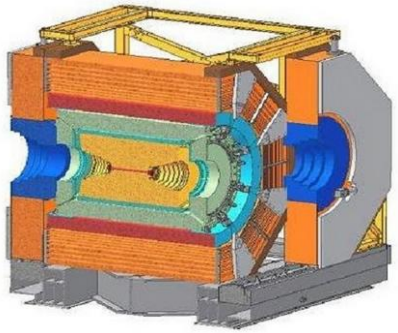
国家自然科学基金重大项目中期检查报告

《北京谱仪BESIII实验上粲夸克衰变中标准模型的精确检验》之课题四：

精确测量粲介子半轻衰变形状因子和检验轻子普适性



报告人：马海龙（高能所）

承担单位：中国科学院高能物理研究所

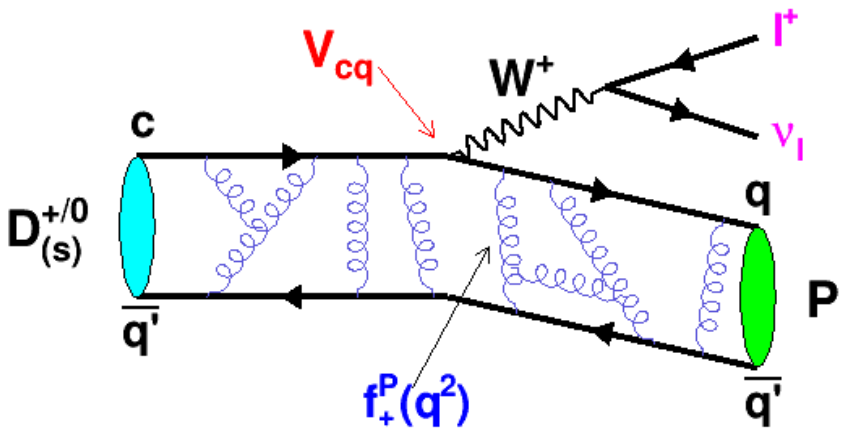
2026年10月19日，四川省成都市

主要内容

- 物理意义
- 总体目标和执行情况
- 代表性成果或进展

重要意义

粲介子半轻衰变：联系夸克和轻子的理想桥梁，检验标准模型的理想探针之一



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

夸克间强作用: 形状因子 $f_+^{D\to h}(0)$:

夸克间弱作用: CKM矩阵元$|V_{cq}|$

- $D \to h$形状因子 → 刻度格点QCD等计算
- 夸克混合矩阵元$|V_{cs}|$、 $|V_{cd}|$ → 约束CKM矩阵的幺正性
- 分支比之比$R_{\mu/e}$ → 检验轻子普适性
- 相对干净的环境 → 探讨轻介子性质的理想窗口

总体目标

使用BESIII更高统计量的
D^0、D^+和D_s^+介子样本，
系统、精密地研究粲介子
各类电子和μ子半轻衰变

$D \to Pl^+\nu_l$
$D \to Vl^+\nu_l$
$D \to Sl^+\nu_l$
$D \to Al^+\nu_l$

P: 赝标量介子，如K、π、η、η'
V: 矢量介子，如K^*、ρ、ϕ
S: 标量介子，如$a_0(980)$或$f_0(980)$
A: 轴矢量介子，如$K_1(1270)$

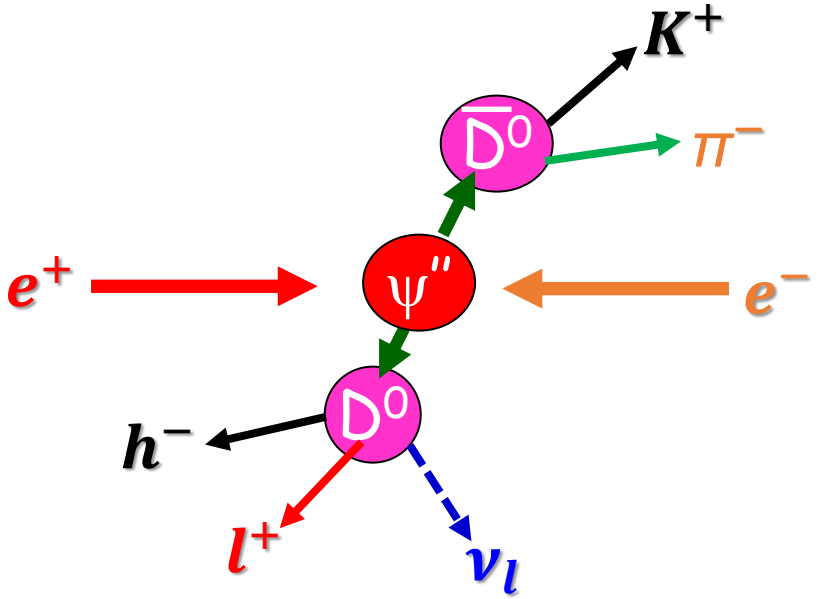
- 以世界最高精度测量$D \to P$和$D \to V$形状因子，预期$D \to K$和$D \to \pi$形状因子的测量精度分别**达到0.5%和1%水平**；首次抽取$D \to S$和$D \to V$形状因子。

