

北京谱仪实验30年

苑长征^{1,2} 吕晓睿² 李海波^{1,2}

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

粒子物理的标准模型被认为是当前描述微观亚原子体系最成功的理论,它包括描述电弱相互作用的电弱统一理论和描述强相互作用的量子色动力学(QCD)两大部分。电弱统一理论虽然有些参数的测量精度尚需提高,但可靠性已经被大量精确的实验测量所验证;但QCD部分,尽管在高能量大动量转移下的计算已为实验事实所证实,但它在低能区因为微扰论不再适用而丧失了预言能力。特别是对强子谱,包括常规强子和奇特强子态,以及强子的产生和衰变性质,理论上一直没有发展出可靠的计算方法,这大大阻碍了人们对低能强相互作用的认识。解决这一重要的科学问题,必须依靠精确的实验数据进一步检验和发展QCD以及基于QCD的理论模型。

北京正负电子对撞机(BEPC)项目是设计工作在2~5 GeV 陶-粲能区的高亮度正负电子对撞设备。在这个能量区域,BEPC可以针对第三代轻子——陶子(τ)和第二代上型夸克——粲夸克开展专门研究。既能通过陶轻子和粲夸克弱衰变研究电弱统一理论,又能通过粲偶素研究QCD的非微扰效应。1984年10月7日,BEPC工程破土动工,同时

与之配套的高能物理实验探测器北京谱仪(BES)开始建造。1988年10月16日,北京正负电子对撞机实现首次对撞,并于12月亮度达到设计指标。1989年4月,北京谱仪推入北京正负电子对撞机的南对撞点,6月探测到 J/ψ 事例产生,确认进入正常工作状况,9月,正式采集数据,开始物理实验。1991年5月,北京谱仪国际合作组正式成立,BEPC/BES实验成为首个由中国主导发起的国际大科学实验装置。

北京谱仪探测器是精密的通用型磁谱仪,基于北京谱仪探测器采集数据进行的实验统称为北京谱仪实验或BES实验。北京谱仪实验历经了三个阶段,根据北京谱仪探测器的结构和性能,依次称为北京谱仪(BES)、北京谱仪II(BESII)和北京谱仪III(BESIII)(图1)。其中第一代BES实验采集了当时世界上最大的900万 J/ψ 事例、400万 $\psi(2S)$ 事例、 5 pb^{-1} 亮度的 τ 质量测量数据和 22 pb^{-1} 亮度的 $\psi(4040)$ 数据样本,1995年夏结束数据采集。第二代BESII实验1998年开始采集数据,在2~5 GeV能区91个能量点采集了 5.6 pb^{-1} 亮度的R值扫描数据,以及5800万 J/ψ 事例、1400万 $\psi(2S)$ 事例和 33 pb^{-1} 亮度的 $\psi(3770)$ 数据样本,2004年结束运行取数。其后

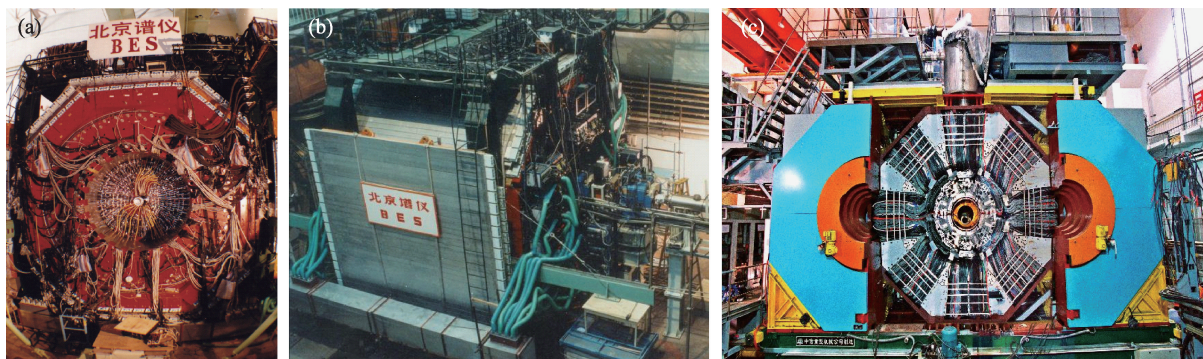


图1 三代北京谱仪探测器(a)北京谱仪;(b)北京谱仪II;(c)北京谱仪III

BEPC和BES均进行了重大改造,升级为第二代对撞机 BEPCII 和第三代 BESIII 实验。BEPCII 于 2008 年实现对撞,全新的 BESIII 探测器放入 BEPCII 南对撞点,在完成 BEPCII 和 BESIII 联调后,2009 年 BESIII 实验开始首次物理取数。BESIII 实验至今已连续 10 年顺利取数,在质心系能量 2.0~4.6 GeV 能区内积累了超过 20 fb^{-1} 亮度的数据。2016 年 BEPCII 的峰值亮度达到了设计指标 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,创造了陶-粲能区的正负电子对撞亮度的国际纪录。2019 年 2 月 BESIII 实验积累了 100 亿 J/ψ 事例,是有史以来正负电子对撞中采集的最大的 J/ψ 数据样本。

