

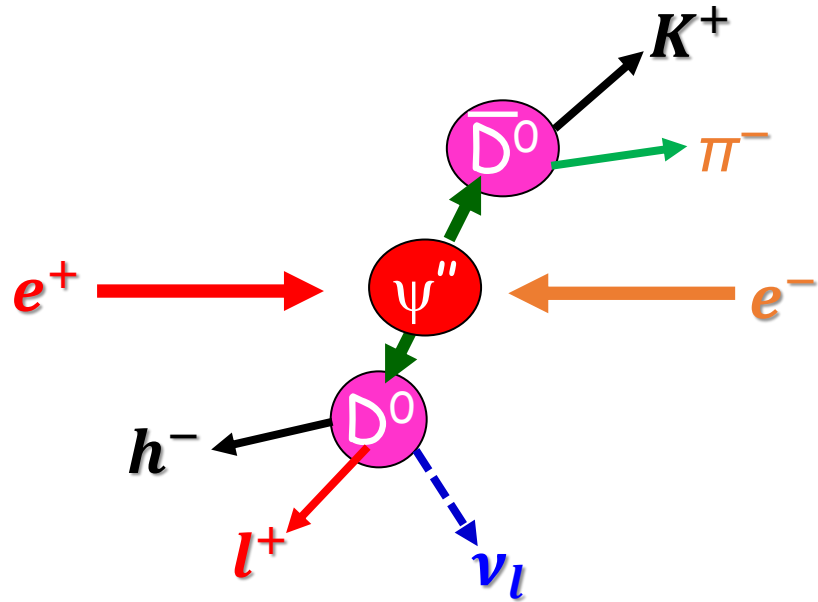
# BESIII上粲介子半轻衰变研究进展

报告人：马海龙（高能所）

中国科学院高能物理研究所

BESIII粲强子物理研讨会，2024年5月12日，河南省郑州市

# 研究内容

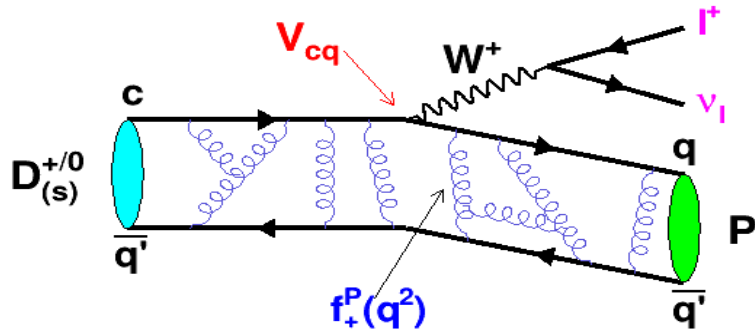


使用BESIII更高统计量的 $D^0$ 、 $D^+$ 和 $D_s^+$ 介子样本, 系统、精密地研究粲介子各类电子和 $\mu$ 子半轻衰变

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

**P:** 赝标量介子, 如 $K$ 、 $\pi$ 、 $\eta$ 、 $\eta'$   
**V:** 矢量介子, 如 $K^*$ 、 $\rho$ 、 $\phi$   
**S:** 标量介子, 如 $a_0(980)$ 或 $f_0(980)$   
**A:** 轴矢量介子, 如 $K_1(1270)$

# Semileptonic decays of charmed mesons



Ideal bridge to access the strong and weak effects between quarks

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

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

CKM matrix elements: fundamental Standard Model (SM) parameters describing the mixing of quark fields due to weak interaction

- $|V_{cs}|$  and  $|V_{cd}|$  → Test CKM matrix unitarity
- Hadronic form factors → Calibrate LQCD calculations
- Branching fraction ratios → Test lepton flavor universality

Search for new physics beyond the SM

# 研究目标

- 以世界最高精度测量粲介子卡比玻允许和卡比玻压制型半轻衰变形状因子，预期 $D \rightarrow K$ 和 $D \rightarrow \pi$ 形状因子精度分别达到0.5%和1.0%水平；首次抽取末态含标量和轴矢量介子半轻衰变的形状因子
- 实现对粲介子遍举 $\mu$ 子半轻衰变的较全面观测，建立较完善的遍举 $\mu$ 子半轻衰变图像；以世界最高精度检验 $\mu$ -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

