arXiv:2611.32309v1 [hep-ex] 24 Nov 2026

测量 $|V_{cd(s)}|$ 、衰变常数及 BESIII 的（半）轻子$D_{(s)}$ 衰变中的形状因子

Medina Ablikim[1], *（代表 BESIII合作组）

[1]中国科学院高能物理研究所，北京市玉泉路19B号，邮编100049

摘要。BESIII实验积累了世界上规模最大的粲介子样本。本文介绍基于这些数据集对（半）轻子D^+ 和D_s^+ 衰变中的衰变常数、跃迁形状因子及CKM矩阵元所进行的最新测量。

1 引言

对轻子和半轻子粲衰变进行精密测量，对于约束CKM矩阵至关重要；在弱相互作用下，CKM矩阵支配夸克味和代混合。这些测量能够提取用于参数化强相互作用效应的衰变常数和形状因子。粲物理通过衰变常数和形状因子测量，为研究非微扰QCD提供基础信息，并可通过Cabibbo–Kobayashi–Maskawa（CKM）幺正性和轻子普适性研究检验标准模型（SM） [1–3]。

BESIII探测器 [4]已积累e^+e^- 碰撞数据，在 $\sqrt{s}$ = 3.773 GeV处的积分亮度为 20.3 fb^{-1} ，在 $\sqrt{s}$ = 4.128–4.226 GeV能区的积分亮度为7.33 fb^{-1} 。在BESIII，对 D^0, D^+、D_s^+及其激发态的各种衰变开展的实验研究已在文献 [5], 中综述，而关于粲介子衰变振幅分析方法的全面概述见文献 [6]。本文主要介绍利用这两组数据集获得的轻子和半轻子$D^{0(+)}$ 及D_s^+ 衰变的最新测量结果。这些研究能够精确测定CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 和$|V_{cs}|$、衰变常数f_{D^+} 和$f_{D_s^+}$以及跃迁形状因子。

得益于阈值附近e^+e^- 湮灭数据所具有的洁净实验环境和低本底水平，研究采用了双标记（DT）方法 [7] 。通过变量$U_{\rm miss} = E_{\rm miss} - |\vec{p}_{\rm miss}|$ 和$M^2_{\rm miss} = E^2_{\rm miss} - |\vec{p}_{\rm miss}|^2$ 识别（半）轻子信号，并推断不可探测的中微子。分支比通过以下方式计算：

$$\mathcal{B} = \frac{N_{\rm DT}}{N_{\rm ST}\,\epsilon_{\rm DT}/\epsilon_{\rm ST}} \tag{1}$$

其中，与单标签（ST）选择相关的系统不确定度大多相互抵消。

*电子邮箱：mablikim@ihep.ac.cn

2 轻子衰变

2.1 $D^+ \to \mu^+\nu_\mu$子衰变

利用20.3 fb^{-1} 的数据采集于 $\sqrt{s}$ =3。在773 GeV下，BESIII合作组 [8]测得 $D^+ \to \mu^+\nu_\mu$ 的分支比（BF）为（4。034±0。08$_{\rm stat}$±0。04$_{\rm syst}$）×10^{-4}。结合费米耦合常数G_F、D^+ 和μ^+ 的质量以及 D^+ 介子的寿命， τ_{D^+}， [9]可确定衰变常数与CKM矩阵元的乘积为

$$f_{D^+}|V_{cd}| = (48.02 \pm 0.48_{\rm stat} \pm 0.24_{\rm syst} \pm 0.12_{\rm input} \pm 0.15_{\rm EM})\ \text{MeV}, \tag{2}$$

其中，第三项不确定度来自 τ_{D^+} 的输入值，第四项则是电磁修正带来的不确定度，该修正取决于介子结构 [10]。利用标准模型全局拟合给出的 CKM矩阵元 V_{cd} 的模值 [9]，，可提取 D^+ 衰变常数

$$f_{D^+} = (213.5 \pm 2.1_{\rm stat} \pm 1.1_{\rm syst} \pm 0.8_{\rm input} \pm 0.7_{\rm EM})\ \text{MeV}. \tag{3}$$