时光荏苒,30 年的时间过去了,北京谱仪由第一代发展到了第三代;北京谱仪国际合作组由最初来自中国的 60 余名,美国的 20 余名,总共 90 余名物理学家,不久增加到约 150 人,发展到如今 BESIII 国际合作组来自中国、美国、德国、意大利、英国、俄罗斯、瑞典、日本、荷兰等 15 个国家 72 个研究单位的近 500 名合作者;研究的物理课题也大大扩展,物理研究目标包括寻找和研究胶球多夸克态等新型强子态、系统研究强子谱、研究粲偶素、超子和粲强子的产生与衰变机制、精确测量 R 值和强相互作用耦合常数、通过粲介子衰变对电弱统一理论进行精确检验、研究中性 D 介子的混合和 CP 破坏以及寻找新物理现象等,为标准模型理论的检验和发展提供更多的实验测量。30 年来北京谱仪实验取得了一系列令世界瞩目的科学成果,而中国也逐渐由国际高能物理俱乐部中的一张新面孔,走到了国际高能物理研究舞台的中央。

一、粒子物理标准模型

1. 基本粒子与基本相互作用

自然界有四种相互作用,即引力、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。引力由爱因斯坦的广义相对论描述,基本粒子之间的电磁、弱和强相互作用则由粒子物理标准模型理论描述。

基本粒子(图 2)分为自旋为半整数的费米子(夸克和轻子)和自旋为整数的玻色子(包括传递相互作用的中间传播子和提供质量来源的希格斯(Higgs)粒子)。标准模型共包含 61 个基本粒子。

基本费米子分为两个家族,一个是三代夸克家族,另一个是三代轻子家族。夸克是构成强子的基本粒子,自然界中没有自由的夸克,夸克只在强子束缚态中存在。夸克共有 6 种不同的“味道”,即第一代的“上夸克”、“下夸克”,第二代的“粲夸克”、“奇异夸克”,和第三代的“顶夸克”、“底夸克”。每种“味道”的夸克有 3 种不同的“颜色”,所以夸克有 18 种,加上对应的反夸克,共有 36 种。夸克参与所有的相互作用。轻子家族包含带电的轻子和中性的中微子,第一代的电子和电子中微子,第二代缪子(μ)和缪子中微子,第三代陶子(τ)和陶子中微子。轻子包含 6 种轻子和 6 种反轻子,共 12 种。所有轻子都不参与强相互作用,带电轻子只参与电磁和弱相互作用,而中微子只参与弱相互作用。

电弱相互作用和强相互作用通过交换中间玻色子实现,传递电磁相互作用的是光子、传递弱相互作用的中间玻色子为 W^+ 、 W^- 和 Z^0 ,负责强相互作用传递的有 8 个胶子,因此中间玻色子共有 12 个。

另外,标准模型中还有一个希格斯粒子(也称“上帝粒子”),它赋予了基本粒子质量。2012 年希格斯粒子的发现,完善了粒子物理的标准模型,从此“模型”上升为“理论”。到目前为止,除实验中证实的中微子的微小质量不能由标准模型解释外,我们还没有发现明确的超出标准模型的新物理。

2. 30 年间 BES 关注的科学问题

标准模型形成于 20 世纪 70 年代,并很快得到大量实验的精确检验。在 BEPC 建设之初,除去最重的顶夸克和希格斯粒子尚未发现,其他基本粒子均被实验发现。然而,作为标准模型基本参数的部分粒子(如陶子)的质量和表征弱相互作用中不同夸克间跃迁几率的 CKM(Cabibbo-Kobayashi-Maskawa,卡比玻-小林-益川)矩阵中的部分矩阵元(如



图2 标准模型中的基本粒子(来自维基百科)

$|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的精度却很差;理论上预期的仅由胶子组成的强相互作用系统——胶球存在与否仍是一个很大的谜团。这些也成了BES实验的主旋律:精确测量了陶子质量、发现了D、 $\bar{D}$ 介子和D介子的纯轻子衰变,通过J/ ψ 和 $\psi(2S)$ 衰变研究强相互作用在非微扰能区的性质,寻找胶球和新的强子态以及研究粲偶素强子衰变中的规律。