- 寻找尚未发现的粲介子遍举μ子半轻衰变，完善遍举μ子半轻衰变图像；以世界最高精度检验粲夸克衰变中的μ-e轻子普适性，预期精度**好于1%水平。**

- 实验与理论结合，改进测量CKM矩阵元$|V_{cs}|$和$|V_{cd}|$，预期精度分别**好于1%水平。**

独特优势和历史机遇

e^+e^-质心能量 (GeV)	采集年份	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



反冲观测粒子四动量，
“全重建”中微子：

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

与国际上正在进行的Belle(II)和LHCb实验比，BESIII研究的特点：

- 世界上最大近阈数据
- 粲介子成对产生→双标记方法
- 背景低 → 系统误差小
- 可全重建

BESIII在粲介子半轻衰变研究方面有显著优势！

实验数据：

3.773 GeV数据：
- 2022年: 2.9→7.9 fb^{-1}
- 2023年: 7.9→16 fb^{-1}
- 2024年: 16 →20.3 fb^{-1}

格点QCD (2011→2022)：

- $f_+^{D\to K}(0)$: 2.4→0.4%
- $f_+^{D\to \pi}(0)$: 4.4→0.8%

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

这些都提供了难得的历史机遇！

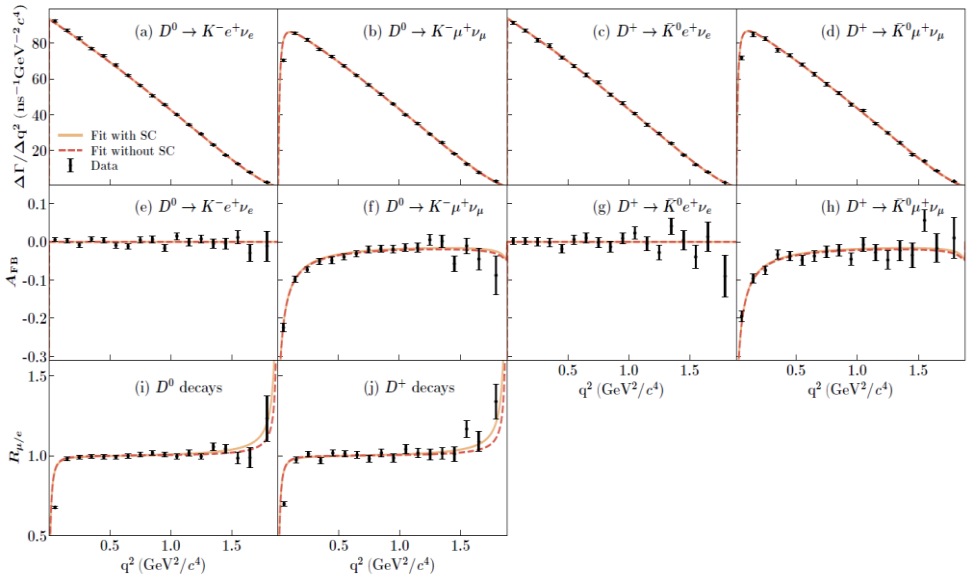
总体执行情况

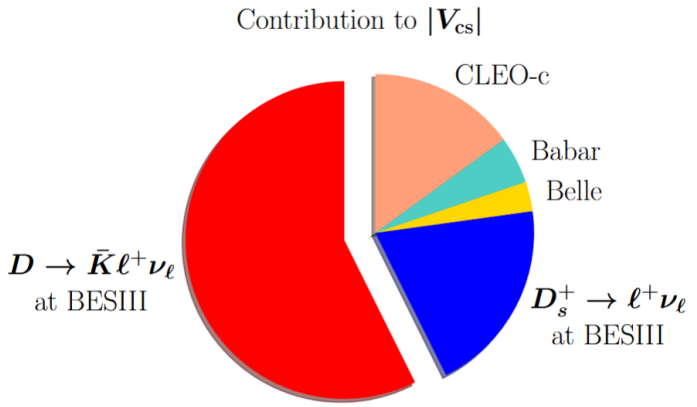
- **$D \to P$型衰变(已发表至少6篇文章(3 PRL), 详见陈超报告)**：完成了$D_s^+ \to \eta' \mu^+ \nu_\mu$和$D^+ \to \eta' \mu^+ \nu_\mu$的首次观测，$D_s^+ \to \pi^0$半轻衰变的寻找，完成了$D_s^+ \to \eta^{(\prime)}$、$D \to K$、$D^+ \to \eta$、$D^+ \to \eta'$形状因子首次或精确测量：$f_+^{D \to K/\pi}(0)$ 和$|V_{cs/d}|$测量及μ-e轻子普适性检验的精度达到既定指标。
- **$D \to S$型衰变(已发表至少3篇文章(1 PRL), 详见陈超报告)**：完成了$D^+ \to f_0(500)$、$D_s^+ \to f_0(980)$、$D^0 \to a_0(980)$形状因子的首次测量；$D^{0(+)} \to a_0(980)$形状因子的改进测量正在进行。
- **$D \to V$型衰变(已发表至少5篇文章(>3 PRL), 详见石家磊报告)**：完成了多项$D \to \bar{K}^*$形状因子精确测量和$D^+ \to \rho^0(770)\mu^+\nu_\mu$绝对分支比测量；$D^+ \to \omega$、$D \to \rho$、$D \to \bar{K}^*$形状因子的改进测量正在进行。
- **$D \to A$型衰变(已发表至少6篇文章(3 PRL), 详见曾溢嘉报告)**：完成了$D^{0(+)} \to \bar{K}_1$形状因子的首次测量，$D^{0(+)} \to \bar{K}\omega e^+\nu_e$、$\bar{K}\pi\pi e^+\nu_e$、$\bar{K}_1\mu^+\nu_\mu$、$b_1^{-(0)}e^+\nu_e$的首次观测和$D_s^+ \to K_1^0/b_1^0 e^+\nu_e$首次寻找。
- **其他半轻衰变(已发表至少2篇文章)**：完成了$D^{0(+)} \to K\bar{K}e^+\nu_e$、$D^{0(+)} \to K\eta e^+\nu_e$的首次寻找。
- **格点QCD计算(详见刘朝峰报告)**：$D_s \to \phi$形状因子计算结果已投稿；正开展$D \to K$、$D \to \pi$、$D \to \bar{K}^*$形状因子计算，部分结果在国际会议报告。

