



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

BESIII 上粲介子纯轻衰变研究

王腾蛟

(wangtj@mail.nankai.edu.cn)

南开大学，中国科学院高能物理研究所

@BESIII 粲强子物理研讨会，中国科学技术大学，2023年4月9日

目录

特点优势	{	• 物理动机 • BESIII 实验 • 研究方法
主要结果	{	• $D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ • $D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$
未来展望	{	• 展望 • 总结

物理动机

- 在SM中，CKM矩阵元描述顶夸克和底夸克通过W玻色子发生弱相互作用的耦合强度，是待定的参数，只能由实验来测量

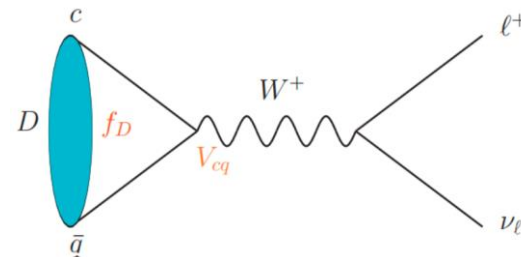
粒子物理标准模型

三代物质粒子 (费米子)				
	I	II	III	
质量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
电荷	2/3	2/3	2/3	0
自旋	1/2	1/2	1/2	0
	u 上	c 粲	t 顶	g 胶子
	d 下	s 奇	b 底	γ 光子
	e 电子	μ μ子	τ τ子	Z Z玻色子
	ν_e 电中微子	ν_μ μ中微子	ν_τ τ中微子	W W玻色子

夸克 (Quarks) 在 I, II, III 列中被框出。轻子 (Leptons) 在 e, ν_e, μ, ν_μ, τ, ν_τ 行中被框出。标量玻色子 (Scalar Bosons) 在 H 和 W/Z 行中被框出。规范玻色子 (Gauge Bosons) 在 g, γ, Z, W 行中被框出。

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

么正性: $V^\dagger V = 1$



- 研究夸克强相互作用力和弱相互作用力的理想衰变道

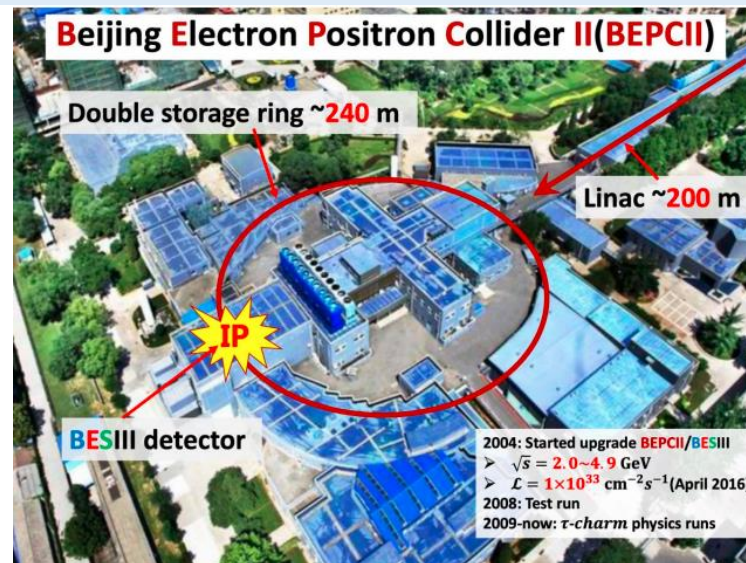
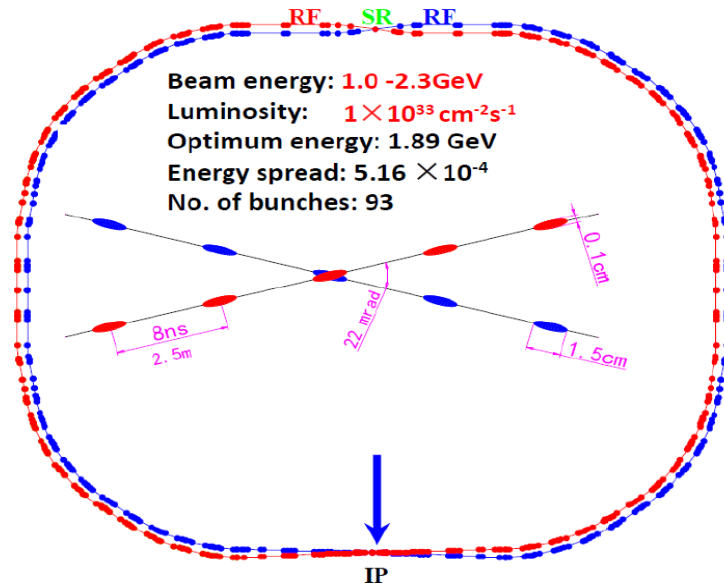
$$\Gamma(D_{(s)}^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell) = \frac{G_F^2}{8\pi} |V_{cd(s)}|^2 f_{D_{(s)}^+}^2 m_\ell^2 m_{D_{(s)}^+}^2 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m_{D_{(s)}^+}^2}\right)^2$$

- 测量 f_D 检验LQCD；精确测量 $|V_{cs}|$ 和 $|V_{cd}|$ ；还可检验轻子普适性，寻找新物理迹象

BEPC-II 和 BES-III

北京正负电子对撞机-II:

- 高亮度双储存环对撞机
- 质心系能量:
- 2.0 – 4.9 GeV



北京谱仪-III:

- BES-III是大型通用探测器，其原理主要采用现代粒子探测技术。
- 用于分析和记录质心能量对撞产生的末态粒子的信息。

MUC

超导磁铁(1 Tesla)

电磁量能器(EMC):

$$\frac{\sigma_E}{E} = 2.5\% \text{ @ } 1 \text{ GeV (桶部)}$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = 5\% \text{ @ } 1 \text{ GeV (端盖)}$$

飞行时间计数器(TOF):

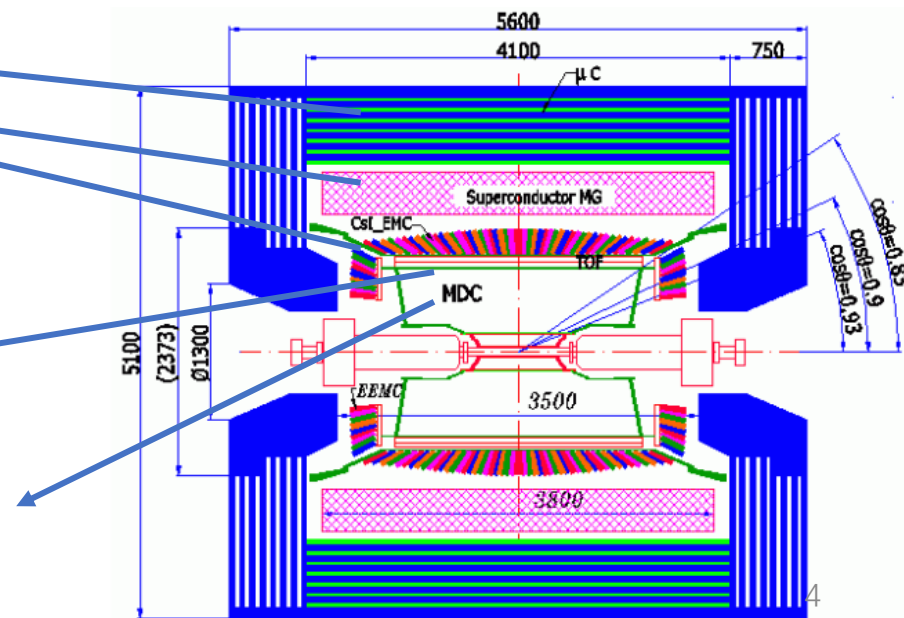
$$\sigma_t = 68 \text{ ps (桶部)}$$

$$\sigma_t = 60 \text{ ps (端盖2015)}$$

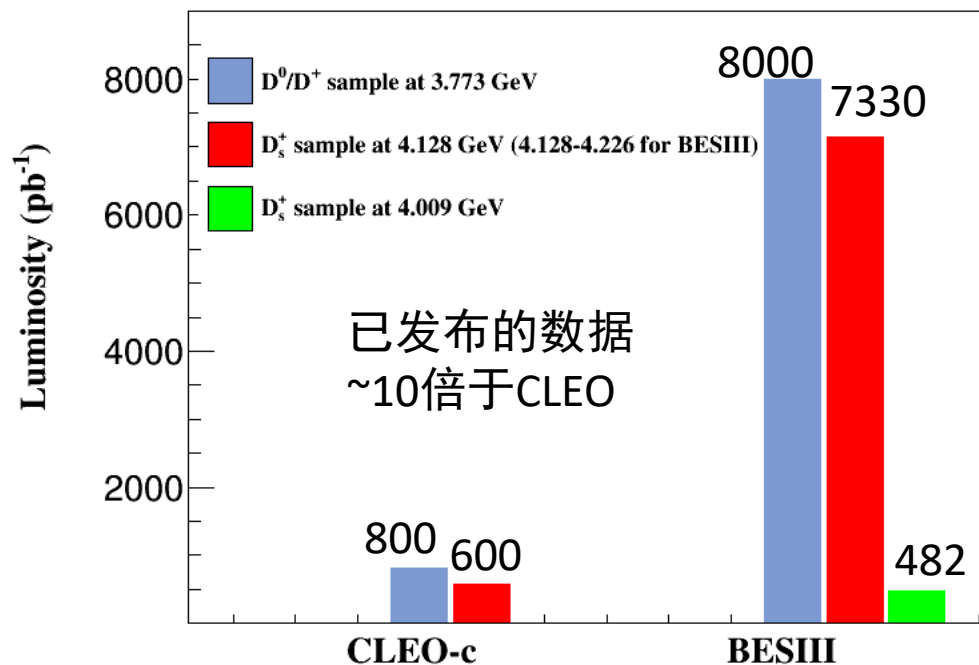
主漂移室(MDC):