1995年3月,美国费米国家实验室宣布发现顶夸克后,所有基本费米子和中间传播子都得到实验的证实,标准模型中最后一块拼图——希格斯粒子成为全世界关注的焦点。虽然实验上没有发现希格斯粒子的任何踪迹,然而借助欧洲核子研究中心(CERN)大型正负电子对撞机LEP实验精确的电弱实验数据和多家中低能正负电子对撞机的实验数据,可以预期希格斯粒子的质量,而在当时,这个预期的质量呈现出与LEP实验直接寻找结果之间的不一致。升级后的BESII以此为契机,利用1998~

1999年采集的数据精确测量了2~5 GeV的正负电子湮灭为强子的总截面(其与湮灭为缪子对截面的比值称为R值),为精确预言希格斯粒子的质量提供了重要的输入。同时,BESII上开展的实验研究推动了强子谱学的进展,BESII在J/ ψ 、 $\psi(2S)$ 、 $\psi(3770)$ 共振峰上采集的数据提供了关于标量介子、赝标量介子等丰富的实验结果。之前的胶球候选者为新的数据所否决,新的胶球候选者和其他新的共振态的发现也使轻强子谱学研究空前繁荣。

1999年BaBar和Belle两个B介子工厂的运行以及B介子中CP破坏的发现大大提升了科学家们对精确测量CKM矩阵元并通过检验CKM矩阵幺正性寻找新物理的热情,原来运行在B能区的CLEO实验将能量降到BEPC能区,以期精确测量跟粲夸克相关的矩阵元($|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$),并为在B介子工厂上其他的测量提供输入数据,这直接导致了BEPC的亮度升级,从而以更高的灵敏度实现对新

物理的寻找。而2003年Belle实验发现 $X(3872)$ 和BaBar实验发现 $D_s^*(2317)$ 则直接将奇特强子态,尤其是含有重夸克的奇特强子态的研究推向了高潮。建造亮度为 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的加速器,精确测量CKM矩阵元等标准模型参数和研究包括胶球、四夸克态、分子态等奇特强子态以精确检验标准模型的电弱理论和强相互作用理论,被确立为BESIII的主要物理目标。

2008年,CERN的大型强子对撞机LHC开始运行,同年BEPCII实现正负电子对撞。前者针对标准模型尚未发现的最后一个粒子,后者针对标准模型计算最难理解的低能强相互作用。一个在西方,一个在东方,二者遥遥相望,向标准模型发起冲击。随着LHC实验和BESIII实验数据的积累,越来越多的成果也陆续报道出来。2012年,随着LHC上希格斯粒子的发现,标准模型基本粒子的实验验证已圆满画上句号。2013年,BESIII实验发现了“四夸克物质” $Z_c(3900)$,打开了物质结构研究“新的视野”。

BESIII在过去的10年采集了世界上最大的100亿 J/ψ 事例、4.5亿 $\psi(2S)$ 事例、 $2.9 \text{ fb}^{-1} \psi(3770)$ 事例、 $3.2 \text{ fb}^{-1} \psi(4160)$ 事例以及大量质心系能量4 GeV以上用于研究类粲偶素的数据。利用这些数据开展的粲强子衰变和强子谱研究的结果国际领先。

在过去的30年里,虽然我们对于标准模型各个方面的研究都有了长足的进步,但是我们对于强相互作用,尤其是强相互作用在强子谱、强子的产生和衰变方面的研究进展依然缓慢,而在超出常规夸克模型的奇特强子态的理论和实验的研究上有待飞跃。强子内部夸克之间的相互作用以及所有与低能区强相互作用相关的理论和实验仍然是基本粒子研究的热点和难点。BEPC/BES实验一直在这个领域耕耘,还将加强在这个领域的研究,继续引领这一领域的发展。

二、标准模型基本参数的测量和基本假设的检验

1. 陶质量测量和轻子普适性检验

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陶子与第二代轻子缪子的弱耦合强度比值约为 $G/G_\mu = 0.941$,该结果偏离1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子质量测量不准确导致的,创新性地提出了在正负电子对撞实验上利用能量扫描技术,在陶子对质量阈值附近获取数据,测量陶子对产生截面随能量变化的关系曲线,进而获得陶子质量的方法。BES的陶子质量测量方法在国际上是首创的,质量结果为1777 MeV,中心值比原来的世界平均值小了7 MeV,精确度提高了10倍。按照BES新的质量结果,结合新的陶子寿命和衰变分支比测量的结果,弱耦合强度比值与1非常好地得到了符合,验证了电弱理论的轻子普适性假设。为了更精确验证轻子普适性,提高陶子质量测量的精度,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100 keV,比BES精度再提高5~6倍。