# 国内外研究现状

e <sup>+</sup> e <sup>-</sup> 质心能量 (GeV)	采集年份	亮度 (fb <sup>-1</sup> )	单标记粲介子产额		
			D <sup>0</sup>	D <sup>+</sup>	D <sub>s</sub> <sup>+</sup>
3.773	2010-2011	2.93	2.5M	1.7M	
4.128-4.226	2014-2019	7.33			0.8M

## 实验方面:

3.773 GeV数据:

□ 2022年: 2.9 → 8 fb<sup>-1</sup>

□ 2023年: 8 → 16 fb<sup>-1</sup>

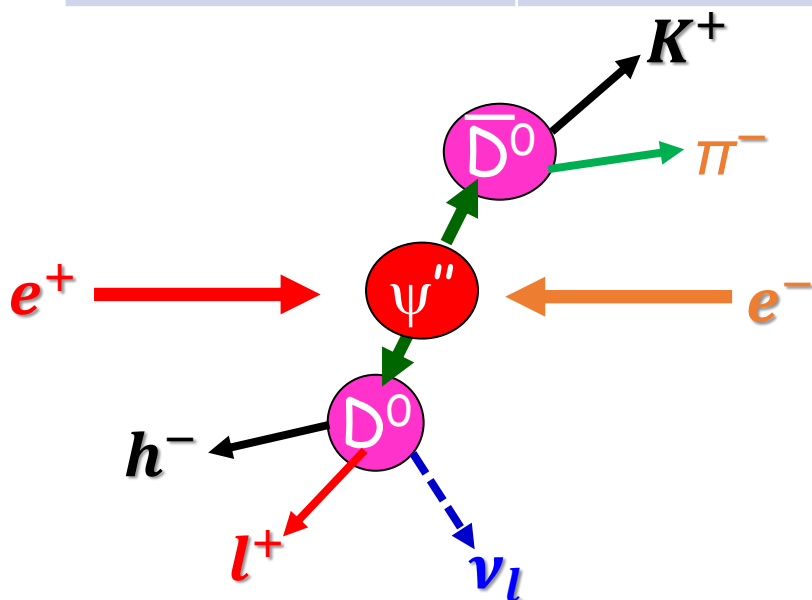
□ 2024年: 16 → 20 fb<sup>-1</sup>

## LQCD (2011 → 2022):

□ f<sub>+</sub><sup>K</sup>(0): 2.4 → 0.4%

□ f<sub>+</sub><sup>π</sup>(0): 4.4 → 0.8%

process	collaboration	f <sub>0</sub> (0)	f <sub>0</sub> (q <sub>max</sub> <sup>2</sup> )	f <sub>+</sub> (q <sub>max</sub> <sup>2</sup> )
D → π	FNAL/MILC	0.6300(51)	1.2783(61)	3.119(57)
D → π	ETMC	17	0.612(35)	1.134(49)
D → K	FNAL/MILC	0.7452(31)	1.0240(21)	1.451(17)
D → K	HPQCD	22	0.7441(40)	1.0136(36)
D → K	HPQCD	21	0.7380(40)	1.0158(41)
D → K	ETMC	17	0.765(31)	0.979(19)
D <sub>s</sub> → K	FNAL/MILC	0.6307(20)	0.9843(18)	1.576(13)



与Belle(II)和LHCb实验相比, BESIII粲物理研究特点:

- 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

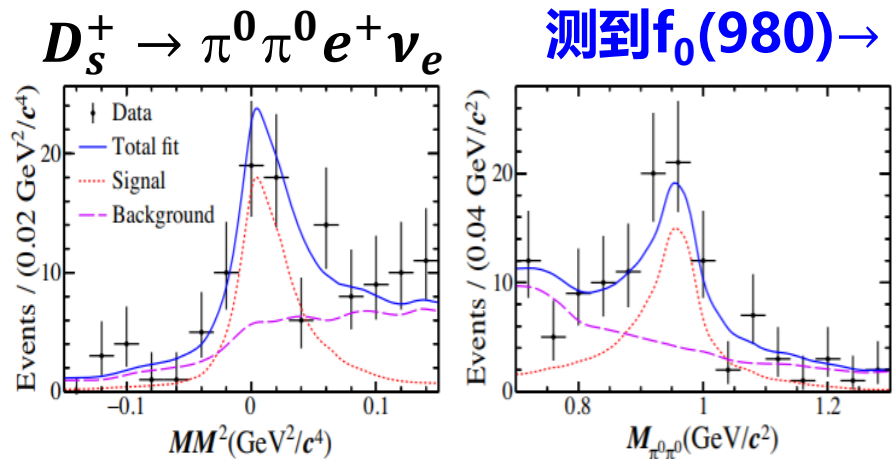
反冲观测粒子四动量, “全重建” 中微子:

