

北京谱仪Ⅲ实验上的粲强子研究

柯百谦^{1,†} 李培荣^{2,††} 马海龙³ 董燎原³

(1 郑州大学物理学院 郑州 450001)

(2 兰州大学核科学与技术学院 兰州 730000)

(3 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2025-02-28 收到

† email: baiciank@ihep.ac.cn

†† email: prli@lzu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250402

CSTR: 32040.14.wl20250402

Experimental studies on charm hadrons with the Beijing Spectrometer Ⅲ

KE Bai-Qian^{1,†} LI Pei-Rong^{2,††} MA Hai-Long³ DONG Liao-Yuan³

(1 School of Physics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(2 School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(3 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘 要 含粲强子包括由一个粲夸克(c)与一个反轻夸克($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$)组成的粲介子或与一对轻夸克组成的粲重子。处于强作用力基态的粲强子又被称为基态粲介子(D^0 , D^+ , D_s^+)与基态粲重子(Λ_c^+)。基态粲强子的衰变模式由会发生夸克味道改变的弱相互作用主导。这使得基态粲强子的衰变模式丰富多彩,是多角度检验弱作用理论的绝佳场所。另一方面,在基态粲强子的弱衰变过程中,粲夸克放出W规范玻色子后转换成轻夸克,这个轻夸克与其他末态夸克会受到强作用力再相互结合成末态强子,因此基态粲强子衰变也被用来检验强相互作用机制。BESⅢ实验在质心系能量3.773 GeV、4.128—4.226 GeV和4.6—4.95 GeV能区内采集了大量的实验数据,文章简要介绍了BESⅢ实验利用该数据得到的一系列关于基态粲强子衰变的物理成果。

关键词 粲强子, 北京谱仪Ⅲ(BESⅢ), 粲介子, 粲重子

Abstract Charm hadrons are particles composed of a charm quark paired with a light quark ($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$) to form charm mesons, or with a pair of light quarks to form charm baryons. In the ground state of the strong interaction they are referred to as ground-state charm mesons (D^0 , D^+ , D_s^+) and ground-state charm baryons (Λ_c^+). The decays of ground-state charm hadrons are dominated by weak interactions involving quark flavor transitions. This leads to a rich variety of decay patterns, making them an excellent testing ground for comprehensive studies of weak interaction theory from multiple perspectives. On the other hand, during the weak decay process, ground-state charm mesons emit a W gauge boson and transform into light quarks, which then undergo strong interactions, recombining to form final-state hadrons. The decays of ground-state charm hadrons are thus also used to probe the mechanisms of strong interactions. Experiments at the Beijing Spectrometer Ⅲ facility have collected a large amount of data at center-of-mass energies of 3.773, 4.128—4.226, and 4.6—4.95 GeV. This article briefly recounts a series of results obtained using these data to study the decays of ground-state charm hadrons.

Keywords charm hadrons, Beijing Spectrometer Ⅲ, charm meson, charm baryon

1 引言

粒子物理学是研究微观世界中基本粒子及其相互作用的学科。研究对象包括构成物质的最基本单位，如夸克和轻子等，以及它们之间的相互作用力，如电磁力、弱力和强力等。粒子物理学的标准模型认为自然界中的物质由三代夸克和三代轻子构成，同时电弱统一理论和量子色动力学(QCD)成功地解释了物质之间的电磁、弱相互作用以及强相互作用，但长期以来一直无法解释粒子质量的来源。1964年，彼得·希格斯等人提出希格斯机制，认为空间中充满了一种粒子(希格斯玻色子)^[1]。基本粒子穿过希格斯玻色子移动时，就像我们在泳池中行走感觉笨重，以此赋予基本粒子质量。直到2012年希格斯玻色子在欧洲大型强子对撞机上的发现才填补了标准模型的最后一块重要缺口^[2]。标准模型在小于1 GeV到几TeV的能量范围内准确地解释了大量实验数据。在高能区的实验，例如大型强子对撞机(LHC)上的ATLAS、CMS和LHCb实验，验证了QCD在高能量近似下的理论预言(称为微扰QCD)。然而，这种近似方法在低能区并不适用，使得QCD在低能区无论是理论还是实验方面都面临着巨大挑战。与其他相互作用力不同，强相互作用的媒介粒子——胶子之间也存在相互作用(而电磁相互作用的光子则没有这种特性)。这一独特性质可能催生出富含胶子的物质形态，如两个胶子组成的胶球，迄今人们对这些物质的理解仍然十分缺乏。此外，标准模型存在许多尚未解决的关键物理问题和无法解释的自然现象。例如，在夸克层级中尚未发现的CP破坏来源或许可以解释为什么宇宙中正物质远多于反物质；人们从天体观测中得知，宇宙大部分由暗物质组成，暗物质的存在将对现有的标准模型产生影响；许多超出标准模型范畴的模型可能会影响夸克味道相互作用。因此，精确检验标准模型、寻找超出标准模型的新物理是当前粒子物理研究的前沿。