2. CKM矩阵元的精确测量

由于参与弱相互作用的夸克不是质量本征态,导致在弱相互作用夸克本征态和质量本征态间存在一个变换矩阵,称为CKM矩阵。CKM矩阵是标准模型的基本参数,在实验上对每个矩阵元都需要进行高精度的测量,以检验CKM矩阵的么正性:任何显著的与期望的偏离都将预示着CKM矩阵是不完备的,从而表明新物理的存在。精度最高的CKM矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的直接测量,将通过 D_s^+ 的纯轻衰变过程 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 得到。从BES到BESIII均对 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 过程进行了研究。BES实验在4.03 GeV处观测到1个 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选事例;BESII实验在3.773 GeV处观测到3个候选事例;而在BESIII实验,利用在3.773 GeV处 2.9 fb^{-1} 数据,得到了409个候选信号,给出了世界上最精确的分支比测量结

果。利用格点量子色动力学(LQCD)精确计算的衰变常数 $f_{D_s^*}$ 作为输入,提取出 $|V_{cd}|=0.2150\pm0.0055\pm0.0020$ 。对于含奇异夸克粲介子的纯轻衰变,BES实验在 4.03 GeV 处观测到 3 个 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 和 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu$ 候选事例,BESIII 实验分析了在 4.178 GeV 上采集的 3.2 fb^{-1} 数据,观测到 1136 个 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选事例,给出最精确的衰变分支比,并结合 LQCD 给出的衰变常数 $f_{D_s^*}$ 提取出 $|V_{cs}|=0.985\pm0.014\pm0.014$,是世界上最精确的结果。在未来 BESIII 的进一步研究计划中, $|V_{cd}|$ 的测量精度将进一步提高 1 倍,达到国际最精确的直接测量结果。

3. R 值测量与“上帝粒子”质量

在 20 世纪末,标准模型中与粒子质量起源密切相关的希格斯粒子尚未找到,联合拟合标准模型参数预言其质量最可能在 $62_{-30}^{+53} \text{ GeV}$,但这与欧洲核子中心的 LEP 实验给出的排除区域结果不符合,使得在实验上寻找希格斯粒子变得更加扑朔迷离。仔细研究发现,上述预言的不确定性主要来自于 5 GeV 下 R 值的测量误差。BESII 实验针对这个问题,利用 1998 至 1999 年间在 2~5 GeV 能区内采集的 91 个能量点的数据进行了精确的 R 值测量,把 R 值的精度从原来的 15%~20% 提高到平均 6.6%。基于 BESII 实验的 R 值结果,希格斯粒子预言的质量变为 $98_{-38}^{+58} \text{ GeV}$,这为后来在大型强子对撞机上最终发现希格斯粒子(质量约为 125 GeV)提供了重要指导。此外,此 R 值结果可以进一步改善标准模型中其他含真空极化贡献的计算精度,从而精确计算电磁跑动耦合常数 $\alpha(s)$ 和缪子反常磁矩 $(g-2)_\mu$ 。BESIII 实验上已经采集了 2.0~4.6 GeV 能区的扫描数据,预期将 R 值测量精度提高到 3% 甚至更高。

实验上精确检验缪子反常磁矩 $(g-2)_\mu$ 是当前检验标准模型和寻找新物理的重要手段之一,其中标准模型计算缪子反常磁矩中最大的误差也来源于 R 值测量的精度,尤其是 2 GeV 以下 e^+e^- 湮灭产生多强子过程截面的贡献。BESIII 实验在 3.773 GeV 能

量上使用初态辐射技术降低 e^+e^- 的湮灭能量,测量了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $\pi^+\pi^-\pi^0$ 和 $\pi^+\pi^-2\pi^0$ 在低能区反应截面。这几个过程都是贡献强子真空极化计算误差的重要过程,BESIII 实验的这些测量对进一步提升理论计算精度起到了关键性的作用。

三、新物质形态的寻找和研究

强子态是夸克和胶子通过强相互作用组成的束缚态,它反映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相当贫乏,特别是量子色动力学(QCD)预言的多夸克态、强子分子态、胶球和混杂态等尚未被确认。因此,寻找这些奇特强子态是强子物理的重要课题,对进一步检验和发展 QCD 理论有重要意义。

1. 发现“四夸克物质”

2013 年,BESIII 实验在 4.26 GeV 附近分析了 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ 过程,在 π^+J/ψ 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,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又先后在两种衰变模式下发现了另一个新的四夸克候选态 $Z_c(4020)^+$,而新的 $Z_c(4020)$ 很可能是 $Z_c(3900)$ 的质量较高的伴随态。国际物理学界高度评价了这一系列发现,美国物理学会主编的《物理》杂志在 2013 年 12 月 30 日公布了 2013 年国际物理领域亮点成果,“发现四夸克物质”位列十一项成果之首。之后 BESIII 实验又积累了更多实验数据,并利用详尽的振幅分析技术,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^+ 。

此外,BESIII 实验在 4.26 GeV 附近进行了正负电子湮灭截面的精细扫描,利用高统计量的数据,在多个含粲强子产生的过程截面上发现 $Y(4260)$ 结构并非简单的单峰结构,很可能是两个共振结构

