

从亮点工作看三代北京谱仪 上粲强子物理研究的发展

马海龙¹ 王 伟² 李 蕾³

(1. 中国科学院高能物理研究所; 2. 上海交通大学 200240; 3. 北京石油化工学院 102617)

一、粲强子物理的前世今生

“天地玄黄，宇宙洪荒。”有史以来，人类便没有停止过对自身所处大千世界的探索。这种探索并不局限于谋求更好的物质条件，也包含对天空的观察、对生命的探究和对未知的渴求，追根溯源来自于我们内心在精神层面对未知事物的好奇和对真理的追求。

在所有的自然科学中，物理学是研究宇宙间物质存在的基本形式以及相互作用和转化规律的科学。在漫长的探索过程中，人们一直保持着一种朴素的信念，即主宰万物的基本规律应当是简单有序的。尽管大千世界千姿百态，但归根结底物质间的基本相互作用可归结为四类，它们分别是：万有引力、电磁相互作用、弱相互作用以及强相互作用。

朴素的信念也让人们一直不断地寻找物质世界的基本组成。在20世纪，人们发现分子尺度之下的原子由原子核与核外电子构成。紧接着，中子、汤川模型预言的传递核力的载体—— π 介子、奇异粒子等一系列发现使得人们对强相互作用性质的认识逐渐清晰起来。到20世纪60年代，实验上已经发现了近两百个未知的强子态。显然，这么庞杂的粒子群体不符合粒子物理学的朴素原则。1964年，盖耳曼和茨威格同时提出了可用来解释强子基本构成单元——夸克的概念：当时发现的所有强子态都可以由三种基本夸克构成，分别是“上”，“下”和“奇异”夸克。夸克都是自旋为1/2的费米子，带

有分数电荷和其他一些量子数。

夸克模型在粒子分类方面取得了很大成功，盖尔曼也因此获得了1969年诺贝尔物理学奖，然而仅依靠三种夸克来解释粒子物理现象还存在很多问题。例如，理论上可以预言“奇异”夸克可以很自然地通过“上”夸克诱导的高阶圈图转换成“下”夸克，不过在实验上却没有得到证实。为了解释这种现象，格拉肖、意大利普路斯和麦阿尼于1970年引入“粲”夸克，用于抵消圈图中“上”夸克的贡献。1974年，美国布鲁克海文国家实验室BNL和斯坦福直线加速器中心SLAC在不同类型的对撞机上，几乎同时探测到了第一个包含粲夸克的粒子 J/ψ ，这被称为“十一月革命”。两个实验组主要负责人丁肇中和里克特分享了1976年诺贝尔物理学奖。此项发现在高能物理发展史中具有里程碑式的意义，由此揭开了粒子物理研究的新篇章。

在夸克模型中，介子被认为是由一对正反夸克组成，重子则是由三个夸克组成，反重子由三个反夸克构成。粲强子物理，顾名思义就是有关含粲夸克强子的物理。图1显示了粲强子 D^0, D^+, D_s^+ 和 Λ_c^+ 的夸克组成。这些粲强子最早发现于20世纪70年代。四十多年来，国际粲强子实验和理论研究波澜

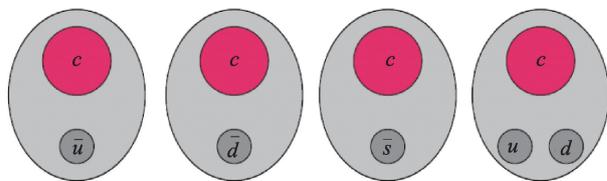


图1 粲强子(D^0, D^+, D_s^+ 和 Λ_c^+)的夸克组成图

壮阔。在这个过程中,我国主导的北京谱仪(BES)实验发挥了非常重要的作用;而三代谱仪上的粲强子研究的亮点工作则见证了我国粲物理实验研究的成长。

二、三代北京谱仪上粲介子研究亮点

1988年10月北京正负电子对撞机(BEPC)和北京谱仪(BES)建造成功。从那时起,我国陶-粲物理实验研究开启了漫漫征程。这一大科学实验装置的目标是,希望经过努力,使得我国在国际高能物理领域占有一席之地。

