

北京谱仪III实验上的 粲介子物理

马海龙

(中国科学院高能物理研究所 100049)

当前,描述自然界物质微观基本结构的最成功、最基本的理论是粒子物理的标准模型。该模型认为:自然界中的物质由三代夸克和三代轻子构成,四种基本相互作用中的电磁作用和弱作用能够用电弱统一理论描述,而强作用能够用量子色动力学理论描述。尽管标准模型在描述基本粒子及其相互作用方面取得了巨大成功,但在解释暗物质、暗能量和质量起源,以及强相互作用的非微扰性质理论描述等方面仍存在诸多问题。系统地研究各类强子衰变,精确检验标准模型、寻找超出标准模型的新物理是围绕上述问题开展的前沿课题。以下简要介绍基于我国大科学实验装置北京正负电子对撞机II上的北京谱仪III实验上的粲介子物理研究。

一、粲夸克的发现和粲介子

“原子(atom)”一词来自希腊语,原意“不可切分的”。直到20世纪初,原子一直被认为是组成物质世界的“基本粒子”。20世纪上半叶,人类对微观世界的认识取得巨大进展。早期,人们认识到原子核是由质子和中子构成的。根据当时的探测水平,人类所能探测的最小粒子,包括质子、中子、电子、光子和各种介子,被认为是构成自然界物质的“基本粒子”。随着实验探测技术的进步和量子场论研究的不断进展,人们认识到质子、中子、介子等参与强相互作用的粒子(又称为强子)由更基本的夸克和胶子构成。与此同时,人们还陆续发现了性质和电子类似的一系列轻子,以及性质与光子和胶子相似的一系列规范玻色子。这些夸克和轻子是现代物理

学深入研究的“基本粒子”。

“charm”一词中文原意为“魅力”,在粒子物理学中,它表示一种粒子——粲夸克。夸克(“quark”)是迄今为止人类发现的最“基本”的粒子。由于“夸克禁闭”现象,夸克不能在自然界中独立地存在,只能在强子里找到。因此,人们对夸克的认知都是通过对强子的观测间接实现。20世纪60年代之前,人们知道自然界中存在三种夸克,分别称为“上”夸克(up, u)、“下”夸克(down, d)和“奇异”夸克(strange, s)。夸克模型认为介子由一对正反夸克构成,而重子(比如质子和重子)则由三个夸克构成。那时,夸克模型在粒子分类方面取得了很大成功,不仅解释了当时已经发现的众多粒子,其预言的粒子也相继被发现,盖尔曼因此获得了1969年诺贝尔物理学奖。然而,随着实验和理论研究的不断深入,越来越多的粒子物理现象难以通过三夸克模型予以解释。比如,理论上预期“奇异”夸克能够通过“上”夸克诱导的高阶圈图转换成“下”夸克,但无法在实验上得以证实。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。

由于绝大部分强子难以在自然界中长时间存在,只能通过高能物理实验来被观测到。从20世纪中期开始,科学家们开始尝试将稳定的质子或电子,放在加速器里加速,使其达到接近光速的速度,在撞击时产生高能强子,进而探测强子的微观结构和性质。这些研究依赖于大型科学实验装置,包括加速器和探测器。1974年,美国布鲁克海文国家实验室BNL通过质子-质子对撞实验、斯坦福线性加

速器中心 SLAC 通过正负电子对撞实验,几乎同时探测到了一个质量为 $3.097 \text{ GeV}/c^2$ 的粒子,即为后人熟知的内部含有一对正反粲夸克的粒子 J/ψ 。该粒子的发现即粲夸克的发现被誉为粒子物理学界的“十一月革命”,具有里程碑式的意义。这两个实验组的主要负责人丁肇中和瑞奇特因此分享了1976年的诺贝尔物理学奖。随后,人们在实验中又先后发现底夸克和顶夸克。