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

**BESIII在粲介子半轻衰变研究方面有显著优势!**

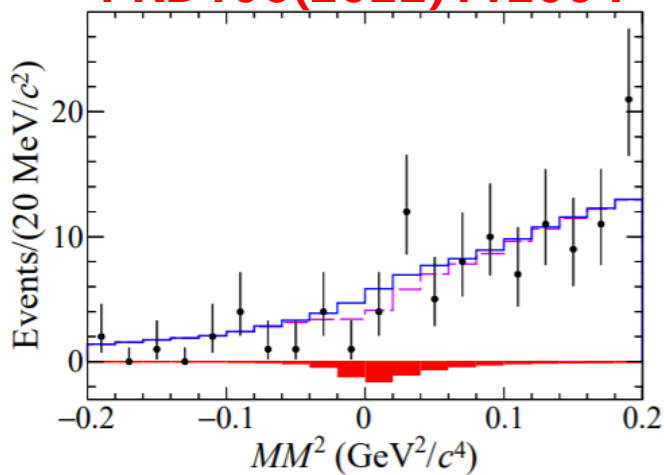
# $D_s^+$ 介子半轻衰变

PRD105(2022)L031101 首次在半轻过程中观测到  $f_0(980) \rightarrow \pi^0 \pi^0$



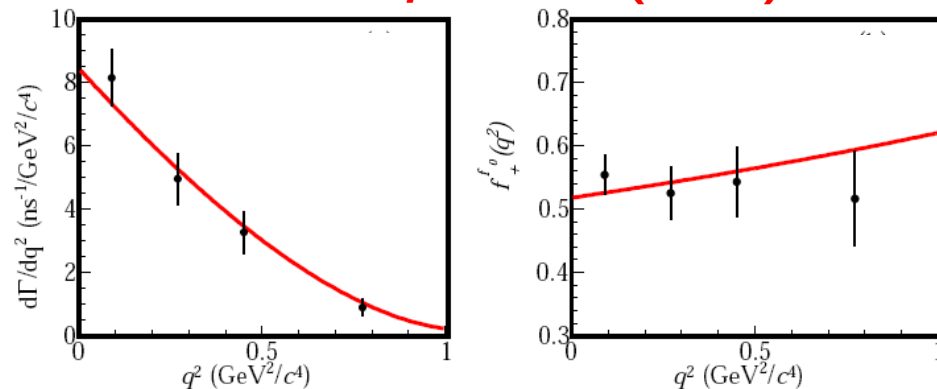
首次寻找  $D_s^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$

PRD106(2022)112004



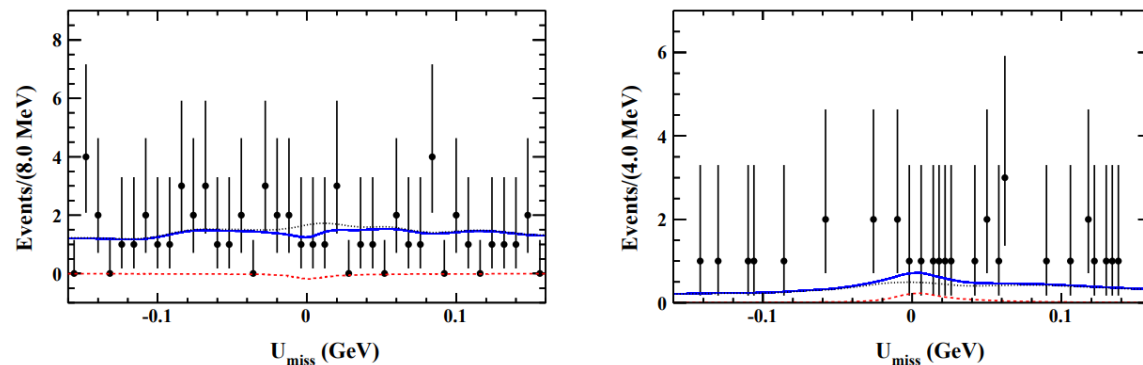
首次抽取  $D_s^+ \rightarrow f_0(980)e^+\nu_e$  形状因子  
→ 探讨标量介子夸克组成

