

BESIII上半轻衰变 $D \rightarrow P \ell^+ \nu_\ell$ 课题汇报

报告人：何凯凯

杭州师范大学

国家重点研发项目“粲强子衰变和标准模型的精确检验” 2025年夏季年会

2025.08.14

主要内容

- **物理动机**
- **研究方法**
- **重要成果或进展**
- **总结**

CKM矩阵是标准模型中描述夸克味混合的基本参数矩阵。其中，矩阵元描述味变过程的强度，且**只能通过实验测得**。

$$V_{\text{CKM}}^{\text{PDG2024}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.97367 \pm 0.00032 & 0.22431 \pm 0.00085 & 0.00382 \pm 0.00020 \\ 0.221 \pm 0.004 & 0.975 \pm 0.006 & 0.0411 \pm 0.0012 \\ 0.0086 \pm 0.0002 & 0.0415 \pm 0.0009 & 1.010 \pm 0.027 \end{pmatrix}$$

- 验证CKM矩阵幺正性是检验标准模型是否完备的重要手段。

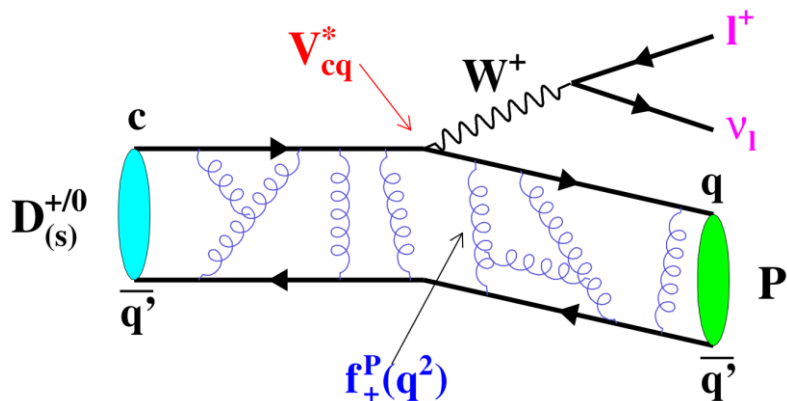
$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9984 \pm 0.0007$$

$$|V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 = 1.001 \pm 0.012 \quad \sim 1\% \quad \text{精度低, 对新物理不敏感}$$

- 第二行的计算精度主要受 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 的误差影响。
- **提高 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 的实验测量精度是高精度检验CKM矩阵幺正性的关键。**

物理动机

粲介子半轻衰变：实验上测量CKM矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的重要途径之一。



$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = X \frac{G_F^2}{24\pi^3} |f_+^P(0)|^2 |V_{cq}|^2 |\vec{p}_P|^3$$

夸克间强作用：
形状因子

夸克间弱作用：
CKM矩阵元 $|V_{cq}|$

P ：赝标量介子，如 K 、 π 、 η 、 η'

格点QCD (2011→2023)

$$f_+^{D \rightarrow K}(0): 2.4 \rightarrow \mathbf{0.4\%}$$

$$f_+^{D \rightarrow \pi}(0): 4.4 \rightarrow \mathbf{0.8\%}$$

Process	Collaboration	$f_0(0)$	$f_0(q_{\max}^2)$	$f_+(q_{\max}^2)$
$D \rightarrow \pi$	FNAL/MILC	0.6300(51)	1.2783(61)	3.119(57)
$D \rightarrow \pi$	ETMC 17	0.612(35)	1.134(49)	2.130(96)
$D \rightarrow K$	FNAL/MILC	0.7452(31)	1.0240(21)	1.451(17)
$D \rightarrow K$	HPQCD 22	0.7441(40)	1.0136(36)	1.462(16)
$D \rightarrow K$	HPQCD 21	0.7380(40)	1.0158(41)	1.465(20)
$D \rightarrow K$	ETMC 17	0.765(31)	0.979(19)	1.336(54)
$D_s \rightarrow K$	FNAL/MILC	0.6307(20)	0.9843(18)	1.576(13)



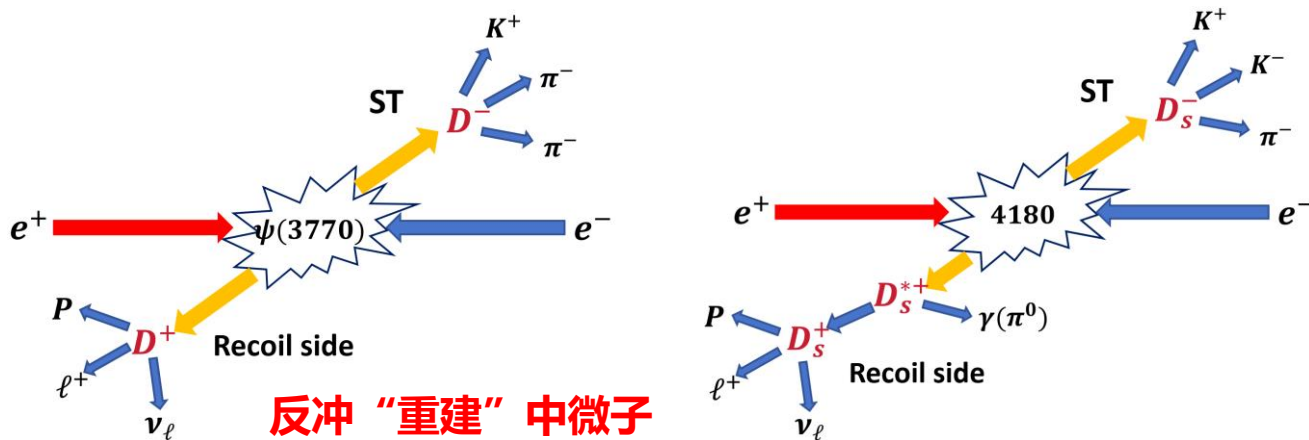
在实验上测得更高精度的
形状因子极为迫切

- 形状因子 $f_+^P(0)$ 精确测量，有助于检验格点QCD等计算；
- CKM矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 精确测量，有助于检验CKM矩阵幺正性；
- 分支比之比 $R_{\mu/e}$ 的计算，检验轻子普适性。

研究方法

基于BESIII探测器采集的大数据样本

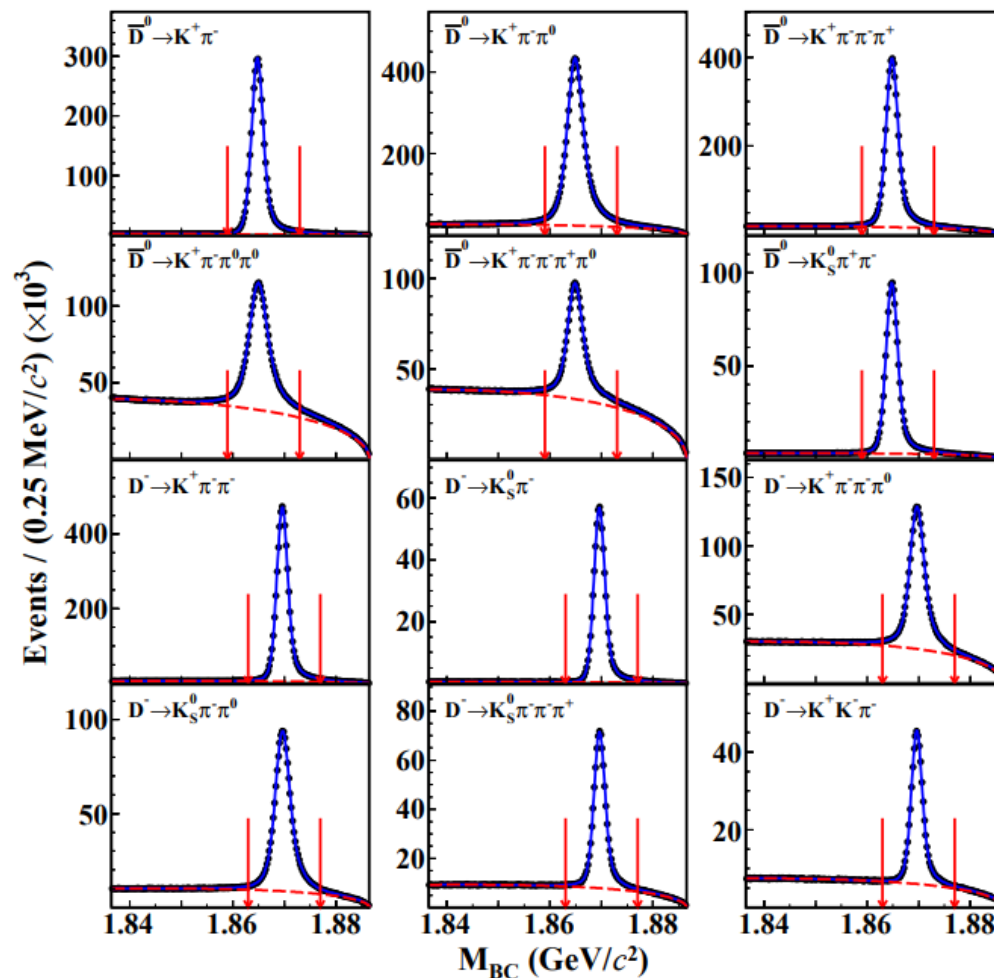
粲介子成对产生→**双标记方法**:



e^+e^- 质心 能量 (GeV)	采集年份	积分亮度 (fb^{-1})	单标记粲介子产额		
			D^0	D^+	D_s^+
3.773	2010-2011	2.93	2.5M	1.7M	
4.13-4.23	2014-2019	7.33			0.8M