叠加形成的,对进一步理解 $Y(4260)$ 的性质提供了重要的数据;同时 4.26 GeV 上首次发现了辐射产生 $X(3872)$ 的过程,并发现了新的衰变模式 $X(3872) \rightarrow \pi^0 \chi_{c1}$ 和 $\omega J/\psi$ 。这些结果使得 BESIII 成为奇特强子态研究的前沿实验。

2. 重子对阈值处的新结构

BESII 到 BESIII 两代实验,利用当时世界上最高统计量的 J/ψ 数据,发现了一系列新的结构,特别是在正反质子对质量阈值处发现了新的共振结构 $X(pp)$ 和 $X(1835)$ 。由于它们与夸克模型预言的介子激发态不完全符合,被认为是重子反重子分子态或六夸克态等奇特强子态候选者,激发了国际理论和实验的广泛研究。2003 年 BESII 实验在 $J/\psi \rightarrow \gamma p \bar{p}$ 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 实验在 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^+ \pi^- \eta'$ 中发现新共振结构 $X(1835)$ 。BESIII 利用更高统计量的 J/ψ 数据,进一步深入研究上述两个过程,确定了 $X(p\bar{p})$ 自旋宇称为 0^- ,并在更高统计量 $\pi^+ \pi^- \eta'$ 不变量谱上清楚地看到在正反质子对质量阈值处有共振态线型的突变,揭示了 $X(p\bar{p})$ 和 $X(1835)$ 之间复杂的关联。另外在 $J/\psi \rightarrow \gamma \omega \phi$, $\gamma 3(\pi^+ \pi^-)$, $\gamma K_s^0 K_s^0 \eta$, $\omega \eta \pi^+ \pi^-$ 和 $\gamma \gamma \phi$ 等过程中,发现了质量和宽度接近 $X(1835)$ 的共振结构。

BESIII 实验利用精细的能量扫描数据和高能量数据的初态辐射事例,研究了质子-反质子和 Λ 超子-反 Λ 超子质量阈值附近的产生截面分布,发现在它们的阈值处均出现了奇特的突然增强的结构。目前理论上还不清楚这些阈值增强结构的来源,需要开展更多相关的研究。

3. 胶球何在?

QCD 理论预言了含胶子自由度的新型强子态——胶球的存在,根据 LQCD 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。由于普通量子数的胶球很容易

和普通介子发生混合,这为确切判断一个胶球带来很大挑战,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,联合确定候选拉来的属性。

J/ψ 的辐射衰变被认为是胶球大量产生的场所,BES、BESII 和 BESIII 实验利用这一过程系统开展了寻找胶球的工作。BESII 实验对 J/ψ 辐射衰变到 $\pi^+ \pi^-$ 、 $\pi^0 \pi^0$ 、 $K^+ K^-$ 和 $K_s^0 K_s^0$ 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 $K_s^0 K_s^0$ 的分波分析结果,均发现了显著的 $f_0(1710)$ 态;在 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$ 的模型无关的振幅分析中也看到 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 的 f_0 激发态,也可能含有标量胶球成分。BESIII 实验在 J/ψ 辐射衰变 $\eta \eta$ 、 $K_s^0 K_s^0$ 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 $\pi^+ \pi^- \eta'$ 和 $K^+ K^- \eta'$ 中发现了 $X(2120)$ 和 $X(2370)$,它们也是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 LQCD 计算结合,最终揭示它们的本质。

四、精确测量强子性质,检验标准模型预言

1. 阈值上粲重子性质研究

实验上发现首个粲重子 Λ_c^+ 是在 20 世纪 70 年代末,但实验上关于 Λ_c^+ 的衰变性质研究非常有限,很多重要的衰变过程完全没有实验数据,已经测量的衰变道的精度也很差。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。2013 年 BESIII 实验首次在 $\Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 对的阈值能量处获取了 10 万对 $\Lambda_c^+ \bar{\Lambda}_c^-$ 事

例,开展了模型无关的 Λ_c^+ 衰变分支比的绝对测量。由于 Λ_c^+ 在阈值处产生,因此测量具有很多独特优势:产额高、本底低、系统误差小且可以利用阈值运动学约束。基于这批数据,BESIII 实验 1) 在世界上首次在阈值附近精确测量了 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 的绝对分支比,精度达到 6%,与当时 Belle 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,在世界上首次直接测量了半轻衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+\nu$ 和 $\Lambda\mu^+\nu$ 的绝对分支比,精度远远好于之前通过间接方法测量的结果;3) 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 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK_s^0\pi^+$ 。BESIII 实验上 Λ_c^+ 衰变性质测量的重要进展,也触发了国际上关于粲重子的理论研究的新进展,特别地促进了理论上预言双粲重子 Ξ_{cc} 的性质,支持了 LHCb 上 Ξ_{cc} 的首次发现。LHCb 实验也进一步关注 BESIII 上的粲重子衰变研究,期待更加精确的 Λ_c^+ 衰变实验结果。