或者，采用精确的 LQCD 计算 [11], 所得的 f_{D^+} 值，可提取 CKM矩阵元

$$|V_{cd}| = 0.2265 \pm 0.0023_{\rm stat} \pm 0.0011_{\rm syst} \pm 0.0009_{\rm input} \pm 0.0007_{\rm EM}. \tag{4}$$

这是目前最精确的测量结果。其精度较此前最佳测量结果 [12]提高了 2.3 倍。

2.2 $D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu$子衰变

利用在4.128至4.226 GeV质心能量范围内采集的积分亮度为7.33 fb^{-1} 的数据，BESIII合作组测量了<style id='2'>D_s^+ → 介子轻子衰变为$\mu^+\nu_\mu$ [13]的BF

$$\mathcal{B}(D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu) = (0.5294 \pm 0.0108_{\rm stat} \pm 0.0085_{\rm syst})\%. \tag{5}$$

结合测得的BF与<style id='1'>G_F、<style id='4'>m_μ、<style id='7'>$m_{D_s^+}$的世界平均值以及<style id='10'>D_s^+介子的寿命[9]，，确定了<style id='14'>D_s^+介子的衰变常数<style id='17'>$f_{D_s^+}$与<style id='20'>c → <style id='23'>s 夸克混合矩阵元<style id='25'>V_{cs} 的模的乘积

$$f_{D_s^+}|V_{cs}| = 241.8 \pm 2.5_{\rm stat} \pm 2.2_{\rm syst}\ \text{MeV}. \tag{6}$$

以全球标准模型拟合给出的<style id='1'>V_{cs} 值 [9] 或近期格点量子色动力学计算得到的平均衰变常数 [14, 15] 作为输入，提取出衰变常数<style id='6'>$f_{D_s^+}$ 和CKM矩阵元 |<style id='10'>V_{cs}| 分别为<style id='13'>$f_{D_s^+}$ = 248.4 ± 2.5$_{\rm stat}$ ± 2.2$_{\rm syst}$ MeV和 |<style id='20'>V_{cs}| = 0.968 ±0.010$_{\rm stat}$ ± 0.009$_{\rm syst}$。

图 1 和图 2 分别汇总了衰变常数 f_{D^+} 和 $f_{D_s^+}$以及 CKM 矩阵元 $|V_{cd}|$和 $|V_{cs}|$的实验测量结果和理论预测。BESIII 的测量结果目前给出了最精确的测定值。