3.773 GeV数据:

- ✓ 2022年: $2.9 \rightarrow 7.9 \text{fb}^{-1}$
- ✓ 2023年: $7.9 \rightarrow 16 \text{fb}^{-1}$
- ✓ 2024年: $16 \rightarrow 20.3 \text{fb}^{-1}$



$N_{ST}^{D^0} \sim 20.2\text{M}$

$N_{ST}^{D^+} \sim 10.6\text{M}$

分支比测量

计算公式: $B = \frac{N_{DT}}{N_{ST}\epsilon_{DT}/\epsilon_{ST}}$

N_{ST} 和 N_{DT} : 单标记产额和信号侧产额。

ϵ_{ST} 和 ϵ_{DT} : 单标记效率和信号侧效率。

构造运动学变量 U_{miss} 和 M_{miss}^2 来得到丢失中微子的基本信息:

$$\square U_{\text{miss}} = E_{\text{miss}} - |\vec{p}_{\text{miss}}|$$

$$\square M_{\text{miss}}^2 = E_{\text{miss}}^2 - A|\vec{p}_{\text{miss}}|^2$$

E_{miss} 和 $\vec{p}_{\text{miss}}$ 分别表示反冲粒子的能量与动量。

最大似然拟合 U_{miss} 和 M_{miss}^2 , 得 N_{DT} 。

形状因子测量

q^2 表示四动量转移的平方, 定义为:

$$q^2 = (E_{\ell^+} + E_{\nu_\ell})^2 - |\vec{p}_{\ell^+} + \vec{p}_{\nu_\ell}|^2$$

构造 χ^2 以描述实验测量值和预期值之间的差异

$$\chi^2 = \sum_{i,j=1}^{N_{\text{bins}}} (\Delta\Gamma_i^{\text{measured}} - \Delta\Gamma_i^{\text{expected}}) \times C_{ij}^{-1} (\Delta\Gamma_j^{\text{measured}} - \Delta\Gamma_j^{\text{expected}})$$

最小 χ^2 拟合数据 q^2 分布, 得 $f_+^P(0)|V_{cs(d)}|$



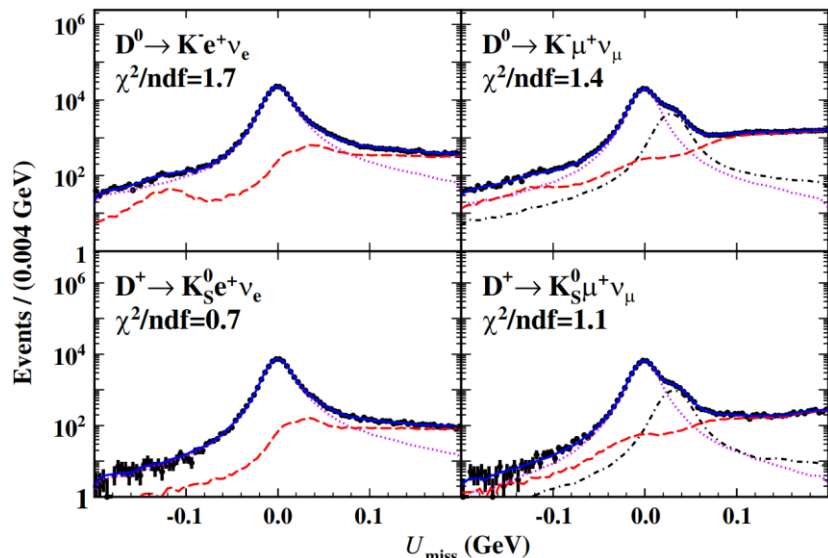
多级展开模型

$$f_+(t) = \frac{1}{P(t)\Phi(t, t_0)} a_0(t_0) \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t_0) [z(t, t_0)]^k \right)$$

$D^{0(+)} \rightarrow \bar{K} \ell^+ \nu_\ell (\ell = e, \mu)$ 的研究

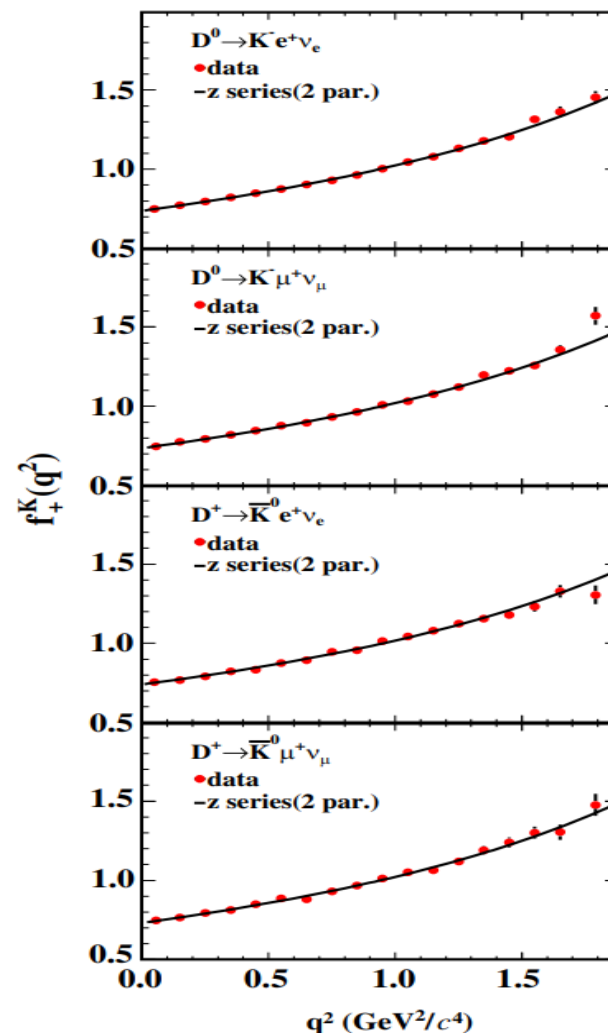
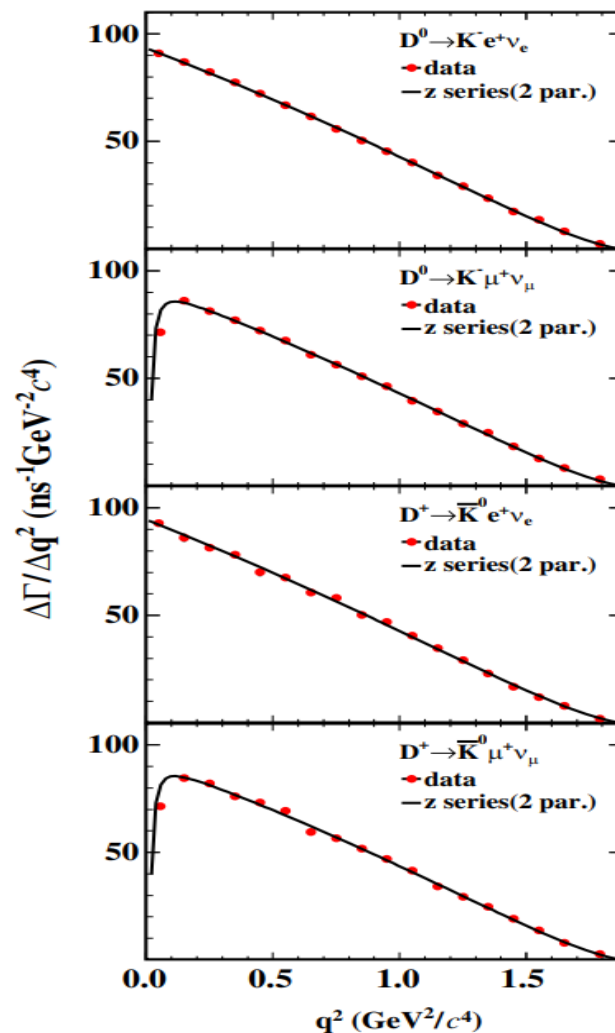
7.9 fb⁻¹ @ 3.773 GeV PRD 110, 112006 (2024)