PRL132, 141901 (2024)



首次寻找  $D_s \rightarrow K_1 e^+ \nu_e$  和  $D_s \rightarrow b_1 e^+ \nu_e$

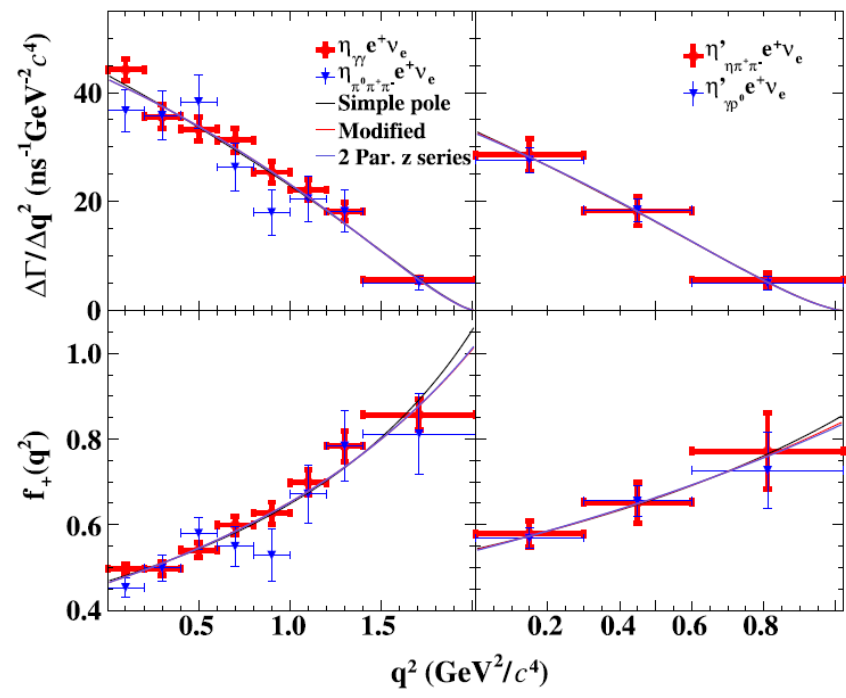
PRD108(2023)112002



# $D_s^+ \rightarrow (\eta, \eta') l^+ \nu_l$ 半轻衰变 $\rightarrow$ 形状因子、 $|V_{cs}|$

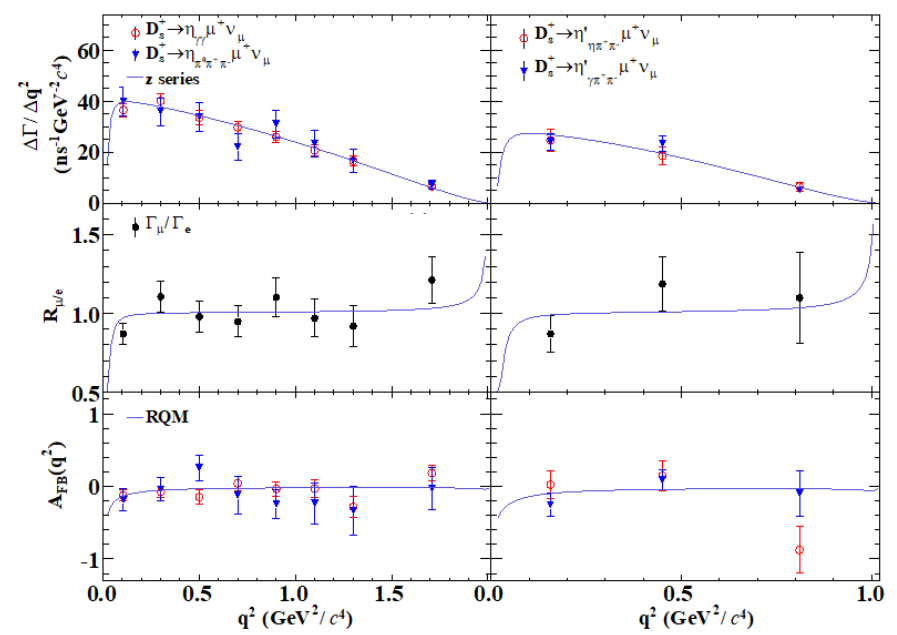
$D_s^+ \rightarrow (\eta, \eta') e^+ \nu_e$  动力学研究

