

国家自然科学基金委重大项目
《北京谱仪BESIII实验上粲夸克衰变
中标准模型的精确检验》之课题三

BESIII

精确测量 CKM 矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 以及粲介子衰变常数

柯百谦

郑州大学



郑州, 2024/05/10-13

- 立项依据
- 研究内容、研究目标以及研究方案
- 课题进展
- 总结

- 立项依据
- 研究内容、研究目标以及研究方案
- 课题进展
- 总结

CKM矩阵是标准模型的基本参数，
描述着夸克味道之间的混合

CKM矩阵么正性是检验电弱统一理论的重要途径

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} \boxed{V_{ud} \quad V_{us} \quad V_{ub}} \\ \boxed{V_{cd} \quad V_{cs} \quad V_{cb}} \\ V_{td} \quad V_{ts} \quad V_{tb} \end{pmatrix}$$

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

第一行的世界平均精度为 10^{-4}

$$|V_{cd}| = 0.221 \pm 0.004$$

$$|V_{cs}| = 0.987 \pm 0.011$$

$$|V_{cb}| = 0.0410 \pm 0.0014$$

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

第二行的世界平均精度只有 10^{-2}

提高第二行矩阵元的实验精度是
当前检验CKM矩阵么正性的关键

么正性要求之一

任意一行的平方和等于

如果么正性不满足

新物理？

粲介子纯轻衰变是测量 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 最理想的场所

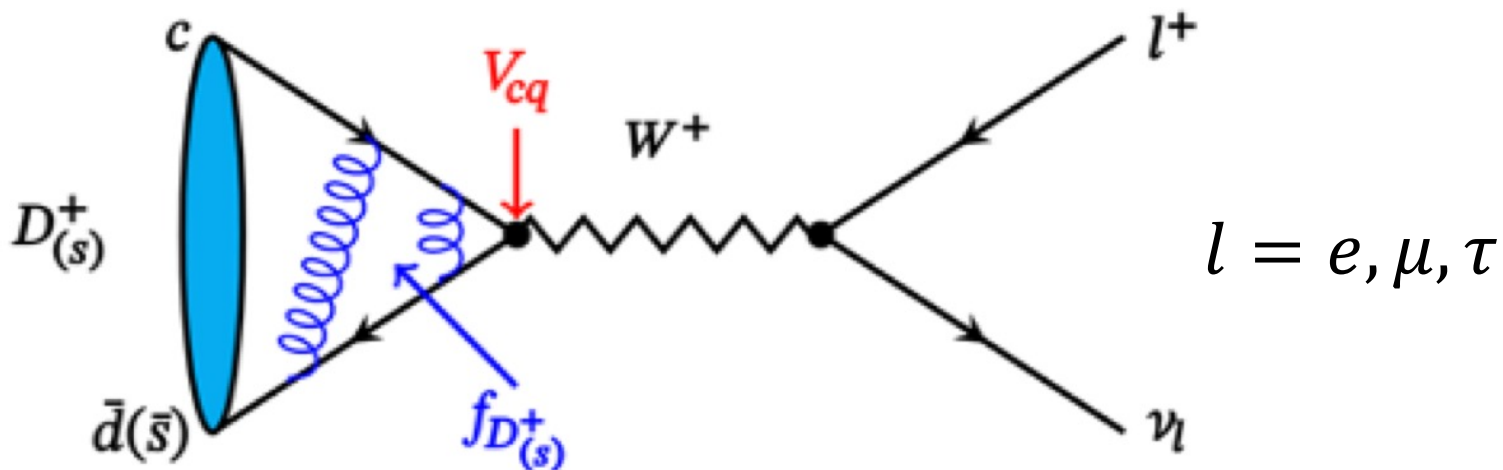
在纯轻衰变中获取的 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 的误差主要来自实验精度

