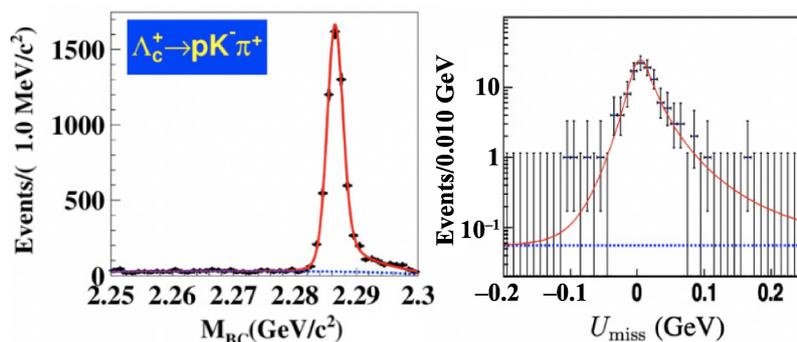


图9 BESIII实验上 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 信号(左)和半轻子衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow Ae^+\nu$ 信号(右)

度。但是碎裂函数具有非微扰性,第一性原理的计算并不可靠,需要从单举强子产生过程的实验数据中直接抽取。理论上认为碎裂函数具有“普适性”,即在正负电子湮没、电子-离子对撞、质子-(反)质子对撞过程中夸克到强子的碎裂过程均可以用相同的碎裂函数来描述。正负电子湮没实验被认为是精确测量夸克碎裂函数最干净、最理想的场所。另外,虽然碎裂函数不能微扰计算,但其随能标的演化仍是微扰可算的。由此,陶粲能区的 BESIII 实验位于低能区域,可以通过正负电子湮没过程精确测量碎裂函数,对于精确研究核子结构、检验碎裂函数普适性及其随能标的演化规律具有重要意义。

当前的核子结构研究中,核子的自旋结构分布函数是一个重要课题,即理解夸克和胶子的角动量是如何稳定地形成核子的总自旋 $1/2$ 的。其中一个关键问题是核子横向极化分布函数的精确测量。实验上提取横向极化分布函数需要精确的横极化碎裂函数的信息,而正反电子湮没过程恰好提供了干净测量该碎裂函数的场所。正反电子湮没产生的量子关联正反夸克对是横极化关联的,因此夸克强子化后形成的强子之间将存在动力学关联。通过实验分析强子产生的动力学关联机制,可以获取夸克横极化碎裂函数的信息。Collins 碎裂机制阐述了核子中横极化的夸克在真空中转化为强子后的物理效应,对 Collins 碎裂函数的测量提供了理解强相互作用动力学的重要数据。BESIII 实验利用 3.65 GeV 能量处对撞数据,测量了关联的正反夸克对碎裂到两个带电 π 介子的单举过程,观测到了 π 介子对之间由 Collins 效应带来的方位角分布的不对称度。该测量不对称度与电子-离子对撞实验数据联合分析,可以提取核子内的横向极化分布。这是国际上首次在陶粲能区完成夸克极化碎裂函数的测量。与日本的 BELLE 实验和美国的 BaBar 实验的相关分析相比,BESIII 实验与现存的 JLab 实验和未来计划的 EIC 和 EicC 等电子-离子对撞实验的能标重合,联合分析可以更加有效压低能量演化的不确定性,提高极化分布函数的测量可靠性。

超子物理研究

理解宇宙的原初正反物质不对称性是粒子物理学的基本的问题。大爆炸理论表明宇宙诞生初期,原初正反物质是等量产生的;然而当今宇宙却完全由正物质组成,我们尚未发现任何宇宙原初反物质,这就是“正反物质不对称”。1967年,萨哈罗夫提出了解释正反物质之谜所必须满足的三个条件,其中之一就是电荷-宇称对称性破坏(CP 破坏)。最近,BESIII 实验利用海量的实验数据和创新性的实验方法,在百分之一的高精度水平下对 CP 破坏效应进行了测量。同时,超子中 CP 破坏的精确测量是寻找超出标准模型新物理的黄金途径。

CP 对称性描述了正反粒子(C 对称)所遵守的物理定律在镜像变换(P 对称)后遵循同样的物理规律。这一对称性在强和电磁相互作用下成立,但在弱相互作用下存在轻微破坏。在标准模型中,Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 矩阵中的相位角是 CP 破坏的唯一来源。1964 年以来,CP 破坏效应相继在 K 、 B 和 D 介子中被发现,目前的测量结果均与标准模型的预言一致;然而其大小并不足以解释宇宙形成中的正反物质不对称,对新物理的限制也仅在自旋为零的介子领域。因此,实验上探寻重子领域的 CP 破坏意义重大。BESIII 运行累积了 100 亿 J/ψ 数据,提供了极为丰富的超子(重子的一种)物理研究机会。正反超子对是量子关联产生的,约占 J/ψ 衰变事例的千分之一;超子继续衰变,直到末态为质子、 π 介子、光子等。根据级联衰变链信息,我们可以构建其微分角分布公式,将表征超子的产生、衰变等性质的各项参数都包含进来,进而通过最大似然拟合的方法就可以在实验上同时测量正反超子的极化、衰变参数和 CP 破坏等物理观测量(图 10)。这是 BESIII 实验可以开展的创新性实验方法,既能够在世界上首次测量正反超子的多项参数,又能够极大地利用事例信息,提高测量灵敏度。