2 北京谱仪的粲强子实验

运行在数GeV的正负电子对撞机对人们理解强相互作用的非微扰性质和精确测量发挥了重要作用。目前，北京正负电子对撞机Ⅱ(BEPCⅡ)上的北京谱仪Ⅲ(BESⅢ)具有许多独特的特点，如粲强子成对产生和量子相关性。BESⅢ实验已经开展了广泛的粲物理研究，包括精确检验QCD和电弱相互作用、研究强子谱学，以及寻找低能区的新物理等。2010—2011年，BESⅢ/BEPCⅡ在质心系能量3.773 GeV采集了积分亮度为 2.93 fb^{-1} 的正负电子对撞数据，开启了粲强子物理实验研究之旅。2014年，BESⅢ实验组尝试在4.6 GeV采集了 0.567 fb^{-1} 的 Λ_c^+ 数据。基于这批仅仅花一个月时间采集的数据，BESⅢ就在国际一流物理期刊发表了17篇文章，其中包含7篇*Physical Review Letters*。至今为止，BESⅢ实验组在质心系能量为3.773 GeV、4.128—4.226 GeV和4.6—4.95 GeV能区分别积累了积分亮度约 20.3 fb^{-1} 、 7.33 fb^{-1} 和 6.4 fb^{-1} 的正负电子对撞数据^[3]。在这些能量点上，正反粲强子成对产生，不会有其他强子伴随产生，提供了干净的粲强子样本和精细的运动学约束信息。我们可以利用部分重建一个粲强子的单标记技术和全重建正反粲强子对的双标记技术来测量粲强子衰变过程的衰变分支比。该测量方法的优势在于不依赖于粲强子对的产生截面和衰变模型的假设，可以做到绝对分支比的测量。由于准确知道正负电子对的初始能动量，不易探测的粒子的信号(如中子、中微子)可以基于能量动量守恒利用丢失信息来描述^[4]。

3 含轻衰变

1976年，Mark I实验组发现了粲介子^[5]，1980年Mark II实验组首次证实了粲重子的存在^[6]。至此之后人们对粲强子进行了广泛的实验研究。粲介子由一个粲夸克(c)和一个反轻夸克($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$)，组成，而粲重子则由一个粲夸克和一对轻夸克

组成。2 GeV 左右的质量使它们处于微扰和非微扰 QCD 的过渡区域。虽然非微扰 QCD 的复杂性导致在理论上研究粲介子和粲重子的强子衰变很困难，但它们的含轻衰变却提供了最干净且最佳的途径来理解 c 夸克到 u, d, s 夸克的跃迁机制。在含轻衰变中，由于强相互作用仅影响强子系统，弱和强相互作用可以很好地被分离，从而实现对粲介子衰变常数和粲夸克跃迁形状因子 ($|V_{cd}|$, $|V_{cs}|$) 以及轻子普适性的最精确测量或检验。

2012 年，BES III 利用在 3.773 GeV 采集的 2.93 fb^{-1} 数据，在国际会议上报道了纯轻衰变 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 的研究结果，首次提出使用纯轻衰变 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 来测定 $|V_{cd}|$ ；同时还精确测量了 D^+ 介子衰变常数，把世界平均值的精度由原本的近 5% 大幅改善至约 2%^[7]。2019 年，BES III 利用在 4.179 GeV 采集的 3.19 fb^{-1} 数据，取得了当时世界最高精度的 $|V_{cs}|$ 以及 D_s^+ 介子衰变常数。2024 年，BES III 进一步使用 4.126—4.226 GeV 数据以及全部的 3.773 GeV 数据，将 $|V_{cd(s)}|$ 以及 $D_{(s)}^+$ 衰变常数的精度改善至约 1% (图 1)^[8]。