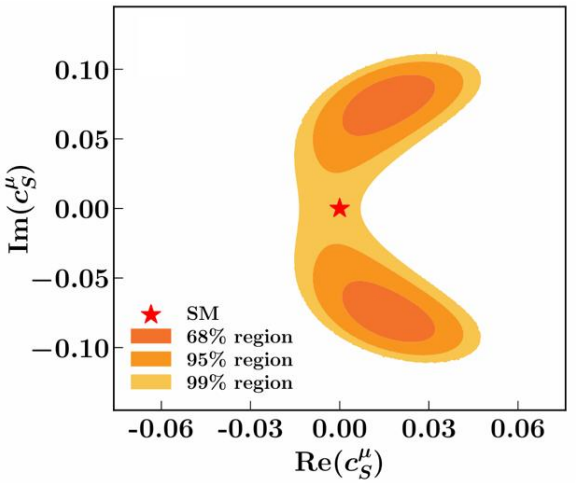
重点介绍几个代表性成果

$D \to P$型衰变：$D^{0(+)} \to Kl^+\nu_l\ (l = e, \mu)$的研究

7.9→20.3 fb^{-1} @3.773 GeV　　PRD110(2024)112006 →PRL137(2026)091803+PRD114(2026)033008



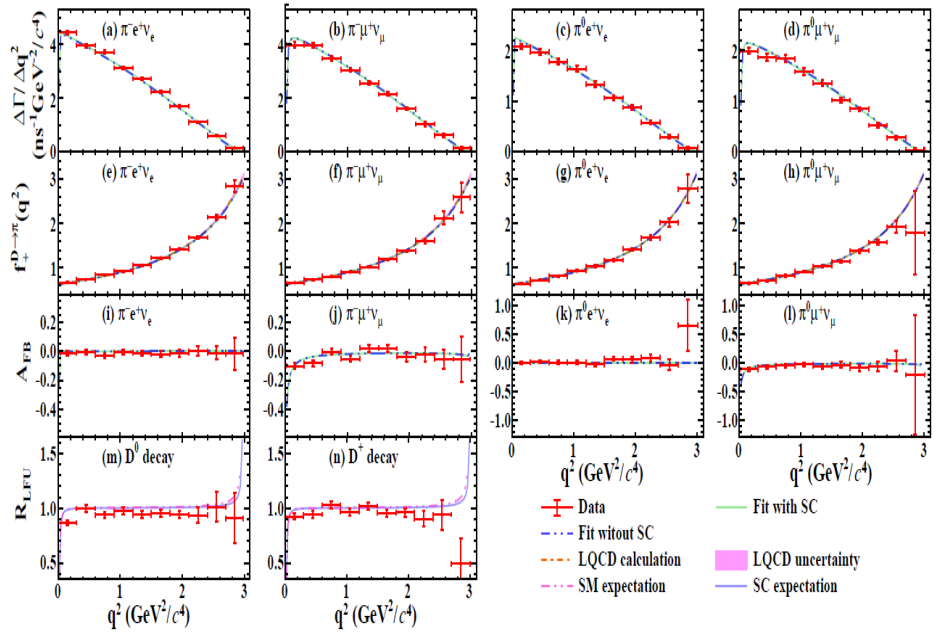


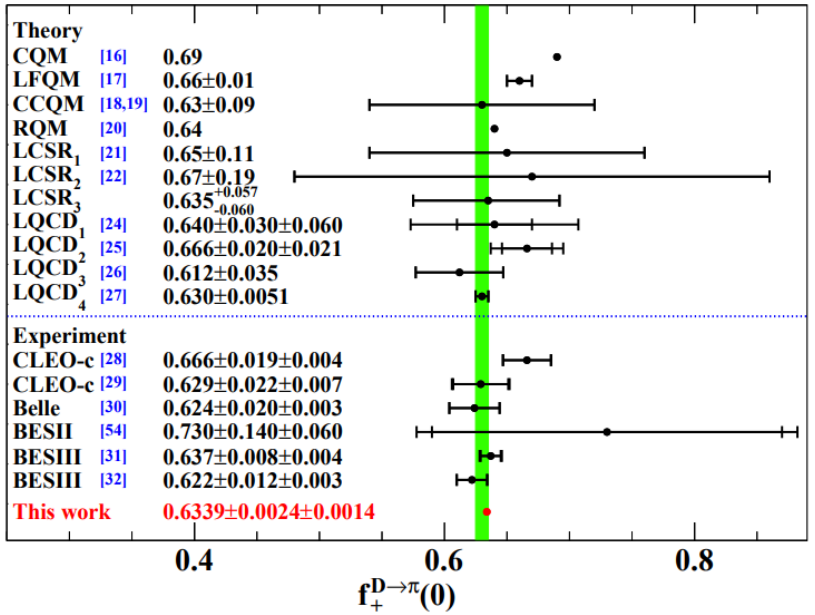


- **首次完成$D^{0(+)} \to Kl^+\nu_l$四个半轻衰变动力学的联合研究；**
- **以世界最高精度测得形状因子$f_+^{D\to K}(0)$、CKM矩阵元$|V_{cs}|$、检验了粲介子半轻衰变中的μ-e轻子普适性，精度分别达到0.25%、0.5%和0.8%；分别好于0.5%、1%和1%的计划目标；**
- **测得的形状因子$f_+^{D\to K}(0)$比项目执行前的最好测量精度改进2倍以上；**
- **首次测量前后冲不对称参数、约束标量流粒子贡献。**