四个半轻衰变过程独立的形状因子测量



信号过程	信号产额	分支比(%)
$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$	19065(471)	3.521(09)(16)
$D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$	147596(488)	3.419(11)(16)
$D^+ \rightarrow \bar{K}^0 e^+ \nu_e$	57846(256)	8.864(39)(82)
$D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \mu^+ \nu_\mu$	47229(248)	8.665(46)(84)

$$R_{\mu/e}^{D^0 \rightarrow K} = 0.971(04)(06) \quad R_{\mu/e}^{D^+ \rightarrow K} = 0.978(07)(13)$$

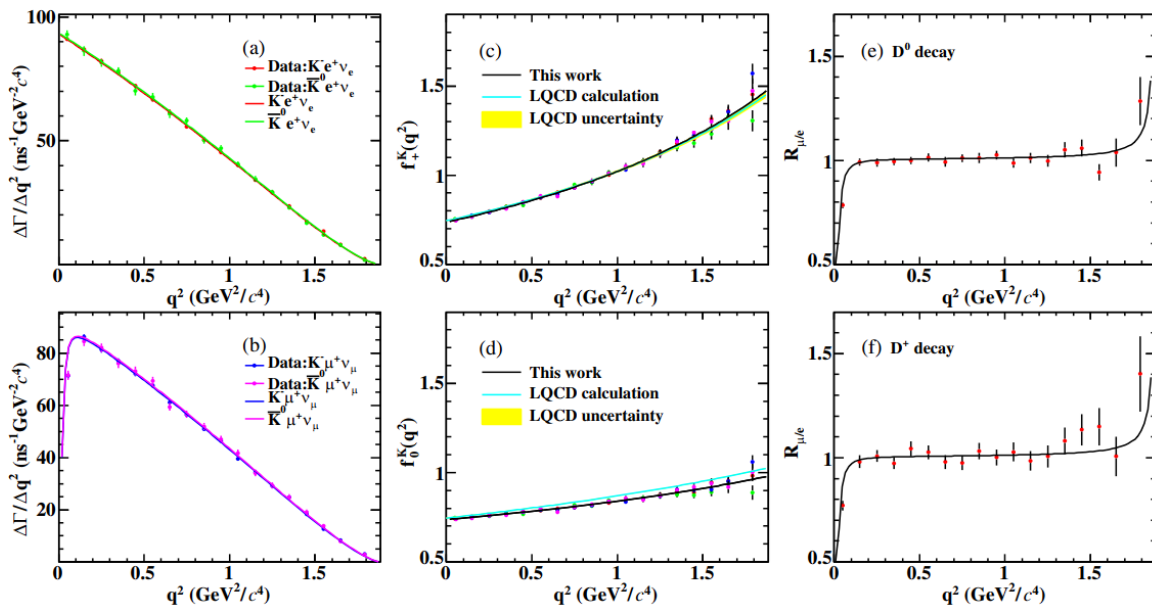


◆ 在0.8%精度下，检验粲介子半轻衰变中的 $\mu - e$ 轻子普适性

$D^{0(+)} \rightarrow \bar{K} \ell^+ \nu_\ell (\ell = e, \mu)$ 的研究

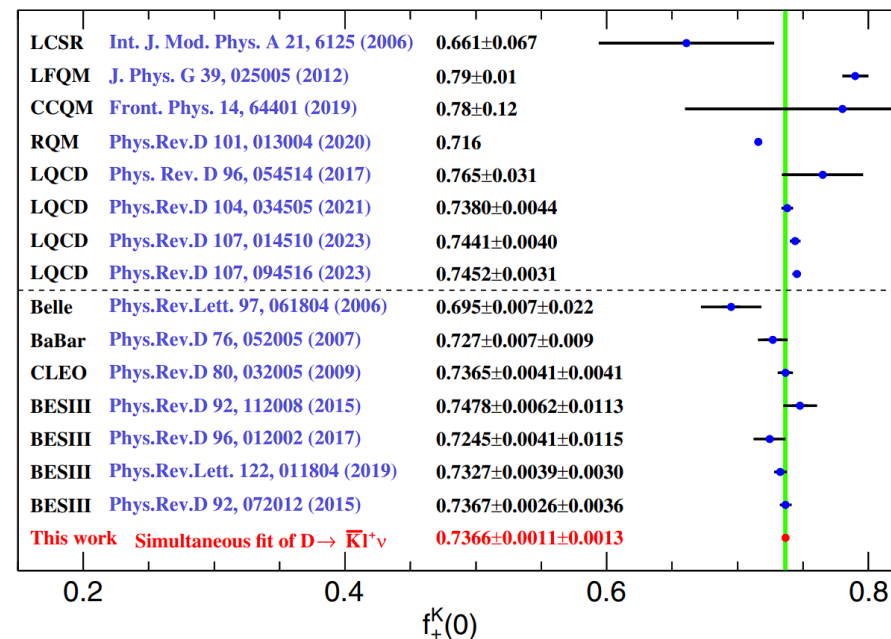
Case	Signal decay	$f_+^K(0) V_{cs} $	$r_1(t_0)$	$\rho_{2\text{par}}$	χ^2/ndf
Individual fit	$D^0 \rightarrow K^- e^+ \nu_e$	$0.7179 \pm 0.0016 \pm 0.0017$	$-2.30 \pm 0.05 \pm 0.03$	0.48	16.3/16
	$D^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$	$0.7162 \pm 0.0022 \pm 0.0019$	$-2.28 \pm 0.08 \pm 0.02$	0.62	17.1/16
	$D^+ \rightarrow \bar{K}^0 e^+ \nu_e$	$0.7207 \pm 0.0027 \pm 0.0035$	$-2.13 \pm 0.10 \pm 0.07$	0.29	13.0/16
	$D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \mu^+ \nu_\mu$	$0.7124 \pm 0.0035 \pm 0.0032$	$-2.41 \pm 0.12 \pm 0.08$	0.45	10.6/16
Simultaneous fit	$D \rightarrow \bar{K} \ell^+ \nu_\ell$	$0.7171 \pm 0.0011 \pm 0.0013$	$-2.28 \pm 0.04 \pm 0.02$	0.44	60.9/70

首次 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K} \ell^+ \nu_\ell$ 四个半轻衰变动力学的联合研究



$$f_+^{D \rightarrow K}(0) = 0.7366(11)(13) \quad |V_{cs}| = 0.9623(15)(17)(40)_{\text{LQCD}}$$

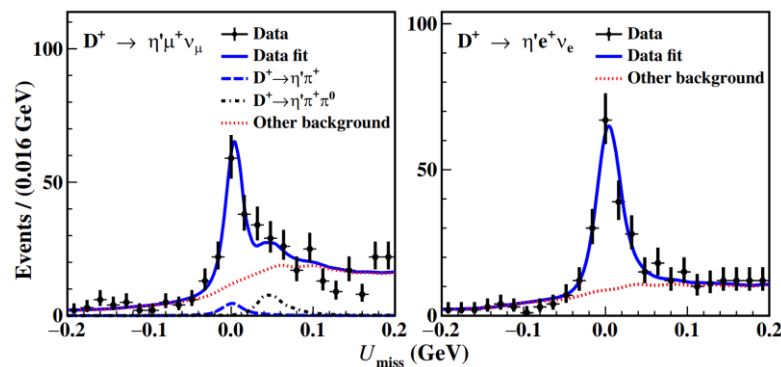
◆ 形状因子 $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 和 $|V_{cs}|$ 精度分别达到0.23%和0.5%;



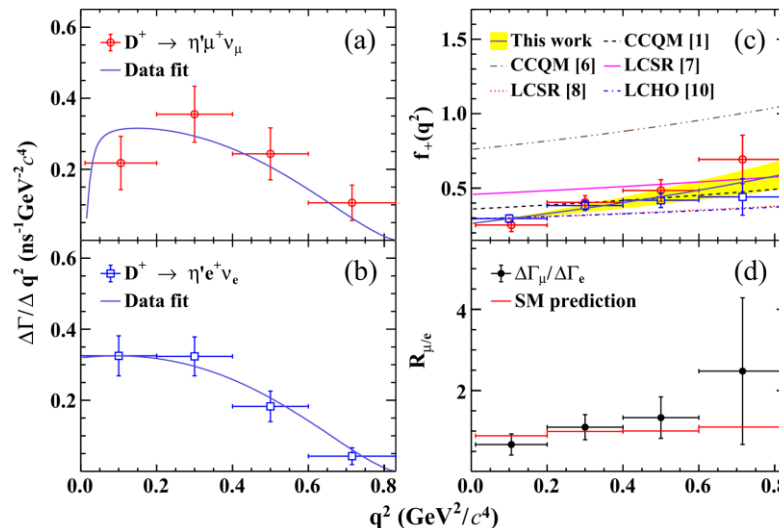
◆ 测得的形状因子 $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 比此前最好测量精度改进2倍以上。