“轻子普适性”是标准模型的重要成分，三代轻子，即电子、缪子和陶子，除质量不同，其他相互作用特性应该没有区别。标准模型依据轻子普适性精确预言了粲介子纯轻衰变中 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 的衰变分支比比值。然而 τ^+ 轻子无法被探测器直接测量，导致 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 重建起来比 $\mu^+ \nu_\mu$ 困难且本底复杂。BES III 实验尝试了各种不同的测量方法与大量模拟后，通过 τ^+ 轻子的多个衰变道，如 $\tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$ ，观测到 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 并测量了其衰变分支比，精确检验了 $\mu - \tau$ 轻子普适性。

形状因子是重夸克至轻夸克味道改变流的参数化形式，是检验标准模型的重要途径之一。BES III 通过 $D_{(s)}$ 介子半轻衰变以世界最高精度测量了各类 $D_{(s)}$ 介子跃迁的形状因子^[4]，其中备受国际同行关注的 $D \rightarrow K$ 和 $D \rightarrow \pi$ 跃迁形状因子的精度分别达到 0.3% 和 1.6%，前者与格点 QCD 计算精度相当 (图 2)。除此之外，BES III 首次测量了 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda$ 的形状因子^[9]，发现在不同 q^2 能区内形

状因子与格点 QCD 计算结果不一致的问题，这有助于检验理论上对于其他粲重子半轻衰变的计算。同时，BES III 在一系列的半轻衰变的研究中，系统地检验了 $e - \mu$ 轻子普适性。

4 强子衰变

相较于含轻子末态的衰变，末态粒子皆为强子的衰变 (强子衰变) 就显得复杂许多，但也因此，强子衰变中包含了丰富的物理内容有待深入研究。BES III 实验首次观测到三十多个粲介子强子衰变新模式，填补了国际权威《粒子数据手册》

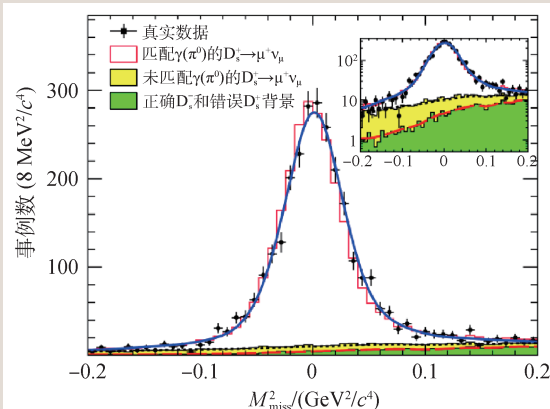


图1 以世界最高精度测量 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 的分支比与 D_s^+ 介子衰变常数。由于中微子无法被探测器直接探测，依据四动量守恒原理，将初始的正负电子四动量减去除中微子外的所有末态粒子四动量，从而计算出丢失四动量，即可取得中微子的信息。 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 的信号事例在丢失质量平方等于 0 ($M_{\text{miss}}^2 = 0$) 附近有明显的信号。其中，插图为相应的对数坐标展示图

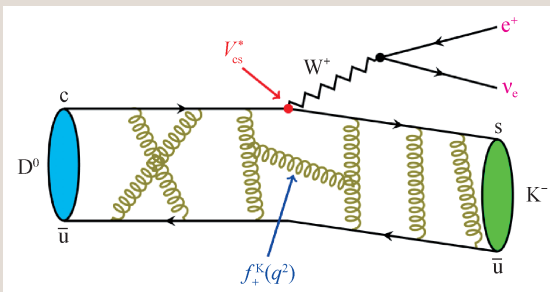


图2 $D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$ 的衰变机制图。它表明了在半轻衰变中弱作用力流 $W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 和强作用力流 $D^0 \rightarrow K^-$ 之间互不干扰，在理论上可以被有效地分离开。 $D^0 \rightarrow K^-$ 的跃迁由形状因子 $f_K^+(q^2)$ 参数化， q 是 W^+ 的四动量，又被称为转移四动量