$D \to P$型衰变：$D^{0(+)} \to \pi l^+ \nu_l\ (l = e, \mu)$的研究

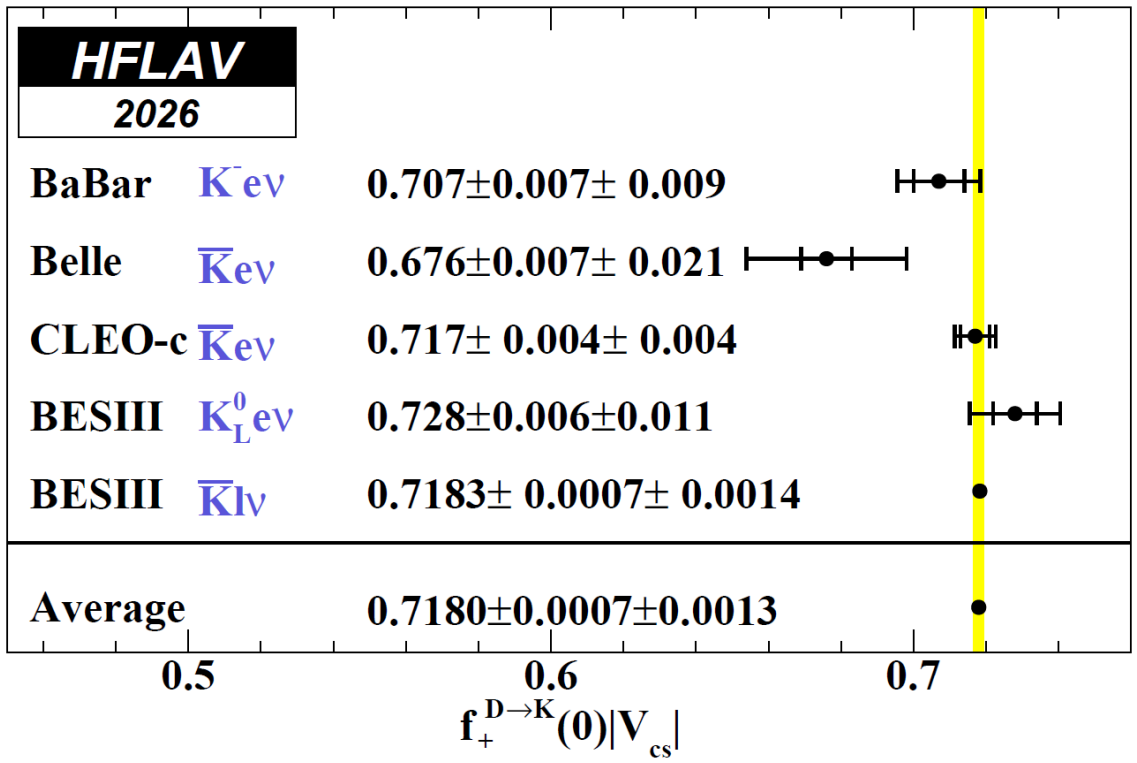
20.3 fb^{-1} @3.773 GeV　arXiv:2607.23949, 2607.23945，已投稿，反馈意见正面

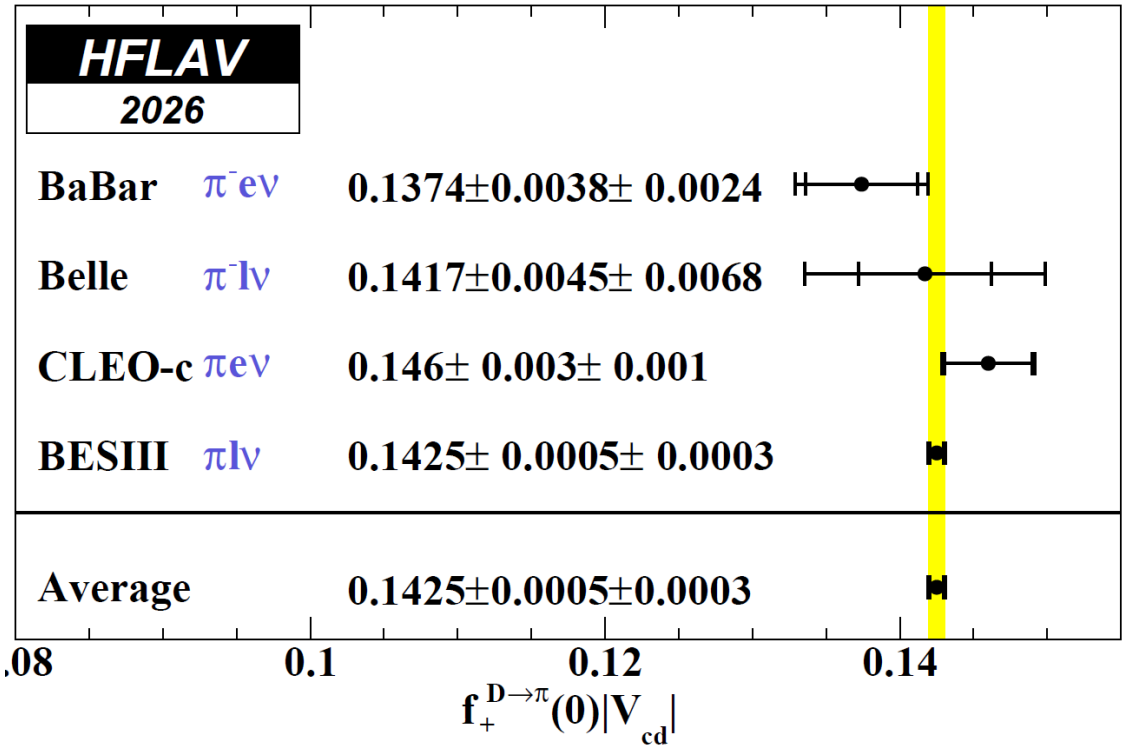




- **首次完成$D^{0(+)} \to \pi l^+ \nu_l$四个半轻衰变动力学的联合研究；**
- **以世界最高精度测得形状因子$f_+^{D\to\pi}(0)$、CKM矩阵元$|V_{cd}|$、检验了粲介子半轻衰变中的μ-e轻子普适性，精度分别达到0.4%、0.9%和1.5%；前两者分别好于0.5%和1%的计划目标；**
- **测得的形状因子$f_+^{D\to\pi}(0)$比项目执行前的最好测量精度改进2倍以上；**
- **首次测量前后冲不对称参数、约束标量流粒子贡献。**