$$\sigma_{\gamma\phi} = 130 \mu\text{m (single wire)}$$

$$\sigma_{p_t}/p_t = 0.5\% \text{ @ } 1 \text{ GeV}$$



数据样本及双标记方法



双标记方法

- 粲介子 D^+D^- , $D_s^+D_s^{*-}$ 成对产生，可以选择双标记方法；
- 得到较为干净的背景，减小系统误差；
- 分支比：

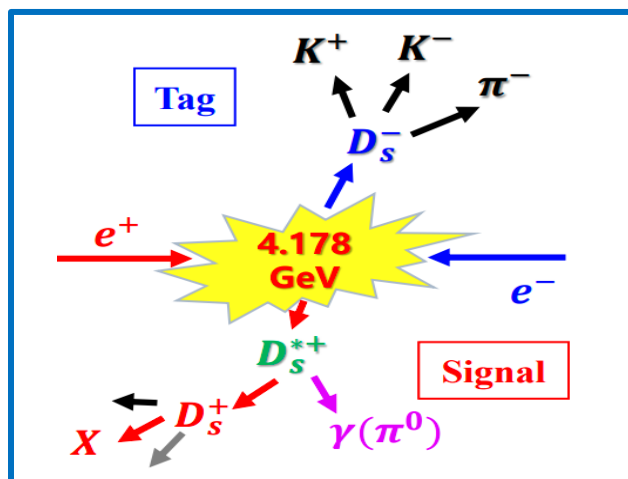
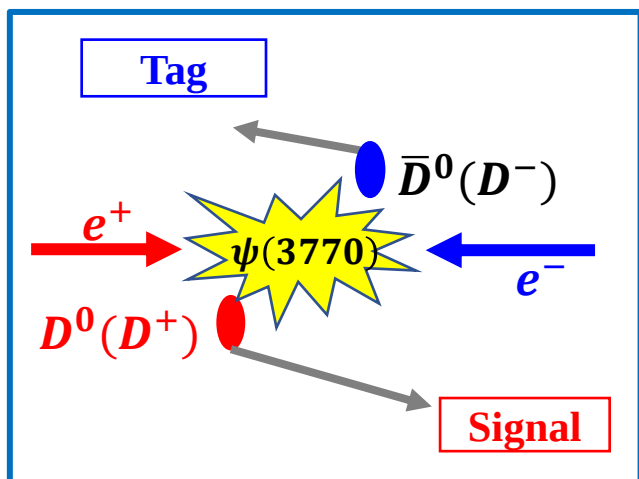
$$\mathcal{B}_{\text{sig}} = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{ST}} \times \epsilon_{\text{sig}}}$$

- 信号侧重重建 X ($X = \mu^+, \pi^+$)；
- 产额，拟合中微子运动学变量：

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

$$E_{\text{miss}}^2 = E_{\text{cm}} - E_{\text{tag}} - E_X$$

$$\vec{p}_{\text{miss}} = -\vec{p}_{\text{tag}} - \vec{p}_X$$



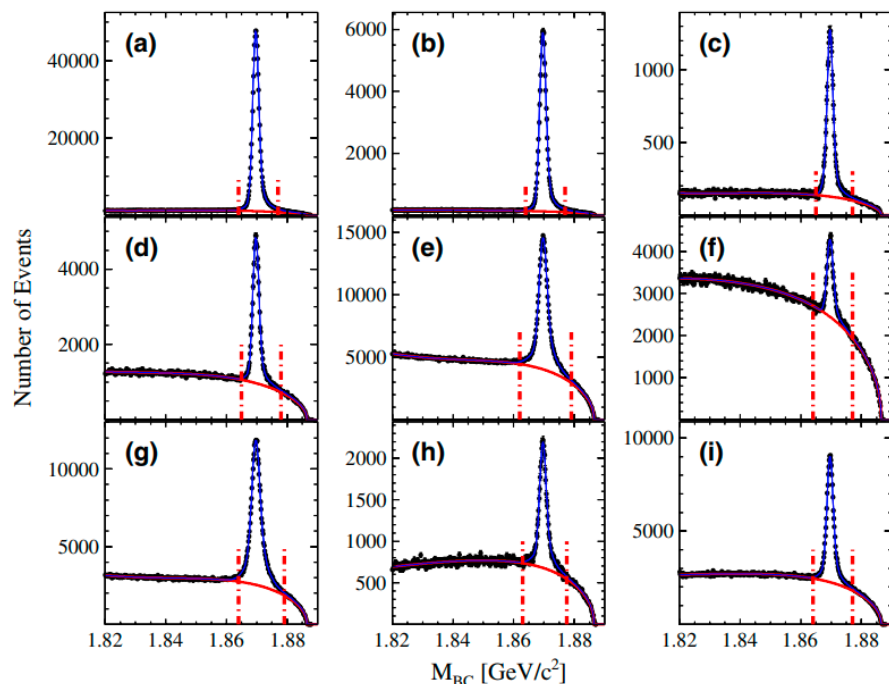
$$D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \mu^+$$

数据: 2.93 fb⁻¹ $\psi(3770)$ @ 3.773 GeV

$N_{ST}: 1703045 \pm 3405$

PRD 89, 051104 (2014)

$N_{DT}: 409.0 \pm 21.3$

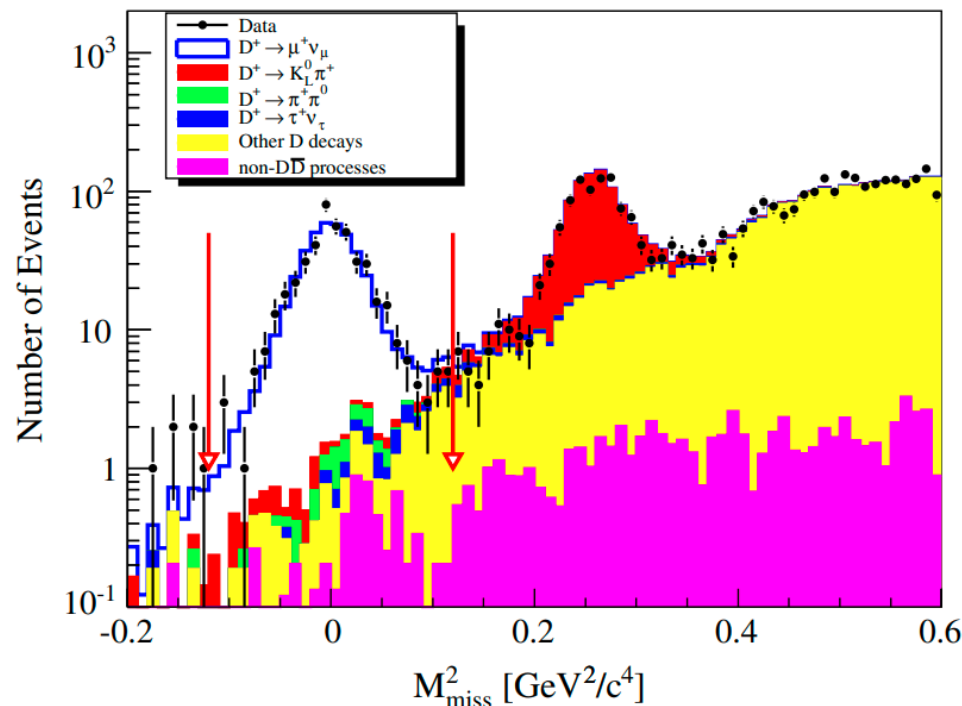


单标记: 拟合 D^- 事例

$$M_{BC} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |\vec{p}_{mK\pi}|^2}$$

$$\Delta E = E_{\text{beam}} - E_{\bar{D}}$$

$$M_{\text{miss}}^2 = (E_{\text{cm}} - E_{\text{tag}} - E_{\mu^+})^2 - |\vec{p}_{\text{tag}} - \vec{p}_{\mu^+}|^2$$