2. 粲介子的衰变常数、形状因子和强子衰变

BESIII 实验在 $\psi(3773)$ 和 $\psi(4160)$ 共振峰分别积累了世界上统计量最高的 $D\bar{D}$ 和 $\bar{D}_sD_s^{(*)}$ 数据,从而可以系统地研究粲介子 $D_{(s)}$ 的衰变性质,为 QCD 有效模型和 LQCD 在粲能区计算提供实验依据。主要的研究包括:1) 利用纯轻衰变 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+\nu$, 给出了最精确的粲介子衰变常数 f_{D^+} 和 $f_{D_s^+}$, 精度分别达到世界上最好的 2.8% 和 2.2%, 进而精确检验 LQCD 计算;2) 利用半轻衰变 $D^0 \rightarrow K^-e^+\nu$ 、 $K^-\mu^+\nu$ 和 $\pi^-e^+\nu$, 测量了形状因子 f_K^+ 和 f_π^+ , 精度分别为 0.6% 和 1.5%, 为世界最精确的测量,用于刻度 LQCD 计算;3) 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。

3. 重子的极化与 CP 破坏

BESIII 实验利用 13 亿 J/ψ 事例,挑选出 42 万个 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-(\bar{p}\pi^+))$ 衰变事例,利用 Λ 超子和它的反超子形成的自旋纠缠系统,通过角分布分析,首次观测到显著的 Λ 超子横向极化,最大极化度达到 25%,同时测量了 Λ 超子的衰变参数为 0.750 ± 0.010 , $\bar{\Lambda}$ 反超子的衰变不对称参数为 -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。该测量把 Λ 超子和 $\bar{\Lambda}$ 反超子的衰变参数精度提高到 1.3%, 这是目前世界上最精确的结果。值得注意的是, Λ 超子目前的世界平均值比 BESIII 的测量小超过 5 倍标准偏差,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%。粒子数据表 2019 年版采用了 BESIII 的测量结果并摒弃了所有之前的测量。这个测量结果,作为其他实验测量的输入,也将刷新大批其他超子和粲重子衰变参数的测量值。

4. 低能标下的 Collins 效应

Collins 碎裂函数考虑了在强子化过程中的自旋相关效应,对它的测量提供了理解强相互作用动力学的重要数据。BESIII 实验上利用 e^+e^- 湮灭数据,在 3.65 GeV 能量处通过测量带电 π 介子对产生 $e^+e^- \rightarrow \pi\pi X$ 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性。BESIII 的结果可以和 B 介子工厂高能标下的测量结果进行对比,加深对 QCD 能量演化行为的理解;同时该结果的能标与已有的深度非弹散射实验的能标接近,可以用于联合分析提取核子中的横向极化分布函数。

五、北京谱仪实验的未来

1. 加速器和探测器升级计划

BESIII 探测器自 2008 年安装运行至今,工作性能稳定,各子探测器表现良好。只是主漂移室内室由于常年辐照产生了些微的老化问题,为了保证未来的实验的高精度测量,BESIII 合作组准备了两套

方案:1) 制作了与运行中的主漂移室内室类似的内室备用;2) 研发新型的圆形 GEM 探测器替代原来的内室,期待在保持原有空间分辨率和探测效率的基础上,进一步提高纵向空间分辨率。目前前者已经完成,后者正在建造中。

为了进一步扩展 BESIII 实验的物理潜力,2018 年起 BEPCII 升级了加速器的束流能量,将最高能量从 2.3 GeV 提高到 2.45 GeV,如此对撞的质心系能量将可达到 4.9 GeV,更加丰富了在粲重子和粲偶素方面的研究内容。BEPCII 还进行了连续注入模式的测试,预期在同样的运行时间内将增加 30% 的数据量。

BEPCII 亮度优化在 $\psi(3770)$ 共振峰,对应的束流能量为 1.89 GeV。在束流能量高于 2.2 GeV 时,限制亮度提高的关键因素是补充束流能量的高频腔的腔压和功率。通过小规模改进,增加高频腔个数并改善功率源,将亮度提高 2~4 倍是一个性价比非常高的改进方案。这可以大大提高 BESIII 研究粲强子物理以及含粲夸克奇特强子态的能力,尤其对于寻找类似 $Z_c(3900)$ 的奇特强子态, Z_{cs} ,即含正反粲夸克对且含奇异夸克的多夸克态有重要意义。相关的研究正在紧锣密鼓地进行当中。