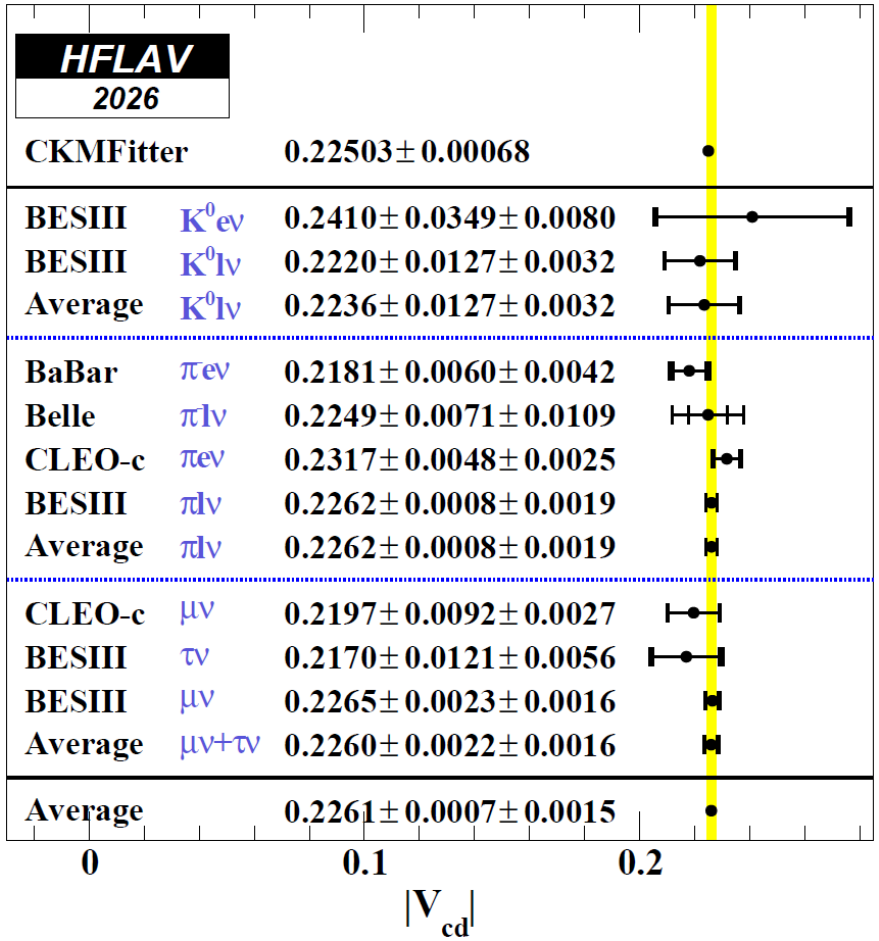
$f_+^{D\to K/\pi}(0)\,|V_{cs/d}|$形状因子实验测量的比较