D^+ 信号事例数据
蒙卡比较

实验上 $|V_{cd}|$ 精度
最高:
 $\sim 2.8\%$

$$B(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (3.71 \pm 0.19 \pm 0.06) \times 10^{-4}$$

$$f_{D^+} |V_{cd}| = (45.75 \pm 1.20 \pm 0.39) \text{ MeV}$$

$$f_{D^+} = (203.2 \pm 5.3 \pm 1.8) \text{ MeV}$$

$$|V_{cd}| = 0.2210 \pm 0.0058 \pm 0.0047$$

$$D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell : \ell = \tau^+$$

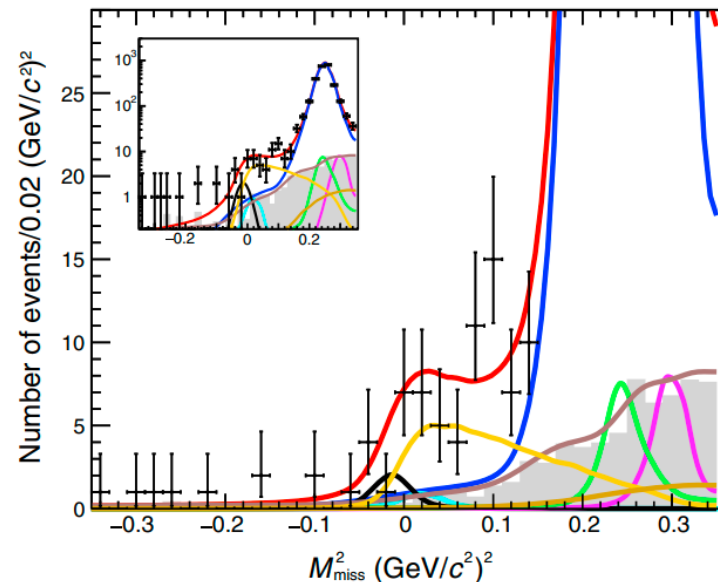
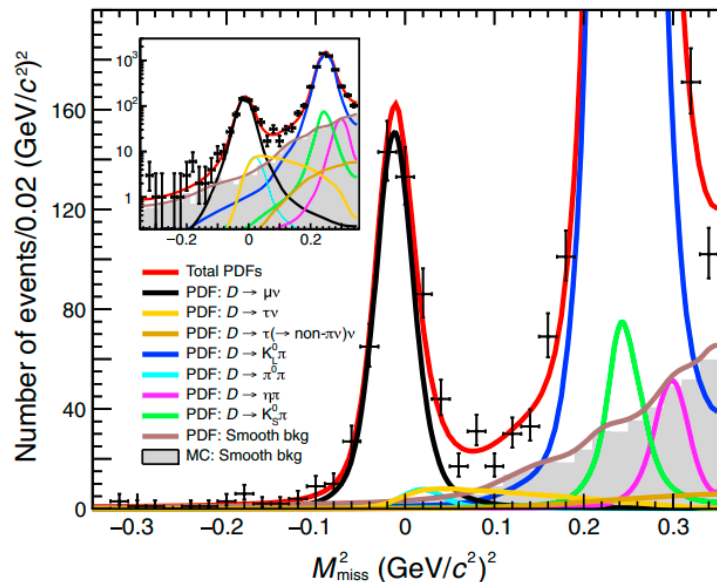
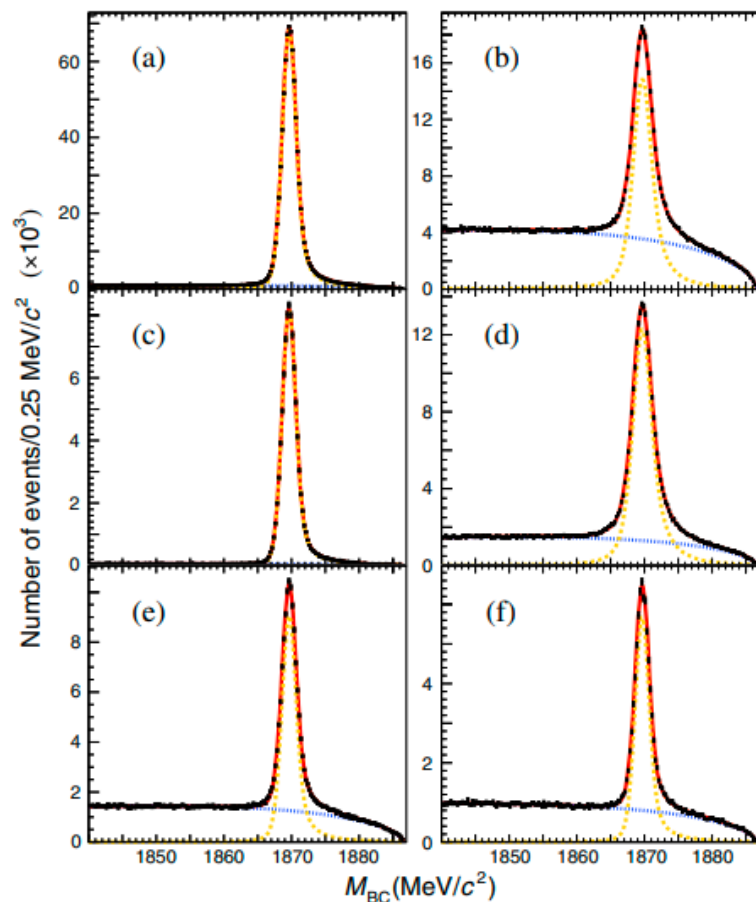
数据: 2.93 fb⁻¹ $\psi(3770)$ @ 3.773 GeV

PRL 123, 211802 (2019)

单标记: 拟合 D^- 事例

联合拟合: μ^+ -like (左)

π^+ -like (右)



$$N_{D^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 137 \pm 27$$

$$\mathcal{B}_{\tau\nu} = (1.20 \pm 0.24_{\text{stat}} \pm 0.12_{\text{syst}}) \times 10^{-3}$$

$$|V_{cd}| = 0.237 \pm 0.024_{\text{stat}} \pm 0.012_{\text{syst}} \pm 0.001_{\text{ex-syst}}$$

$$f_{D^+} = 224.5 \pm 22.8_{\text{stat}} \pm 11.3_{\text{syst}} \pm 0.9_{\text{ext-syst}} \text{ MeV}$$

$$R_{\tau/\mu} = \Gamma(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) / \Gamma(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = 3.21 \pm 0.64_{\text{stat}} \pm 0.43_{\text{syst}}$$

实验上首次观测:

5.1 σ

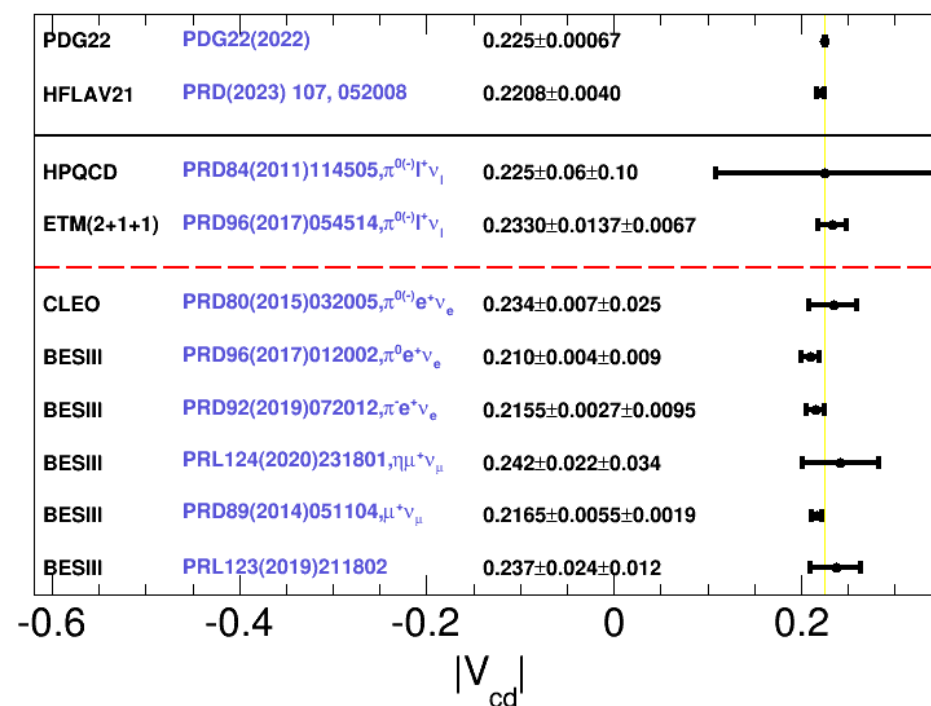
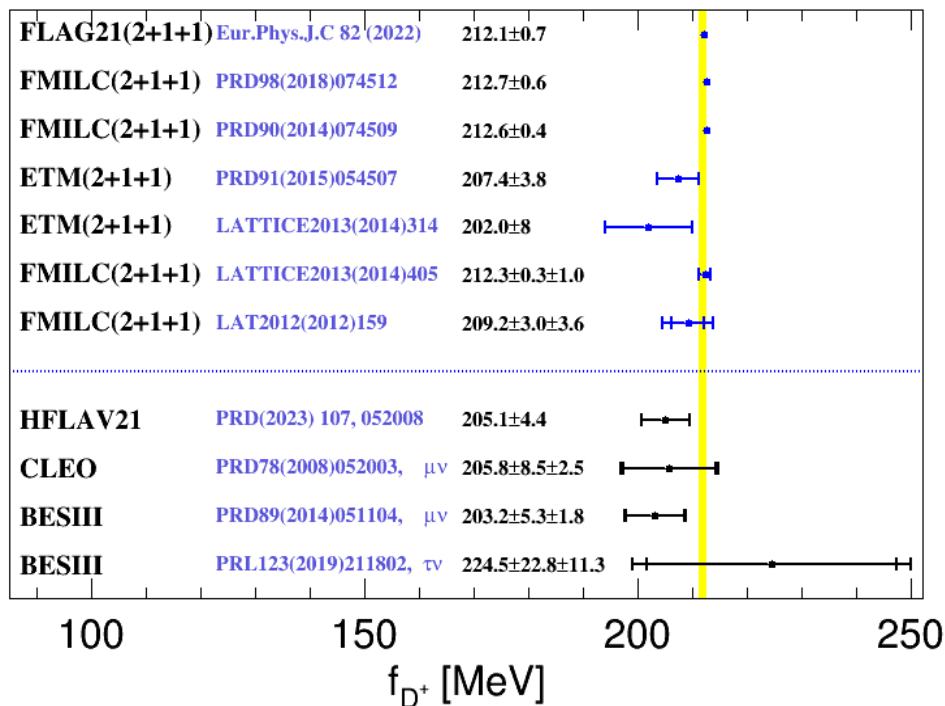
$|V_{cd}|$ 精度:

