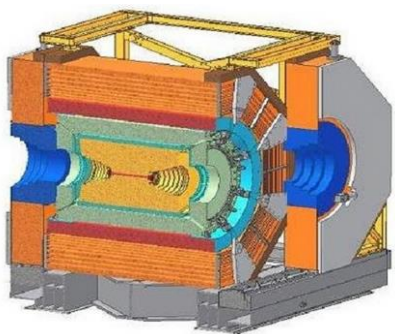


国家自然科学基金重大项目年度进展报告

《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：

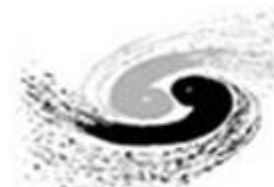
精确测量粲介子半轻衰变形状因子和检验轻子普适性



BESIII

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



中国科学院
高能物理研究所

2025年BESIII粲强子物理研讨会，2025年8月8日，兰州大学

主要内容

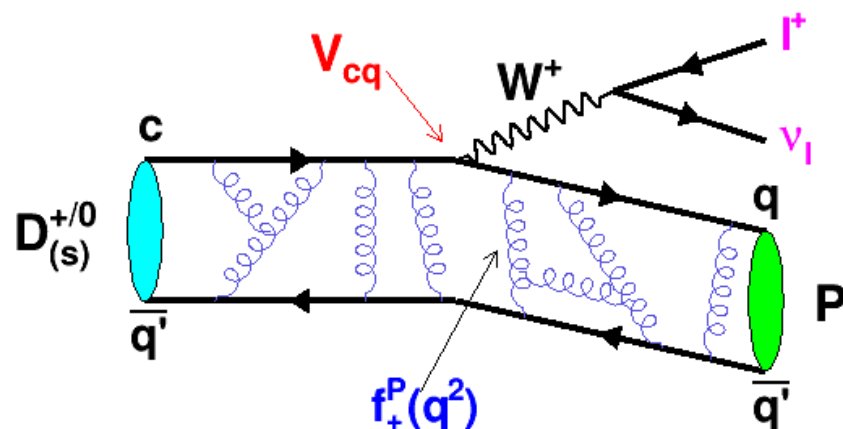
- 总体目标和执行情况
- 重要成果或进展
- 研究团队、人才培养
- 组织管理、合作交流
- 存在的问题及拟采取的措施

主要内容

- 总体目标和执行情况
- 重要成果或进展
- 研究团队、人才培养
- 组织管理、合作交流
- 存在的问题及拟采取的措施

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 $f_+^{D \rightarrow h}(0)$:

夸克间弱作用:

CKM矩阵元 $|V_{cq}|$

- $D \rightarrow h$ 形状因子
- 夸克混合矩阵元 $|V_{cs}|$ 、 $|V_{cd}|$
- 分支比之比 $R_{\mu/e}$
- 相对干净的环境

→ 刻度格点QCD等计算

→ 约束CKM矩阵的么正性

→ 检验轻子普适性

→ 探讨轻介子性质的理想窗口

研究目标

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

$$D \rightarrow Pl^+\nu_l$$

$$D \rightarrow Vl^+\nu_l$$

$$D \rightarrow Sl^+\nu_l$$

$$D \rightarrow Al^+\nu_l$$

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 $D \rightarrow P$ 和 $D \rightarrow V$ 形状因子, 预期 $D \rightarrow K$ 和 $D \rightarrow \pi$ 形状因子的测量精度分别**达到0.5%和1%水平**; 首次抽取 $D \rightarrow S$ 和 $D \rightarrow A$ 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

实验数据:

3.773 GeV数据:

□ 2022年: 2.9→7.9 fb⁻¹

□ 2023年: 7.9→16 fb⁻¹

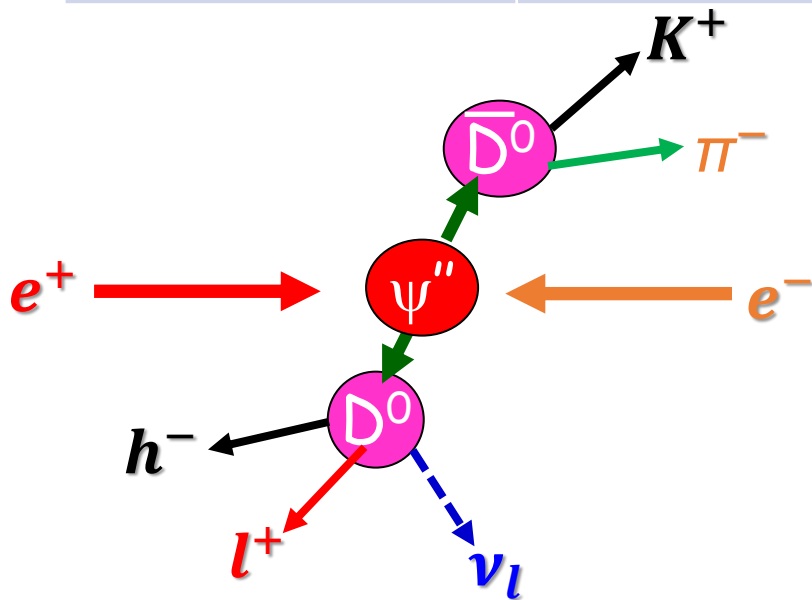
□ 2024年: 16 →20.3 fb⁻¹

格点QCD (2011→2022):

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

□ $f_+^{D \rightarrow \pi}(0)$: 4.4→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)



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!**

这些都提供了**难
得的历史机遇!**

执行情况

- **$D \rightarrow P$ 型衰变**: 完成了 $D_s^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ 的首次观测, $D_s^+ \rightarrow \pi^0$ 半轻衰变的寻找, $D_s^+ \rightarrow \eta^{(\prime)}$ 、 $D \rightarrow K$ 、 $D^+ \rightarrow \eta'$ 形状因子首次或精确测量; $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 和 $|V_{cs}|$ 测量及 μ -e 轻子普适性检验的精度达到既定指标; 正开展 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}$ 、 $D^{0(+)} \rightarrow \pi$ 、 $D^{0(+)} \rightarrow \eta$ 形状因子的精确测量。
- **$D \rightarrow S$ 型衰变**: 完成了 $D^+ \rightarrow f_0(500)$ 、 $D_s^+ \rightarrow f_0(980)$ 、 $D^0 \rightarrow a_0(980)$ 形状因子的首次测量; 正开展 $D^{0(+)} \rightarrow a_0(980)$ 形状因子的改进测量。
- **$D \rightarrow V$ 型衰变**: 完成了 $D^+ \rightarrow \rho^0(770) \mu^+ \nu_\mu$ 绝对分支比测量和 $D \rightarrow K^*$ 形状因子测量; 正开展 $D^+ \rightarrow \omega$ 、 $D \rightarrow \rho$ 、 $D \rightarrow \bar{K}^*$ 形状因子的精确测量。
- **$D \rightarrow A$ 型衰变**: 完成了 $D_s^+ \rightarrow K_1^0/b_1^0 e^+ \nu_e$ 、 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}_1 l^+ \nu_l$ 、 $D^{0(+)} \rightarrow b_1^{-(0)} e^+ \nu_e$ 的首次观测或寻找; 正开展 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}_1$ 形状因子的首次测量和 $D^{0(+)} \rightarrow b_1^{-(0)}$ 分支比的改进测量。
- **其他半轻衰变**: 完成了 $D^{0(+)} \rightarrow K \bar{K} e^+ \nu_e$ 、 $D^{0(+)} \rightarrow K \eta e^+ \nu_e$ 的首次寻找。
- **格点QCD计算**: 取得阶段性进展; 获得 $D \rightarrow K$ 形状因子初步结果, 在国际会议报告; 正开展 $D \rightarrow K^*$ 、 $D \rightarrow \pi$ 、 $D_s \rightarrow \phi$ 形状因子计算。

执行情况

BESIII实验研究进展 → 详见8月7上午曾溢嘉的报告。

理论进展 → 详见8月6上午刘朝峰的报告。

主要内容

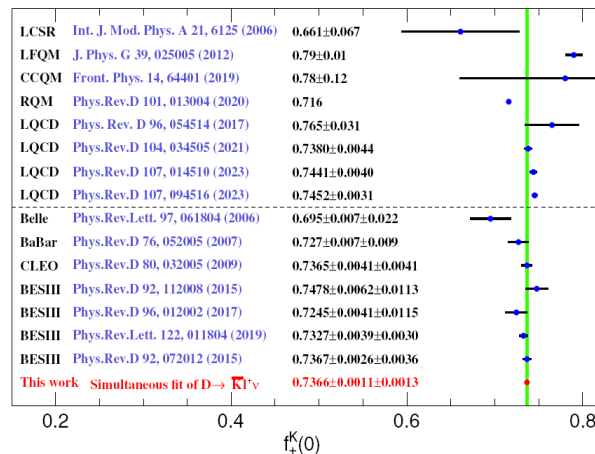
- 总体目标和执行情况
- **BESIII实验研究重要成果或进展**
- 研究团队、人才培养
- 组织管理、合作交流
- 存在的问题及拟采取的措施