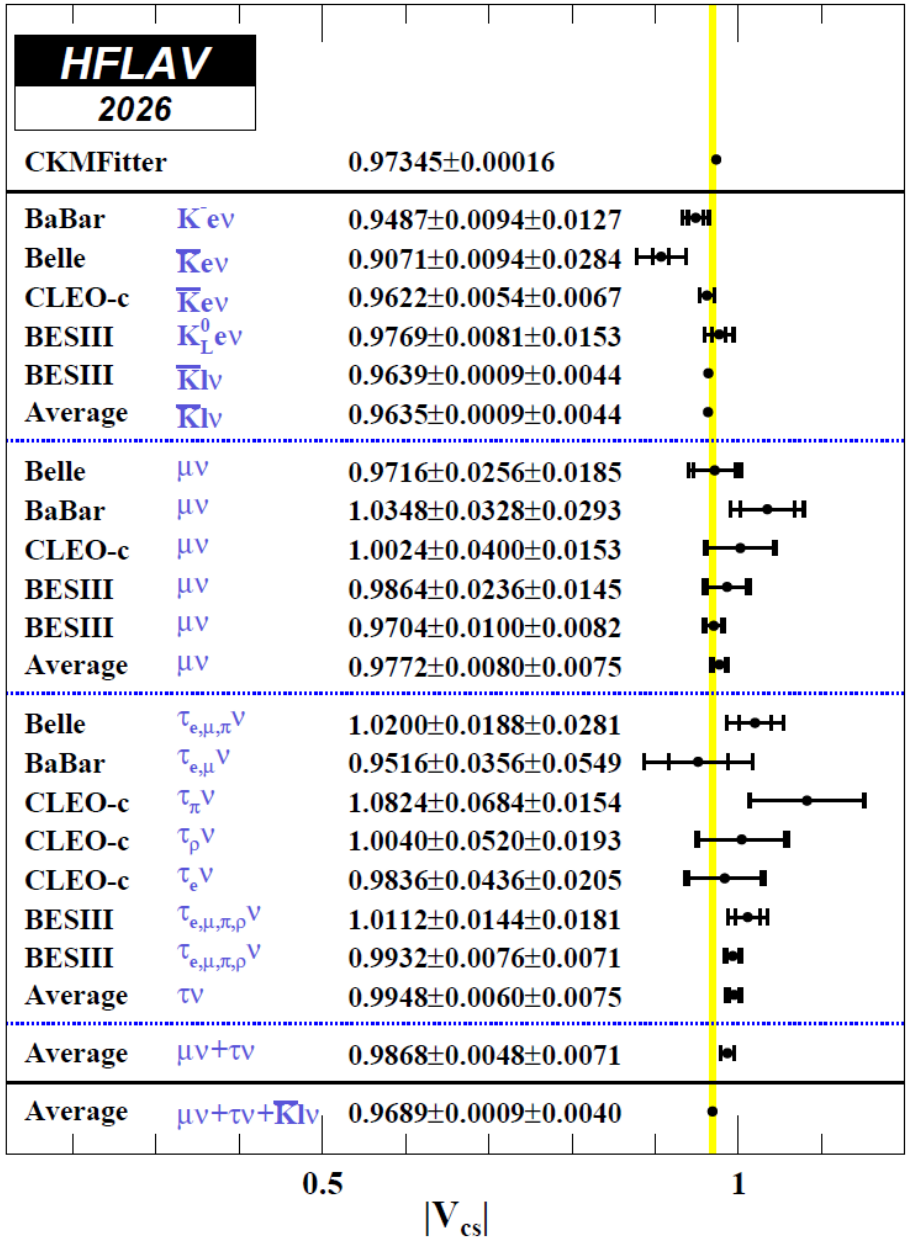




BESIII实验对相关世界平均值有主导作用！

$|V_{cd}|$和$|V_{cs}|$测量的比较



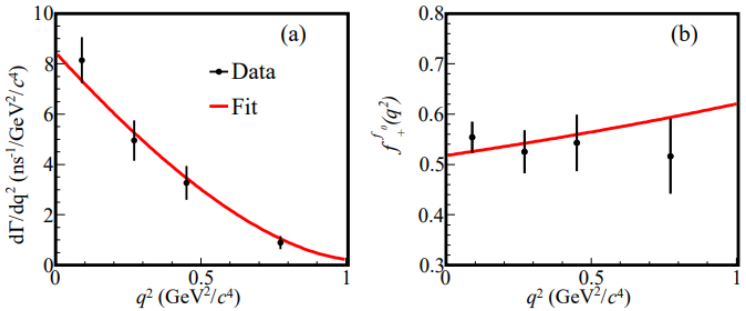


$D \to S$型半轻衰变

7.33 fb^{-1}@4.128-4.226 GeV

$D_s^+ \to f_0(980)^0 e^+ \nu_e$

PRL132(2024)141901

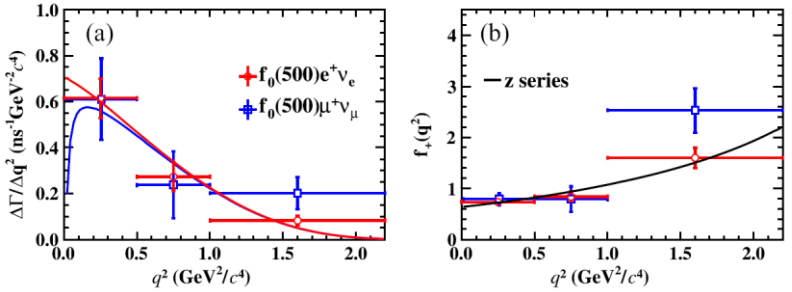


$f_+^{D_s \to f_0(980)}(0)|V_{cs}| = 0.504(17)(35)$ (7.7%)

2.93 fb^{-1} @3.773 GeV

$D^+ \to f_0(500)^0 e^+ \nu_e$

PRD110(2024)092008

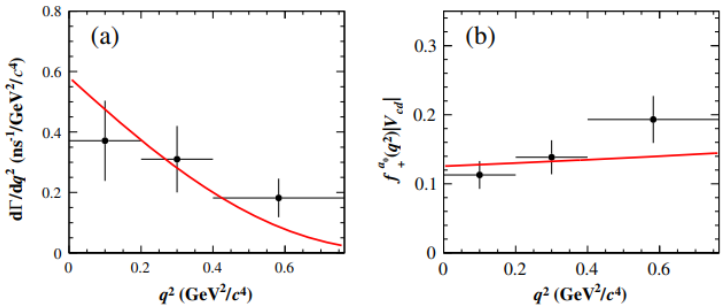


$f_+^{D^+ \to f_0(500)}(0)|V_{cd}| = 0.143(14)(11)$ (12.5%)

7.9 fb^{-1} @3.773 GeV

$D^0 \to a_0(980)^- e^+ \nu_e$

PRD111(2025)L091501



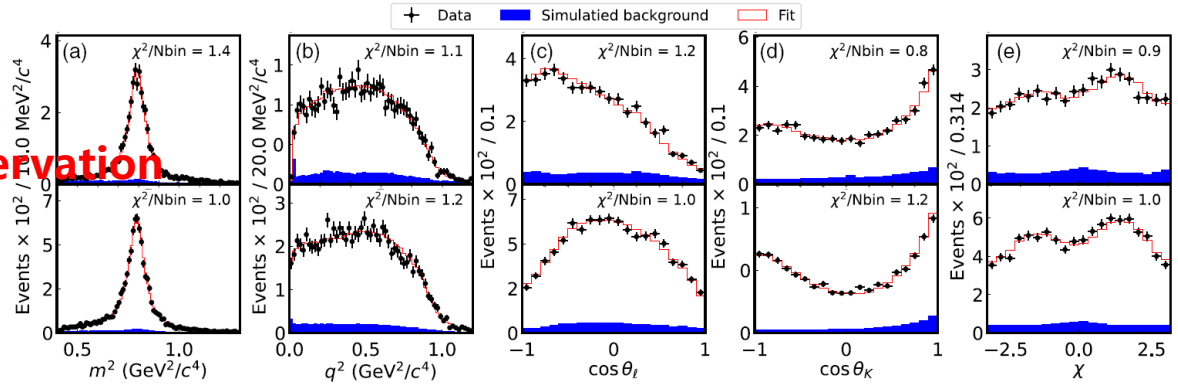
$f_+^{D^0 \to a_0(980)}(0)|V_{cd}| = 0.126(13)(03)$ (10.6%)

- **首次观测到$D^+ \to f_0(500)\mu^+\nu_\mu$；**
- **首次抽取了$D_s^+ \to S$形状因子，填补了实验研究空白；**
- **有助于理解轻标量介子是否含有四夸克态成分；**
- **在23%的精度下检验了$D \to S$型半轻衰变中的μ-e轻子普适性。**