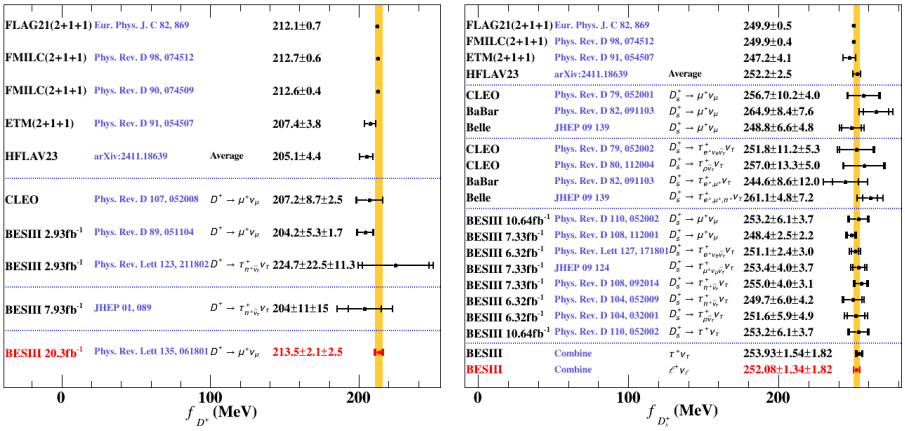


图1. 衰变常数 f_{D^+} （左）和 $f_{D_s^+}$ （右）与各项实验测量和理论确定值的比较

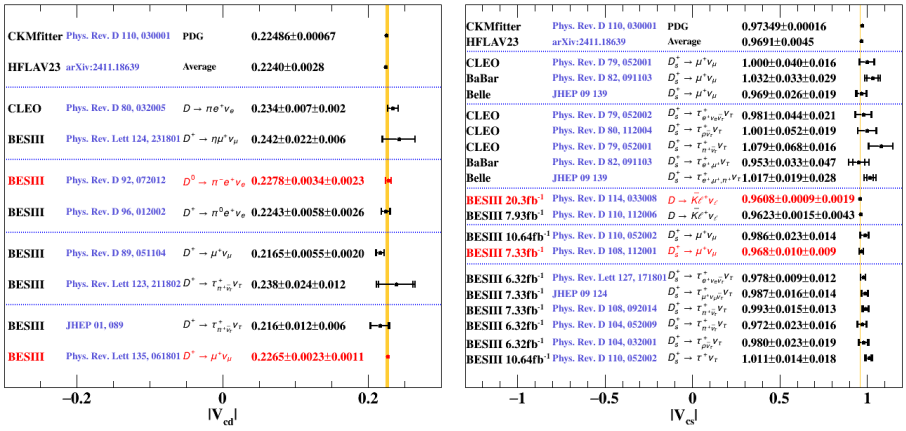


图2. CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ （左）和 $|V_{cs}|$ （右）与各项实验测量和理论确定值的比较

3 半轻子衰变

3.1 $D^{0(+)} \to P^{-(0)}l^+\nu_l$的测量

利用积分亮度为 20.3 fb^{-1} 的 D 介子数据样本，BESIII实验对半轻子衰变 [16] $D^0 \to K^-e^+\nu_e$、$D^0 \to \bar{K}^-\mu^+\nu_\mu$、$D^+ \to K^0e^+\nu_e$ 和 $D^+ \to K^0\mu^+\nu_\mu$进行了精确测量，测得的绝对分支比分别为 $(3.548\pm0.006_{stat}\pm0.017_{syst})$%、$(3.445\pm0.007_{stat}\pm0.017_{syst})$%、$(8.928\pm0.025_{stat}\pm0.050_{syst})$% 和 $(8.770\pm0.029_{stat}\pm0.053_{syst})$%。半缪子衰变与

半电子D介子衰变的R^{D^0} μ/e = 0.971 ± 0.003$_{stat}$ ± 0.004$_{syst}$ 和R^{D^+} μ/e = 0.982 ± 0.004$_{stat}$ ± 0.002$_{syst}$ 被确定为，其与0.975 ± 0.001 [17] 至1.5σ的轻子味普适性预测存在轻微差异。首次测量了前后不对称性，并报告了$D^{0(+)} \to \bar{K}l^+\nu_l$(l = μ, e)的部分衰变率精确测量结果 [18]。对这些运动学变量进行同时拟合，首次给出了$D^{0(+)} \to \bar{K}l^+\nu_l$跃迁中标量流贡献的实验约束。复数威尔逊系数被确定为Re(c_s^{μ}) = 0.017 ± 0.008$_{stat}$ ± 0.006$_{syst}$ 和Im(c^{μ} S) = 0.077 ± 0.011$_{stat}$ ± 0.009$_{syst}$，与标准模型存在2.3σ的偏差。此外，还给出了分支分数的改进测量结果和轻子味普适性（LFU）检验、强子跃迁形状因子$f_+(0)$，以及CKM矩阵元 $|V_{cs}|$的测量结果，其精度均达到目前最高水平。