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

7.9 fb⁻¹ @3.773 GeV

PRD110(2024)112006

$f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 实验和理论比较



$|V_{cs}|$ 实验测量的比较

CKMFitter	PDG	0.97349 ± 0.00016
HFLAV21	PRD107(2023)052008	0.9701 ± 0.0081
BESIII	PRD92(2015)112008, $D^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e$	0.977 ± 0.008 ± 0.016
BESIII	PRD96(2017)012002, $D^+ \rightarrow K^0 e^+ \nu_e$	0.946 ± 0.005 ± 0.016
BESIII	PRD92(2015)072012, $D^0 \rightarrow K^+ e^- \nu_e$	0.9624 ± 0.0034 ± 0.0062
BESIII	PRL122(2019)011804, $D^0 \rightarrow K^+ \mu^- \nu_\mu$	0.9572 ± 0.0050 ± 0.0057
BESIII	PRD110(2024)112006, $D \rightarrow K l^+ \nu_l$	0.9623 ± 0.0015 ± 0.0044
BESIII Combined	$D_s^+ \rightarrow \tau \nu$	0.9892 ± 0.0060 ± 0.0071
BESIII Combined	$D_s^+ \rightarrow \tau \nu + \mu \nu$	0.9820 ± 0.0052 ± 0.0071

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

$$f_+^{D \rightarrow K}(0) = 0.7171(11)(13)$$

$$|V_{cs}| = 0.9623(15)(17)(40)_{\text{LQCD}}$$

- 首次完成 $D^{0(+)} \rightarrow Kl^+ \nu_l$ 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 $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 、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0.3%、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 $f_+^{D \rightarrow K}(0)$ 比此前最好测量精度改进2倍以上。

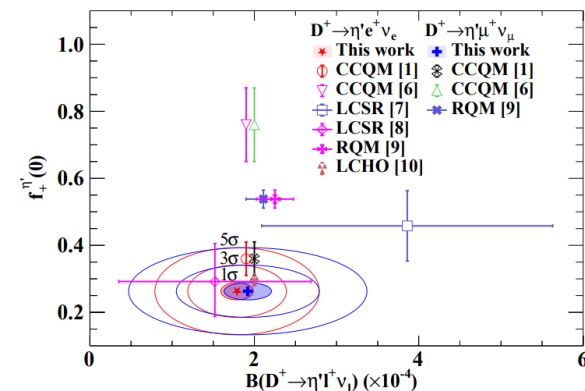
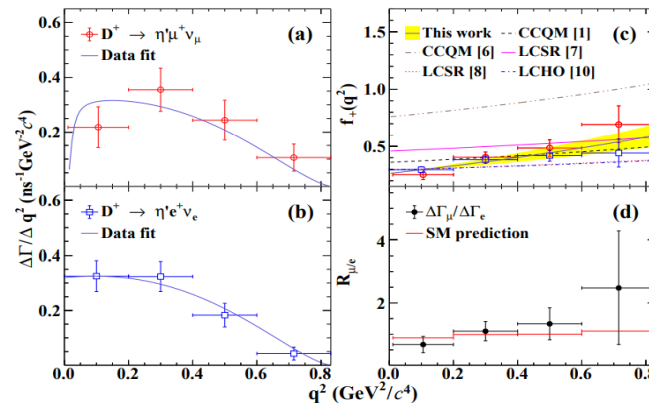
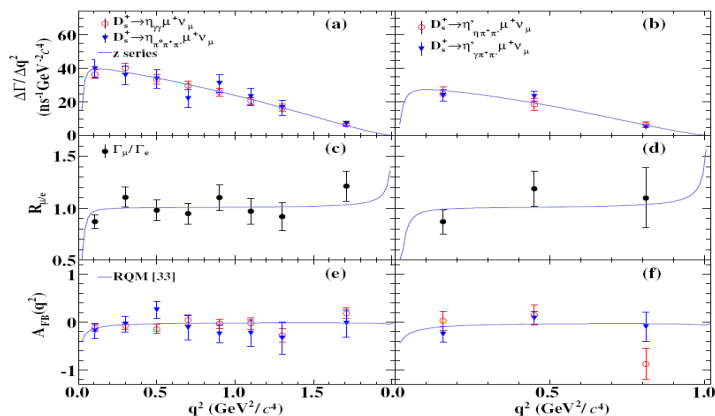
$D \rightarrow P$ 型衰变: $D_{(s)}^+ \rightarrow \eta^{(\prime)} l^+ \nu_l$ ($l = e, \mu$)的研究

7.33 fb⁻¹ @4.13-4.23 GeV

PRL132(2024)091802

20.3 fb⁻¹ @3.773 GeV

PRL134(2025)111801



$$f_+^{D_s \rightarrow \eta}(0)|V_{cs}| = 0.451(10)(08)$$

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

$$f_+^{D \rightarrow \eta'}(0)|V_{cd}| = 0.0592(56)(13)$$

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

$$f_+^{D_s \rightarrow \eta'}(0)|V_{cs}| = 0.506(37)(11)$$

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

$$\phi_P = (39.8 \pm 0.8_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{syst}})^\circ$$

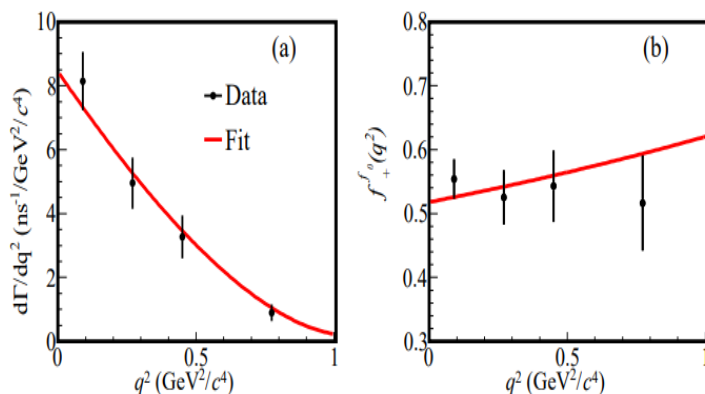
- 首次观测到 $D_s^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$ 信号, 在理论预期30多年后首次在实验上确认;
- 首次抽取了 $D^+ \rightarrow \eta'$ 形状因子; 对 $|V_{cs}|$ 做出了补充测量;
- 在(3.3-20)%精度下验证 μ -e轻子普适性在 $D_{(s)}^+ \rightarrow \eta^{(\prime)} l^+ \nu_l$ 半轻衰变中成立;
- 测得的 $\eta - \eta'$ 混合角有助于探讨 η' 介子的夸克组成。

$D \rightarrow S$ 型半轻衰变

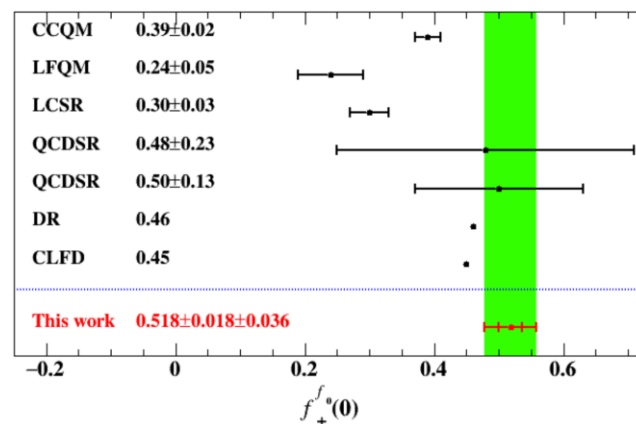
$$D_s^+ \rightarrow f_0(980)e^+\nu_e$$

7.33 fb⁻¹ @4.13-4.23 GeV

PRL132(2024)141901



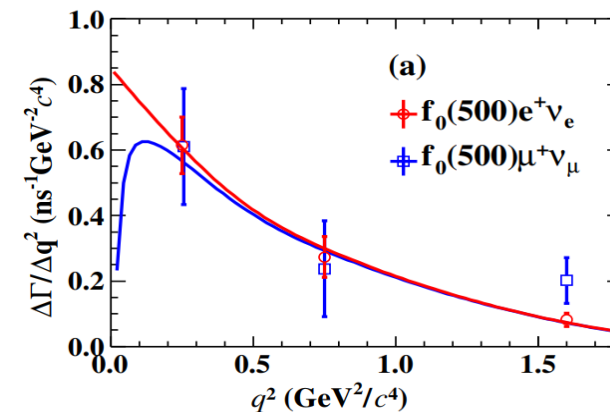
$$f_+^{D_s \rightarrow f_0(980)}(0)|V_{cs}| = 0.504(17)(35)$$



$$D^+ \rightarrow f_0(500)l^+\nu_l$$

2.9 fb⁻¹ @3.773 GeV

PRD110, 092008 (2024)