PRD108, 092003 (2023)



首次观测到  $D_s^+ \rightarrow \eta' \mu^+ \nu_\mu$  半轻衰变、  
 $D_s^+ \rightarrow (\eta, \eta') \mu^+ \nu_\mu$  首次动力学研究  
 和首次提取前冲后冲不对称参数

PRL132, 091802 (2024)



# $D^{0(+)} \rightarrow Pl^+ \nu_l$ 半轻衰变 $\rightarrow$ 形状因子、 $|V_{cs(d)}|$

8  $\rightarrow$  20 fb<sup>-1</sup> @3.773 GeV

$$D^{0(+)} \rightarrow K$$

BAM773

Internal review  
ONLY

$$D^+ \rightarrow \eta'$$

BAM659

Internal review  
ONLY

$$D^{0(+)} \rightarrow \pi$$

BAM804

Internal review  
ONLY

$$D^+ \rightarrow \eta$$

BAM792

Internal review  
ONLY

形状因子精度好于0.5%

$|V_{cs}|$ 精度好于1%

其他三项分析，都将使用20 fb<sup>-1</sup>数据更新后发表

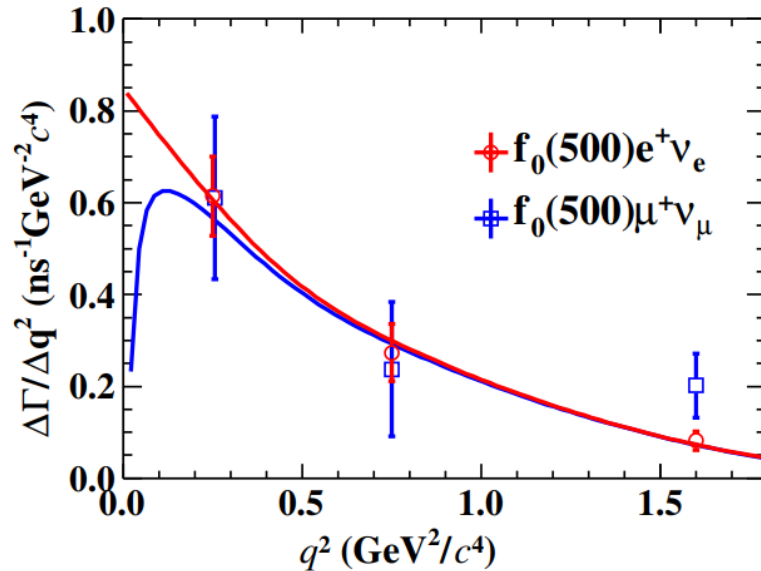
基于8 fb<sup>-1</sup>数据的分析有望  
于下半年推出发表，基于20  
fb<sup>-1</sup>数据的分析正在进行