11.3%

$D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$: 结果比较

根据来自PDG2022的 G_F, m_D, m_τ, m_μ , 输入 $|V_{cd}|, f_D$

参数	输入	来源
f_D	212.0 ± 0.7 MeV	LQCD
V_{cd}	0.22500 ± 0.00067	CKMfitter
m_τ	1776.86 ± 0.12 MeV	PDG2022
m_μ	$105.6483755 \pm 0.0000023$ MeV	PDG2022
m_D	1869.66 ± 0.005 MeV	PDG2022



$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$$

数据1: 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV

数据2: 482 pb⁻¹ @ 4.009 GeV

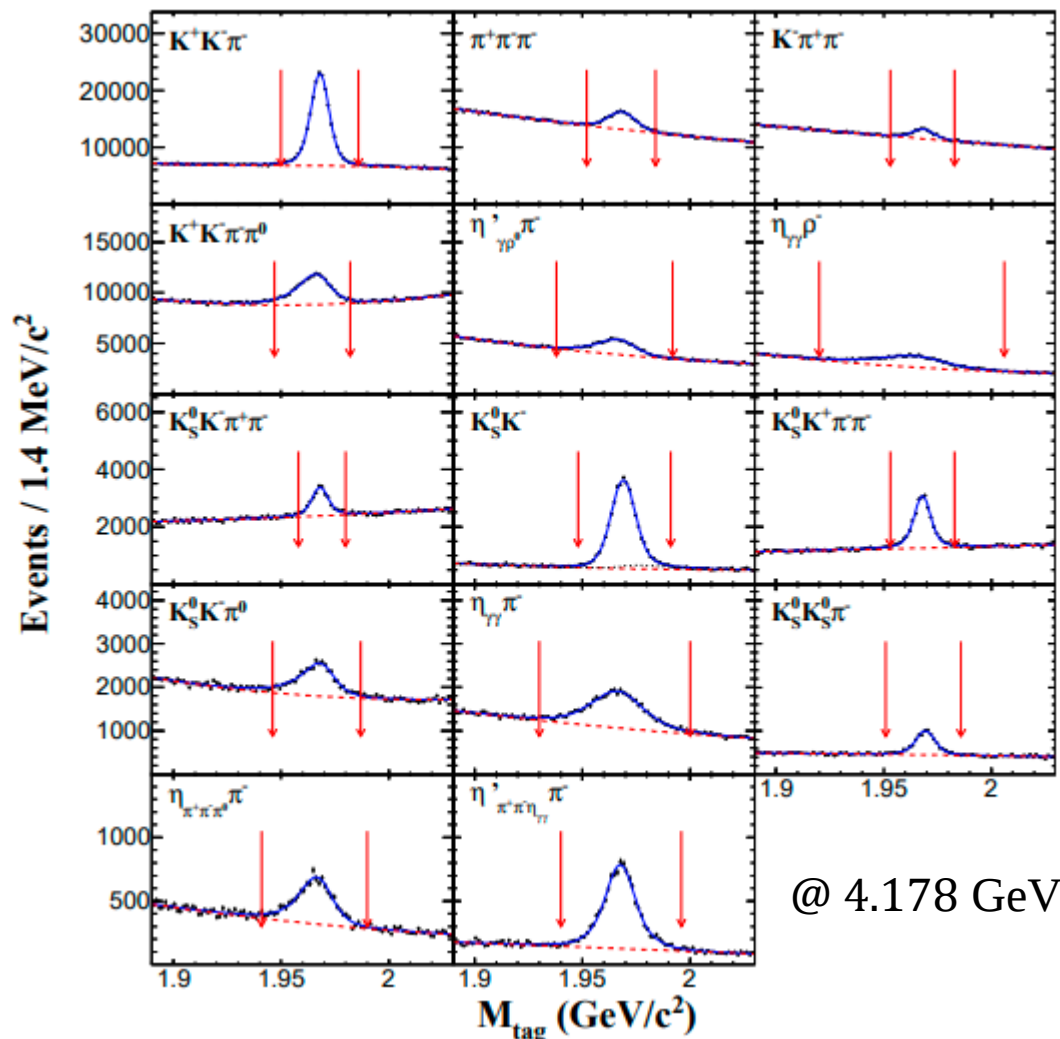
14个单标记道 @ 4.128 – 4.226 GeV: $N_{ST} \sim 0.89 M$

信号侧重重建 $X (X = e, \pi^+, \pi^+ \pi^0, \mu^+)$,
丢失掉的中微子的运动学信息:

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

$$E_{\text{miss}}^2 = E_{\text{cm}}^2 - \sqrt{|\vec{p}_{\text{tag}}|^2 + m_{D_s}^2} - E_{\gamma(\pi^0)} - E_X$$

$$\vec{p}_{\text{miss}} = -\vec{p}_{\text{tag}} - \vec{p}_{\gamma(\pi^0)} - \vec{p}_X$$



$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell : \ell = \mu^+, \tau^+$$

数据: 482 pb⁻¹ @ 4.009 GeV

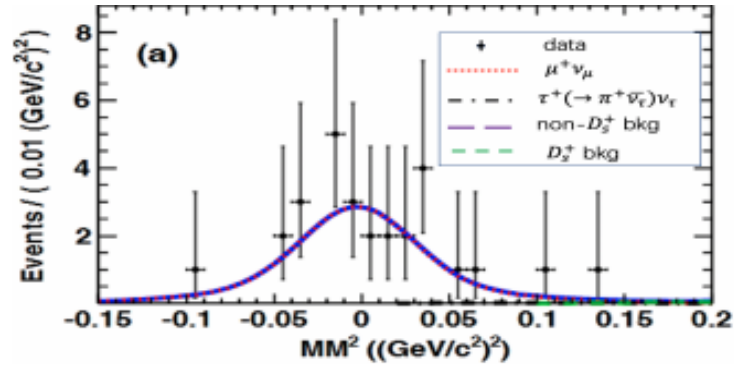
PRD 94, 072004 (2016)

衰变链: $e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^- \rightarrow D_s^+ D_s^-$

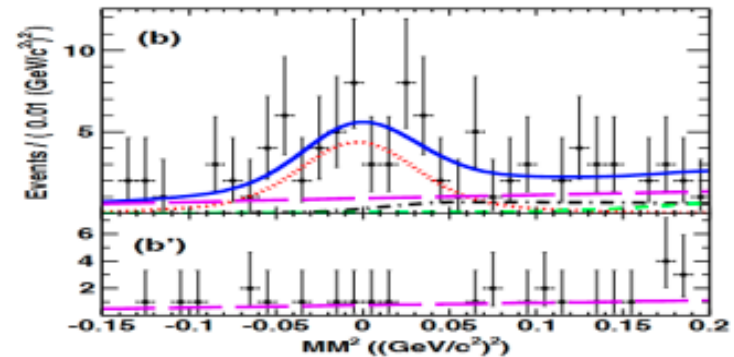
$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (0.517 \pm 0.075 \pm 0.021)\%$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = (3.28 \pm 1.83 \pm 0.37)\%$$

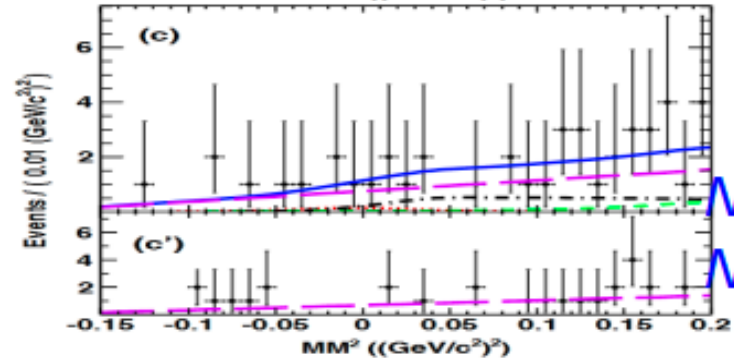
- BF ($\mu^+ \nu_\mu$) 精度: ~ 15.1%
- BF ($\tau^+ \nu_\tau$) 精度: ~ 56.9 %