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

$$R_{\mu/e}^{+,f_0(500)} = 1.14 \pm 0.26$$

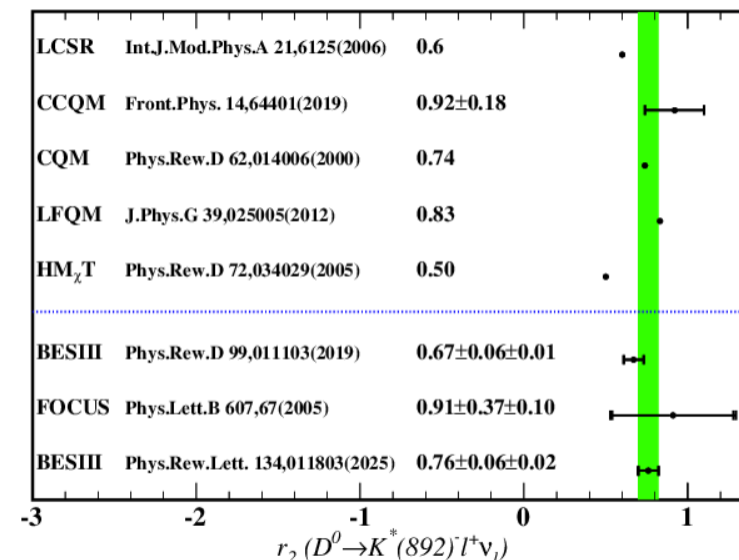
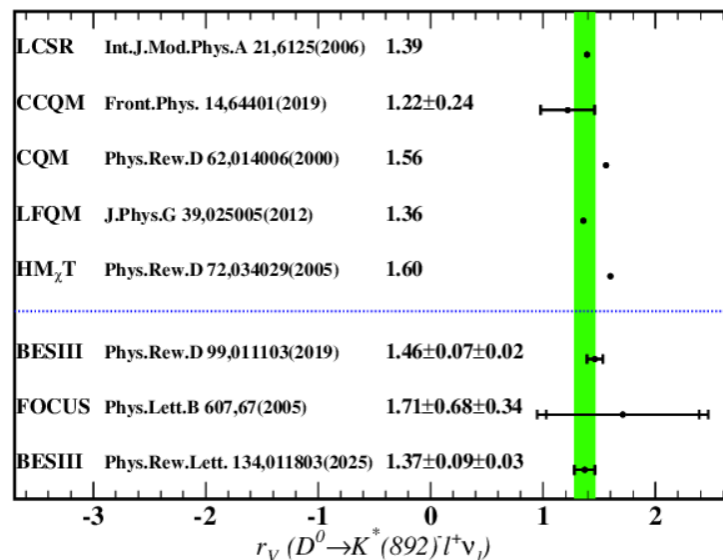
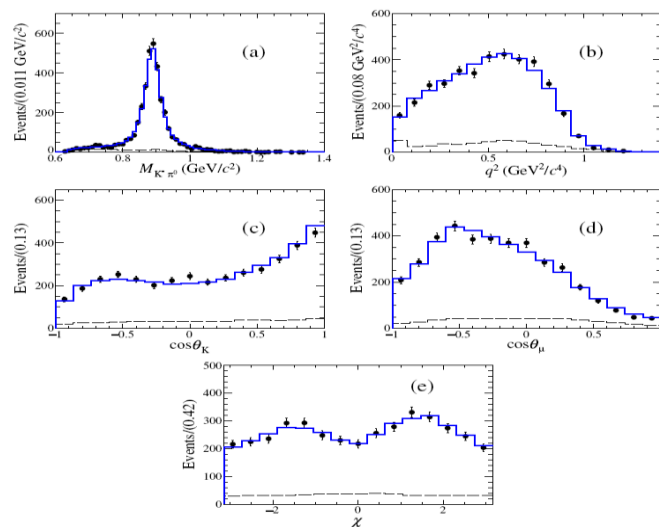
- 首次观测到 $D^+ \rightarrow f_0(500)\mu^+\nu_\mu$;
- 首次抽取了 $D_s^+ \rightarrow f_0(980)$ 和 $D^+ \rightarrow f_0(500)$ 形状因子, 填补了实验研究空白;
- 相关结果支持轻标量介子含有四夸克态成分的理论计算;
- 在23%的精度下检验了 $D \rightarrow S$ 型半轻衰变中的 μ - e 轻子普适性。

$D \rightarrow V$ 型半轻衰变: $D^0 \rightarrow K^- \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ 的研究

$$D^0 \rightarrow K^{*-} \mu^+ \nu_\mu$$

7.9 fb⁻¹ @3.773 GeV

PRL134(2025)111803



$$B(D^0 \rightarrow K^{*-} \mu^+ \nu_\mu) = (2.073 \pm 0.039 \pm 0.032)\%$$

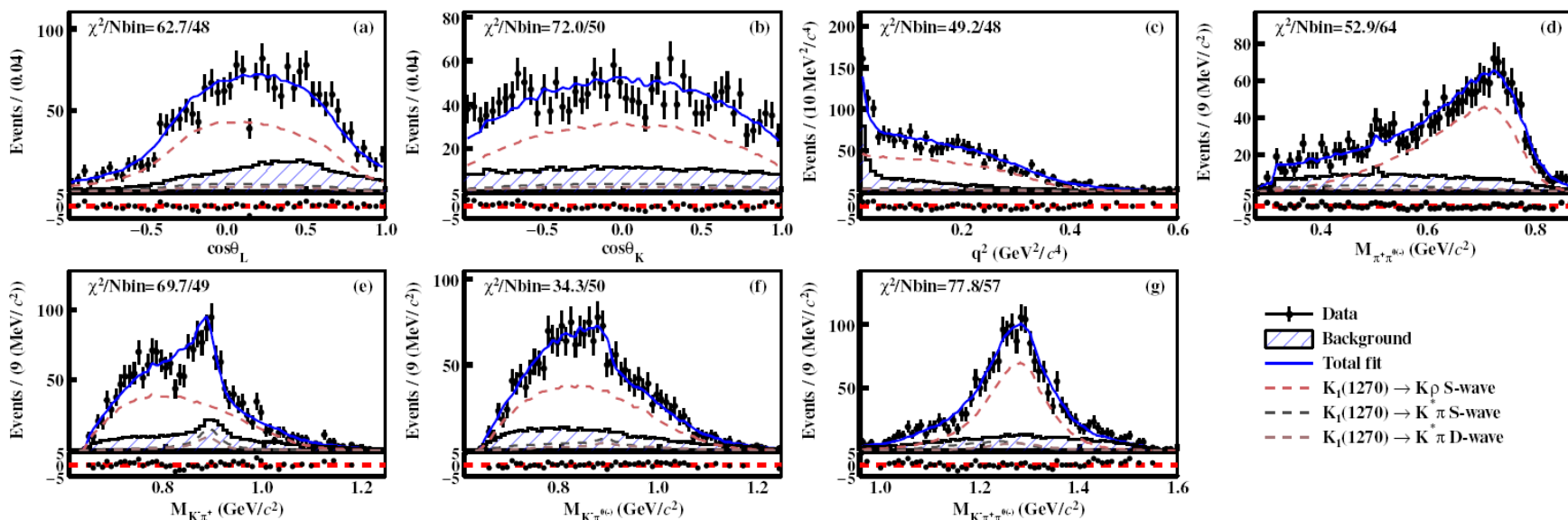
$$R_{\mu/e}^{0,K^*} = 1.020(30)(28)$$

- 精确测量了 $D^0 \rightarrow K^{*-} \mu^+ \nu_\mu$ 分支比, 精度比此前世界平均值改进5倍;
- 研究了 $D^0 \rightarrow K^- \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ 动力学, 精确测量了 $D \rightarrow K^*$ 形状因子;
- 在约4%的精度下检验了 $D \rightarrow V$ 型半轻衰变中的 μ -e 轻子普适性。