利用同一数据集，报告了首次观测到半轻子衰变 $D^+ \to \eta'\mu^+\nu_\mu$，其显著性为 8.6$\sigma$，并对 $D^+ \to \eta' e^+\nu_e$ 进行了精度提高的测量 [19]。$D^+ \to \eta'\mu^+\nu_\mu$和 $D^+ \to \eta' e^+\nu_e$的分支分数分别测定为 $(1.92 \pm 0.28_{stat} \pm 0.08_{syst}) \times 10^{-4}$和 $(1.79 \pm 0.19_{stat} \pm 0.07_{syst}) \times 10^{-4}$。两种分支分数之比测定为 $R_{\mu/e} = 1.07 \pm 0.19_{stat} \pm 0.03_{syst}$，与标准模型中轻子味普适性的理论预期一致。通过分析 $D^+ \to \eta' l^+\nu_l$ 衰变动力学，首次测得强子形状因子（FF）$f_+^{\eta'}(0)$ 与 CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 的乘积，结果为 $f_+^{\eta'}(0)\,|V_{cd}| = (5.92 \pm 0.56_{stat} \pm 0.13_{syst}) \times 10^{-2}$。结合 $D^+ \to \eta l^+\nu_\ell$ [9]和 $D_s^+ \to \eta^{(\prime)} l^+\nu_\ell$ [20, 21]的分支分数，测得夸克味基底中的 η-η' 混合角为 $\phi_P = (39.8 \pm 0.8_{stat} \pm 0.3_{syst})°$，为约束 η' 介子中的胶子成分提供了补充数据。

3.2 $D^+ \to Vl^+\nu_\ell$的测量

BESIII实验首次报告了$D^+ \to \bar{K}^{*0}l^+\nu_\ell$经由 $\bar{K}^{*0} \to K_S^0\pi^0$ [22]衰变中完整的CP 不对称性和带有A_{CP}的平均角观测量。此外，首次测得D $^+ \to {}^0_S\pi^0\ ^+\nu_\mu$ 0 943 ± 0 012$_{stat}$ ± Kμ的绝对 0 010$_{syst}$ $^+ \to {}^0_S\pi^0\ ^+\nu_e$ 分支比为（...）%，并以更高精度测得DKe的绝对分支比。通过分析$D^+ \to K_S^0\pi^0 l^+\nu_\ell$的衰变动力学，给出了P波分量占比以及$D^+ \to \bar{K}^{*0}$的强子形状因子比。研究检验了轻子味普适性，在整个范围内以及所选的五个动量转移平方区间中，均未发现$\mu - e$ 轻子味普适性破坏的证据。

3.3 $D_s^+ \to \to Sl^+\nu_\ell$的测量

基于7.33 fb^{-1}的D$_s$ 数据样本，开展了对经由中间共振态$f_0(980) \to \pi^+\pi^-$ 衰变的D $^+_s \to \pi^+\pi^- e^+\nu_e$ 的分析 [23]。测得$D_s^+ \to f_0(980)e^+\nu_e$ 衰变（随后$f_0(980) \to \pi^+\pi^-$ 衰变）的BF为$(1.72 \pm 0.13 \pm 0.10) \times 10^{-3}$。通过采用简单极点参数化描述FF，并使用Flatté公式表征微分衰变率中的$f_0(980)$贡献，首次确定了强子形状因子f $D_s \to f_0(980)$ +(0)与c $\to$s CKM矩阵元$|V_{cs}|$的乘积，得到f $D_s \to f_0(980)$ +(0)$|V_{cs}| = 0.504 \pm 0.017_{stat} \pm 0.035_{syst}$。此外，首次搜寻了$D_s^+ \to f_0(500)e^+\nu_e$ 衰变，但未发现信号。$D_s^+ \to f_0(500)e^+\nu_e$、$f_0$(500) $\to \pi^+\pi^-$ 衰变的BF上限设定为3.3×10^{-4}，置信水平为90%置信水平。

3.4 $D_s^+ \to Al^+\nu_\ell$的测量

利用4.128–4.226 GeV下的7.33fb^{-1} 数据，还首次搜索了半轻子衰变$D_s^+ \to K_1(1270)^0 e^+\nu_e$和$D_s^+ \to b_1(1235)^0 e^+\nu_e$ [24]，以及$D_s^+ \to f_1(1420)e^+\nu_e$ 和$D_s^+ \to f_1(1285)e^+\nu_e$ [25]