μ -like



non- μ , π -like



π -like

$$N(\mu^+ \nu_\mu) = 72.4 \pm 10.4$$

$$N(\tau^+ \nu_\tau) = 22.1 \pm 12.3$$

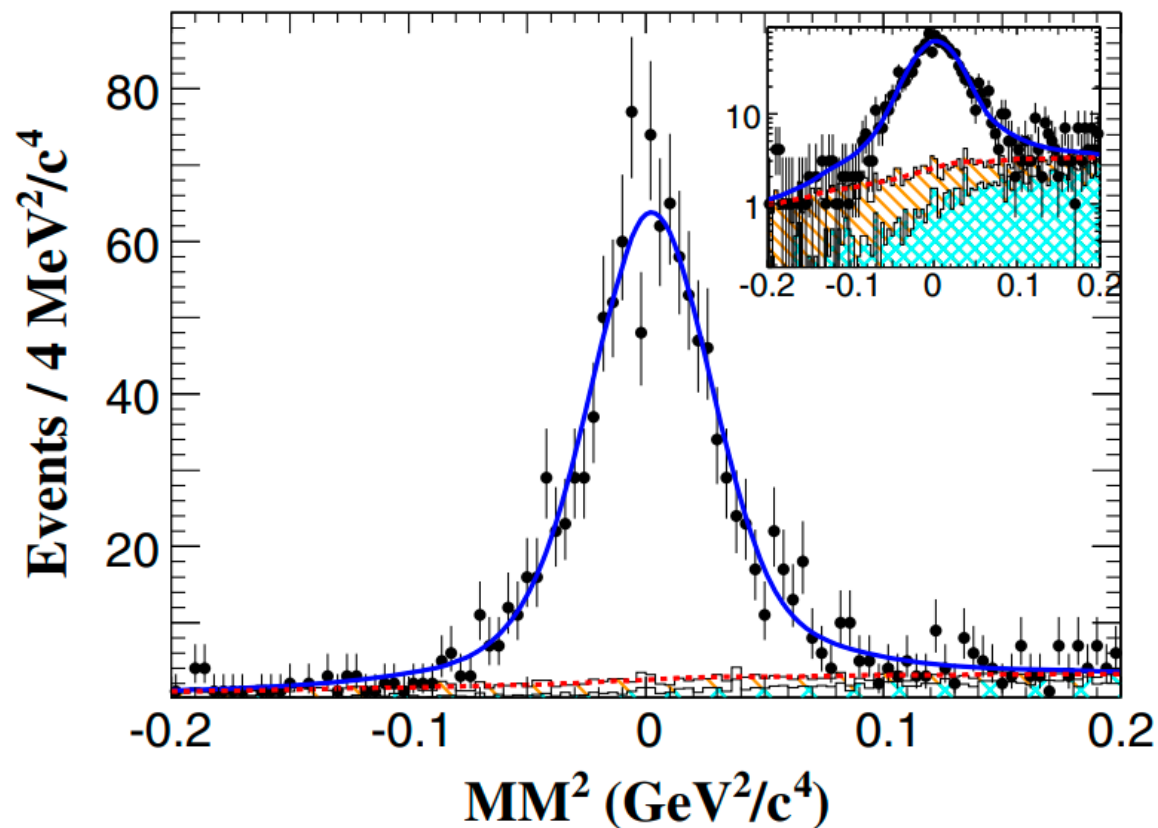
$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \mu^+$$

数据: 3.19 fb⁻¹ @ 4.178 GeV

$$e^+e^- \rightarrow D_s^+ D_s^{*-} \rightarrow \gamma(\pi^0) D_s^+ D_s^-$$

PRL 122, 071802 (2019)

双标拟合: 误差棒为数据, 直方图为蒙卡模拟的背景



$$N_{ST} = 388660 \pm 2592$$

$$N_{D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu} = 1135.9 \pm 33.1$$

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu} = (5.49 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.15_{\text{syst}}) \times 10^{-3}$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = 246.2 \pm 3.6_{\text{stat}} \pm 3.5_{\text{syst}} \text{ MeV}$$

$$f_{D_s^+} = 252.9 \pm 3.7_{\text{stat}} \pm 3.6_{\text{syst}} \text{ MeV}$$

$$|V_{cs}| = 0.985 \pm 0.014_{\text{stat}} \pm 0.014_{\text{syst}}$$

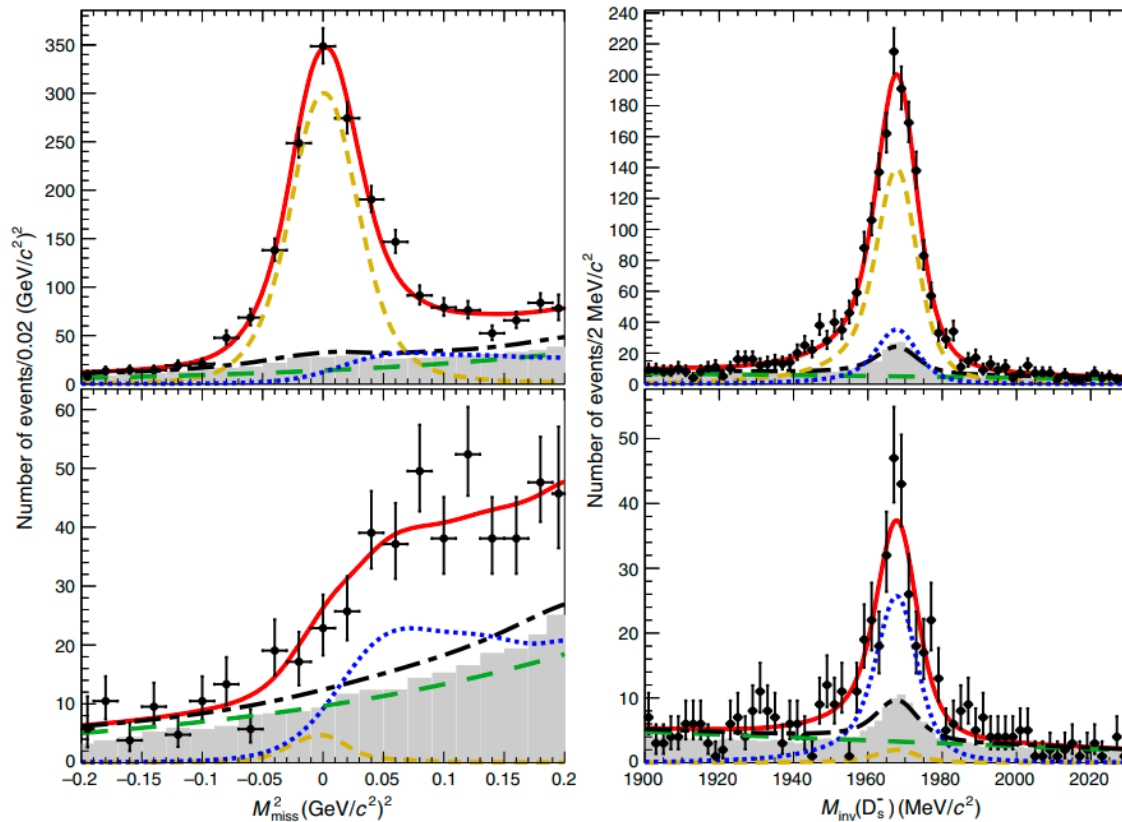
- 实验上极大改善了
BF的精度: 3.99 %
- $|V_{cs}|$ 精度: ~2 %

$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \mu^+, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}$$

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 – 4226 GeV

PRD 104, 05209(2021)

拟合(@4.178 GeV):



- μ -like (upper):
 $E_{\text{EMC}} \leq 300$ MeV, mixture
of $D_s^+ \rightarrow \tau^+(\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau) \nu_\tau$
and $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- π -like (lower):
 $E_{\text{EMC}} > 300$ MeV,
dominated of
 $D_s^+ \rightarrow \tau^+(\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau) \nu_\tau$

• 多能量点测量;
• 改善了 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu$
的BF精度: $\sim 5.8\%$

$$N_{D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu} = 2198 \pm 55, \quad N_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 946^{+46}_{-45}$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu) = (0.535 \pm 0.013 \pm 0.016)\%$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = (5.21 \pm 0.25 \pm 0.17)\%$$