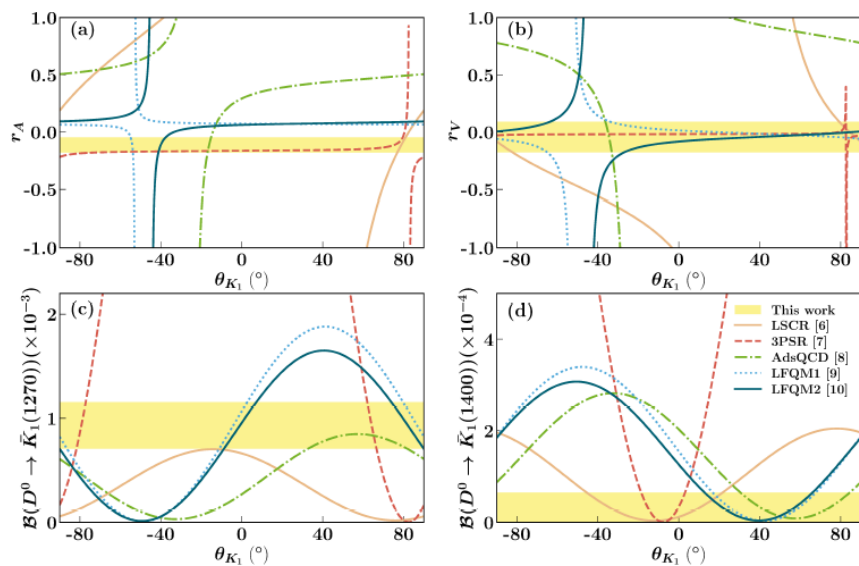
$D \rightarrow A$ 型半轻衰变: $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}_1(1270)/\bar{K}_1(1400)e^+\nu_e$

20.3 fb⁻¹ @3.773 GeV

arXiv:2502.03828, accepted by PRL



Variable	Value
$r_A (\times 10^{-2})$	$-11.2 \pm 1.0 \pm 0.9$
$r_V (\times 10^{-2})$	$-4.3 \pm 1.0 \pm 2.5$
$f_{\rho K^-}^{D^+} (\%)$	$79.3 \pm 2.0 \pm 25.7$
$f_{\pi \bar{K}^*(892)}^{D^+} (\%)$	$10.9 \pm 1.2 \pm 3.0$
$f_{\bar{K}_1(1400)}^{D^+} (\%)$	< 5
$f_{\rho K^-}^{D^0} (\%)$	$71.8 \pm 2.3 \pm 23.9$
$f_{\pi \bar{K}^*(892)}^{D^0} (\%)$	$19.5 \pm 1.9 \pm 5.2$
$f_{\bar{K}_1(1400)}^{D^0} (\%)$	< 9
$m_{K_1(1270)} (\text{MeV}/c^2)$	$1271 \pm 3 \pm 7$
$\Gamma_{K_1(1270)} (\text{MeV})$	$168 \pm 10 \pm 20$



- 首次抽取到 $D \rightarrow A$ 半轻跃迁形状因子;
- 以世界最高精度测定 $D \rightarrow \bar{K}_1(1270)e^+\nu_e$ 分支比;
- 首次寻找 $D \rightarrow \bar{K}_1(1400)e^+\nu_e$, 在90%置信度下设定了其分支比上限;
- 有助于深入探讨轴矢量介子的性质、约束 K_1 混合角 $\rightarrow$ 有效约束末态包含 K_1 的 τ 、D、B 等相关的理论计算。

$D \rightarrow A$ 型半轻衰变

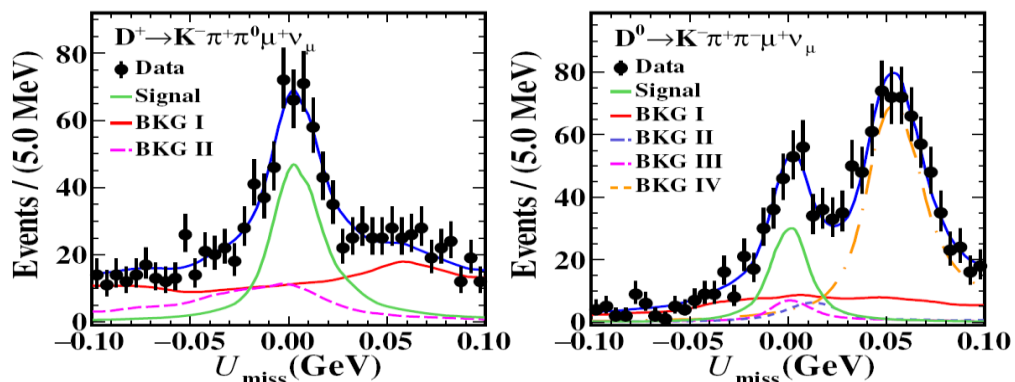
$$D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}_1(1270)\mu^+\nu_\mu$$

$$D^{0(+)} \rightarrow b_1^{-(0)}(1235)e^+\nu_e$$

PRD111(2025)L071101

7.9 fb⁻¹ @3.773 GeV

arXiv:2407.20551



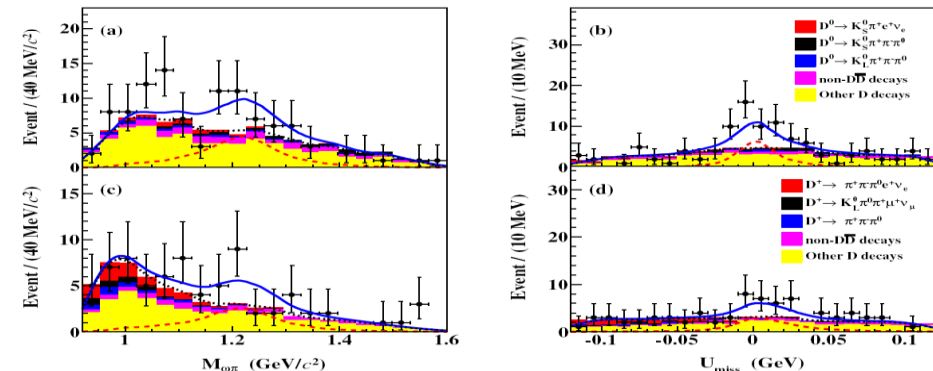
$$\mathcal{B}_{\text{SL}}^+ \mathcal{B}_{K_1}^0 = (10.92 \pm 0.91^{+0.82}_{-1.26}) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}_{\text{SL}}^0 \mathcal{B}_{K_1}^- = (2.62 \pm 0.38^{+0.17}_{-0.29}) \times 10^{-4}$$

$$R_{\mu/e}^{0,K_1} = 1.03(14)_{(15)}^{(11)}$$

$$R_{\mu/e}^{+,K_1} = 0.73(13)_{(13)}^{(08)}$$

- 首次观测到 $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}_1\mu^+\nu_\mu$;
- 在约20%的精度下检验了 $D \rightarrow A$ 型半轻衰变中 μ - e 轻子普适性成立。



$$B_{D^0 \rightarrow b_1^- e^+ \nu} B_{b_1^- \rightarrow \omega \pi^-} = (0.72 \pm 0.18^{+0.06}_{-0.08}) \times 10^{-4}$$

$$B_{D^+ \rightarrow b_1^0 e^+ \nu} B_{b_1^0 \rightarrow \omega \pi^0} = (1.16 \pm 0.44 \pm 0.16) \times 10^{-4}$$

- 首次观测到卡比玻压制型半轻衰变 $D^{0(+)} \rightarrow b_1^{-(0)} e^+ \nu_e$;
- 有助于理解 $\omega\pi$ 是否是 b_1 主导衰变模式的长期疑难。