在北京正负电子对撞机上研究超子物理,尽管产额相对较低,但是有如下优势:1) 超子通过 J/ψ 粒

子衰变成对产生,正反超子处于 $C=-$ 的反对称状态,也就是说它们是量子关联的;2) 物质效应小,本底噪声干净可控;3) 探测器既能重建带电径迹又能重建中性簇射,且精度都很高。其中最为关键的是:通过拟合量子关联产生和级联衰变的微分角分布,可以对正反超子极化和其弱衰变不对称性同时进行精确测量。BESIII 上利用正反超子对研究超子极化、衰变参数和 CP 破坏早在 2015 年就开展了,首次利用 13 亿 J/ψ 事例,挑选出约 42 万个 J/ψ 衰变到正反 Λ 超子事例,并首次观测到显著的 Λ 超子横向极化,发现最大极化度可以达到 25%。同时测量了 Λ 超子弱衰变参数为 0.750 ± 0.010 ,反 Λ 超子衰变参数为 -0.758 ± 0.012 ,在 2% 的灵敏度下确认了超子衰变中不存在 CP 破坏。最近 BESIII 更新了 100 亿 J/ψ 数据的结果,实验精度提高了三倍, Λ 超子的衰变参数平均值 $\langle \alpha \rangle$ 为 0.7542 ± 0.0022 ,精度为世界最高且比过去实验测量值大了超过 5 倍标准偏差。这表明在过去 40 多年的时间里, Λ 超子的衰变参数被低估了 17%。这个测量结果作为输入,为其他实验测量超子、粲重子和底重子的衰变参数和 CP 破坏度提供了重要的实验依据。BESIII 最近分析了 13 亿 J/ψ 数据,重建出约 7.3 万高纯度 J/ψ 衰变到正反带电 Ξ 超子对样本,通过拟合其级联衰变的微分角分布,得到了包括 Ξ 极化、 Ξ 衰变参数、 Λ 衰变参数、CP 破坏、强相位差、弱相位差等多项重要的物理结果。其中,对反 Ξ 超子两项衰变参数的测量是世界首次。BESIII 实验利用积累的 100 亿 J/ψ 数据和新

颖的实验方法,研究了超子的极化、衰变参数,探寻了重子领域的 CP 破坏。虽然目前的结果尚不能断言 CP 破坏是否存在,但多项测量是世界首次并且精度极高,这为我们检验标准模型、寻找新物理和理解宇宙的正反物质不对称性提供了非常大的帮助。

五、结束语

北京正负电子对撞机/北京谱仪实验是中国加速器高能物理实验的开端,自 1988 年建成并成功运行以来,获得了系列重要成果。北京谱仪实验从第一代到第三代,已历经 30 多年。BES/BESII/BESIII 不是简单的重复,也不是简单的统计量的增加,每一个阶段都有它特色的物理,为世界高能物理做出过重要贡献。从 BES 的陶轻子质量的精确测量,到 BESII 的 R 值精细扫描,到新一代 BESIII 对强物质态精细结构的测量,对重味夸克弱衰变的精确检验,以及利用量子纠缠的独特物理的探索等,凝聚了几代高能人的心血。期望我们能够继续在这个能区探索更多的物理,为理解强作用本质和新物理的寻找做出重要科学贡献。图 11 显示三代北京谱仪探测器示意图。

中国的高能物理实验队伍在 BEPC/BES 实验设施的设计、建造和运行过程中逐步成长壮大,从开始时学习和借鉴国外加速器、探测器和电子学等器件的先进技术,到全新自主创新设计的 BESIII 探测器,积累了大科学工程建设的丰富经验,培养了

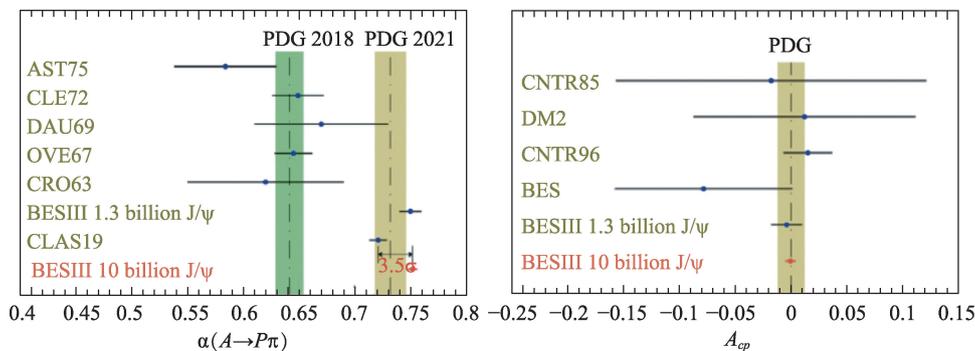


图 10 BESIII 实验上 Λ 超子衰变参数(左)及 CP 破坏度测量(右)