2. 未来的物理研究

BESIII 实验运行 10 年来,在不同能量点上共积累了超过 20 fb^{-1} 的实验数据,完成了 100 亿 J/ψ 大样本事例的采集。在未来的取数计划中,BESIII 实验考虑了完成 30 亿 $\psi(2S)$ 事例、 $10\sim 20 \text{ fb}^{-1}$ 3.773 GeV 数据、4.0~4.6 GeV 内 30 fb^{-1} 的类粲偶素扫描数据、4.6~4.9 GeV 内 13 fb^{-1} 的粲重子和类粲偶素数据等。基于这些数据,BESIII 实验将继续在新强子态、粲强子弱衰变、以及新物理寻找方面开展研究。毋庸置疑,对数据的多方面挖掘还有可能给我们带来意想不到的发现,正如发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$ 和正反重子对产生中的极化现象等。大自然的秘密往往隐藏在我们的想象力之外,拥有高质量的数据并进行不懈的探索,才是通往发现的途径。

六、 τ -粲能区物理的未来

1. 其他正在开展的相关实验研究

目前国际上正在运行的强子物理研究前沿项目,主要包括 CERN 的 LHCb 实验,日本的 Belle II 实验和美国杰佛逊国家实验室 GlueX 实验等,这些实验均将运行至 2025 年以后,与 BESIII 实验在新强子态研究和粲强子物理研究等方面形成竞争和互补的关系。德国正在建造的 PANDA 实验,将在 2024 年部分运行,也将在上述研究上与 BESIII 有所重叠,但由于 PANDA 是正反质子湮灭实验,本底要复杂得多,能与 BESIII 进行竞争的研究非常有限。

2. 下一代超高亮度陶粲工厂

作为 BEPCII/BESIII 实验的下一步升级项目,中国和俄罗斯分别提出了下一代超高亮度的正负电子对撞机项目——超级陶粲工厂项目(STCF)和超级粲陶工厂项目(SCTF)——峰值亮度为目前 BEPCII 的 50~100 倍,对撞能区覆盖 2~6 GeV 甚至更高,可以产生更高统计量的陶子和粲强子样本,用于高精度地检验标准模型,并寻找新物理。

七、结语

BES 实验是我国第一个大科学装置实验,历经 30 年发展至今,BESIII 实验在我国主导的大型国际合作组实验的发展中起到了不可替代的作用。作为目前世界上唯一运行在陶粲能区的高亮度正负电子对撞实验,BESIII 实验已发表科研论文 250 多篇,成为了当前强子物理和粲物理前沿的重要实验装置之一。

BES 实验 30 年来,一直是我国培养高科技人才的重要基地,也是我国发起的国际科技合作项目的重要前沿。BESIII 实验还将继续运行 5~10 年,物理研究将继续保持 15 年以上,可以期待有更多新的发现和成果。

致谢:作者感谢叶铭汉、郑志鹏、李卫国和王贻芳研究员对文章写作有益的建议。

北京谱仪实验大事记

- 1984年10月7日,北京正负电子对撞机(BEPC)工程破土动工,北京谱仪(BES)建造正式开始。
- 1987年11月,北京谱仪主要探测器部件的制备、组装基本完成。
- 1988年5月,北京谱仪开始总装。
- 1988年10月16日,北京正负电子对撞机实现正负电子束流对撞。
- 1989年4月,北京谱仪推入对撞区投入运行。
- 1989年5月15日,北京谱仪首次记录到大角度巴巴事例和双 μ 事例。
- 1989年6月22日,北京谱仪首次测量到 J/ψ 共振峰。
- 1989年7月5日,北京正负电子对撞机和北京谱仪通过技术鉴定。
- 1989年9月,北京谱仪开始物理实验。
- 1990年7月21日,北京正负电子对撞机工程通过国家验收。
- 1991年5月,北京谱仪采集到900万 J/ψ 事例。
- 1991年5月,北京谱仪国际合作组正式成立,包括来自中国的60余名,美国的20余名,总共90余名物理学家。
- 1991年11月—1992年1月,北京谱仪采集 5 pb^{-1} τ 质量测量数据。
- 1992年1月—1994年5月,北京谱仪在4.03 GeV采集 22.3 pb^{-1} D_s 数据。
- 1992年8月7日,北京谱仪 τ 质量精确测量文章提交《物理评论快报》发表。该成果以及相关成果获1995年度国家自然科学二等奖。
- 1993年12月12日—1994年1月6日,1995年1月1日—4月1日,北京谱仪分两次共采集400万 $\psi(2S)$ 事例。
- 1994年12月22日,北京谱仪 D_s 衰变常数文章提交《物理评论快报》发表。
- 1995年夏—1997年底,北京谱仪升级为北京谱仪II(BESII)。
- 1998年4月—1999年5月,BESII在2-5 GeV采集R值扫描数据。
- 1998年8月19日,北京谱仪发现 $\psi(2S)$ 相对于 J/ψ 衰变到矢量-张量末态反常压低的文章提交《物理评论快报》发表。该成果以及相关成果获2001年度国家自然科学二等奖。
- 1999年11月—2001年5月,BESII采集5800万 J/ψ 事例。
- 2001年2月3日,BESII在2-5 GeV R值精确测量文章提交《物理评论快报》发表。该成果以及相关成果获2004年度国家自然科学二等奖。
- 2001年11月—2002年3月,BESII采集1400万 $\psi(2S)$ 事例。
- 2002年4月—2003年12月,BESII采集 33 pb^{-1} $\psi(3770)$ 事例。
- 2003年2月10日,国务院批准北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)项目建议书。
- 2004年1—3月,BESII采集2.2、2.6、3.07 GeV R值测量数据。
- 2004年3月,BESII结束运行。
- 2004年4月30日,北京正负电子对撞机停止高能物理实验运行,BESII探测器移出对撞区。
- 2004年7月7日,BESII发现 $\psi(3770) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 文章提交《物理快报》发表。该成果以及相关成果获2010年度国家自然科学二等奖。