发表文章列表

	No.	题目	期刊号
已发表 BESIII 文章	1	Observation of $D^+ \rightarrow K^{-1}(1270)0\mu + \nu\mu$ and $D^0 \rightarrow K1(1270)^- \mu + \nu\mu$	PRD111, L071101 (2025)
	2	Study of the light scalar $a_0(980)$ through the decay $D^0 \rightarrow a_0(980)^- e + \nu e$	PRD111, L091501 (2025)
	3	Observation of $D^+ \rightarrow \eta' \mu + \nu\mu$ and First Study of $D^+ \rightarrow \eta' \ell + \nu\ell$ Decay Dynamics	PRL134, 111801 (2025)
	4	Analysis of $D^0(+) \rightarrow K\pi^+\pi^-(0)e + \nu$	arXiv:2503.02196, PRL accepted
	5	Test of Lepton Universality and Measurement of the Form Factors of $D^0 \rightarrow K(892)^* \mu + \nu\mu$	PRL134, 011803 (2025)
	6	Study of light scalar mesons through $D^+ s \rightarrow \pi^0 \pi^0 e + \nu e$ and $K^0 S K^0 S e + \nu e$ decays	PRD105, L031101 (2022)
	7	Search for the semileptonic decay $D_s \rightarrow \pi^0 e + \nu e$	PRD106,112004 (2022)
	8	Precision measurements of $D^+ s \rightarrow \eta e + \nu e$ and $D^+ s \rightarrow \eta' e + \nu e$	PRD108, 092003 (2023)
	9	Search for the semileptonic decays $D^+ s \rightarrow K1(1270)^0 e + \nu e$ and $D^+ s \rightarrow b1(1235)^0 e + \nu e$	PRD108, 112002 (2023)
	10	Observation of $D^+ s \rightarrow \eta' \mu + \nu\mu$, Precision Test of Lepton Flavor Universality with $D^+ s \rightarrow \eta'(\ell) \ell + \nu\ell$, and First Measurements of $D^+ s \rightarrow \eta'(\ell) \mu + \nu\mu$ Decay Dynamics	PRL132, 091802 (2024)
	11	Study of the $f_0(980)$ and $f_0(500)$ Scalar Mesons through the Decay $D^+ s \rightarrow \pi^+ \pi^0 e + \nu e$	PRL132, 141901 (2024)
	12	Observation of $D^+ \rightarrow f_0(500) \mu + \nu\mu$ and study of $D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \ell + \nu\ell$ decay dynamics	PRD110, 092008 (2024)
	13	Observation of the semileptonic decays $D^0 \rightarrow K^0 S \pi^+ \pi^0 e + \nu e$ and $D^+ \rightarrow K^0 S \pi^+ \pi^0 e + \nu e$	JHEP10, 199 (2024)
	14	Improved measurements of $D^0 \rightarrow K \ell^+ \nu\ell$ and $D^+ \rightarrow K^0 \bar{\ell} \ell + \nu\ell$	PRD110, 112006 (2024)
	15	Analysis of the dynamics of the decay $D^+ \rightarrow K^0 S \pi^0 e + \nu e$	JHEP10, 199 (2024)
	16	Search for $D^0 \rightarrow K \eta e + \nu e$, $D^+ \rightarrow K^0 S \eta e + \nu e$ and $D^+ \rightarrow \eta \eta e + \nu e$ decays	PRD110, 092008 (2024)
理论 文章	17	RI/(S) MOM renormalizations of overlap quark bilinears with different levels	PRD108, 054506 (2023)
	18	Charm physics with overlap fermions on 2+1-flavor domain wall fermion configurations	CPC48, 123104 (2023)
	19	LQCD calculation of D_s^* radiative decay with (2+1)-flavor Wilson-clover ensembles	PRD109, 074511 (2024)

投稿文章或其它研究列表

	No.	题目	分析状态
已投稿 BESIII 文章	1	Observation of $D0 \rightarrow b1(1235) - e + \nu$ and evidence for $D+ \rightarrow b1(1235)0e + \nu$	arXiv:2407.20551
	2	Analysis of $D+ \rightarrow \eta l + \nu$ ($l = e$ and μ)	arXiv:2506.02521
	3	Analysis of $D+ \rightarrow K_S^0 l + \nu$ ($l = e$ and μ)	arXiv:2506.05761
	4	Analysis of $D0 \rightarrow K_S^0 \mu + \nu$	arXiv:2504.10867
正在 进行的 分析	5	Observation and dynamics study of $D_s \rightarrow f_0(980) \mu + \nu$	MEMO review, BAM-00662
	6	Study of $D_s \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 e + \nu$	MEMO review, BAM-00783
	7	Combined analysis of $D0(+) \rightarrow \pi^+ e + \nu$ and $D0(+) \rightarrow \pi^- \mu + \nu$	MEMO review, BAM-00804
	8	Study of the decay $D0 \rightarrow K^- \pi^0 e + \nu$	MEMO review, BAM-00829
	9	Search for $D+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta e + \nu$	MEMO review, BAM-00911
	10	Study of $D0, + \rightarrow K^- l + \nu$ ($l = e$ or μ)	MEMO review, BAM-00931
	11	Search for $D_s \rightarrow f_1(1285) e + \nu_e$ and $D_s \rightarrow f_1(1420) e + \nu_e$	MEMO review, BAM-00938
	12	Search for $D0(+) \rightarrow \omega K^+ e + \nu$	MEMO review, BAM-00942
	13	Study of the decay $D+ \rightarrow K^- \pi^+ e + \nu$	MEMO review, BAM-00962
	14	Measurements of BF's of $D0(+) \rightarrow \mu + X$	MEMO review, BAM-00980
	15	Measurements of BF's of $D0(+) \rightarrow K^+ l + \nu$ and $e + \nu$	MEMO review, BAM-01026
	16	Study of $D0(+) \rightarrow \rho^0 l + \nu$	Internal report
	17	Study of the decay $D+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 e + \nu$	Internal report

主要内容

- 总体目标和执行情况
- 重要成果或进展
- **研究团队、人才培养**
- 组织管理、合作交流
- 存在的问题及拟采取的措施

研究团队、人才培养

■ 研究团队：

马海龙、刘怀民、刘朝峰

■ 人才培养：

10名以上研究生开展本课题研究；毕业研究生6名。

■ 协作：

1. 本项目其他课题承担者及合作组其他成员完成了部分半轻衰变的研究；
2. 确保BESIII在3.773 GeV数据采集期间、特别是疫情期间的谱仪值班；以及新数据质量检查、系统误差研究、单标记 $D^{0(+)}$ 介子产额的提取。

主要内容

- 总体目标和执行情况
- 重要成果或进展
- 研究团队、人才培养
- **组织管理、合作交流**
- 存在的问题及拟采取的措施

组织管理、合作交流

- **组织管理：**每周二和每周五上午课题讨论。
- **BESIII相关的会议：**每周二下午的粲物理组周例会；每周五下午的BESIII物理软件周例会；每周一上午的数据质量检查会；以及每年BESIII春季、秋季物理研讨会、及夏季、冬季合作组会。
- **合作：**发挥大科学装置平台优势，与多所高校开展了研究生联合培养，总数>6名。
- **国内外会议报告约20次：**(PIC、LQCD、Charm等；BESIII粲强子物理研讨会、高能物理大会、重味物理和CP破坏研讨会、理论与实验联合研讨会、格点QCD会议等。
- **其他：**马海龙参加国际重味物理组HFLAV在粲介子纯轻和半轻方面的review工作。

主要内容

- 总体目标和执行情况
- 重要成果或进展
- 研究团队、人才培养
- 组织管理、合作交流
- **存在的问题及拟采取的措施**

存在的问题及拟采取的措施

- 总体上：**没有影响完成课题既定指标的困难。**
- 前期，因疫情影响差旅费相对偏少，因3.773 GeV新数据采集状态投入研究生相对偏少。
- 部分研究进展略慢：**加强沟通与合作，力争尽快完成。**

总结

- **课题研究总体进展顺利，取得一些重要物理成果；实验+理论共发表论文近20篇，包括5篇PRL；部分结果已达到预期目标。**
 - 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 (好于0.8%)；
 - 以世界最高精度、首次或精确抽取了粲介子 $\rightarrow$ 多个强子形状因子；
 - $D \rightarrow K$ 形状因子和 $|V_{cs}|$ 测量精度分别达到0.3%和0.5%。
- **进一步查漏补缺、推出更多粲介子半轻衰变物理成果。**

谢谢!