为了在BES上开展粲强子实验研究,首先要在合适的能量点采集数据。在这些能量点,粲强子成对或者接近成对产生。与国际上B工厂和LHCb等实验相比,BES近阈粲强子实验研究有高产额、信号显著、背景水平低和系统误差小,能进行绝对测量等优势。图2以在3.773 GeV, e^+e^- 对撞产生 ψ'' (3770),又称为 ψ'' 粒子, ψ'' 衰变到 D^+D^- , $D \rightarrow K^- \pi^+$, $D^+ \mu^+ \nu$ 为例,显示了粲强子对产生示意图。

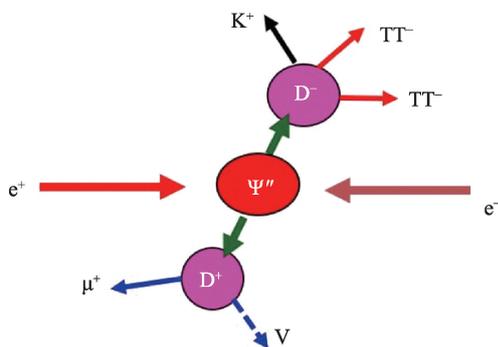


图2 粲强子对产生示意图

1. 从无到有,摸索前进,BES开创中国 D_s^+ 介子实验研究的先河

在粒子物理的标准模型中,夸克的弱相互作用本征态与其质量本征态并不一致,因此两个本征态之间存在一个变换矩阵,称作CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)矩阵:作为标准模型的基本参数,上述矩阵中每个矩阵元表征了两代夸克之间的混合程度。CKM矩阵元是标准模型中的基本参数,在实验上精密测定这些矩阵元,是国际味物理领域的重要任务之一,其重要性不言而喻。其中,含c夸克的两个矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 可以通过研究粲介子纯轻和半轻衰变来测量。在理论上,粲介子纯轻和半轻衰变可以被简单描述,其衰变宽度通常被参数化为描述初末态夸克间强相互作用的衰变常数或形状因子和描述初末态夸克间弱相互作用的 $|V_{cs(d)}|$ 。由于这些衰变在理论上能够精密计算,因此这两类衰变为测定 $|V_{cs(d)}|$ 提供了理想桥梁,历来是粲介子实验研究的焦点。粲介子纯轻和半轻衰变的最低阶费曼图如图3所示。

时间回溯到20世纪90年代。1994年,BES实验在4.03 GeV采集了22.3 pb^{-1} 积分亮度的数据,主要开展 D_s^+ 物理研究。尽管BES是当时世界上工作在陶-粲物理能区的性能最好的探测器,但是由于BEPC亮度和BES性能的限制,能够用于开展粲介子衰变研究的数据样本小,背景高;特别是4.0 GeV之上各种可能的共振态和粲介子相互叠加,背景极为复杂。再加上当时人们对这些共振态在实验和理论上的认知都非常有限,研究的难度可想而知。

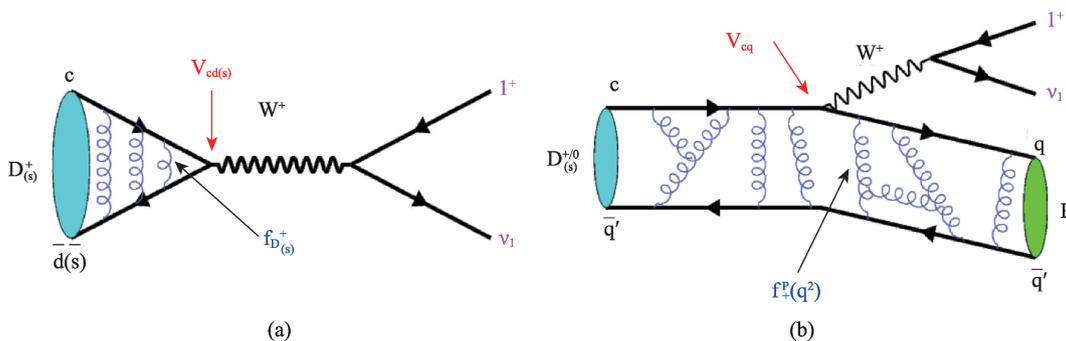


图3 粲介子纯轻衰变(a)和半轻衰变(b)费曼图

BES克服了数据少、背景高和数据分析经验少等诸多困难,在国际上首次使用近阈数据,从复杂的背景中分离出3个 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu + \tau^+ \nu$ 候选信号(见图4(a)),提取了其绝对分支比并测量了 D_s^+ 介子衰变常数。研究结果于次年发表在国际权威物理期刊《物理评论快讯》上。该工作拉开了BES研究粲强子衰变的帷幕,成为中国粲介子实验研究的里程碑。有了一个艰难但良好的开局,BES D_s^+ 介子研究成果不断涌现,并获1997年中国科学院自然科学一等奖。