粲夸克 c 是人类发现的第一个重夸克。根据夸克模型,它可以和反轻夸克 \bar{u} 、 \bar{d} 、和 \bar{s} 组成粲介子,也就是 $c\bar{u}$ 、 $c\bar{d}$ 、和 $c\bar{s}$, 分别标记为 D^0 、 D^+ 和 D_s^+ 。粲介子物理就是研究含粲夸克强子的物理。20世纪70年代以来,多个高能物理实验开展了粲介子物理的研究。1976年,工作在 SPEAR 正负电子对撞机上的 MARKI 实验在 $3.9\sim 4.6 \text{ GeV}$ 能区扫描,在 $K^-\pi^+$ 、 $K^-\pi^+\pi^-\pi^+$ 和 $K^-\pi^+\pi^+$ 粒子组合的不变质量谱上发现了中性和带电的粲介子 D^0 和 D^+ 。1983年,工作在 CESR 正负电子对撞机上的 CLEO 实验观测到奇异粲介子 D_s^+ 。 D^0 、 D^+ 和 D_s^+ 是粲介子的基态。随后,粲介子家族的其他成员也陆续被实验发现。

自粲介子被发现以来,多个实验开展了它们的弱衰变研究。这些实验包括:美国斯坦福线性加速器中心(SLAC)的正负电子对撞实验,美国费米国立加速器实验室(Fermilab)的质子-反质子对撞实验,美国康奈尔大学的正负电子对撞实验,日本筑波的高能加速器研究机构(KEK)的正负电子对撞实验,欧洲核子研究组织(CERN)的大型强子对撞机(LHC)实验和我国的北京正负电子对撞机(BEPC)上的北京谱仪(BES/BESII/BESIII)实验。

二、北京谱仪实验上的粲介子物理研究

北京正负电子对撞机是我国第一个大科学实验装置,是世界上八大高能加速器基地之一。它于1984年破土动工,1988年成功建成,1989年成功获取到第一个物理事例,从此开启了我国探索微观强子世界之旅。2004年,为了满足国际陶-粲物理更

高精度前沿研究的需要,北京正负电子对撞机和北京谱仪开始改造;升级改造后,称为 BEPCII 和 BESIII,它们的性能都达到国际先进水平,并于2009年开始采集数据。

2010和2011年,BESIII实验在正负电子质心系能量 3.773 GeV 下获取了世界上最大的 $\psi(3770)$ 数据。这些数据积分亮度为 2.93 fb^{-1} ,包含数以千万计的、世界上最大的近阈 $D^0\bar{D}^0$ 和 D^+D^- 介子对样本,可用于研究粲介子 D^0 和 D^+ 衰变。2012至2019年间,先后在正负电子质心系能量 $4.128\sim 4.226 \text{ GeV}$ 区间内采集了世界最大的近阈 $D_s^+D_s^-$ (含电荷共轭) 的数据。这些数据总积分亮度为 7.33 fb^{-1} ,包含数以百万计的 $D_s^+D_s^-$ 介子对样本,可用于研究粲介子 D_s^+ 衰变。与国际上 BaBar、Belle 和 LHCb 等实验相比,BESIII 近阈粲强子实验研究有绝对测量、信号显著、背景水平低和系统误差小等独特优势。

由于电磁作用和强作用过程要求粲数和宇称守恒,粲介子 D^0 、 D^+ 和 D_s^+ 只能通过弱作用发生衰变。按照末态产物,这些粲介子的衰变可以分为三类:只有轻子的纯轻衰变,既有轻子又有强子的半轻衰变,以及末态都是强子的非轻衰变。图1显示了粲介子纯轻衰变和半轻衰变的最低阶费曼图。对粲介子 D^0 、 D^+ 和 D_s^+ 弱衰变的实验研究有重要的物理意义。目前,BESIII 实验已经开展了大量相关的研究,并已经取得了一系列在国际上有重要影响的物理成果。因为篇幅限制,以下举例简要介绍几方面重要成果。

1. 精密测量 CKM 矩阵元 $|V_{cs(d)}|$

在粒子物理的标准模型中,夸克是构成物质的基本粒子之一,它们分为上夸克(u, c, t)和下夸克(d, s, b)两类。然而,夸克的弱相互作用本征态与其质量本征态并不一致。两个本征态之间存在一个如下 3×3 的变换矩阵:

$$V_{CKM} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix}.$$

该矩阵称为 CKM 矩阵或夸克混合矩阵,描述了上

夸克和下夸克之间的混合关系。在这个矩阵中, V_{ij} 表示从第 i 种夸克转变为第 j 种夸克的转变概率。量子力学要求 CKM 矩阵是幺正的, 即各行或各列元素平方和等于 1, 如果在实验上发现了显著的偏离则意味着存在超出标准模型的新物理效应。CKM 矩阵的元素可以通过实验测量, 含粲夸克 c 的两个矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 能够通过研究粲介子纯轻和半轻衰变来测量。在理论上, 这两类衰变的概率大