粲介子半轻衰变 → 形状因子

粲介子半轻衰变是精密检验标准模型的理想窗口之一

理论上，格点量子色动力学(QCD)、QCD求和规则和夸克模型等方法能够计算 $f_+^h(0)$

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

夸克间强作用: 形状因子 $f_+^h(0)$: 夸克间弱作用: CKM矩阵元 $|V_{cq}|$

理论上，格点量子色动力学(QCD)、QCD求和规则和夸克模型等方法能够计算 $f_+^h(0)$

实验上，联合标准模型全局拟合给出的 $|V_{cq}|$ (误差可忽略)，能够精密测量 $f_+^h(0)$

精密测量 $f_+^h(0)$ ，精确检验格点QCD理论等计算，是寻找粲衰变中新物理迹象的一个重要途径

粲介子半轻衰变 → 检验轻子普适性

轻子味道普适性是标准模型的一个基本假定

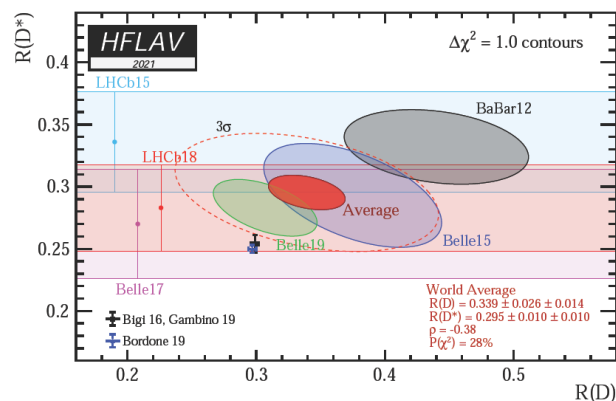
精确检验轻子味道普适性是探索新物理的重要途径之一

重味 B 介子物理:

$$R(D^{(*)}) = \frac{B(B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu)}{B(B \rightarrow D^{(*)} l \nu)}$$

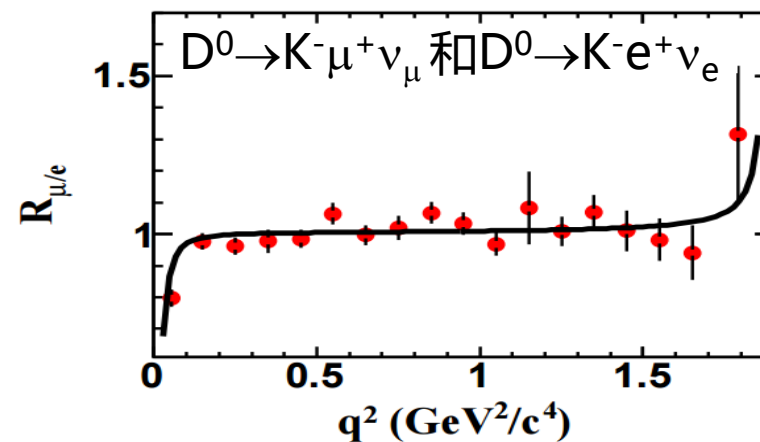
$$R_{\mu/e} = \frac{\Gamma(D \rightarrow h \mu^+ \nu_\mu)}{\Gamma(D \rightarrow h e^+ \nu_e)} \quad \begin{array}{l} \text{理论误差} \\ < 0.2\% \end{array}$$

偏离标准模型预期 3.4σ



究竟是否真实的物理效应?

需综合研究各类重介子、尤其是处于微扰和非微扰QCD过渡能区的含粲强子的各类含轻衰变

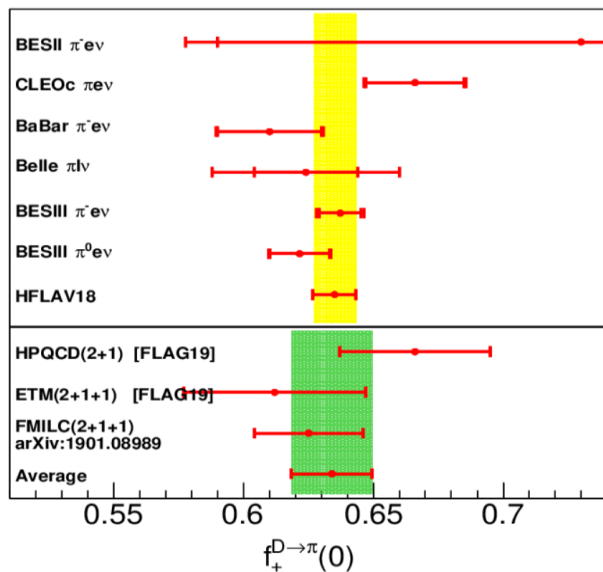


系统、精密地测量不同代半轻衰变分支比之比 $R_{\mu/e}$, 有助于澄清粲夸克衰变中是否存在轻子普适性破坏迹象

本项目之前的研究状态

本项目之前，使用已有的数据，BESIII已发表粲介子半轻衰变论文30多篇，包括9篇PRL

□ 半轻衰变形状因子：
实验测量和理论计算
精度普遍有待提高



□ 改进测量CKM矩阵元
 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

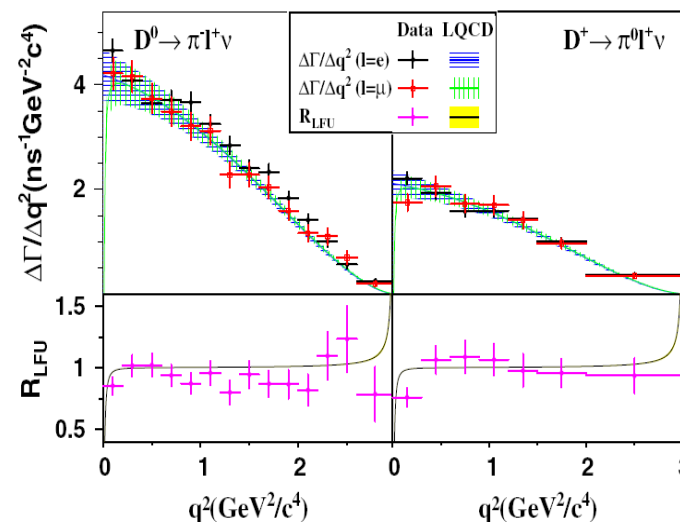
第一行精度0.06%

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 = 0.9985 \pm 0.0006$$

第二行精度2.2%

$$|V_{cd}|^2 + |V_{cs}|^2 + |V_{cb}|^2 = 1.025 \pm 0.022$$

□ q^2 依赖的形状因子，检验
格点QCD和轻子普适性



BESIII上20 fb⁻¹更大的数据样本为系统精密研究粲介子半轻衰变，
精密检验标准模型，寻找新物理迹象提供了难得历史机遇

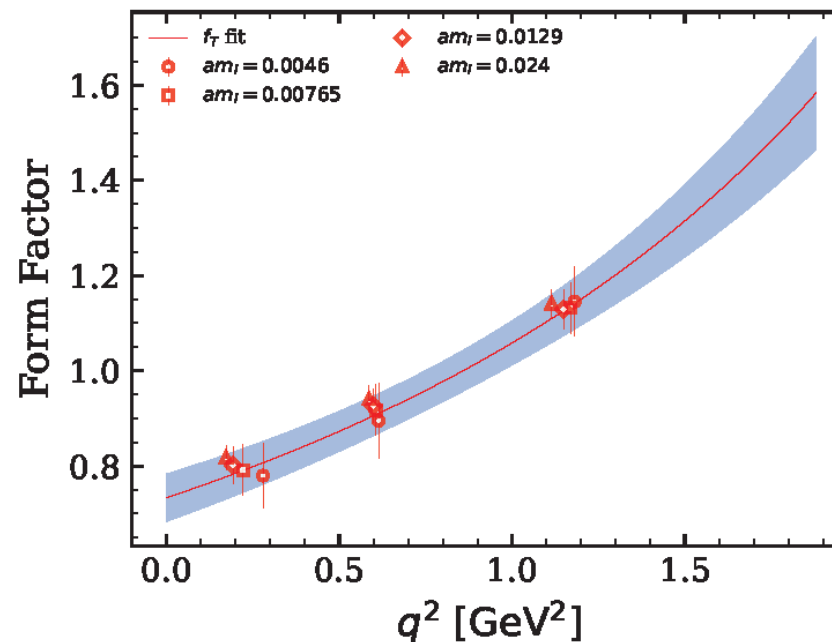
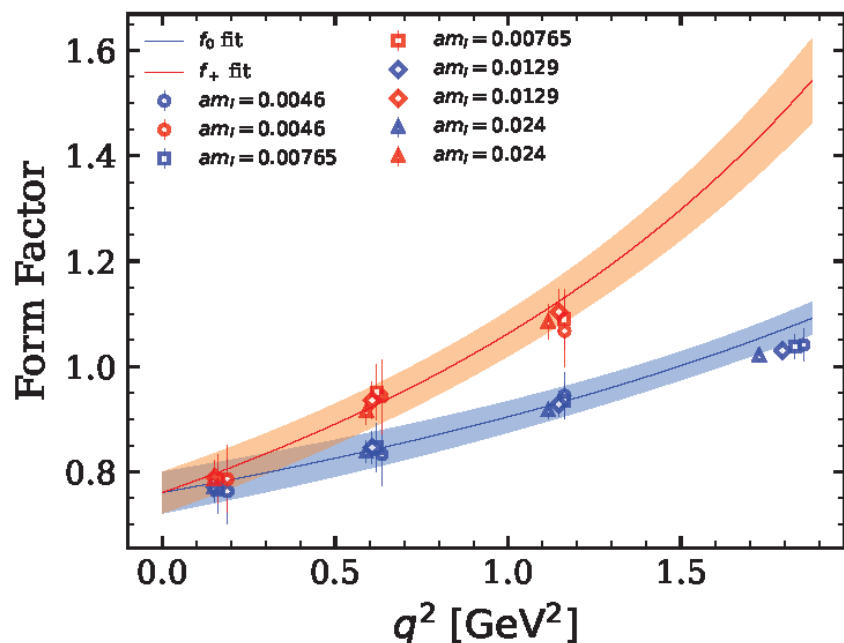
$D \rightarrow K$ 形状因子的格点QCD计算