- 2004—2008年,北京谱仪 III(BESIII)探测器建造。
- 2005年6月5日,第一次 BESIII 国际合作组会议。
- 2005年8月11日,BESII 发现新粒子 X(1835)文章提交《物理评论快报》发表。该成果以及相关成果获 2013 年度国家自然科学二等奖。
- 2008年4月19日,BESIII 探测器推到对撞点。
- 2008年7月19日,BEPCII 加速器与 BESIII 联合调试对撞成功。
- 2009年4月14日,BESIII 采集 1.06 亿 $\psi(2S)$ 事例。
- 2009年6月12日—7月28日,BESIII 采集 2.25 亿 J/ψ 事例。
- 2009年7月17日,BEPCII 工程通过国家验收。
- 2010年1月—2011年5月,BESIII 采集 $2.9 \text{ fb}^{-1} \psi(3770)$ 数据,研究 D 介子。
- 2011年5月,BESIII 采集 4.01 GeV 数据 0.5 fb^{-1} ,研究 D_s 介子和类粲偶素 XYZ 粒子。这是第一批用于 XYZ 粒子研究的数据。
- 2012年3月30日,BESIII 采集 3.4 亿 $\psi(2S)$ 事例。
- 2012年5月25日,BESIII 采集 11 亿 J/ψ 事例。
- 2012年夏,BEPCII 直线加速器升级,束流能量由 2.1 GeV 提高到 2.3 GeV。
- 2012年12月—2014年5月,BESIII 在 3.8–4.6 GeV 采集数据 6 fb^{-1} ,研究类粲偶素 XYZ 粒子和 Λ_c 粲重子。
- 2013年3月26日,BESIII 实验宣布发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$,论文 6 月 17 日在《物理评论快报》发表。在美国“*Physics*”杂志评出的 2013 年物理学领域十一项亮点成果中位列榜首。
- 2014年12月—2015年4月,BESIII 在 2–3 GeV 采集 0.6 fb^{-1} R 值测量数据。
- 2016年1—6月,BESIII 在 4.18 GeV 采集 3.2 fb^{-1} 数据,研究 D_s 介子。
- 2016年4月5日,BEPCII 实现对撞亮度 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,性能达到改造前的 100 倍。
- 2016年12月—2017年5月,BESIII 在 4.19–4.28 GeV 采集 3.9 fb^{-1} 数据,研究类粲偶素 XYZ 粒子。
- 2017年12月6日—2019年2月11日,BESIII 采集 87 亿 J/ψ 事例,与 2009 年、2012 年累计采集 100 亿 J/ψ 事例。
- 2018年10月20日,“北京正负电子对撞机建成 30 周年研讨会”在中国科学院高能物理研究所举行。
- 2019年2—6月,BESIII 采集 4.13–4.44 GeV 数据 3.8 fb^{-1} ,研究类粲偶素 XYZ 粒子。
- 2019年夏,BEPCII 升级,束流能量由 2.3 GeV 提高到 2.45 GeV。
- 2019年9月5—6日,“北京谱仪实验物理研究 30 年研讨会”(“Symposium on 30 years of BES Physics”)在中国科学院高能物理研究所举办。

封面说明

自 1989 年北京谱仪运行 30 年来,我国陶粲能区物理实验研究从蹒跚起步到今天已经国际领先。北京谱仪实验在陶物理、粲物理、强子物理等方面取得了丰硕的成果,做出了包括陶质量精确测量(上左)、发现粲偶素衰变反常规律(下左)、发现 $\psi(3770)$ 非粲介子对衰变(上中)、精确测量粲能区强子产生截面即 R

值(下中)、发现 X(1835)等新粒子(上右)、发现“四夸克物质” $Z_c(3900)$ (下右)、精确测量粲强子衰变性质和 CKM 矩阵元、发现正负电子对撞产生重子对过程中的重子极化等多项重要成果,使我国在世界高能物理领域占有了一席之地。