2. 背水一战, BES II 在国际 D^0 和 D^+ 介子研究领域占据一席之地

1993~1997年, BEPC 和 BES 进行了升级改造。升级改造后的 BEPC 仍称为 BEPC, 而 BES 称为 BESII。2002年, BESII 在 3.773 GeV 附近采集了约 33 pb^{-1} 积分亮度的数据, 主要用于 D^0 和 D^+ 介子产生与衰变特性的研究以及 $\psi(3770)$ 非 $D\bar{D}$ 衰变的寻找。然而, 同期原先工作在 B 物理能区的美国 CLEO 实验将其对撞能量降至陶-粲物理能区, 主要目标是粲介子衰变的研究。该实验(CLEO-c)在 3.774 GeV 采集了 818 pb^{-1} 积分亮度的数据, 并且探测器分辨好, 领先 BESII 一代。当时一位国外实验家曾经拿一幅漫画形象地对比 BESII 和 CLEO-c 实验的差距。在该漫画中, CLEO-c 被比作一只巨兽, 而 BESII 则是一根任其宰割的香肠。于是, 合作组内的外方人员集体退出了 $\psi(3770)$ 和 D 物理文章的署名。由此可见, BESII 面临的国际竞争形势之严峻。然而, 正是在这种不被看好的情况下, BESII 硬是憋足一股劲, 通过坚持不懈的努力, 与时间赛跑, 最终于 2004 年初在意大利举行的 Moriond 电弱国际研讨会上, 在国际上率先公布了粲介子衰变研究的初步结果: 首次提取到 3 个 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选信号并设定了 D^+ 介子衰变常数; 证实 $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu$ 和 $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 e^+ \nu$ 衰变分宽度之比和同位旋对称性的预期在误差范围内一致, 解决了自 Mark III 实验后 20 余年内粲介子弱衰变中同位旋是否守恒的一个长期疑难(见 CLEO-c 实验发言人 I. Shipsey 教授, 2004 年国

际高能物理大会报告)。BESII 充分利用自身特点, 扬长避短, 先后发表了十多篇粲介子衰变研究的文章, 有力地回击了质疑, 在国际 D^0 和 D^+ 介子实验研究领域占据了一席之地。值得一提的是, BESII 粲介子若干疑难问题的研究和 $\psi(3770) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$ 非 $D\bar{D}$ 衰变的发现一起, 获得了 2010 年国家自然科学二等奖。

3. 励精图治, 稳步前进, BES III 奠定了中国在粲介子物理研究中多领域领先的国际地位

2004~2008年, 为了满足国际陶-粲物理高精度前沿研究的需要, BEPC 和 BES II 进行了重大升级改造, 分别称为 BEPC II 和 BES III。升级改造后, BEPC II 比 BEPC 亮度提高两个数量级, BEPC II 和 BES III 性能都达到国际先进水平。2010~2011年, BESIII 在 3.773 GeV 采集了 2.93 fb^{-1} 积分亮度的数据, 2016年在 4.178 GeV 采集了 3.19 fb^{-1} 积分亮度的数据, 分别用于粲介子 $D^{(*)}$ 和 D_s^+ 物理研究。这些样本是世界上最大的近阈粲介子样本, 为我国粲介子物理实验研究的全面、深入开展提供了数据保障。然而, 由于此前 CLEO-c 实验利用近阈数据开展过粲介子衰变的系统研究, 发挥 BES III 的数据量的优势、尽可能改进测量系统误差是 BES III 粲介子物理的关键因素之一。