12.2.4 $|V_{cs}|$

The direct determination of $|V_{cs}|$ is possible from semileptonic D or leptonic D_s decays, using lattice QCD calculations of the semileptonic D form factor or the D_s decay constant. For muonic decays, the average of Belle [41], CLEO-c [42], *BABAR* [43], and BESIII [44, 45] is $\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu) = (5.51 \pm 0.16) \times 10^{-3}$ [24]. For decays to τ leptons, the average of CLEO-c [42, 46, 47], *BABAR* [43], Belle [41], and BESIII [44] gives $\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu) = (5.52 \pm 0.24) \times 10^{-2}$ [24]. From each of these values, determinations of $|V_{cs}|$ can be obtained using the PDG values for the mass and lifetime of the D_s , the masses of the leptons, and $f_{D_s} = (249.9 \pm 0.5) \text{ MeV}$ [14]. The average of these determinations gives $|V_{cs}| = 0.992 \pm 0.012$, where the error is dominated by the experimental uncertainty. In semileptonic D decays, lattice QCD calculations of the form factor are available [14]. Using $f_+^{DK}(0) = 0.25 \pm 0.01$ and the average $\mathcal{B}(D \rightarrow K \ell \nu)$ [28, 43] [29], *BABAR* [48], and recent BESIII [26, 49] measurements of $D \rightarrow K \ell \nu$ decays, one obtains $|V_{cs}| = 0.939 \pm 0.038$, where the dominant uncertainty is from the theoretical calculation of the form factor. Averaging the determinations from leptonic and semileptonic decays, we find

$$|V_{cs}| = 0.987 \pm 0.011. \quad (12.10)$$

在半轻衰变中获取的 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 的误差主要受到理论上形状因子的计算（不小于2%）

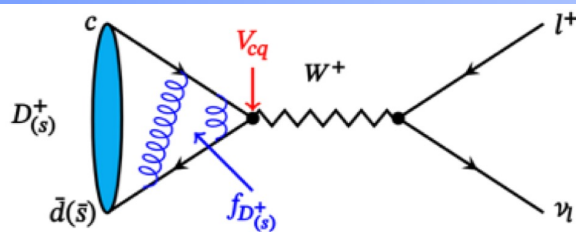


$$\Gamma(D_{(s)}^+ \rightarrow l^+ \nu_l) = \frac{G_F^2}{8\pi} |V_{cd(s)}|^2 f_{D_{(s)}}^2 m_{D_{(s)}} m_l^2 \left(1 - \frac{m_l^2}{m_{D_{(s)}}^2}\right)^2$$

- **弱相互作用**: 正反夸克对通过 W^+ 玻色子的湮灭 $\rightarrow |V_{cd(s)}|$
- **强相互作用**: 粲夸克与轻夸克之间的胶子交换 $\rightarrow f_{D_{(s)}}$
- CKM矩阵元 $|V_{cd(s)}|$ 只能从实验测定, 衰变常数 $f_{D_{(s)}}$ 可经由格点QCD计算或实验测量

实验测得

$\downarrow l = e, \mu, \tau$



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

结合格点QCD的 $f_{D_{(s)}}$

→ 精确测量CKM矩阵元 $|V_{cd(s)}|$

结合CKM全局拟合的 $|V_{cd(s)}|$

→ 精确刻度格点QCD计算 $f_{D_{(s)}}$

、可外推到B能区

不同轻子末态分宽度的比值

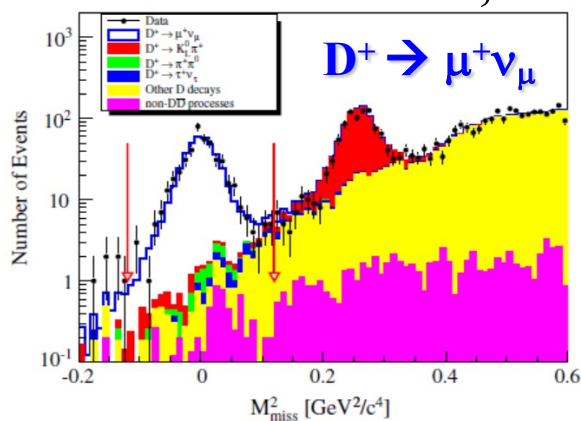
$$e^+ \nu_e : \mu^+ \nu_\mu : \tau^+ \nu_\tau$$