$D \rightarrow Klv$ 形状因子 $f_+(q^2)$ 和 $f_0(q^2)$

- 一个格距、一个海夸克质量点处的结果
- 价夸克: overlap fermions
- 重整化常数 [Y. Bi et al., PRD108 (2023) 054506]
- 正在完成另两个海夸克质量点处的计算: $m_\pi^{\text{sea}} \approx 302 \text{ MeV}$ 、 412 MeV
- z-expansion, 内插/外推到加夸克质量物理点

$a^{-1} \text{ (GeV)}$	Label	$am_l^{\text{sea}}/am_s^{\text{sea}}$	$L^3 \times T$	$N_{\text{conf}} \times N_{\text{src}}$
2.383(9)	f004	0.004/0.03	$32^3 \times 64$	628×1
$(m_\pi^{\text{sea}} \approx 360 \text{ MeV})$	f006	0.006/0.03	$32^3 \times 64$	42×32
	f008	0.008/0.03	$32^3 \times 64$	49×16

RBC-UKQCD, 2+1味组态



$$f_+(q^2 = 0) = f_0(0) = 0.760(39), \quad f_T(0) = 0.733(50)$$

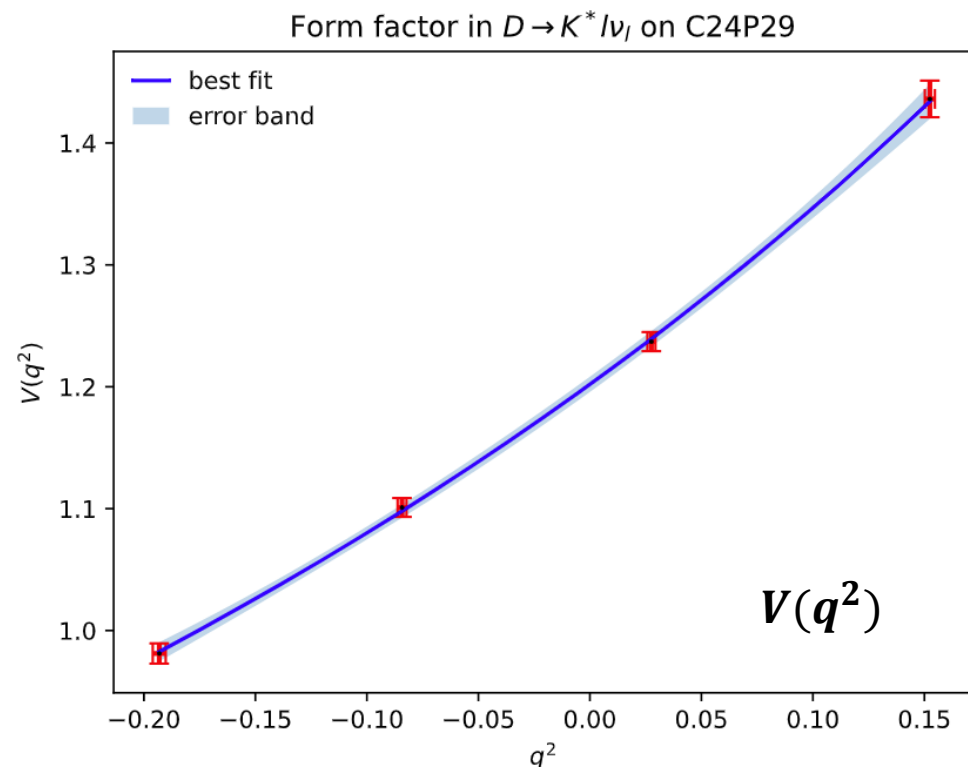
沈庭弘 et al., PoS (LATTICE2024) 294

$D \rightarrow K^*$ 半轻过程

樊高峰 et al., in progress

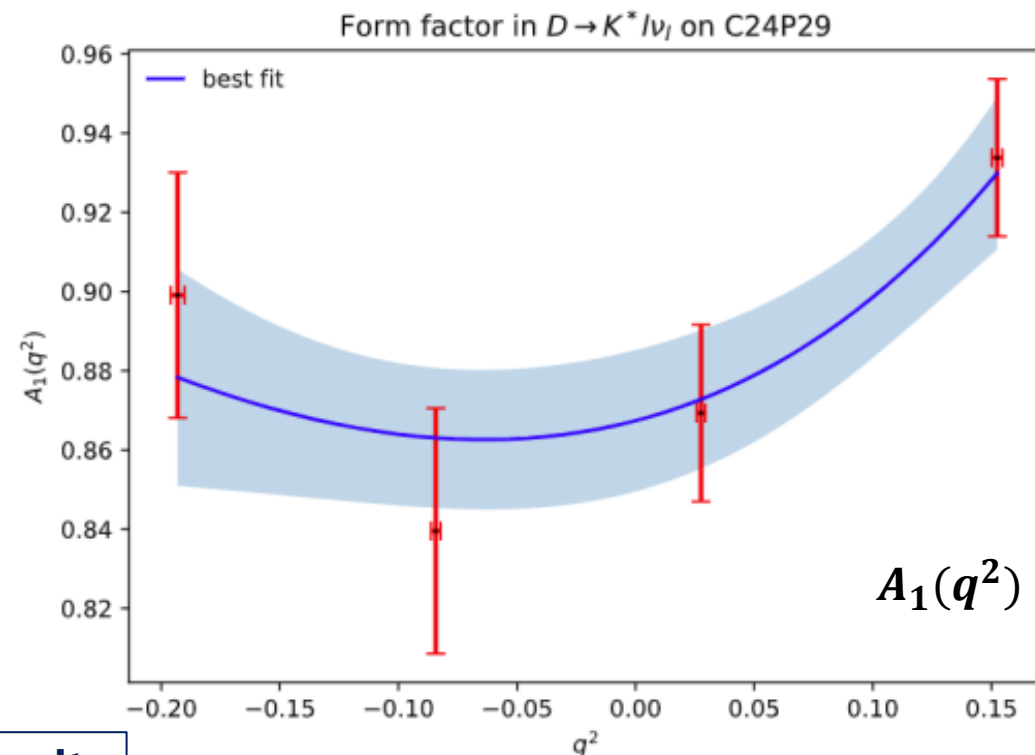
2+1味组态, clover fermions

$$\begin{aligned} & \langle \phi(p', \epsilon) | V^\mu - A^\mu | D_s(p) \rangle \\ &= \frac{2i\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}}{M_{D_s} + M_\phi} \epsilon_\nu^* p'_\alpha p_\beta V(q^2) - (M_{D_s} + M_\phi) \epsilon^{*\mu} A_1(q^2) \\ &+ \frac{\epsilon^* \cdot q}{M_{D_s} + M_\phi} (p + p')^\mu A_2(q^2) + 2M_\phi \frac{\epsilon^* \cdot q}{q^2} q^\mu A_3(q^2) \\ &- 2M_\phi \frac{\epsilon^* \cdot q}{q^2} q^\mu A_0(q^2). \end{aligned}$$



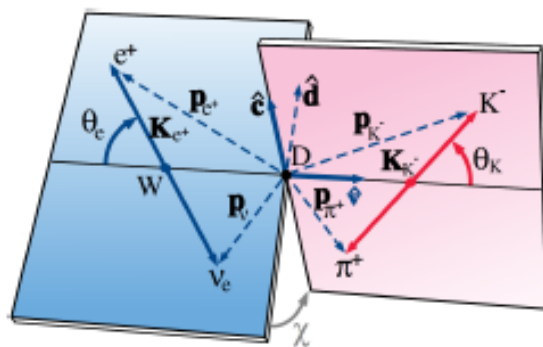
Label	a/fm	$L^3 \times T$	m_π/MeV	$N_{\text{conf}} \times N_{\text{src}}$
C24P29	0.1053	$24^3 \times 72$	292.7(1.2)	450×2