小能够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 $|V_{cs(d)}|$ 的乘积。而衰变常数或形状因子可以通过格点量子色动力学的理论方法精密计算, 进而可以精密测定 $|V_{cs(d)}|$ 。反之, 通过 CKM 幺正性约束结合其他精确测量的 CKM 矩阵元可以得到衰变常数或形状因子, 进而精确检验量子色动力学计算的衰变常数或形状因子。

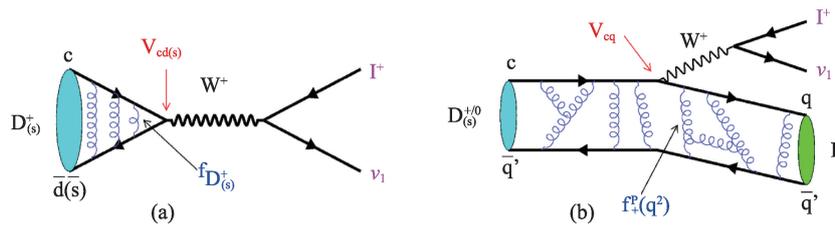


图1 粲介子纯轻衰变(a)和半轻衰变(b)费曼图

2012年, BESIII 在粲物理国际研讨会(Charm 2012)上发布了纯轻衰变 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 研究结果, 首次提出使用粲介子纯轻衰变测定 $|V_{cd}|$ 的方案, 该结果于 2014 年发表。该方案使得 $|V_{cd}|$ 世界平均值的精度由此前的约 5% 改进到约 2%。2019 年, BESIII 使用在对撞质心系能量 4.178 GeV 处采集的 3.19 fb^{-1} 的数据, 精密测量了纯轻衰变 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, 获得当时世界单次最高测量精度的 $|V_{cs}|$ 。随后, BESIII 使用更大数据样本和更多衰变道进一步改进测量了 $|V_{cs}|$, 使得 $|V_{cs}|$ 世界平均值的精度从原有 2% 精度改进到接近 1%。

2. 轻子味道普适性检验

轻子是组成自然界物质的基本粒子, 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, 即所谓的“轻子普适性”。如果发现不同代含轻衰变分支比的比值与标准模型预期有显著的偏离, 则意味着轻子普适性的破坏, 即暗示存在超出标准模型的新物理效应。重介子, 如 B 和 D 介子, 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。在实验上, 一般通过实验测量重介子到电子、缪子和陶子的衰变概率比

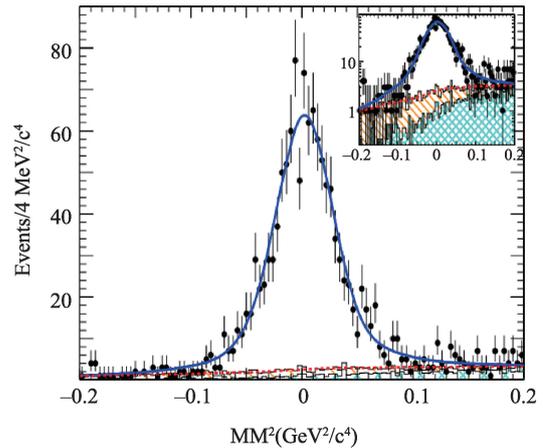


图2 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 候选事例丢失质量平方分布图

值来检验“轻子普适性”。特别是, 近年来, 人们发现在 B 介子衰变到不同代轻子的衰变概率之比与标准模型的预期有超过 3 倍标准偏差的偏离。探讨此偏差的根源究竟是实验偏差, 还是固有偏离, 需要系统研究各类重介子的各类含轻衰变来予以回答。

理论上, 粲介子可能通过半轻衰变跃迁到标量介子(如 $a_0(980)$, $f_0(980)$)、赝标量介子(\bar{K}^0 、 π^0 、 K^+ 、 π^+ 、 η 、 η')、矢量介子(\bar{K}^{*0} 、 \bar{K}^{*+} 、 ρ^0 、 ρ^+)、轴矢量介子($\bar{K}_1(1270)^0$ 、 $K_1(1270)^-$)。但是, 在 BESIII 实验之前, 基于传统夸克模型预期的粲介子到标量