# $D^{0(+)} \rightarrow Se^+\nu_e$ 半轻衰变 $\rightarrow$ 形状因子

2.9 fb<sup>-1</sup> @ 3.773 GeV

$D^+ \rightarrow f_0(500)l^+\nu_l$  首次动力学研究



arXiv:2401.13225, submitted to PRD

8 fb<sup>-1</sup> @ 3.773 GeV

$D^0 \rightarrow a_0(980)^-e^+\nu_e$  首次动力学研究

BAM773

Internal review  
ONLY

# $D^{0(+)} \rightarrow K^* l^+ \nu_e$ 半轻衰变 $\rightarrow$ 形状因子

8 fb<sup>-1</sup>

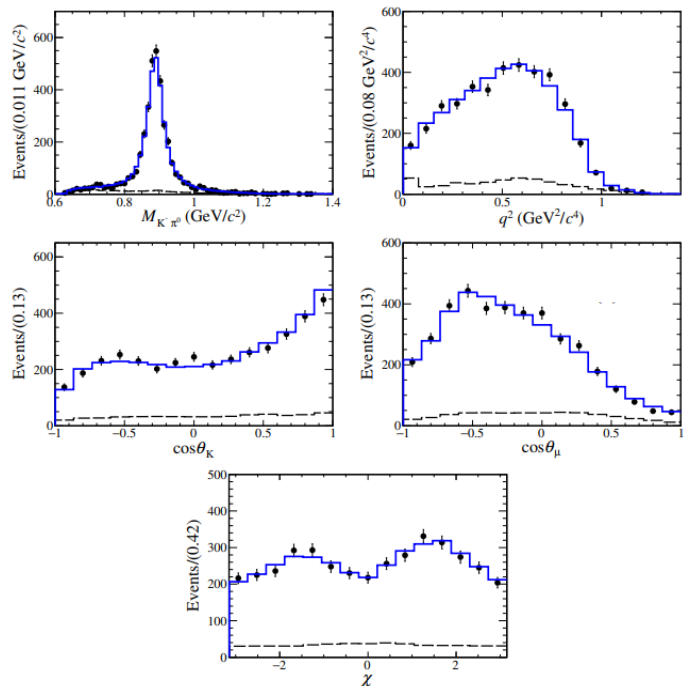
$D^+ \rightarrow K_s^0 \pi^0 e^+ \nu_e$  首次动力学研究

BAM785

Internal review  
ONLY

有望于下半年推出发表

$D^0 \rightarrow K^- \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$  首次动力学研究



arXiv:2403.10877, submitted to PRL

衰变道	状态	数据样本
$D^+ \rightarrow K_s^0 \pi^0 e^+ \nu_e$	BAM785	8 fb <sup>-1</sup>
$D^+ \rightarrow K_s^0 \pi^0 l^+ \nu_l$	Charm组内审查	16→20 fb <sup>-1</sup>
$D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^- e^+ \nu_e$	BAM828	8 fb <sup>-1</sup>
$D^0 \rightarrow K^- \pi^0 e^+ \nu_e$	BAM829	8 fb <sup>-1</sup>
$D^0 \rightarrow K^- \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$	Submitted	8 fb <sup>-1</sup>
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ e^+ \nu_e$	Ongoing	8→20 fb <sup>-1</sup> ?
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \mu^+ \nu_\mu$	Ongoing	8→20 fb <sup>-1</sup> ?

# $D \rightarrow \rho/\omega l^+ \nu_e$ 半轻衰变 $\rightarrow$ 形状因子

**8 fb<sup>-1</sup>**  $D^0 \rightarrow \rho^- e^+ \nu_e$  形状因子测量

**BAM800**

Internal review  
ONLY

$D^+ \rightarrow \omega l^+ \nu_l$  形状因子测量

Internal review  
ONLY

该分析有望于下半年推出发表

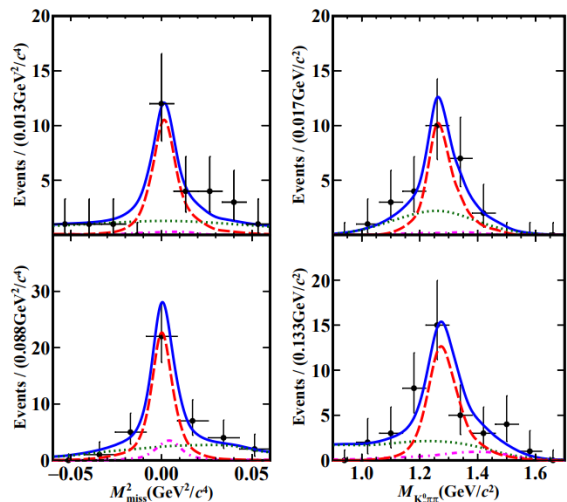
基于16  $\rightarrow$  20 fb<sup>-1</sup> 数据的分析正在进行