首次发现了衰变$D_s^+ \to f_1(1420)e^+\nu_e$，其统计显著性为$3.4\sigma$，其乘积衰变分数 $\mathcal{B}[D_s^+ \to f_1(1420)e^+\nu_e]\cdot \mathcal{B}[f_1(1420) \to K^+K^-\pi^0]$ 确定为$(4.5^{+2.0}_{-1.7}) \times 10^{-4}$。未观测到$D_s^+ \to K_1(1270)^0 e^+\nu_e$和$D_s^+ \to b_1(1235)^0e^+\nu$，以及$D_s^+ \to f_1(1285)e^+\nu_e$的显著信号，并将其乘积BF的90%置信水平上限分别设定为$\mathcal{B}[D_s^+ \to K_1(1270)^0e^+\nu_e] < 4.1 \times 10^{-4}$、$\mathcal{B}[D_s^+ \to b_1(1235)^0e^+\nu_e]\cdot \mathcal{B}[b_1(1235)^0 \to \omega\pi^0] < 6.4 \times 10^{-4}$和 $\mathcal{B}[D^+s \to f_1(1285)e^+\nu_e]\cdot\mathcal{B}[f_1(1285) \to \pi^+\pi^-\eta] < 1.7 \times 10^{-4}$。

4 总结与展望

BESIII实验已对 D^+ 和 D_s^+的轻子衰变和半轻子衰变实现了世界领先的精密测量：衰变常数的测量精度约为1%，CKM矩阵元 $|V_{cs}|$和 $|V_{cd}|$的提取精度分别达到0.5%和1%。展望未来，利用BESIII粲夸克数据集，预计将开展许多新的测量并更新现有测量[26]。

参考文献

[1] J. D. Richman 和 P. R. Burchat，粲强子和底强子的轻子衰变与半轻子衰变，《现代物理评论》67，893-976（1995）。https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.67.893[2] B-C. Ke、J. Koponen、H-B. Li 和 Y. Zheng，粲强子轻子衰变和半轻子衰变的最新进展，《核与粒子科学年度评论》73，285-314（2023）。https://doi. org/10.1146/annurev-nucl-110222-044046[3] H-B. Li 和X-R. Lyu，BESIII上利用粲强子弱衰变研究标准模型，《国家科学评论》8，nwab181（2021）。https://doi.org/10.1093/nsr/nwab181[4] BESIII合作组，M. Ablikim 等，BESIII探测器的设计与建造，《核仪器与方法A》614，345（2010），0911.4960。https://doi.org/10.1016/j.nima. 2009.12.050[5] Y.J. Zeng、X. Pan 和 H.L. Ma，BESIII上粲介子衰变实验研究综述，arXiv:2604.20644v2。https://doi.org/10.48550/arXiv.2604.20644[6] H. Zhang、Z.X. Li、C.Y. Guan、Z.H. Lu、H. Li、L.P. Yang、Y.C. Yu、N. Zhang、M.G. Zhao、Y. Lu、B-C. Ke 和 L.Y. Dong，BESIII上粲介子衰变的振幅分析，《中国物理C》50，9，093002（2026）。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1137/ ae7962/pdf[7] MARK-III合作组，J. Adler 等，粲D介子分支比的重新分析，《物理评论快报》60，89（1988）。https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett. 60.89[8]BESIII合作组，M. Ablikim 等，$D^+ \to \mu^+\nu_\mu$分支比的精密测量，《物理评论快报》135，061801（2025）。https://doi.org/10.1103/ gb8v-4rnh[9] S. Navas 等（粒子数据组），《物理评论D》110，030001（2024）。 https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.110.030001[10] A. Bazavov 等，《物理评论D》98，074512（2018）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD. 98.074512[11] Y. Aoki 等（味格点平均组（FLAG）合作组），《欧洲物理学杂志C》82，869（2022）。https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-022-10536-1