上大量的空白, 包含多个卡比博压低过程, 其中测定了卡比博双重压低衰变 $D^+ \rightarrow K^+\pi^+\pi^-\pi^0$ 的分支比在 10^{-3} 量级, 打破了人们对此类衰变分支比一般在 10^{-4} 的传统认识。BESIII 同时测量了 Λ_c^+ 的 12 个强子衰变道的衰变分支比^[10], 其中黄金衰变道 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK^-\pi^+$ 的测量精度达到了 6%, 较之前《粒子数据手册》中世界平均值的 26% 精度有了大幅提升。另外 11 个强子衰变道的分支比精度也有 3 到 6 倍的提升。BESIII 独特的数据特性, 可以根据四动量守恒的原理取得探测器无法直接测量的中性粒子信息, 例如 K_L^0 (K^0 与反 K^0 介子的混合态) 和中子。至此, BESIII 在粲介子衰变中系统地检验了 $K_S^0-K_L^0$ 的不对称性, 澄清了不同理论计算结果带来的分歧; 首次研究了含中子末态的粲重子衰变过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK_S^0\pi^+$ ^[11] 和单卡比博压低过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$ 的绝对衰变分支比^[12], 发现 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$ 分支比与 $\Lambda_c^+ \rightarrow p\pi^0$ 过程分支比的比值高于所有理论预言(图 3)。基于相同的测量方法, 进一步发现并测量了单卡比博压低过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+\pi^0$ 和 $n\pi^+\pi^-\pi^+$ 以及卡比博允许过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow nK^-\pi^+\pi^+$ 的衰变分支比^[13]。粲重子的自旋为 1/2, 因此粲重子产生的极化参数以及弱衰变

过程中的不对称参数为在理论上理解粲重子衰变的动力学机制和非微扰 QCD 性质提供了关键的输入信息。BESIII 首次测量了纯 W 玻色子交换过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K^+$ 的弱衰变不对称参数^[14], 该测量结果与零一致, 排除了近年来诸多的理论结果, 并进一步首次测量了 Λ_c^+ 产生的极化参数以及 $\Lambda_c^+ \rightarrow pK_S^0$ 、 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+$ 、 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+\pi^0$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0\pi^+$ 的弱衰变过程中的不对称参数。

此外, BESIII 实验利用自行研发的振幅分析工具, 首次开展了包括粲重子多体过程 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+\pi^0$ ^[15] 在内的三十多个粲强子多体强子衰变的振幅分析研究。通过振幅分析, 能够测量各衰变中子共振过程的比例与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。BESIII 实验首先观测到 $D_s^+ \rightarrow a_0\pi$ 具有远大于传统上对纯 W 湮灭过程的衰变分支比的预期^[16], 随后又整合了 $D_s^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$, $D_s^+ \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^+$, $D_s^+ \rightarrow K_S^0K^+\pi^0$ 的振幅分析结果, 在 KK (两个 K 介子组成的系统) 不变质量谱上观测到标量介子的相消相长干涉效应, 并发现了质量约为 1.817 GeV 的中性与带电类标量 a_0 态^[17, 18]。但目前已知的信息无法确认这些新发现的类 a_0 态

是 $f_0(1710)$ 对应的同位旋三重态, 或者对应的 X(1812) 粒子, 需要进一步的实验和理论研究。BESIII 实验也在 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+\eta$ 的振幅分析中观测到比理论预期高一个量级以上的 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+$ 衰变分支比。这些问题为理论上研究标量介子是否是四夸克态开启了新的研究方向。粲强子衰变也为轻强子研究提供了大量的数据样本。BESIII 比较了 $D_s^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+$ 和 $D_s^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$ 的振幅分析结果, 首次在粲介子衰变中测量了 ϕ 介子衰变分支比^[19], 此结果与《粒子数据手册》中的世界平均值有 3 倍显著性偏差, 预期将激发一系列理论上与实验上的后续研究。