介子、轴矢量介子的半轻衰变始终未在实验上得以确认；特别是，粲介子17种可能的遍举缪子半轻衰变中，仅有5个衰变道的测量，都来自固定靶实验或高能区B物理实验，测量精度较差。因此，在这些衰变中是否存在可能的轻子普适性破坏亟需系统的实验检验。

特别是，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%，存在显著差异。BESIII实验精密测量了 $D^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$ ，首次观测到 $D^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D^+ \rightarrow \eta \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D^+ \rightarrow \omega \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D^0 \rightarrow \bar{\mu}^+ \nu_\mu$ 、 $D_s^+ \rightarrow \phi \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D_s^+ \rightarrow \eta \mu^+ \nu_\mu$ ，大大完善了粲介子遍举缪子半轻衰变图像，在最高约1.3%精度下证实“ $\mu-e$ 轻子普适性”在粲介子衰变中仍然成立。同时，BESIII实验还首次观测到粲介子到标量介子、轴矢量介子的电子半轻衰变；首次抽取了多个半轻衰变的形状因子，填补了国际上相关实验研究的空白。此外，BESIII还测量了纯轻衰变 $D^+ \rightarrow l^+ \nu_l$ 和 $D_s^+ \rightarrow l^+ \nu_l$ 分支比之比，排除了粲介子衰变中“ $\tau-\mu$ 轻子普适性”破坏的可能性。

3. 精确测量中性粲介子强衰变相位差

强相位产生于衰变末态强子之间的相互作用，它不能通过理论计算，只能通过实验测量。正反中性D介子的强相差反映了中性D介子和其反粒子

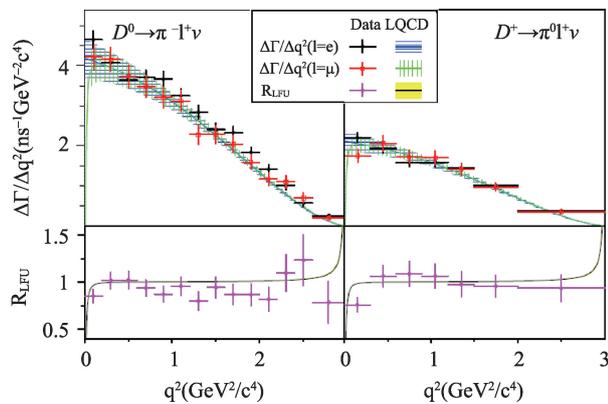


图3 缪子和电子半轻衰变 $D^{0(+)} \rightarrow \pi^{0(-)} l^+ \nu_l$ 微分跃迁率比较

同时衰变到相同强子过程所产生的强相位的差值。在所有可能的强子末态中， $K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 的强相差是国际上最关心的参数之一，因为它能够为测量粒子物理标准模型的一些重要基本参数提供关键的实验输入。这些重要基本参数包括描述第一代和第三代夸克家族混合的CKM相位角 γ 和描述正反中性D介子振荡的混合参数等。

精确测量CKM相角 γ 能够为基于标准模型的电弱理论提供强有力的检验。将 γ 的测量精度降低至1度以下是未来重味物理实验的重要目标之一，因此备受国际重味物理同行的关注。然而，在BESIII实验之前的 γ 角测量中，已有中性粲介子强相差参数作为输入而引入的系统误差大约为4度，是主导的系统误差来源，无法满足未来精密测量 γ 角的需要。BESIII实验通过多种方法改进数据分析技术，引入更多的单标记衰变过程以增加信号的统计量、拓展部分重建分析技术以提高信号过程的探测效率、首次在测量中修正区间迁移效应的影响以降低测量值与真实值之间的偏离等。基于数据统计量的显著提升以及上述改进，BESIII实验获得了当前世界上精度最高的正反中性D介子衰变到 $K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 的强相差参数。大大改进了作为外部输入测量 γ 角的主导系统误差，预期能降低至1度以内。此外，BESIII实验还完成了多项其他强相差测量工作。