$D^+ \rightarrow \eta' \ell^+ \nu_\ell (\ell = e, \mu)$ 的研究

20.3fb⁻¹@ 3.773 GeV PRL 134, 111801 (2025)

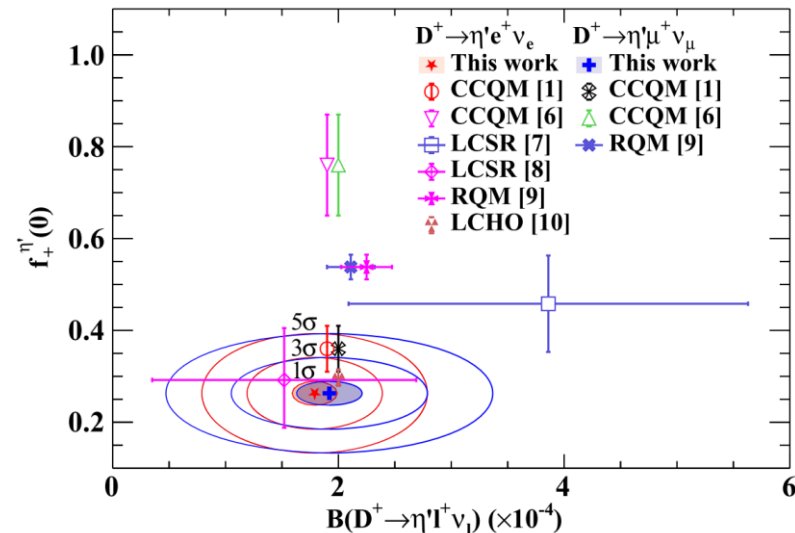


信号过程	信号产额	分支比(10 ⁻⁴)
$D^+ \rightarrow \eta' e^+ \nu_e$	151(16)	1.79(19)(07)
$D^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$	90(13)	1.92(28)(08)



$$R_{\mu/e}^{D^+ \rightarrow \eta'} = 1.07(19)(03)$$

$$\phi_P = (39.8 \pm 0.8 \pm 0.3)^\circ$$

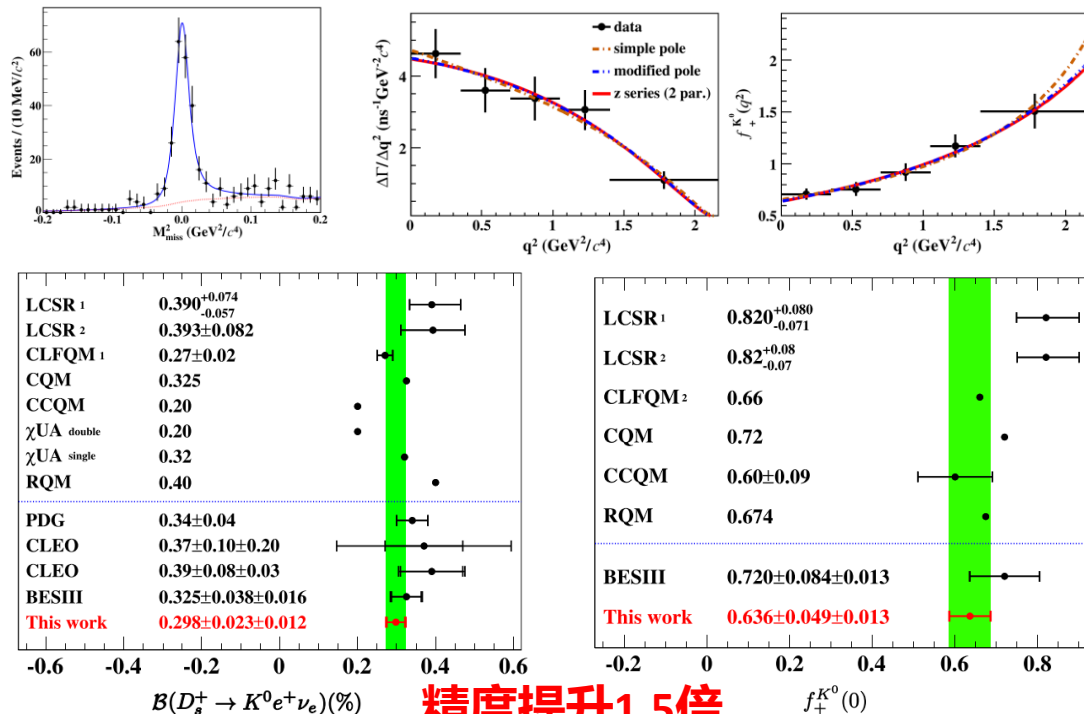


$$f_+^{D^+ \rightarrow \eta'}(0) = 0.263(25)(06)$$

- ◆ 首次观测 $D^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$, 以及更高精度测量 $D^+ \rightarrow \eta' e^+ \nu_e$ 的分支比, 提升2.4倍;
- ◆ 在18%的精度下检验 $\mu - e$ 轻子普适性;
- ◆ 联合拟合, 首次抽取形状因子 $f_+^{D^+ \rightarrow \eta'}(0)$, 精度9.8%;
- ◆ 测得 $\eta - \eta'$ 混合角 ϕ_P , 有助于探讨 η' 介子的夸克组成。

$D_s^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e$ 的研究

7.33 fb⁻¹ @ 4.13-4.23 GeV ($e^+ e^- \rightarrow D_s^{*\pm} D_s^{\mp}$)
PRD 110, 052012 (2024)

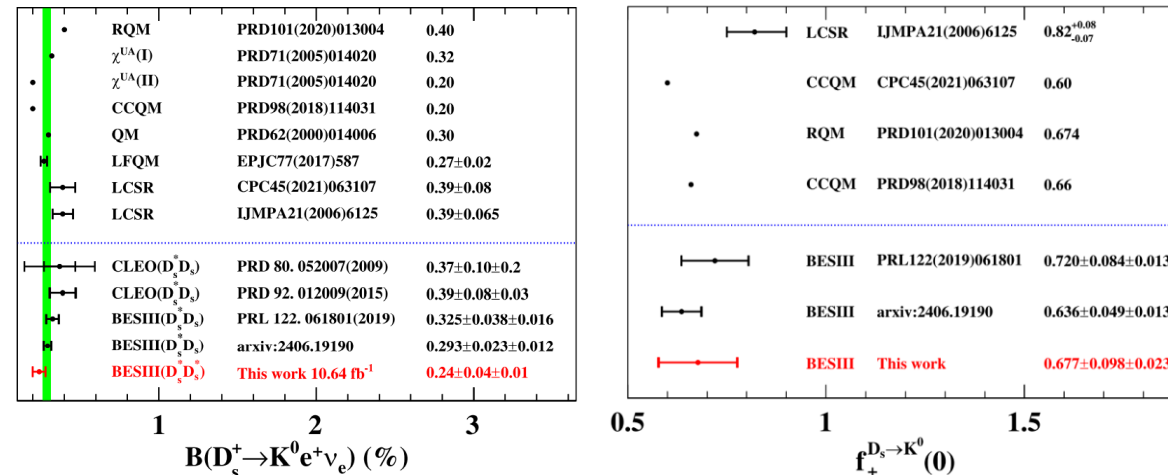


精度提升1.5倍

$$B(D_s^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e) = (0.298 \pm 0.023 \pm 0.012)\%$$

$$f_+^{D_s^+ \rightarrow K^0}(0) = 0.636(49)(13)$$

10.64 fb⁻¹ @ 4.24-4.70 GeV ($e^+ e^- \rightarrow D_s^{*+} D_s^{*-}$)
PRD 110, 072017 (2024)