BES III 很快克服了高精度测量、人员少、时间紧、任务重等实际困难, 陆续推出了在国际上有重要影响的物理成果。2012年, BES III 首次在粲物理国际研讨会(Charm 2012)提出使用纯轻衰变 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 测定 $|V_{cd}|$ 的方案, 并很快取得了实验结果。该结果发表后, 随即被国际权威《粒子数据组》采纳, 使得 $|V_{cd}|$ 测量精度的世界平均值由此前的近 5% 下降到接近 2% 左右。2019年, BES III 从 3.19 fb^{-1} 的数据中观测到 1131 个 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 信号, 获得世界单次最高测量精度的 $|V_{cs}|$ 。图 4 显示了 BES 上 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu + \tau^+ \nu$ 候选信号和 BES III 上 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选信号, 可见 BEPC II 和 BES III 性能的显著提升。图 5 展示了 BES III 测得的 $f_b |V_{cd}|$ 和 $f_b |V_{cs}|$ 与其他实

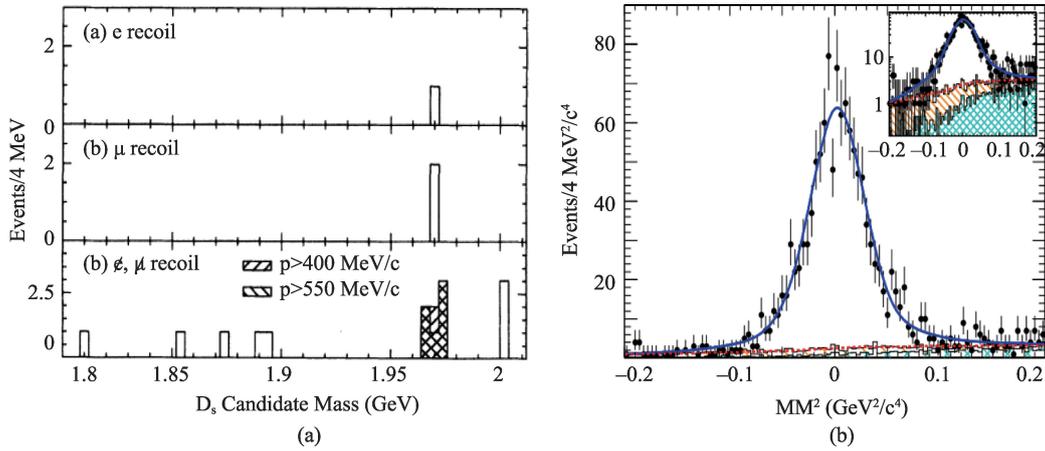


图4 BES(a)和BES III(b)上 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 候选信号

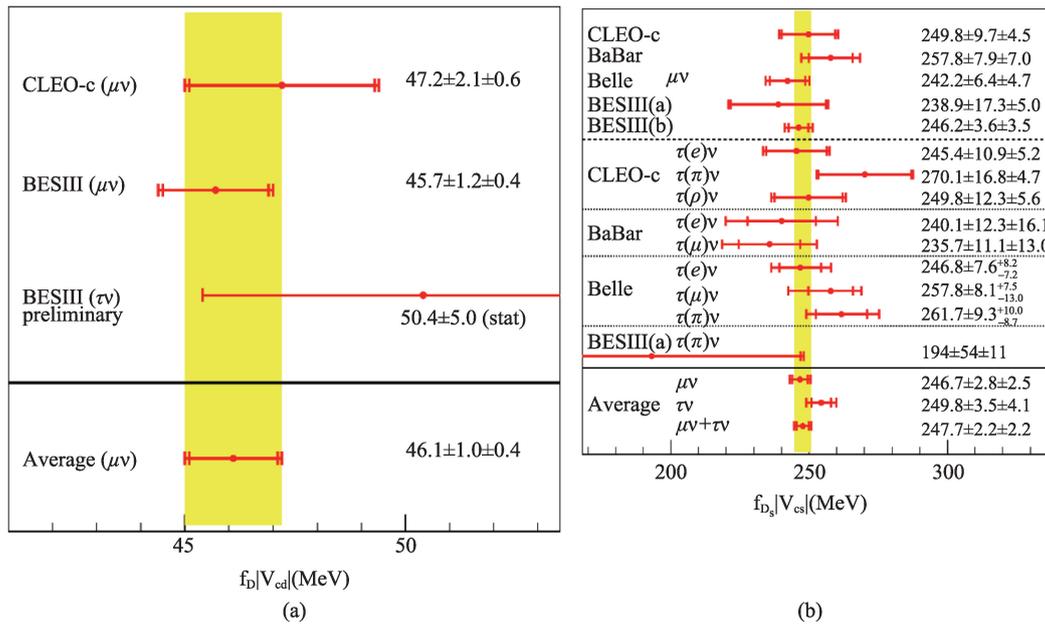


图5 BES III测得的 $f_{D_s} |V_{cd}|$ (a) 和 $f_{D_s} |V_{cs}|$ (b) 与其他实验结果的比较

验结果的比较,显示出BES III结果的明显精度优势。

BES III在“轻子普适性”检验方面也取得重要进展。通俗地说,轻子是组成自然界的基本粒子,分为三代,即电子、缪子和陶子,各代轻子除质量不同,其他相互作用特性应该没有区别,这就是所谓的“轻子普适性”。如果发现轻子普适性的破坏,则意味着新物理的发现。对“轻子普适性”的精确检验是粒子物理的重大前沿专题。重介子,如B和D,可以衰变产生电子、缪子和陶子,是检验“轻子普适性”的理想窗口之一。例如,通过实验测量重介子

衰变为电子、缪子和陶子的分支比的比值来检验“轻子普适性”。近年来,在B介子一些半轻衰变研究中,人们发现,其衰变到不同代轻子的分支比之比与标准模型的预期有较大偏离(3.9 σ),究竟是实验偏差,还是固有偏离,需要实验精确检验。在粲介子衰变中,我们注意到,理论预期 $D^{0(+)} \rightarrow \pi e^+ \nu$ 和 $D^{0(+)} \rightarrow \pi \mu^+ \nu$ 衰变分支比的比值是0.985,误差约千分之二;然而,2016年国际权威《粒子数据组》显示此前测量的结果比理论预期低17%,差异显著。BESIII系统地比较了 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 和 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu$, $D^{0(+)} \rightarrow \pi \mu^+ \nu$