$$D^+ 10^{-5} : 1 : 2.67$$

$$D_s^+ 10^{-5} : 1 : 9.75$$

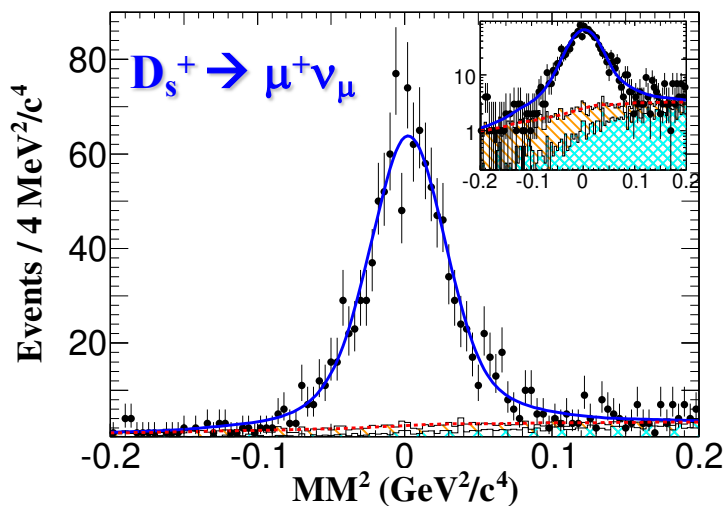
→ 标准模型可以精确预言，
检验轻子普适性

PRD 89, 051104



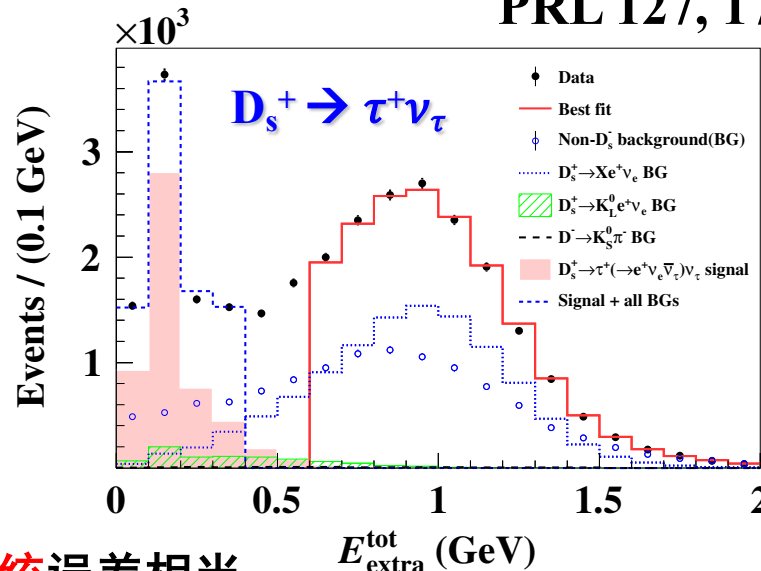