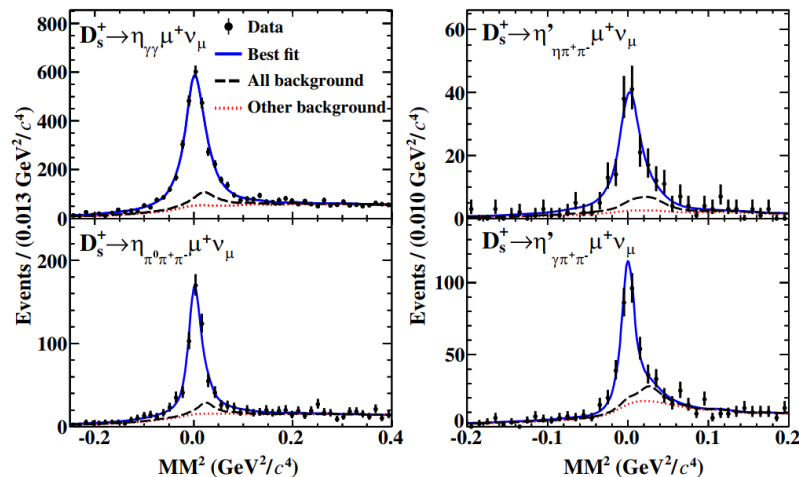
$$B(D_s^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e) = (0.24 \pm 0.04 \pm 0.01)\%$$

$$f_+^{D_s^+ \rightarrow K^0}(0) = 0.677(98)(23)$$

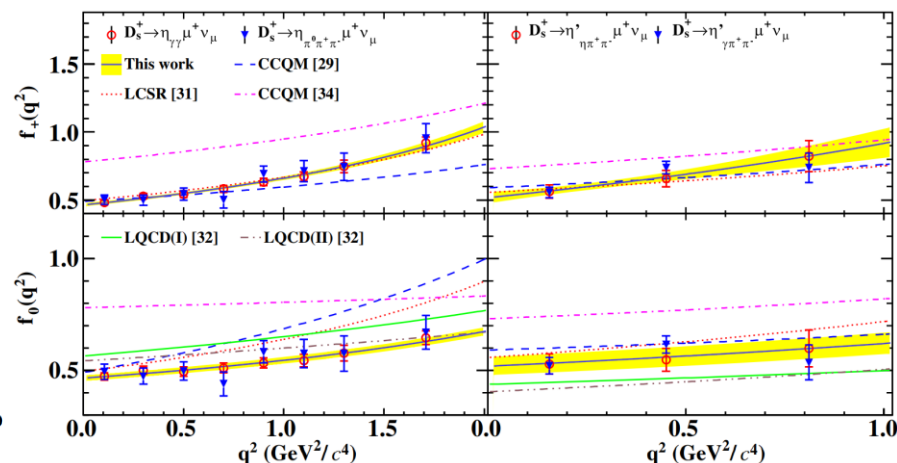
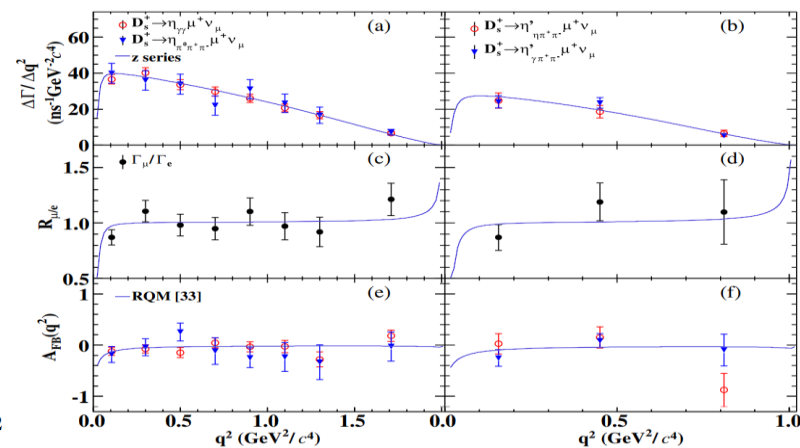
- ◆ 使用多能量点和通过 $e^+ e^- \rightarrow D_s^{*+} D_s^{*-}$ 测量 $D_s^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e$ 的分支比，充分发掘 BESIII 数据潜能；
- ◆ 补充测量形状因子 $f_+^{D_s^+ \rightarrow K^0}(0)$ ，精度分别为8%和15%。

$D_s^+ \rightarrow \eta^{(\prime)} \mu^+ \nu_\mu$ 的研究

7.33 fb⁻¹@ 4.13-4.23 GeV PRL 132, 091802 (2024)



Decay	$\eta \mu^+ \nu_\mu$		$\eta' \mu^+ \nu_\mu$	
$\eta^{(\prime)}$ decay	$\gamma\gamma$	$\pi^0 \pi^+ \pi^-$	$\eta \pi^+ \pi^-$	$\gamma \pi^+ \pi^-$
$\epsilon_{\gamma(\pi^0)\text{sig}}$ (%)	14.06(02)	2.89(01)	2.27(01)	3.64(01)
N_{DT}	2567	528	149	238
B_{sig} (%)	2.235(51)(52)		0.801(55)(28)	



$$R_{\mu/e}^{D_s^+ \rightarrow \eta} = 0.991(29)(16)$$

$$f_{+,0}^{D_s^+ \rightarrow \eta}(0) = 0.465(10)(07)$$

$$\langle A_{FB} \rangle^\eta = -0.059(31)(05)$$

$$R_{\mu/e}^{D_s^+ \rightarrow \eta'} = 0.988(82)(31)$$

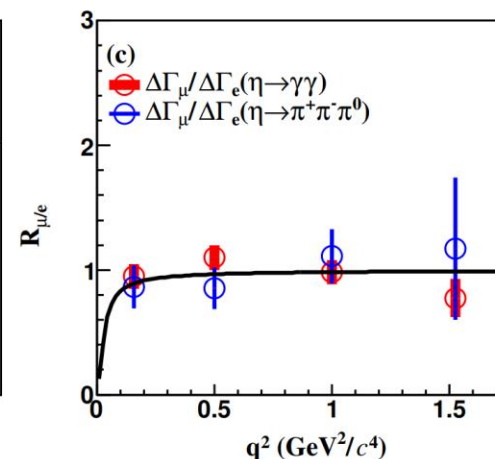
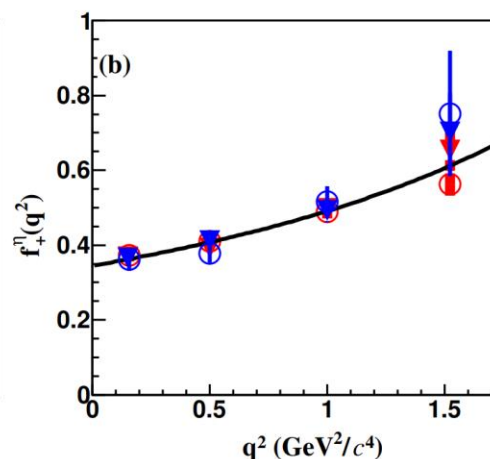
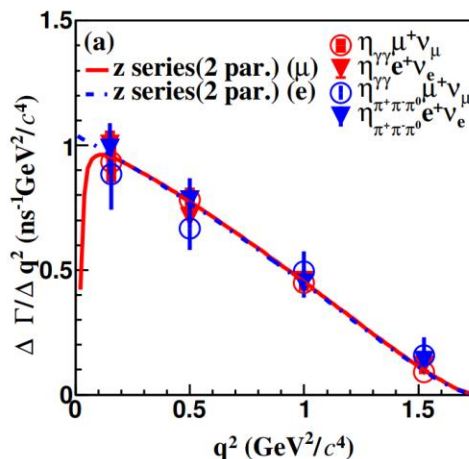
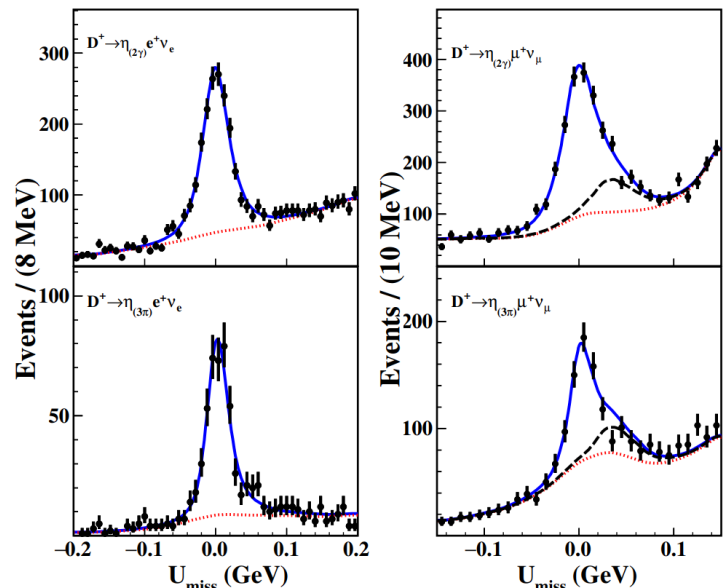
$$f_{+,0}^{D_s^+ \rightarrow \eta'}(0) = 0.518(38)(12)$$

$$\langle A_{FB} \rangle^{\eta'} = -0.064(79)(06)$$

- ◆ 首次观测 $D_s^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ (显著性 $> 10\sigma$), 以及高精度测量 $D_s^+ \rightarrow \eta \mu^+ \nu_\mu$ 分支比, 精度分别提高6.0和6.6倍;
- ◆ 分别在3.3%和8.9%的精度下检验 $\mu - e$ 轻子普适性;
- ◆ 首次抽取标量形状因子 $f_0^{D_s^+ \rightarrow \eta}(0)$ 和 $f_0^{D_s^+ \rightarrow \eta'}(0)$, 精度分别为2.6%和7.7%;
- ◆ 首次测量 $D_s^+ \rightarrow \eta^{(\prime)} \mu^+ \nu_\mu$ 的前冲后冲不对称参数 $\langle A_{FB} \rangle$.