$D \to V$型半轻衰变：$D^+ \to \bar{K}^{*0}(K_S^0\pi^0)l^+\nu_l$

7.9 → 20.3 fb^{-1}@3.773 GeV　　JHEP10(2024)199→PRL135(2025)171801

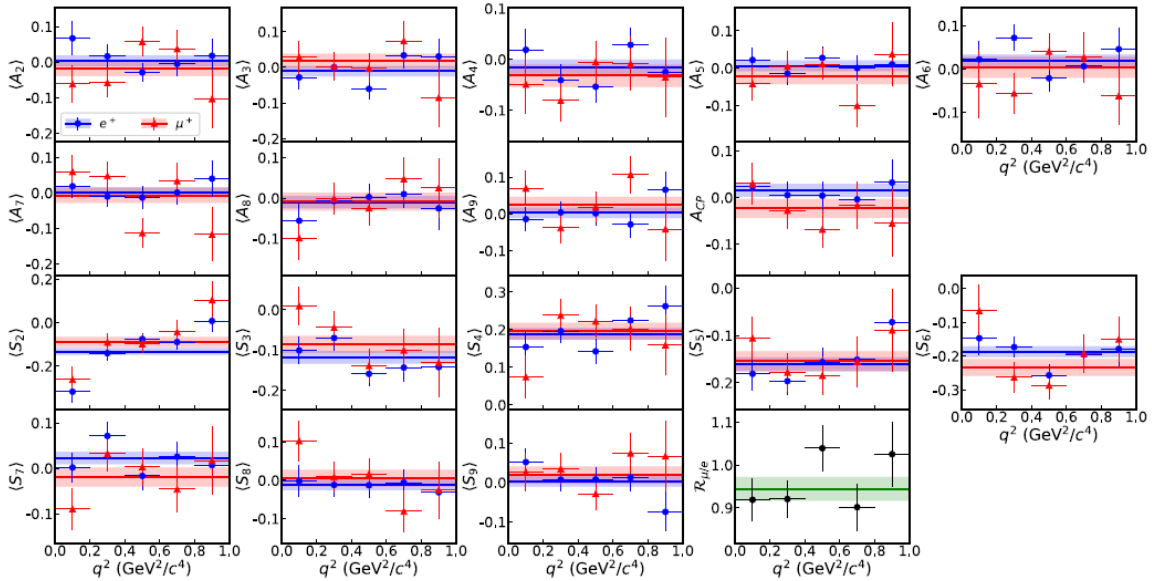
First observation



$r_V = 1.42 \pm 0.03 \pm 0.02$　　$r_2 = 0.75 \pm 0.03 \pm 0.01$

(2.5/4.2%)

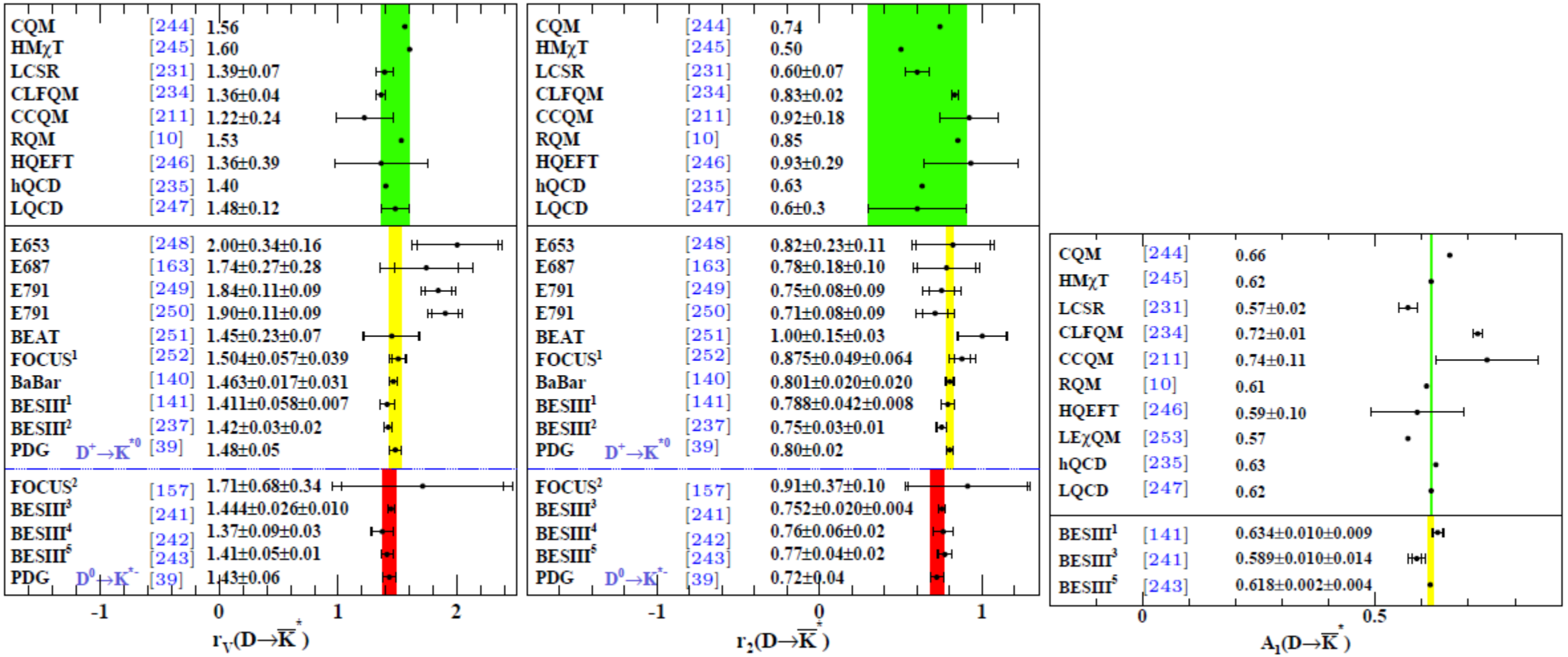
Variable	$D^+ \to K_S^0\pi^0 e^+\nu_e$	$D^+ \to K_S^0\pi^0\mu^+\nu_\mu$
$m_{\bar{K}^{*0}}$ (MeV/c^2)	$897.3 \pm 0.3 \pm 2.2$	
$\Gamma_{\bar{K}^{*0}}$ (MeV/c^2)	$45.2 \pm 0.6 \pm 0.5$	
r_V	$1.42 \pm 0.03 \pm 0.02$	
r_2	$0.75 \pm 0.03 \pm 0.01$	
$a_{S,BG}^{1/2}$ (GeV/c)$^{-1}$	$2.32 \pm 0.11 \pm 0.25$	$1.47 \pm 0.25 \pm 0.22$
r_S (GeV)$^{-1}$	$-8.44 \pm 0.13 \pm 0.37$	$-9.59 \pm 0.46 \pm 0.58$
$f_{S\text{-wave}}$	$6.39 \pm 0.17 \pm 0.14$	$7.10 \pm 0.68 \pm 0.41$
$f_{\bar{K}^{*0}}$	$93.50 \pm 0.18 \pm 0.28$	$92.81 \pm 0.67 \pm 0.47$