4. 其他强子衰变研究

BESIII实验还首次观测到三十多个粲介子衰

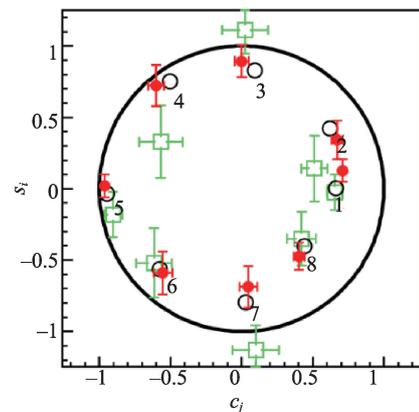


图4 正反中性D介子衰变到 $K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 的强相差参数

变新模式,例如:首次系统地测量了 $D^{(+)}$ 介子遍举 η 衰变绝对分支比,极大地丰富了粲介子遍举 η 衰变的图像;发现卡比玻双重压低衰变 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$,测定其分支比在 10^{-3} 量级,打破了人们对卡比玻双重压低衰变分支比一般在 10^{-4} 的传统认识。BESIII首次使用近阈数据开展这两类衰变的研究,结束了此类研究之前长期由高能区实验主导的历史。

此外,BESIII实验首次开展了二十多个粲介子多体强子衰变的振幅分析。通过振幅分析,不仅能够抽取各衰变中子共振过程的比分,探讨不同子共振过程振幅之间的干涉效应,还能够为深入理解轻强子谱提供重要信息。比如,在 $D_s^+ \rightarrow K_s^0 K^+ \pi^0$ 的振幅分析中,BESIII实验在 $K_s^0 K^+$ 不变质量谱上发现了带电标量 a_0 态,称为 $a_0(1817)$ 。但该带电类 a_0 态究竟是已知中性类 a_0 态的同位旋三重态?还是X(1812)粒子对应的三重态?对此问题的理解有待更深入的实验和理论研究。

三、总结和展望

不积跬步,无以至千里;不积小流,无以成江海。从20世纪90年代的第一代北京谱仪,到本世

纪初的第二代北京谱仪,再到2009年之后开始运行的第三代北京谱仪,粲介子样本实现了从数以千计到数以千万计的提高,对一些关键物理量的测量精度得以显著提升。这见证了我国粲介子物理实验研究事业从无到有、从小到大、由弱到强的历程。目前,BESIII实验已经开展了大量粲介子衰变的研究,并取得了系列重要物理成果,已经发表了110余篇粲介子物理文章,包括约20篇发表在物理领域最有影响的期刊《物理通讯快报》上。这些结果使得人们对粲介子微观世界的认知显著提升。

截至2023年6月,BESIII已经在正负电子对撞能量3.773 GeV处获取到积分亮度为 16 fb^{-1} 的数据,并将在2024年初完成全部 20 fb^{-1} 的数据采集。这些数据,将为深入研究、精密测量粲介子衰变提供强有力支撑。同时,BEPCII计划于2024年6月后开始升级改造,将对撞能量进一步拓展到5.6 GeV,这将有效地拓展陶-粲物理研究内容。未来,BESIII实验将进一步推进粲介子物理研究:在更高精度下测量CKM矩阵元、更广泛地检验轻子普适性、更精密地测量中性粲介子衰变强相位差、开展更多多体强子衰变振幅分析、寻找大量丢失衰变等。



纳米塑料如何影响生物新陈代谢

纳米塑料是尺寸小于100纳米的微小塑料颗粒,由水瓶和塑料袋等较大的塑料碎片产生,普遍分布于海洋和陆地环境。尺寸微小的纳米塑料很容易进入生物体并与其相互作用,潜在威胁着生态系统和食物链的安全。

PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)通常用于制造塑料瓶,莱比锡大学(Leipzig University)和亥姆霍兹环境研究中心(Helmholtz Centre for Environmental Research, UFZ)的研究人员合作调查了PET塑料微粒对生物体新陈代谢和发育的有害影响,并将结果发表在《科学报告》(Scientific Reports)上。

被称为微塑料和纳米塑料的小颗粒,因为塑料的滥用而在全球生态系统中扩散,进入饮用水、食物甚

至空气中。它们可以通过食物和水被人类和动物吸收,随着时间的推移,微塑料会在体内积聚,但其对人类健康的全面影响尚不清楚。

研究人员发现微塑料颗粒在模型动物的几个器官中积聚,包括肝脏、肠道、肾脏和大脑。而且PET纳米塑料会引起胚胎行为异常,因为他们观察到胚胎运动较少。虽然这次的实验动物是斑马鱼,但是这种影响也可能出现在哺乳动物和人类体内。

研究人员将继续研究这一课题。他们已经看到PET纳米塑料在大脑中积累,他们想知道这对大脑功能和神经退行性疾病有何影响。

(高凌云编译自2023年4月30日SciTechDaily网站)