$|V_{cs}|$ 精度

$$f_{D_s^+} = 249.8 \pm 3.0 \pm 3.7 \pm 1.0 \text{ MeV},$$

$$249.7 \pm 6.0 \pm 4.1 \pm 1.0 \text{ MeV},$$

$$249.9 \pm 2.4 \pm 3.4 \pm 1.0 \text{ MeV},$$

$$|V_{cs}| = 0.973 \pm 0.012 \pm 0.015 \pm 0.004,$$

$$0.972 \pm 0.023 \pm 0.016 \pm 0.004,$$

$$0.973 \pm 0.009 \pm 0.013 \pm 0.004,$$

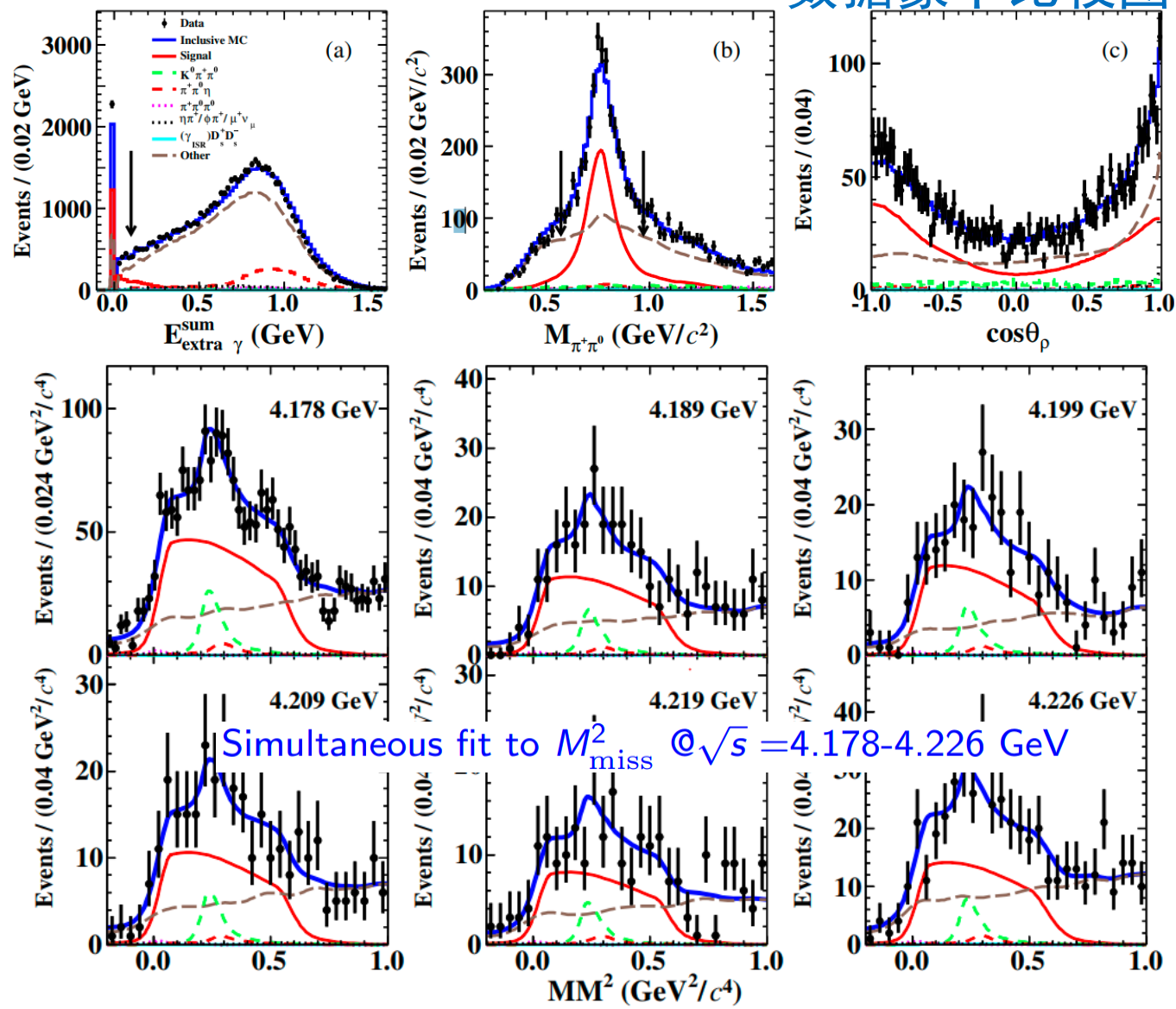
$$\begin{aligned} \longrightarrow \mu^+ \nu_\mu &\longrightarrow \sim 2.0 \% \\ \longrightarrow \tau^+ \nu_\tau &\longrightarrow \sim 2.9 \% \\ \longrightarrow \text{SM约束} &\longrightarrow \sim 1.7 \% \end{aligned}$$

$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \tau^+, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \bar{\nu}$$

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 GeV

数据蒙卡比较图

PRD 104, 032001(2021)



$$N_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 1745 \pm 84$$

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau} = (5.29 \pm 0.25_{\text{stat}} \pm 0.20_{\text{syst}}) \%$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (244.8 \pm 5.8_{\text{stat}} \pm 4.8_{\text{syst}}) \text{ MeV}$$

$$f_{D_s^+} = (251.6 \pm 5.9_{\text{stat}} \pm 4.9_{\text{syst}}) \text{ MeV}$$

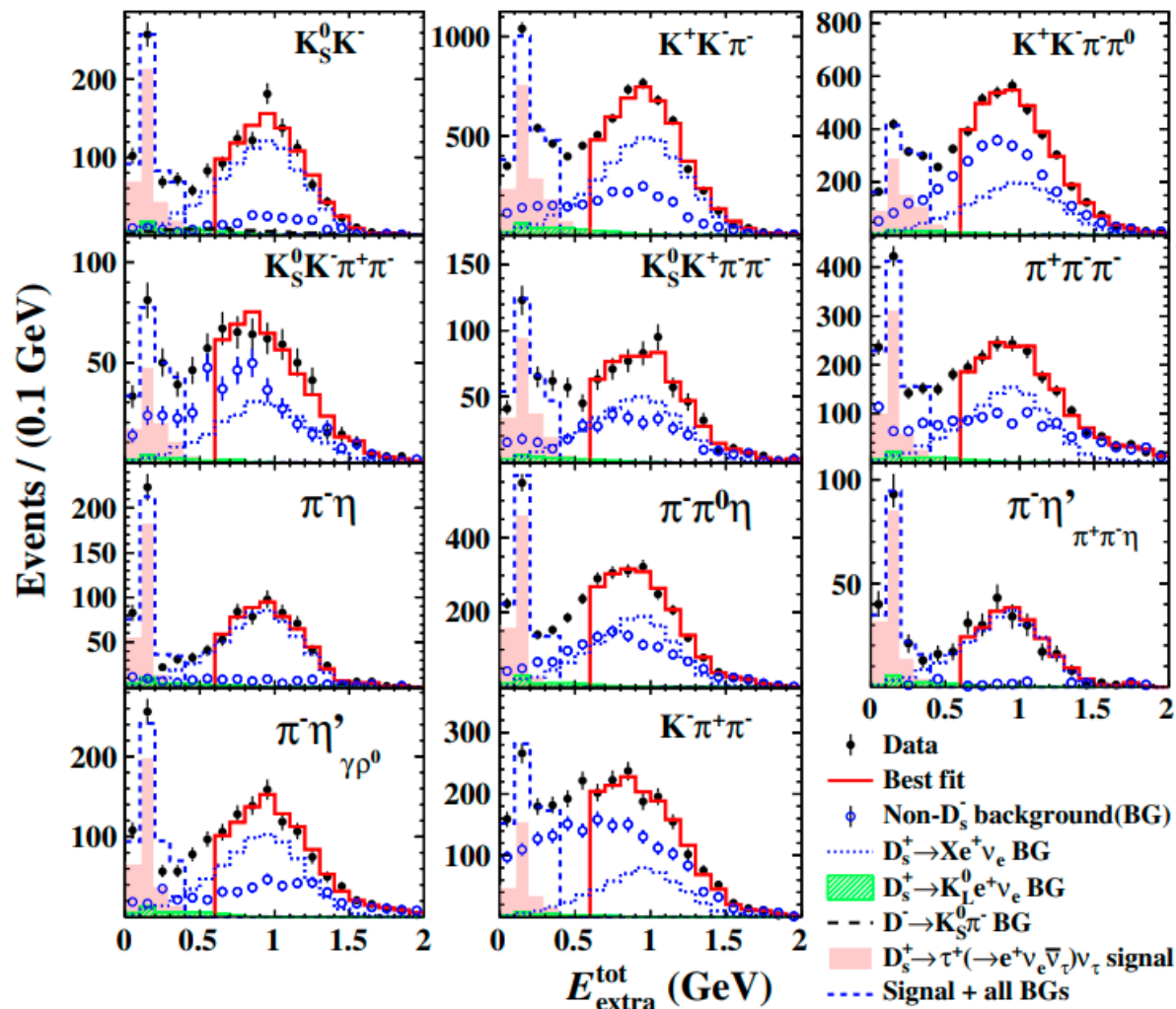
$$|V_{cs}| = 0.980 \pm 0.023_{\text{stat}} \pm 0.019_{\text{syst}}$$

- 多能量点测量;
- 分支比和之前结果相符;
- $|V_{cs}|$ 精度: $\sim 3.1 \%$

$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \tau^+, \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau$$

数据: 6.32 fb⁻¹ @ 4.178 – 4.226 GeV

PRL 127, 0171801(2021)



信号: $E_{\text{extra}}^{\text{tot}} < 0.4$ GeV

背景: $E_{\text{extra}}^{\text{tot}} > 0.6$ GeV

$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau} = (5.27 \pm 0.10 \pm 0.12) \times 10^{-2}$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (244.4 \pm 2.3 \pm 2.9) \text{ MeV.}$$

$$f_{D_s^+} = (251.1 \pm 2.4 \pm 3.0) \text{ MeV.}$$

$$|V_{cs}| = 0.978 \pm 0.009 \pm 0.012$$

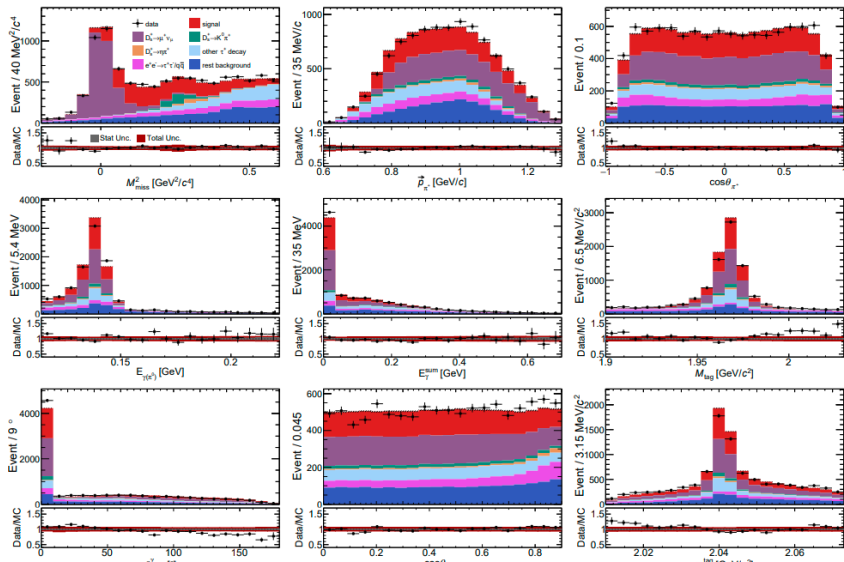
• 迄今为止 $|V_{cs}|$ 精度最高: ~1.5 %

$E_{\text{extra}}^{\text{tot}}$: the total energy of the good EMC showers, excluding FSR and those associated in ST