和 $D^{0(+)} \rightarrow \pi e^+ \nu$, 以及 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K} \mu^+ \nu$ 和 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K} e^+ \nu$ 的分支比, 证实“轻子普适性”在粲介子衰变中仍然成立。

与此同时, BES III 粲介子半轻衰变形状因子测量和强子衰变研究成果如雨后春笋般涌现。截至目前, 已经发表了四十多篇物理文章, 其中八篇发表在国际权威物理期刊《物理评论快讯》上。这些结果在国际粲介子物理领域发挥了重要作用。

三、BES III 上粲重子研究亮点

20世纪70年代末, 人们就在实验上发现了粲重子 Λ_c^+ , 然而对其产生与衰变的研究却一直非常粗糙。2014年国际权威《粒子数据组》收录的 Λ_c^+ 的总衰变分支比仅有约50%, 已知衰变的分支比精度几乎都大于25%。实验数据匮乏且粗糙, 导致对不同理论计算结果的甄别度极差, 这使得多年来人们对 Λ_c^+ 粒子性质的认知停滞不前, 亟需系统、精密的实验测量来打破这些制约 Λ_c^+ 实验和理论研究的瓶颈。

2014年, 综合考虑当时国际上 Λ_c^+ 实验和理论研究的发展现状和 BEPC II 能量性能, BES III 抓住历史机遇, 在 BEPC II 对撞质心系能量 4.6 GeV 采集了 35 天数据, 总积分亮度为 0.6 fb^{-1} 。该样本是世界上最大的近阈粲重子 Λ_c^+ 样本。BES III 充分利用近阈数据优势, 深入挖掘数据潜力, 优化信号筛选过程, 改进分析技术, 获得了一系列在国际上有重要影响的研究成果。

在强子衰变研究方面, $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 衰变由于分支比较大, 重建效率较高等优势, 被认为是粲重子研究中的“黄金道”, 在 B 介子实验上被广泛地用来标定 Λ_c^+ 粒子以寻找更高质量的粲重子和研究含底夸克的重子谱。如 2017 年 LHCb 实验通过标定 Λ_c^+ 粒子并组合 $\Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 的不变质量首次发现了双粲重子 Ξ_{cc}^{++} 粒子。此外 $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 衰变的绝对分支比还被广泛地用来标度、测定粲重子的其他过程的分支比。因此精确测定其分支比有重要意义。BES III 实验联合单标记和双标记粲重子, 测定了包