- D静止, 改变 K^* 的三动量 $\vec{p} = \frac{2\pi}{La} (k_x, k_y, k_z)$
- $(k_x, k_y, k_z) = (1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1), (200)$
- (轴) 矢量流重正化常数 [CLQCD, arXiv:2408.03548]



Preliminary results

Studies of $D \rightarrow V e^+ \nu_e$ dynamics



- $m^2 = (p_{\pi^+} + p_{K^-})^2$

- $\cos(\theta_K) = \frac{\hat{D} \cdot \mathbf{K}_{K^-}}{|\mathbf{K}_{K^-}|}$

- $\cos(\chi) = \hat{e} \cdot \hat{d}$

- $q^2 = (p_{e^+} + p_{\nu_e})^2$

- $\cos(\theta_e) = -\frac{\hat{D} \cdot \mathbf{K}_{e^+}}{|\mathbf{K}_{e^+}|}$

- $\sin(\chi) = (\hat{e} \times \hat{d}) \cdot \hat{d}$

Decay rate depend on 5 variables and 3 form factors

$$d^5\Gamma = \frac{G_F^2 |V_{cs}|^2}{(4\pi)^6 m_D^2} X \beta \mathcal{I}(m^2, q^2, \theta_K, \theta_e, \chi) dm^2 dq^2 d\cos(\theta_K) d\cos(\theta_e) d\chi$$

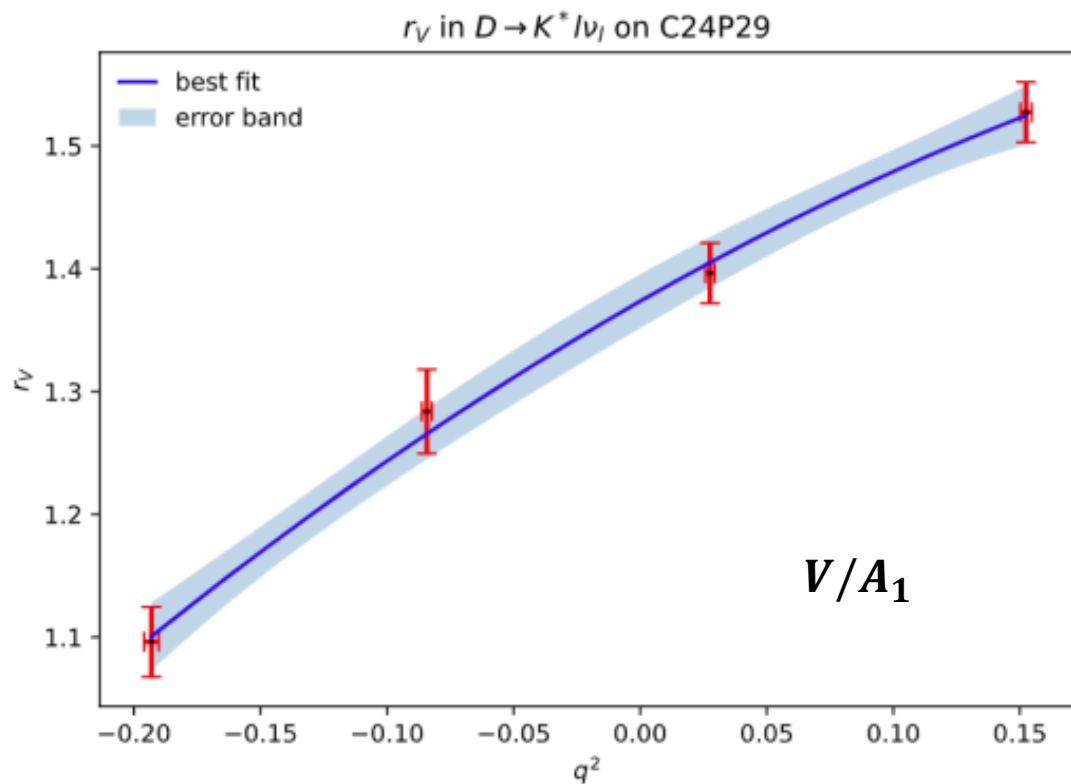
- $X = p_{K\pi} m_D$, $p_{K\pi}$ is the momentum of the $K\pi$ system in the D rest frame
- $\beta = 2p^*/m$, p^* is the breakup momentum of the $K\pi$ system in its rest frame
- $\mathcal{I}$ can be expressed in terms of helicity amplitudes $H_{0,\pm}$:

$$H_0(q^2) = \frac{1}{2m_q} \left[(m_D^2 - m^2 - q^2)(m_D + m) A_1(q^2) - 4 \frac{m_D^2 p_{K\pi}^2}{m_D + m} A_2(q^2) \right]$$

$$H_{\pm}(q^2) = (m_D + m) A_1(q^2) \mp \frac{2m_D p_{K\pi}}{m_D + m} V(q^2)$$

- Vector form factor: $V(q^2) = \frac{V(0)}{1 - q^2/m_V^2}$; or: FF ratio $r_V = V(0)/A_1(0)$

- Axial-vector form factor: $A_1(q^2) = \frac{A_1(0)}{1 - q^2/m_A^2}$, $A_2(q^2) = \frac{A_2(0)}{1 - q^2/m_A^2}$; or: FF ratio $r_2 = A_2(0)/A_1(0)$

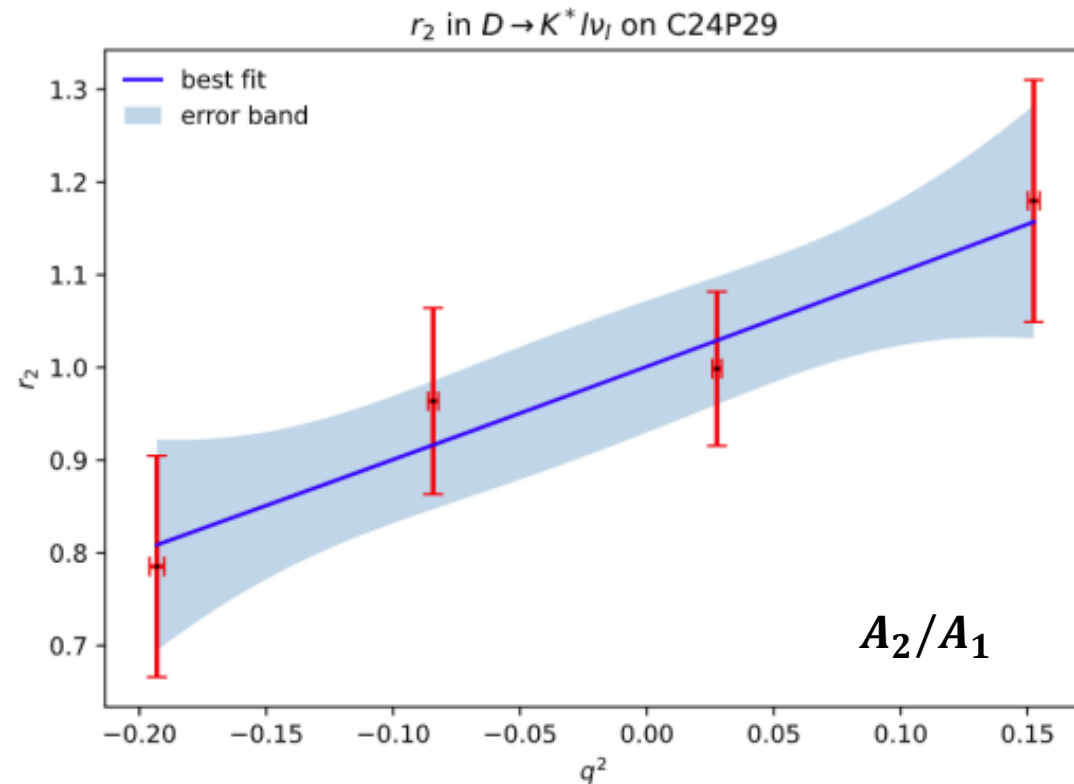


$$r_V = 1.374(22)$$

BESIII, arXiv:2403.10877

$$D^0 \rightarrow K^{*-} \mu^+ \nu_\mu$$

- $r_V = V(0)/A_1(0) = 1.37(9)(3)$
- $r_2 = A_2(0)/A_1(0) = 0.76(6)(2)$



$$r_2 = 1.001(71)$$

BESIII, arXiv:2412.10803

$$D^0 \rightarrow K^{*-} e^+ \nu_e$$

- $r_V = V(0)/A_1(0) = 1.48(5)(2)$
- $r_2 = A_2(0)/A_1(0) = 0.70(4)(2)$