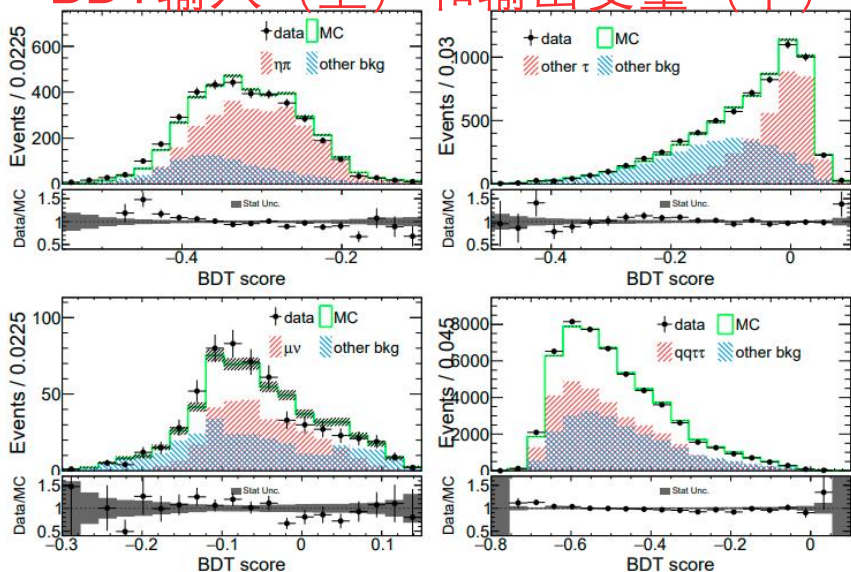
$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \tau^+, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}$$

数据:7.33 @ 4.128-4.226 GeV

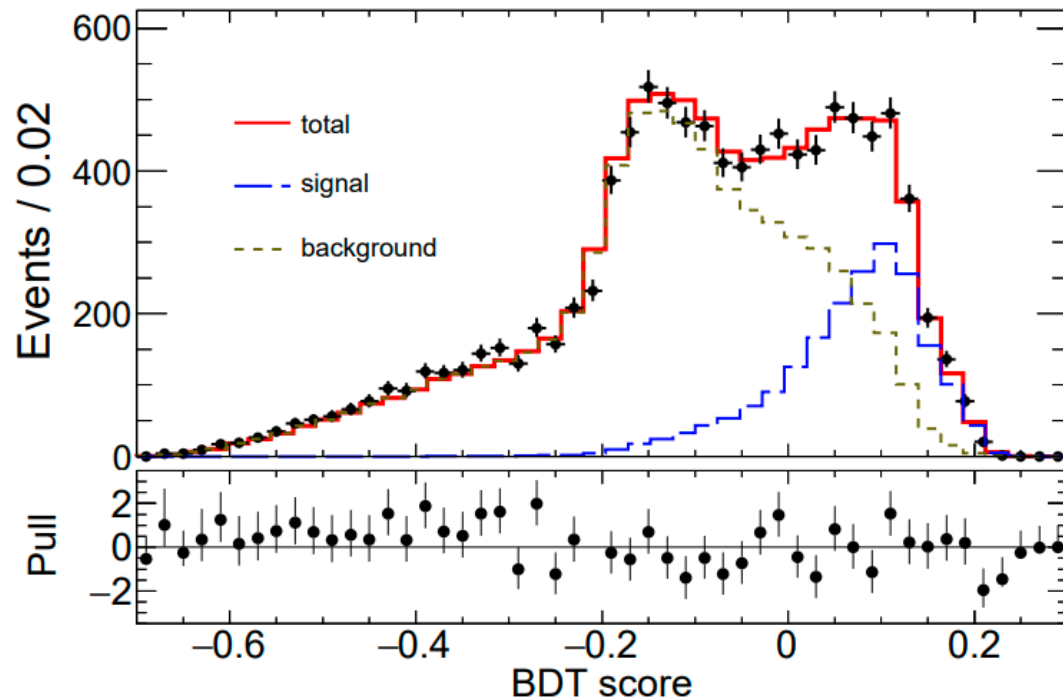
arXiv:2303.12600



BDT输入 (上) 和输出变量 (下)



采用增强法分类的决策树集 (BDT)



$$N_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu} = 2371 \pm 74$$

$$\mathcal{B} (\%)$$

$$5.41 \pm 0.17 \pm 0.13$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| \text{ (MeV)}$$

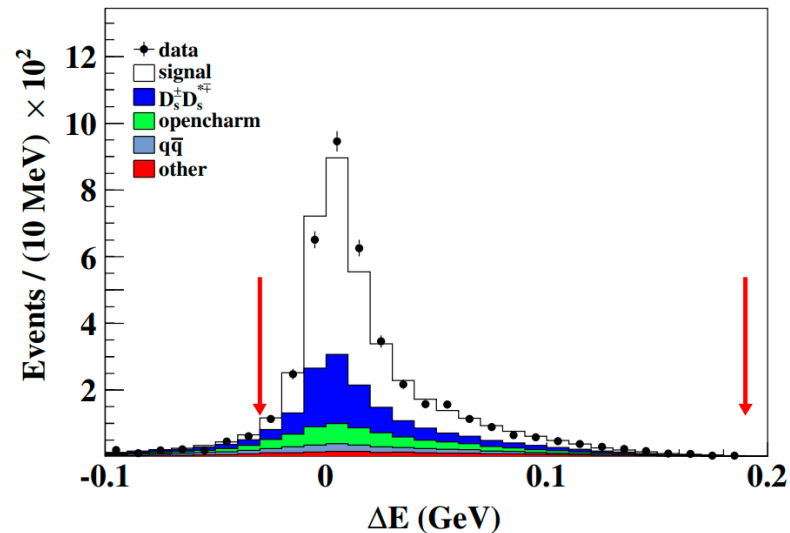
$$247.6 \pm 3.9 \pm 3.2 \pm 1.0$$

• $|V_{cs}|$ 精度: ~2.1 %

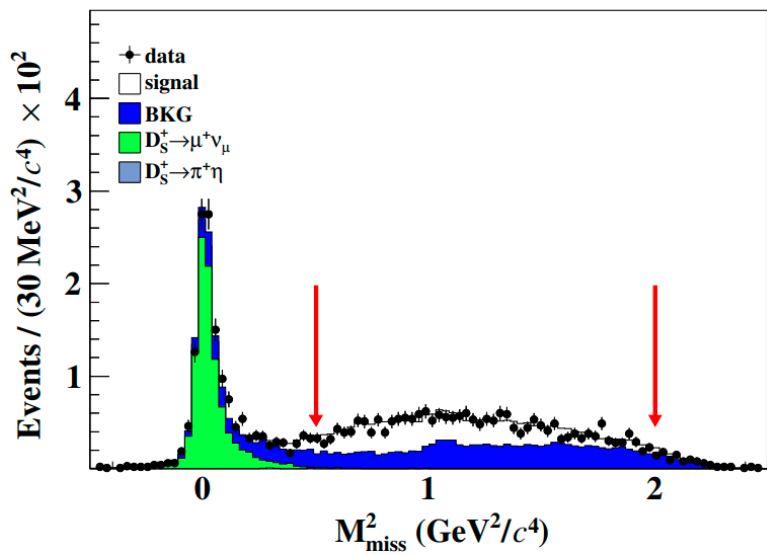
$$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell: \ell = \tau^+, \tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$$