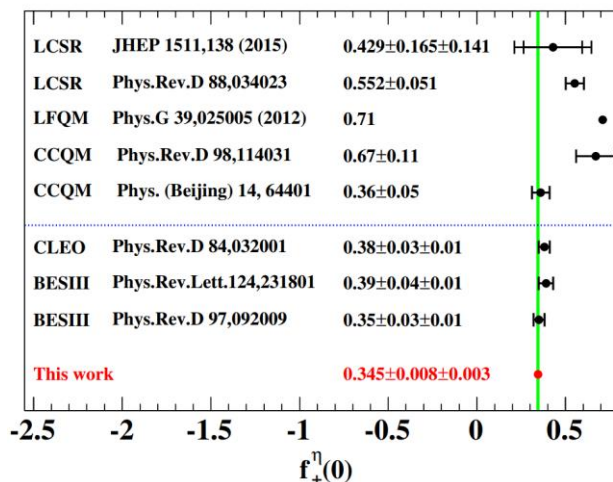
$D^+ \rightarrow \eta \ell^+ \nu_\ell$ ($\ell = e, \mu$) 的研究

20.3fb⁻¹@ 3.773 GeV arXiv: 2506.02521 , submitted to JHEP



Decay	N_{sig}	$\bar{\epsilon}_{\text{sig}} (\%)$	$\mathcal{B}_{\text{sig}} (10^{-4})$
$D^+ \rightarrow \eta(2\gamma) e^+ \nu_e$	1567 ± 119	39.51 ± 0.07	$9.75 \pm 0.29 \pm 0.28$
$D^+ \rightarrow \eta(3\pi) e^+ \nu_e$	426 ± 57	18.76 ± 0.06	
$D^+ \rightarrow \eta(2\gamma) \mu^+ \nu_\mu$	1375 ± 136	36.52 ± 0.07	$9.08 \pm 0.35 \pm 0.29$
$D^+ \rightarrow \eta(3\pi) \mu^+ \nu_\mu$	400 ± 69	18.60 ± 0.06	

$$R_{\mu/e}^{D^+ \rightarrow \eta} = 0.93(05)(02)$$



$$f_+^{D^+ \rightarrow \eta}(0) = 0.345(08)(03)$$

- ◆ 分支比测量精度提高2倍以上;
- ◆ 在5.8%的精度下检验 $\mu - e$ 轻子普适性。

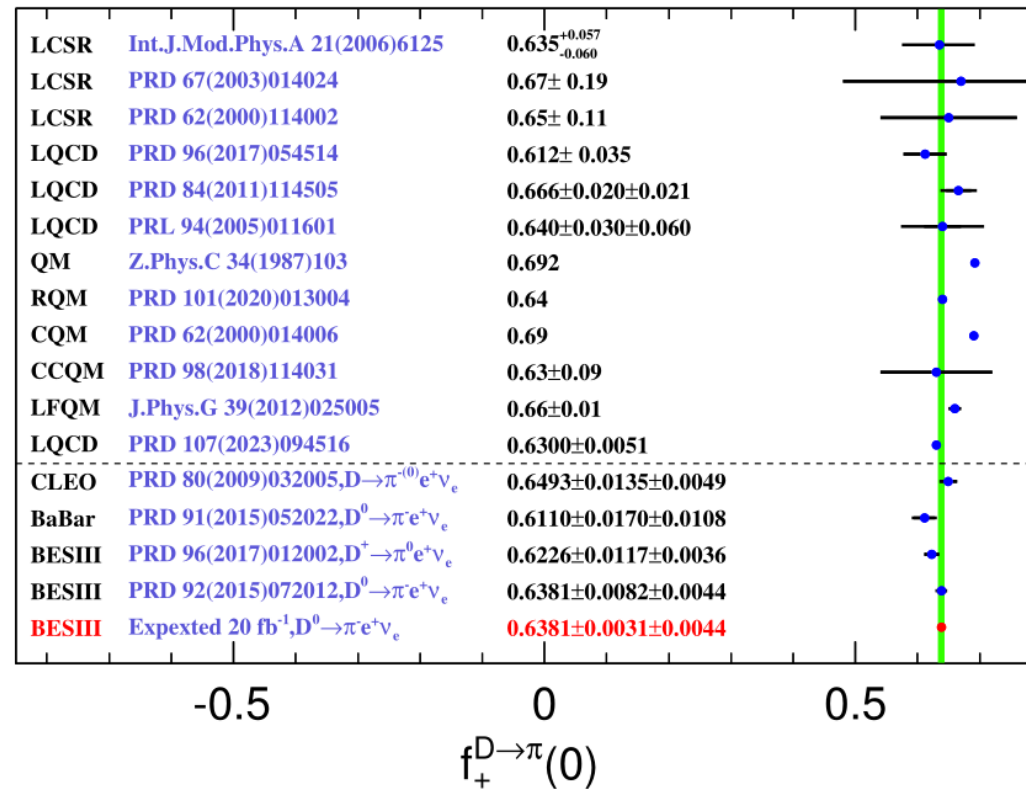
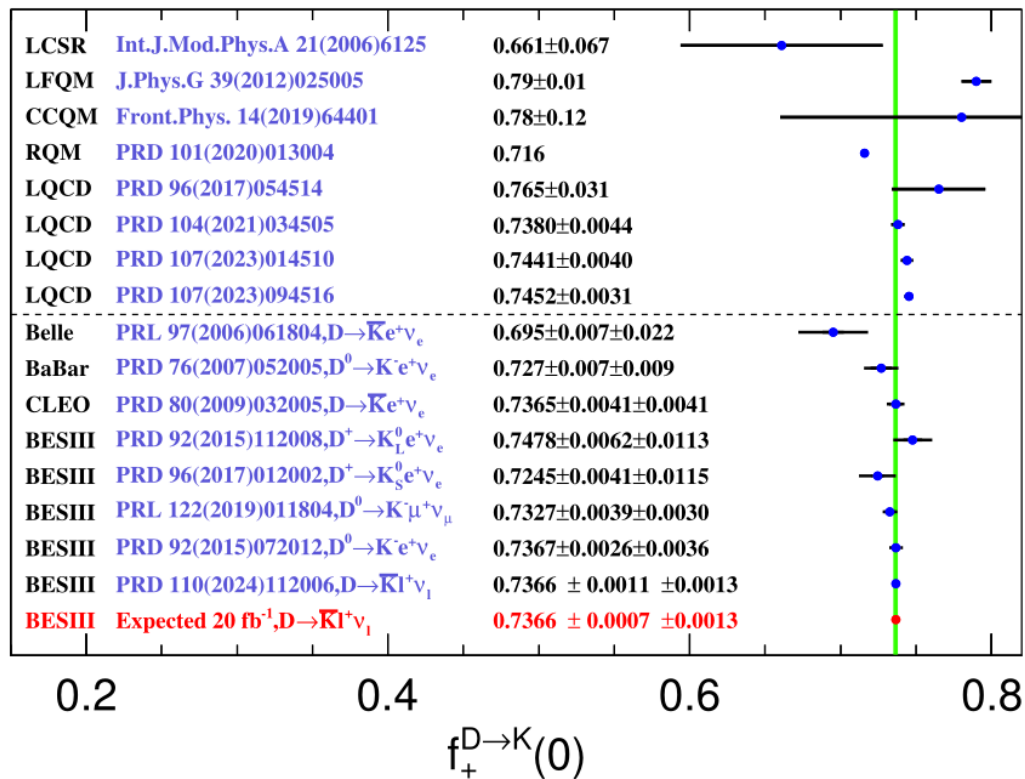
- ◆ 首次完成 $D^+ \rightarrow \eta \ell^+ \nu_\ell$ 半轻衰变动力学的联合研究;
- ◆ 测得形状因子 $f_+^{D \rightarrow \eta}(0)$, 精度由9%提高到2.5%;

正在进行的 $D \rightarrow P\ell^+\nu_\ell$ 研究

No.	课题	所使用的数据	分析状态
1	Precision measurement of $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}\ell^+\nu_\ell$	20.3fb-1@ 3.773 GeV	MEMO review, BAM-00931
2	Combined analysis of $D^{0(+)} \rightarrow \pi^{-(0)}\ell^+\nu_\ell$	20.3fb-1@ 3.773 GeV	MEMO review, BAM-00804
3	Study of the semileptonic decays $D_s^+ \rightarrow K^0\ell^+\nu_\ell$	7.33 fb-1@ 4.13-4.23 GeV	SP's approval, BAM-00887