# $D \rightarrow Ae^+\nu_e$ 半轻衰变→寻找、形状因子

2.9 fb<sup>-1</sup>

$$D^{0(+)} \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^{-(0)} e^+ \nu_e$$

arXiv:2403.19091,  
submitted to JHEP



对 $D^{0(+)} \rightarrow K\omega e^+\nu_e$   
的研究正在进行中

8 fb<sup>-1</sup>

$$\text{首次观测到 } D^{0(+)} \rightarrow K_1(1270)\mu^+\nu_\mu$$

BAM714

Internal review  
ONLY

$$\text{首次观测到 } D^0 \rightarrow b_1(1235)e^+\nu_e$$

BAM761

Internal review  
ONLY

这两个分析有望于下半年推出发表

8 → 20 fb<sup>-1</sup>数据更新分析

$$\text{首次测量 } D^{0(+)} \rightarrow K_1(1270)e^+\nu_e \text{ 形状因子}$$

BAM797

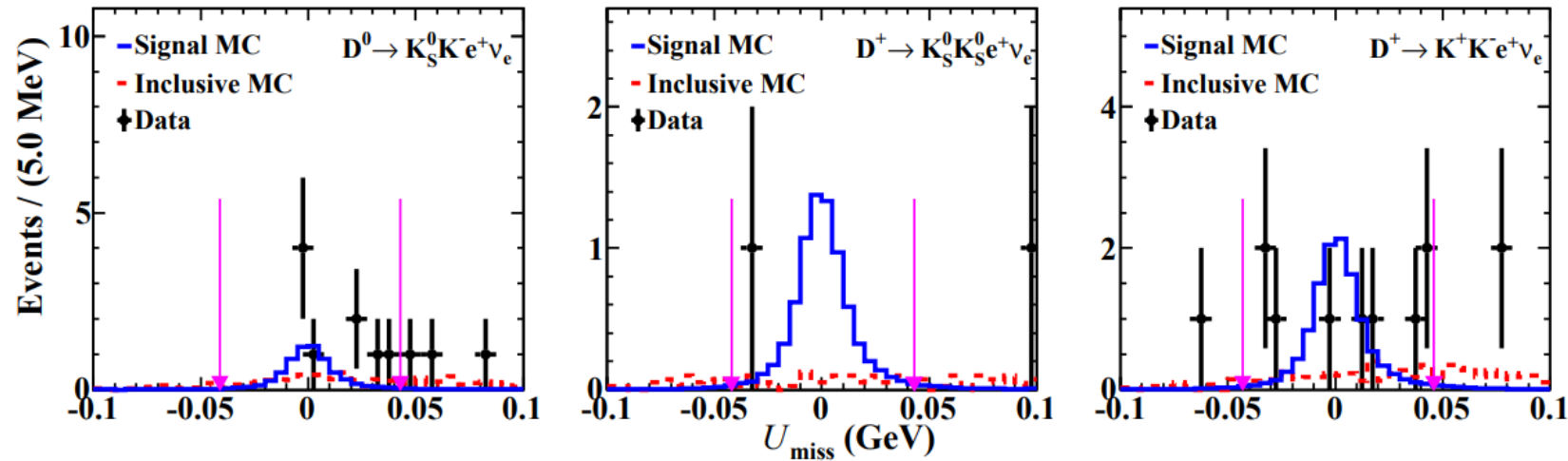
Internal review  
ONLY

# 其它半轻衰变的寻找

8 fb<sup>-1</sup> @ 3.773 GeV

$D^{0(+)} \rightarrow K\bar{K}e^+\nu_e$  的寻找

PRD109, 072003 (2024)



基于8 fb<sup>-1</sup>数据的第一篇  
粲物理文章

8 fb<sup>-1</sup> @ 3.773 GeV

首次寻找  $D^{0(+)} \rightarrow \bar{K}\eta e^+\nu_e$

BAM659

Internal review  
ONLY

Internal review  
ONLY

有望于下半年  
推出发表

# 总结

- **$D^{0(+)}$ 介子半轻衰变**: 基于 $3 \rightarrow 8 \rightarrow 20 \text{ fb}^{-1}$ 数据, 各项既定研究全面开展。人力投入20人以上, 启动了超过20项分析, 首次观测到多个衰变新模式
- **$D_s^+$ 介子半轻衰变**: 一些半轻衰变 $D_s^+ \rightarrow \phi e^+ \nu_e$ 、 $K^0 \mu^+ \nu_\mu$ 、 $K^{*0} \mu^+ \nu_\mu$ 和 $f_0 \mu^+ \nu_\mu$ 的研究在开展; 因各种原因, 推进较慢
- 未来1-2年, 将陆续推出基于全部数据的粲介子半轻衰变物理成果

**谢谢!**