数据: 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV

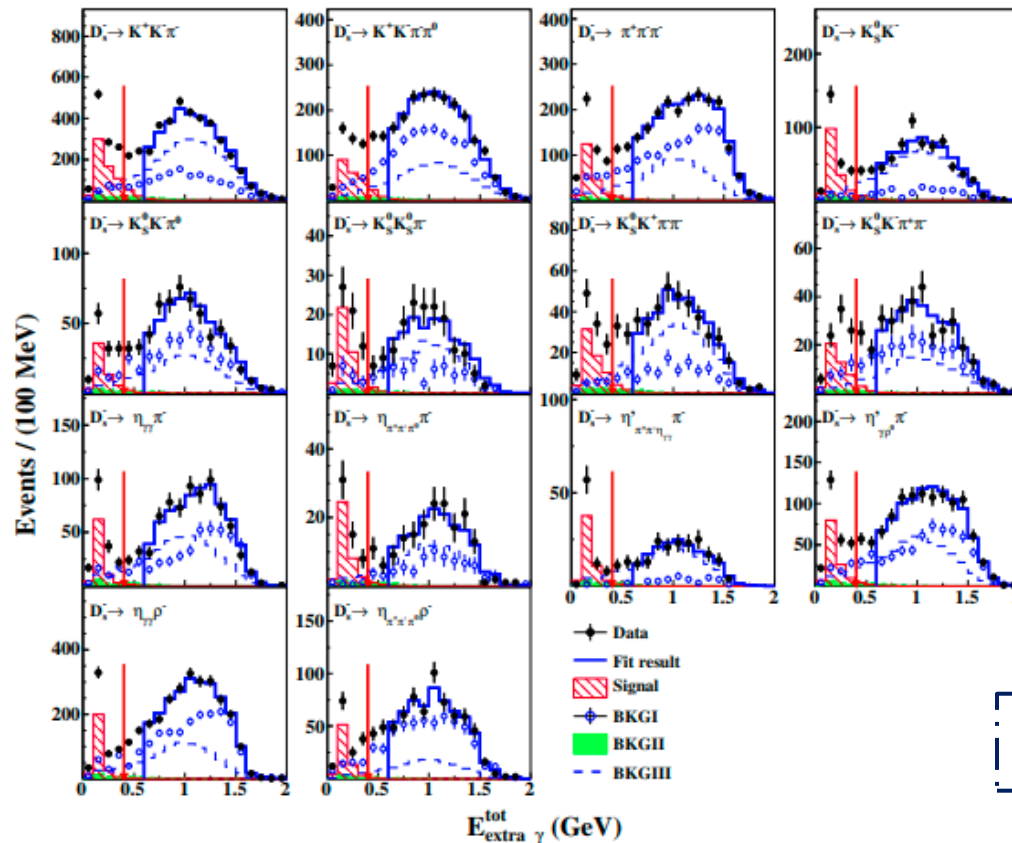
arXiv:2303.12468



信号侧特征变量分布 (箭头内为信号区)



$$N_{\text{DT}}^j = N_{\text{tot}}^j - N_{\text{BKG}}^{\text{I} j} - N_{\text{BKG}}^{\text{II} j} - N_{\text{BKG}}^{\text{III} j}$$



$E_{\text{extra}}^{\text{tot}}$: 未使用的好径迹在EMC中沉积的总能量

信号: $E_{\text{extra}}^{\text{tot}} < 0.4 \text{ GeV}$

背景: $E_{\text{extra}}^{\text{tot}} > 0.6 \text{ GeV}$

• $|V_{cs}|$ 精度: ~1.9 %

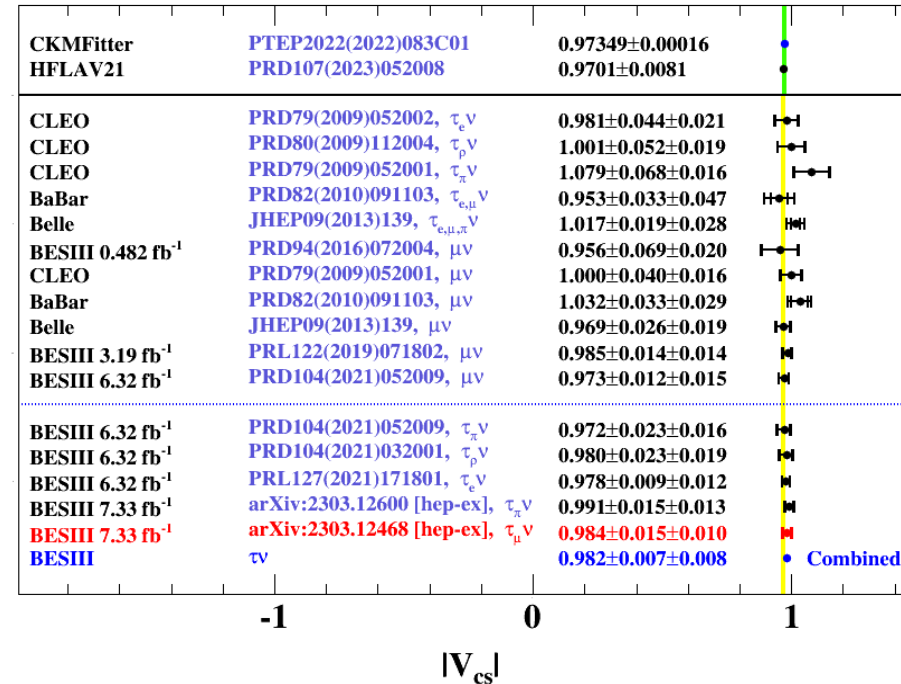
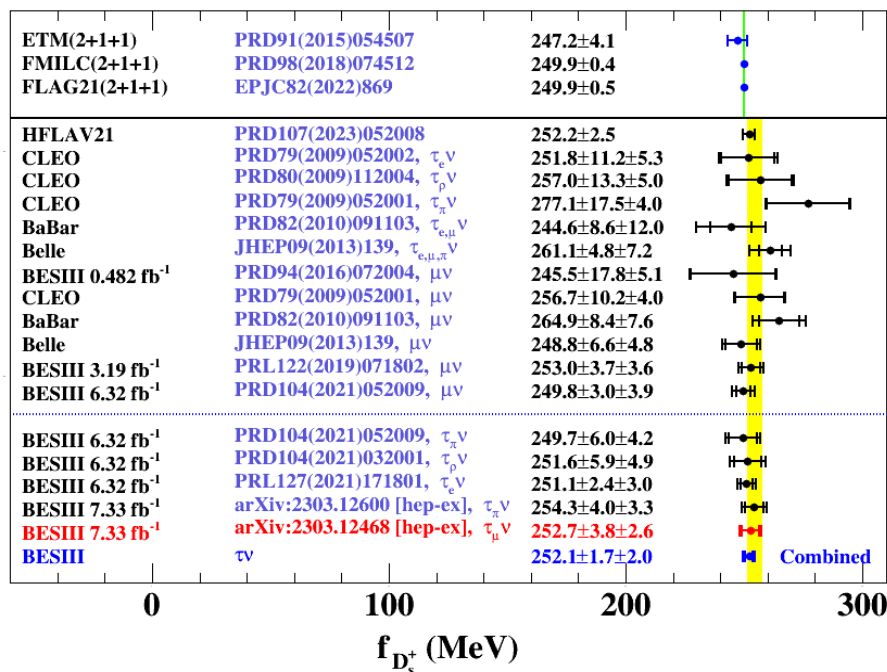
$$\mathcal{B}_{D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau} = (5.34 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}})\%$$

$$f_{D_s^+} |V_{cs}| = (246.2 \pm 3.7_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}}) \text{ MeV}$$

$D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$: 结果比较

根据来自PDG2022的 G_F , $m_{D_s^+}$, m_τ , m_μ , 输入 $|V_{cs}|$, $f_{D_s^+}$

参数	输入	来源
$f_{D_s^+}$	249.9 ± 0.5 MeV	LQCD
$ V_{cs} $	0.97346 ± 0.00016	CKM fitter
m_τ	1776.86 ± 0.12 MeV	PDG2022
m_μ	$105.6483755 \pm 0.0000023$ MeV	PDG2022
m_{D_s}	1978.35 ± 0.07 MeV	PDG2022



展望: $D_{(s)}^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$

① 数据: 8 fb⁻¹ @ 3.773 GeV

- 测量: $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- 多标记道尝试
- 更准确的单标记道的产生子

	数据 (fb ⁻¹)	精度 (%)	状态
2010-2011	2.93	2.8	已发表
2021-2022	8	1.8	On going
2023-2024	20	1.0	?

- ②
- 测量: $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$
 - 多变量分析
 - 联合拟合

③ 数据: 7.33 fb⁻¹ @ 4.128 – 4.226 GeV

- 采用更大数据样本
- 测量: $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- 利用MUC信息
- 精度较大改善: ~1.4%

④ 数据: 5.15 fb⁻¹ @ 4.237 – 4.440 GeV

- 不同衰变链: $e^+ e^- \rightarrow D_s^{*+} D_s^{*-}$
- 测量: $D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ ($\ell = \mu^+, \tau^+$)
- 能量点更高, 检验补充
- BF ($D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$) 精度: ~8.5%
- BF ($D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$) 精度: ~4.0%

总结

- 精确测量 $|V_{cs}|$ ， $|V_{cd}|$ 和 $\mathcal{B}(D_{(s)}^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell)$ 在更高精度下检验标准模型CKM矩阵幺正性以及轻子普适性十分重要
- 通过BESIII采集的 7.33 fb^{-1} @4.128-4.226 GeV和 2.93 fb^{-1} @3.773 GeV数据样本对纯轻过程 $D_s^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ 和 $D^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$ ($\ell = \mu^+, \tau^+$)分别进行分析，精确了测量 $|V_{cs}|$ ($\sim 1.5\%$)， $|V_{cd}|$ ($\sim 2.8\%$)。

进行中：

- 根据BESIII在3.773 GeV处发布的共 **8** fb^{-1} $\psi(3770)$ 数据， $|V_{cd}|$ 测量精度将从2.6%提升至 $\sim 1.8\%$ ； $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$
- 7.33 fb^{-1} @ 4.128 – 4.226 GeV: $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- 5.15 fb^{-1} @ 4.237 – 4.440 GeV: $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$

未来预期：

- 在2024年，BESIII在3.773 GeV处将共拥有**20** fb^{-1} $\psi(3770)$ ， $|V_{cd}|$ 测量精度进一步提升至 $\sim 1.0\%$

谢谢！