$f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 和 $f_+^{D \rightarrow \pi}(0)$ 的实验理论比较

基于PDG2024中global fit下的 $|V_{cs}|$, $|V_{cd}|$ 以及过去实验测量的 $f_+^P(0)|V_{cs(d)}|$, 重新抽取形状因子

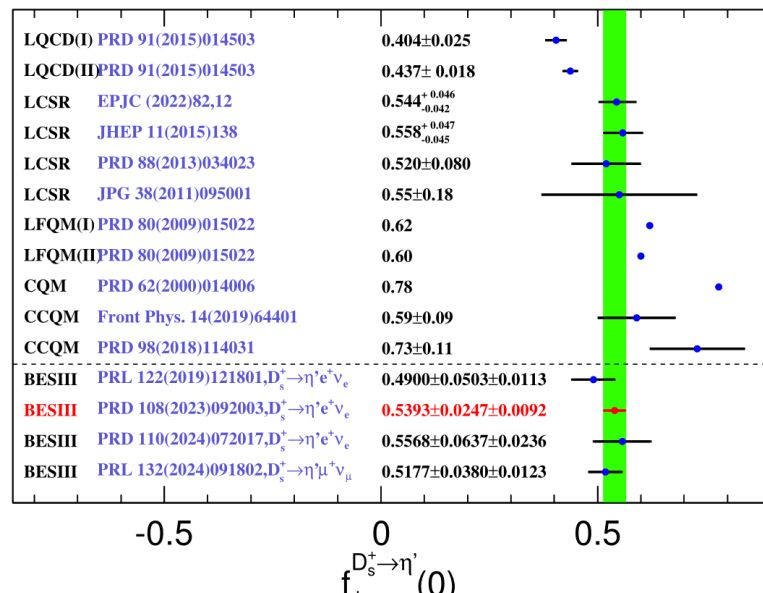
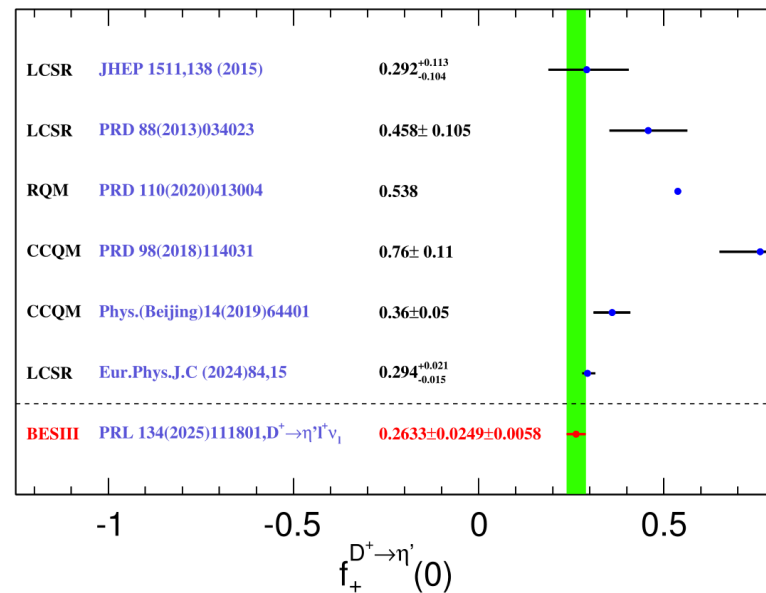
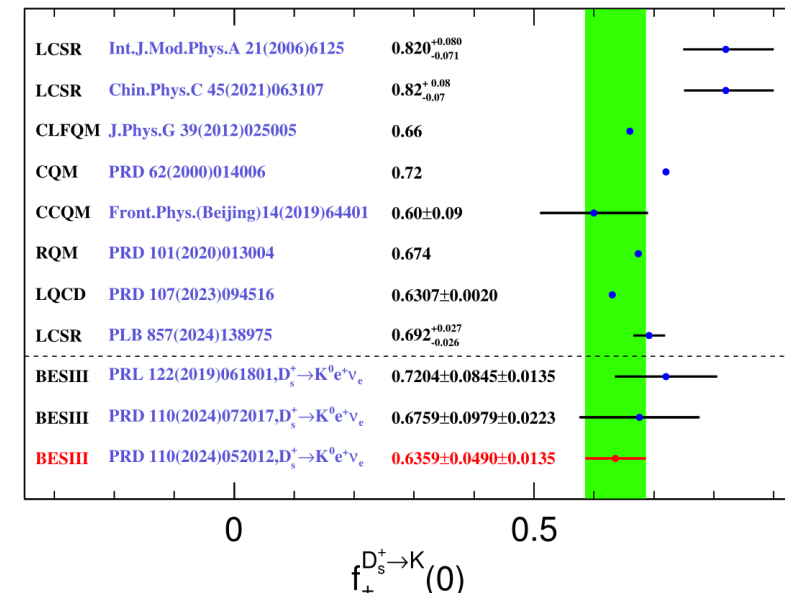
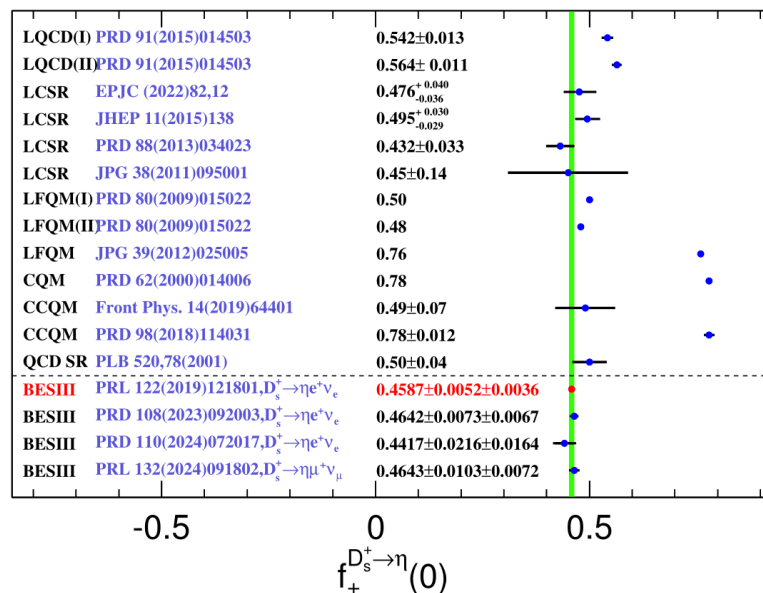
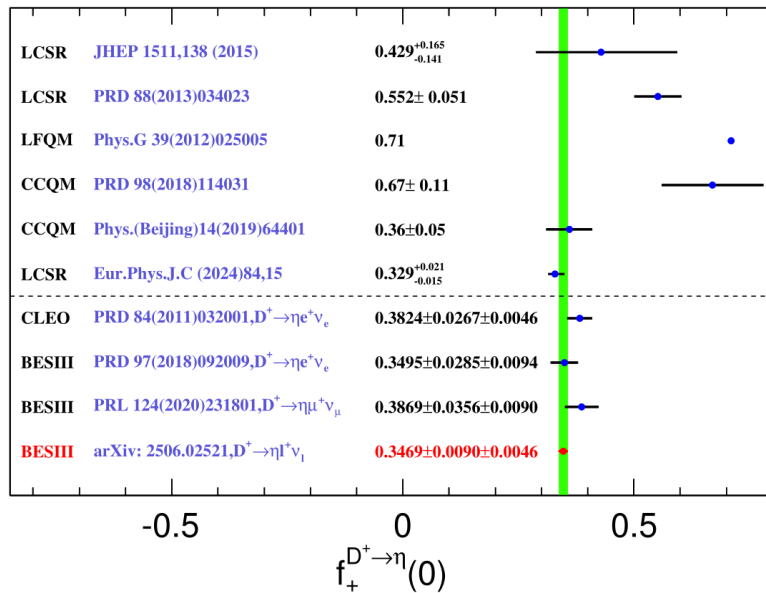


➤ $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 精度: $0.60\%(2.93 \text{ fb}^{-1}) \rightarrow 0.23\%(7.9 \text{ fb}^{-1}) \rightarrow 0.20\% (20.3 \text{ fb}^{-1})$

➤ $f_+^{D \rightarrow \pi}(0)$ 单个衰变道最高精度: $1.4\%(2.93 \text{ fb}^{-1}) \rightarrow 0.8\% (20.3 \text{ fb}^{-1})$