含 $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 在内的十二个强子衰变的绝对分支比。《粒子数据组》联合 BES III 和日本 Belle 实验的结果, 获得 $\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ 加权平均分支比的精度从原来的约 25% 改进至约 5%, 对标定 Λ_c^+ 其他衰变的分支比和其他粲重子衰变发挥了关键作用。

在半轻衰变研究方面, BES III 在国际上首次测定了 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda e^+ \nu$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda \mu^+ \nu$ 衰变的绝对分支比。对检验和发展不同理论模型计算、刻度和发展格点 QCD 理论以及理解 Λ_c^+ 粒子的弱衰变性质有重要意义。研究结果发表后, 随即引发了格点 QCD 理论首次计算了 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda l^+ \nu$ 衰变分支比和形状因子, 其分支比的理论计算结果与 BES III 实验的测量结果很好的一致。

此外, BES III 研究首次观测到 Λ_c^+ 到末态含中子的衰变过程, 为探讨粲重子衰变中质子、中子同位旋对称性提供了有力的实验依据; 精密测量了单举衰变 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda X$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow X e^+ \nu$; 精密测量了其他十多个遍举强子衰变分支比; 精密测定了 $e^+ e^- \rightarrow \Lambda_c^+ \Lambda_c^-$ 过程在阈值产生附近的截面谱, 揭示其阈值附近可能存在较复杂结构等。截至目前, BES III 共发表了十多篇 Λ_c^+ 衰变的物理文章, 其中七篇发表在国际权威物理期刊《物理评论快讯》上。这些研究开创了使用近阈数据研究 Λ_c^+ 的新领域, 奠定了 BES III 在国际粲重子 Λ_c^+ 领域举足轻重的国际地位, 并对检验理论上计算非微扰效应的参数化方法和相关的理论唯象模型, 提供了重要的实验数据。

四、回顾过去, 着眼未来, BES III 仍任重道远

从 BES 摸石头过河, 到 BES II 背水一战, 再到 BES III 在粲介子和粲重子物理研究方面取得丰硕成果, 实现国际领先。三代北京谱仪见证了我国在粲强子物理实验研究从无到有、从小到大、由弱到强的艰辛历程。我们完全有理由相信, 北京谱仪人精益求精、团结奋进、永攀高峰的科研精神在未来必将得到发扬和传承。

过去十年,人们对粲强子的认识水平有了突飞猛进的提高。 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的测量精度已经分别达到约1.5%和2.5%的水平;2019年,欧洲核子中心的LHCb实验首次在正反中性D介子衰变中发现了 10^{-3} 量级的不对称性; $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 衰变绝对分支比精度达到2.5%。然而,人们对微观世界的探索却从未止步。除充分挖掘现有数据潜力外,BES III还计划在3.773 GeV采集更大的粲介子样本,进一步改进粲介子衰变的研究。另外,BEPC II已初步完成将对撞能量从4.6 GeV提高到4.7 GeV的升级改造。这有助于采集更大的粲重子样本,系统、精密地研究 Λ_c^+ 的产生和衰变特性。未来,其能量还计

划进一步升级至4.9 GeV附近。此升级计划一旦实现,BES III将实现使用近阈数据系统研究粲重子 $\Sigma_c(\Xi_c)$ 的衰变。

目前,BES III是国际上唯一运行在陶-粲物理能区的探测器。对于BES III来说,抓住稍纵即逝的难得的历史机遇,充分挖掘、发挥BES III近阈数据优势,进一步改进关键物理目标精度,和国际上其他高能物理实验合作、优势互补,为国际重味物理领域作出应有贡献,仍然任重道远。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”,粲强子物理目前还存在很多未解之谜,需要由更加深入、广泛的研究来揭秘。



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子信箱mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科

技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2019年《现代物理知识》每期定价10元,全年6期60元,欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号:2-824。

编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

银行账号信息

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

需要过去杂志的读者,请按下列价格转账。

2010~2018年单行本每期10元;2010~2015年合订本每本60元。