[12] M. Ablikim 等（BESIII合作组），$\mathcal{B}(D^+ \to \mu^+\nu_\mu)$、赝标量衰变常数 f_{D^+}以及夸克混合矩阵元 $|V_{cd}|$的精密测量，《物理评论D》89，051104（2014年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.051104[13] M. Ablikim 等（BESIII合作组），$D_s^+ \to \mu^+\nu_u$分支比的改进测量，《物理评论D》108，112001（2023年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD. 108.112001[14] A. Bazavov 等，来自四味格点量子色动力学的B介子和D介子轻子衰变常数，《物理评论D》98，074512（2018年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.074512[15] N. Carrasco 等，采用$N_f = 2+1+1$扭曲质量格点量子色动力学计算轻子衰变常数 f_K、f_D 和 f_{D_s}，《物理评论D》91，054507（2015年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91. 054507[16] M. Ablikim 等（BESIII合作组），$D^0 \to K^-l^+\nu_\ell$ 和 $D^0 \to \bar{K}^0l^+\nu_\ell$ 衰变的精确测量，《物理评论D》114，033008（2026年）。https://doi.org/10.1103/3fnf-x8k8[17] L. Riggio、G. Salerno 和 S. Simula，利用格点量子色动力学从实验衰变率中提取 $|V_{cd}|$ 和 $V_{cs}|$，$D \to \pi(K)lv$，《欧洲物理学杂志C》78，501（2018年）。https://link. springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-018-5943-5[18] M. Ablikim 等（BESIII合作组），首次对$D^{0(+)} \to \bar{K}l^+\nu_\ell$ 跃迁中的标量流给出实验限制，《物理评论快报》137，091803（2026年）。https://doi. org/10.1103/2ygw-n5b1[19] M. Ablikim 等（BESIII合作组），观测到$D^+ \to \eta'\mu^+\nu_\mu$ 并首次研究$D^+ \to \eta'l^+\nu_\ell$ 衰变动力学，《物理评论快报》134，111801（2025年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.111801[20] M. Ablikim 等（BESIII合作组），观测到$D_s^+ \to \eta'\mu^+\nu_\mu$，利用$D_s^+ \to \eta^{(\prime)}l^+\nu_\ell$对轻子味普适性进行精密检验，并首次测量$D_s^+ \to \eta^{(\prime)}\mu^+\nu_\mu$ 衰变动力学，《物理评论快报》132，091802（2024年）。https://doi.org/10.1103/ PhysRevLett.132.091802[21] M. Ablikim 等（BESIII合作组），$D_s^+ \to \eta e^+\nu_e$ 和$D_s^+ \to \eta' e^+\nu_e$的精密测量，《物理评论D》108，092003（2023年）。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108. 092003[22] M. Ablikim 等（BESIII合作组），观测到$D^+ \to K_S^0\pi^0\mu^+\nu_\mu$，检验轻子味普适性，并首次对$D^+ \to \bar{K}^*(892)^0l^+\nu_\ell$进行角分布分析，《物理评论快报》135，171801（2025年）。https://doi.org/10.1103/w9vz-4fq9[23] M. Ablikim 等（BESIII合作组），通过$D_s^+ \to \pi^+\pi^-e^+\nu_e$衰变研究 $f_0(980)$和 $f_0(500)$标量介子，《物理评论快报》132，141901（2024年）。https: //doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.141901[24] M. Ablikim 等（BESIII合作组），寻找半轻子衰变$D_s^+ \to K_1(1270)^0e^+\nu_e$ 和$D_s^+ \to b_1(1235)^0e^+\nu_e$，《物理评论D》108，112002（2023年） https://doi.org/10.1103/PhysRevD.108.112002[25] M. Ablikim 等（BESIII合作组），首次发现$D_s^+ \to f_1(1420)e^+\nu_e$ 的证据，并寻找$D_s^+ \to f_1(1285)e^+\nu_e$，arXiv:2601.16938。https://doi.org/10.48550/arXiv.2601. 16938[26]M. Ablikim 等（BESIII合作组），BESIII未来物理计划，《中国物理C》44，040001（2020年）。https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1137/44/ 4/040001