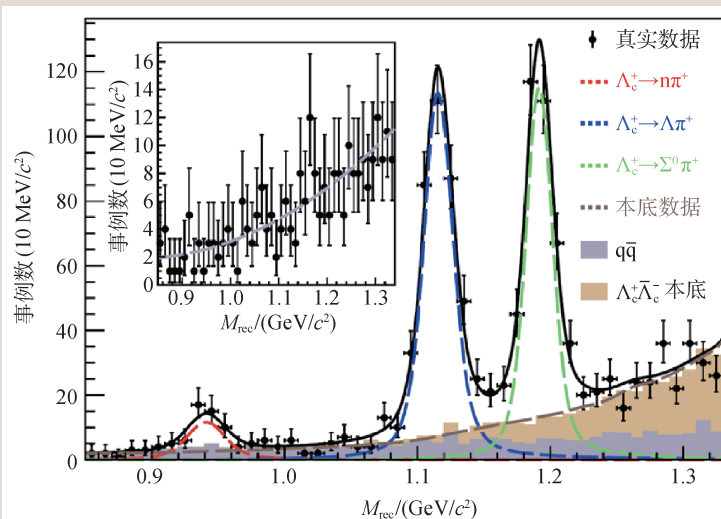


图3 首次发现含中子的 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$ 信号。在 BESIII 的数据中, Λ_c^+ 与 $\bar{\Lambda}_c^-$ 成对产生, 在 $\bar{\Lambda}_c^-$ 和 π^+ 的反冲质量谱上, 观测到在中子质量附近有明显的 $\Lambda_c^+ \rightarrow n\pi^+$ 信号(红色虚线), 同时也观测到 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda\pi^+$ (蓝色虚线)和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0\pi^+$ (绿色虚线)的信号。其中, 插图为 $\bar{\Lambda}_c^-$ 边带区背景事例的分布, 表明不会在中子质量附近形成峰状背景

5 量子关联

BESⅢ在3.773 GeV采集的 $D^0\bar{D}^0$ 数据具有独特的量子关联特性,能为精确测夸克味道混合矩阵相位角 γ 和正反中性D介子振荡提供关键的强相差参数。强相差是正反中性D介子衰变至相同末态强子的强相位的差值,目前只能通过实验测量,无法通过理论计算获得。高精度检验标准模型的电弱理论,精确测量相位角 γ ,将 γ 的测量精度改善至 1° 以下是当前重味物理实验的重要目标之一。因此,BESⅢ的强相差测量结果备受国际重味物理同行的关注。基于数据统计量的显著提升以及各方面数据分析技术的改进,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。BESⅢ实验还系统地开展了各衰变道的强相差测量工作。

6 总结

BESⅢ实验在3.773 GeV、4.126—4.226 GeV和4.6—4.95 GeV能区内积累的海量粲强子实验

数据,为系统研究粲介子和粲重子弱衰变提供了绝佳的机遇。利用这批近阈值数据和独特的标记技术,BESⅢ实验对基态粲强子衰变进行了高精度测量,相关测量结果为理论研究提供了重要输入,引发了理论上粲强子研究的新热点。目前《粒子数据手册》上收录的粲强子衰变的最精确结果也主要来源于BESⅢ实验。随着理论的不断发展和实验研究的不断深入,对粲强子弱衰变过程的计算和测量也将更加精确,这将为精确检验标准模型和寻找超出标准模型的新物理提供理论和实验上的保证。2024年,BESⅢ完成了在3.773 GeV处 20.3 fb^{-1} 数据的采集与重建,当前这批数据与相应的模拟样本已正式投入使用^[3]。在不久的将来,将会有更多国际领先的粲介子成果产出。BESⅢ也将在4.6—4.95 GeV能区内积累 18 fb^{-1} 的粲重子数据,预计将有约250万 $\Lambda_c^+\bar{\Lambda}_c^-$ 对,这将进一步提升粲重子衰变过程的测量精度。目前,实验上关于粲重子 Ξ_c 和 Ω_c^0 的数据十分有限,《粒子数据手册》上已有的衰变过程很少,并且已有过程的衰变分支比测量误差较大,亟需像BESⅢ实验这样对阈值附近的数据开展研究。

参考文献

- [1] Higgs P. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 508
- [2] 2013年诺贝尔物理学奖的官方声明. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/summary/>
- [3] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Chin. Phys. C, 2024, 48: 123001
- [4] Ke B C, Koponen J, Li H B *et al*. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 2023, 73: 285
- [5] Goldhaber G *et al*. Phys. Rev. Lett., 1976, 37: 255
- [6] Dorfan J *et al* (SLAC-LBL). AIP Conf. Proc., 1980, 159: 59
- [7] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. D, 2014, 89: 051104
- [8] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2019, 122: 071802
- [9] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2022, 129: 231803; Phys. Rev. D, 2023, 108: 031105
- [10] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 052001
- [11] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 112001
- [12] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2022, 128: 142001
- [13] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Chin. Phys. C, 2023, 47: 023001
- [14] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2024, 132: 031801
- [15] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). JHEP, 2022, 12: 033
- [16] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 112001
- [17] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. D, 2022, 105: L051103
- [18] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett. 2022, 129: 182001
- [19] Ablikim M *et al* (BESⅢ Collaboration). Phys. Rev. Lett. 2025, 134: 011904