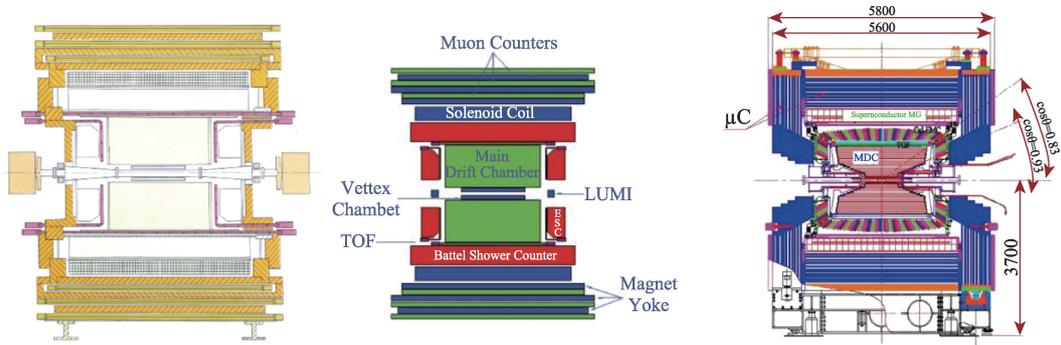


图11 三代BES探测器示意图。从左至右分别为BES,BESII和BESIII探测器

几代高能物理实验人才。与此同时,BEPC一机两用,开展高能物理实验和同步辐射光源,为我国核科学、材料科学、化学、生命科学、考古和地球资源科学等开辟了新的研究手段,培养了大批跨学科人才。正是由于BEPC这颗种子,我们国家逐步建设了新的同步辐射装置、东莞散裂中子源等。正是由于BEPC/BES实验的成功,我国才有能力去开展中微子、暗物质和宇宙学相关的实验,并在中微子领域获得了巨大的成功。从BEPC/BES实验上走出的人才遍布在国际各种大型高能物理实验装置上,为我国开展深入的国际合作奠定了基础,并且在国内各大高校生根发芽。我们看到国内高校正在各种国际大型合作实验中发挥重要作用,获得重要物理结果。BEPC/BES实验的成功促进了我国计划下一代的对撞机实验,包括高能量前沿实验和高亮度前沿实验等的规划和发展。我们有今天,是几代高能物理学家的努力:从建国之初的规划,到改革开放之初打开国门开始国际高能物理实验的合作,时至今日,在国际高能物理领域占有一席之地的成就。我们不会忘记李政道先生对BEPC/BES创建所做的贡献。我们深知,没有邓小平同志对中国高能基地的支持,就没有高能物理的今天。中国高能物理学者用他们的努力和一系列成果来回报邓小平同志的期望。

BEPCII/BESIII实验自从2009年运行至今,在陶粲物理能区积累了约 40 fb^{-1} 积分亮度的实验数据,并取得了丰硕成果^[10]。在强子物理领域,BESIII

实验处于引领地位,每年有大量的实验数据被收录在国际粒子数据手册中。此外,BESIII实验在精确检验标准模型和寻找新物理方面也有独特优势。BESIII实验取得了很多预期的物理成果,包括高精度的陶轻子质量测量、 R 值测量、粲介子含轻衰变和轻强子谱学等,还获得了类似于四夸克粒子候选态、粲重子衰变、Collins碎裂函数测量和超子CP破坏寻找等超出预期的成果。由于篇幅限制本文仅就部分BES实验结果进行回顾总结,有些重要成果并未被涵盖,更多的详细成果读者可以参考文献[2]、[4]和[10]。考虑到目前BEPCII加速器和BESIII探测器的优良性能和状态,BESIII国际合作组正在计划未来5-10年的物理取数研究计划,包括加速器和探测器的进一步升级计划,期待会有更多“出乎预料”的物理成果出现。

参考文献

- [1] 叶铭汉. 现代物理知识, 2018, 30: 0545
- [2] 郑志鹏, 朱永生. 北京谱仪: 正负电子物理. 南宁: 广西科学技术出版社, 1998
- [3] 苑长征, 吕晓睿, 李海波. 现代物理知识, 2019, 31: 0403
- [4] 郑志鹏, 李卫国. 北京谱仪II: 正负电子物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009
- [5] 黄光顺, 李海波, 吕晓睿. 物理, 2020, 49(8): 499
- [6] Zhang C et al. An Overview of the BEPCII Project: Proceeding of 40th ICFA ABDW 2008, Russia: Novosibirsk
- [7] Asner D M et al. Int. J. Mod. Phys. A, 2009,24 :S1
- [8] 王贻芳等. 北京谱仪(BESIII)的设计与研制. 上海: 上海科学技术出版社,2010
- [9] 周小蓉, 黄光顺, 李海波. 物理, 2021,50(8): 535
- [10] Ablikim M et al. Chin. Phys. C, 2020, 44: 040001