0.6% 以内(Combined fit to $D \rightarrow \pi \ell^+ \nu_\ell$ 20.3fb⁻¹)

$f_+^{D_s^+ \rightarrow K}(0)$ 和 $f_+^{D_s^+ \rightarrow \eta'}(0)$ 的实验理论比较



当前实验最高精度:

$$f_+^{D \rightarrow \eta}(0) \sim 2.9\% \quad f_+^{D \rightarrow \eta'}(0) \sim 9.7\%$$

$$f_+^{D_s \rightarrow \eta}(0) \sim 1.4\% \quad f_+^{D_s \rightarrow \eta'}(0) \sim 4.9\%$$

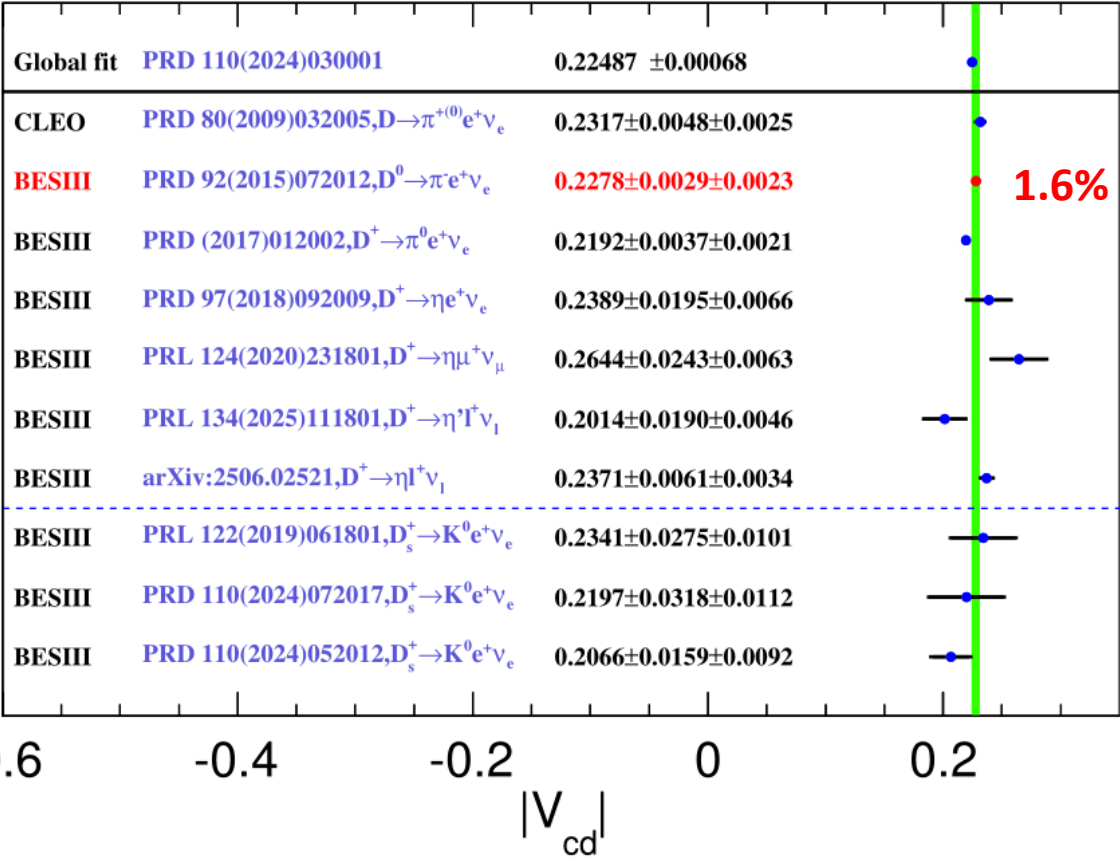
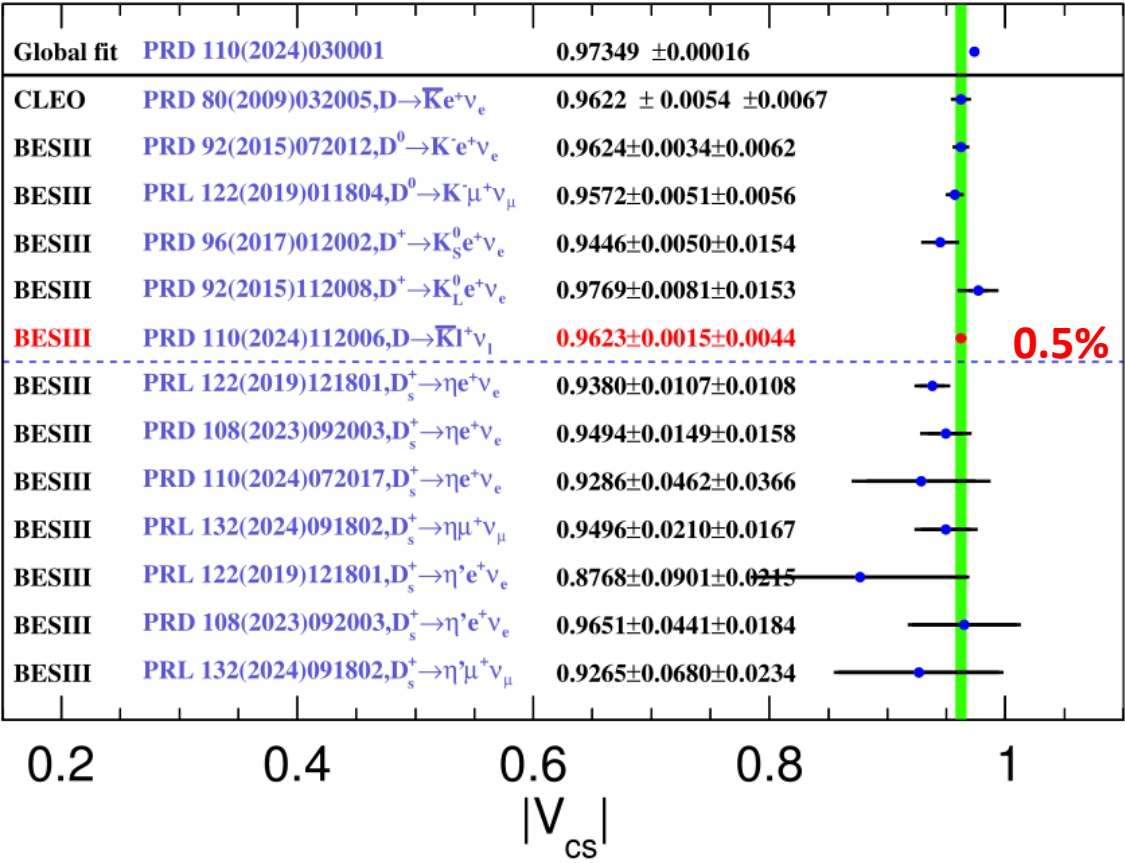
$$f_+^{D_s \rightarrow K}(0) \sim 8.0\%$$

实验测量CKM矩阵元 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的比较

基于理论 $f_+^{D_s \rightarrow P}(0)$ 值, 给出 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ 的比较



PRD 107(2023)094516	Eur.Phys.J.C(2024)84,15	Eur.Phys.J.C(2022)82,12	PLB 857(2024)138975
$f_+^{D \rightarrow K}(0) = 0.7452(31)$	$f_+^{D^+ \rightarrow \eta}(0) = 0.329_{(15)}^{(21)}$	$f_+^{D_s^+ \rightarrow \eta}(0) = 0.476_{(36)}^{(40)}$	$f_+^{D_s^+ \rightarrow K}(0) = 0.692_{(26)}^{(27)}$
$f_+^{D \rightarrow \pi}(0) = 0.6300(51)$	$f_+^{D^+ \rightarrow \eta'}(0) = 294_{(15)}^{(21)}$	$f_+^{D_s^+ \rightarrow \eta'}(0) = 0.544_{(42)}^{(46)}$	



第一项误差为统计误差, 第二项误差为系统误差与理论值误差的合并。

总结

基于BESIII采集的大数据样本:

- 首次观测到粲介子半轻衰变 $D^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D_s^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$, 填补了长期以来的实验空白;
- 首次抽取了 $D^+ \rightarrow \eta'$ 的形状因子, 且在多个抽取粲介子 $\rightarrow$ 赭标介子形状因子的测量上处于世界最高精度;
- $D \rightarrow K$ 形状因子和 $|V_{cs}|$ 测量精度已分别达到0.23%和0.5%;
- 以世界最高精度(0.8%)检验粲介子中的 $\mu - e$ 轻子普适性。

展望:

- 开展更多半轻衰变过程的前冲后冲不对称参数 $\langle A_{FB} \rangle$ 测量工作;
- 继续推进更多高精度的形状因子测量工作。

谢谢!