- **精确测量了分支比和 $D^+ \to \bar{K}^{*0}$ 形状因子；**
- **精确检验了轻子普适性；**
- **首次开展角分布+振幅分析联合分析；**
- **首次在粲介子衰变中提取多个角分布变量和CP破坏参数。**

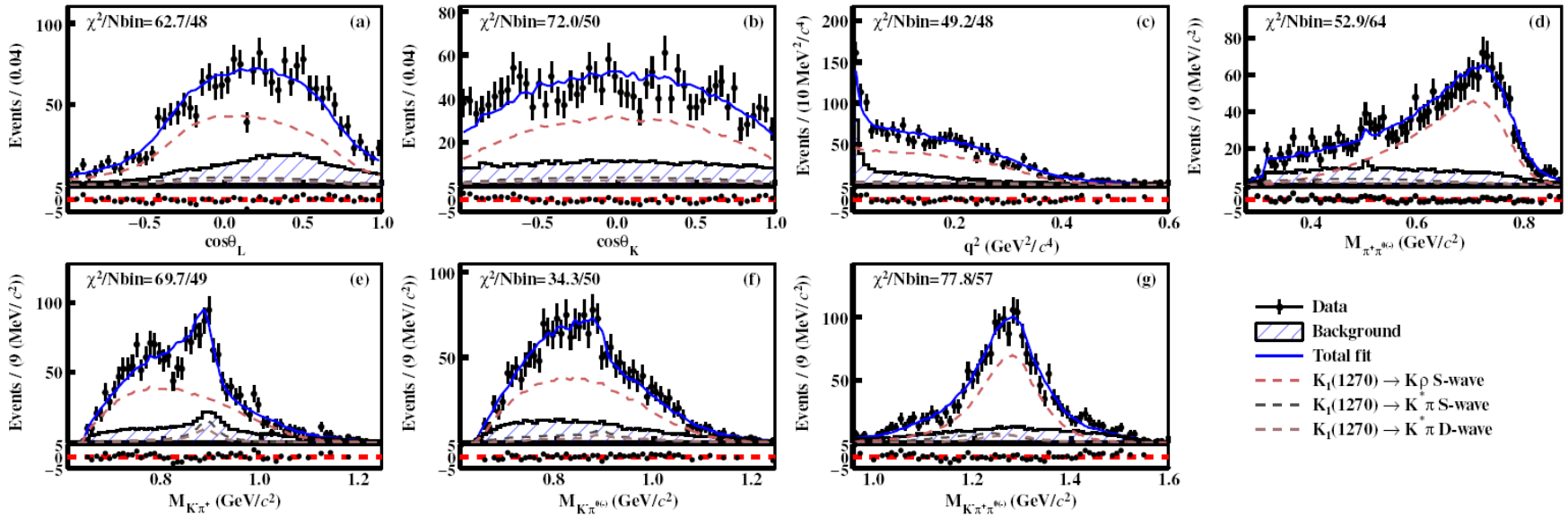
$D \to K^*$形状因子比较

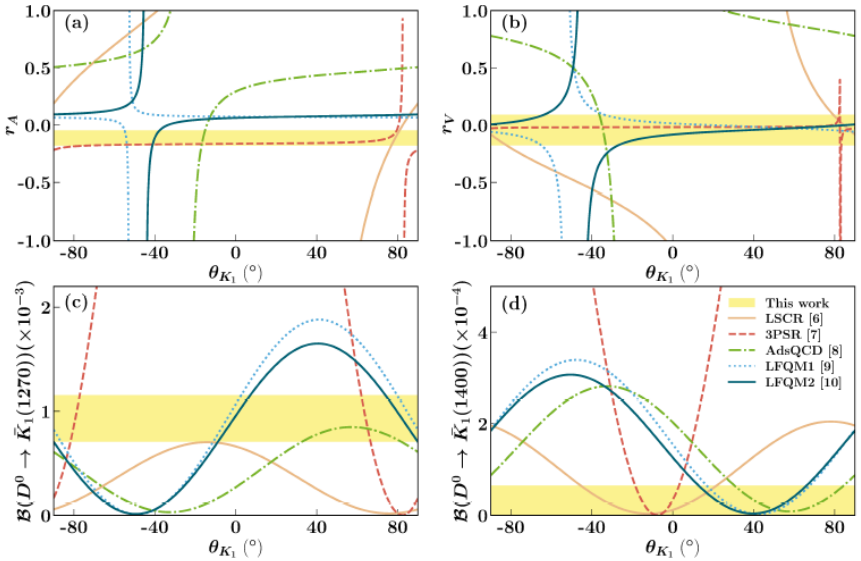
See detailed comparisons in arXiv:2604.20644



$D \to A$型半轻衰变：$D^{0(+)} \to K^-\pi^+\pi^{-(0)}e^+\nu_e$

20.3 fb^{-1} @3.773 GeV PRL135(2025)091801





- 精确测量$D \to \bar{K}_1(1270)e^+\nu_e$、首次寻找$D \to \bar{K}_1(1400)e^+\nu_e$；
- 首次测量了$D \to A$形状因子；
- 有助于深入理解轴矢量介子性质，约束K_1混合角 → 约束末态包含K_1介子的τ、D和 B等衰变。

总结

- **课题研究总体进展顺利，取得了一些重要物理成果；共发表至少22篇论文，包括10篇PRL：**
  - 首次观测到多个半轻衰变新模式，填补了长期以来的实验研究空白；
  - 以世界最高精度检验粲夸克衰变中的μ-e轻子普适性；
  - 以世界最高精度、首次或精确抽取了粲介子→多个强子形状因子；
  - **课题核心指标：D→K/π形状因子和$|V_{cs/d}|$测量及轻子普适性检验精度已实现。**
- **部分研究正在进行中，不影响课题指标。**

谢谢!