本底非常低，统计误差主导

PRL 122, 071802



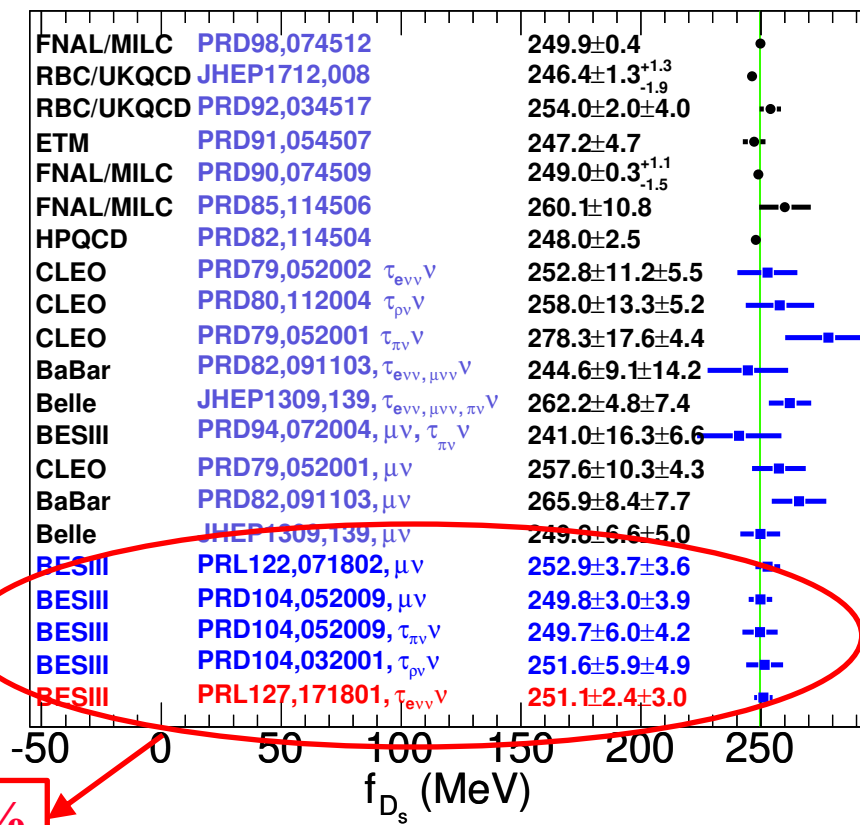
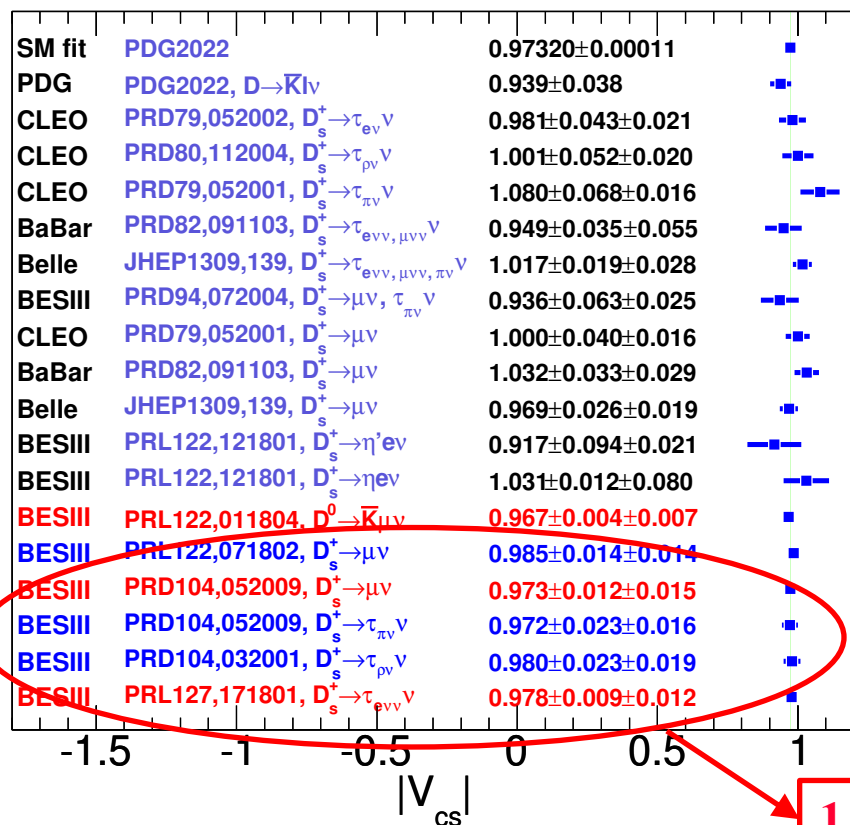
统计误差和系统误差相当

PRL 127, 171801



国际上的研究现状

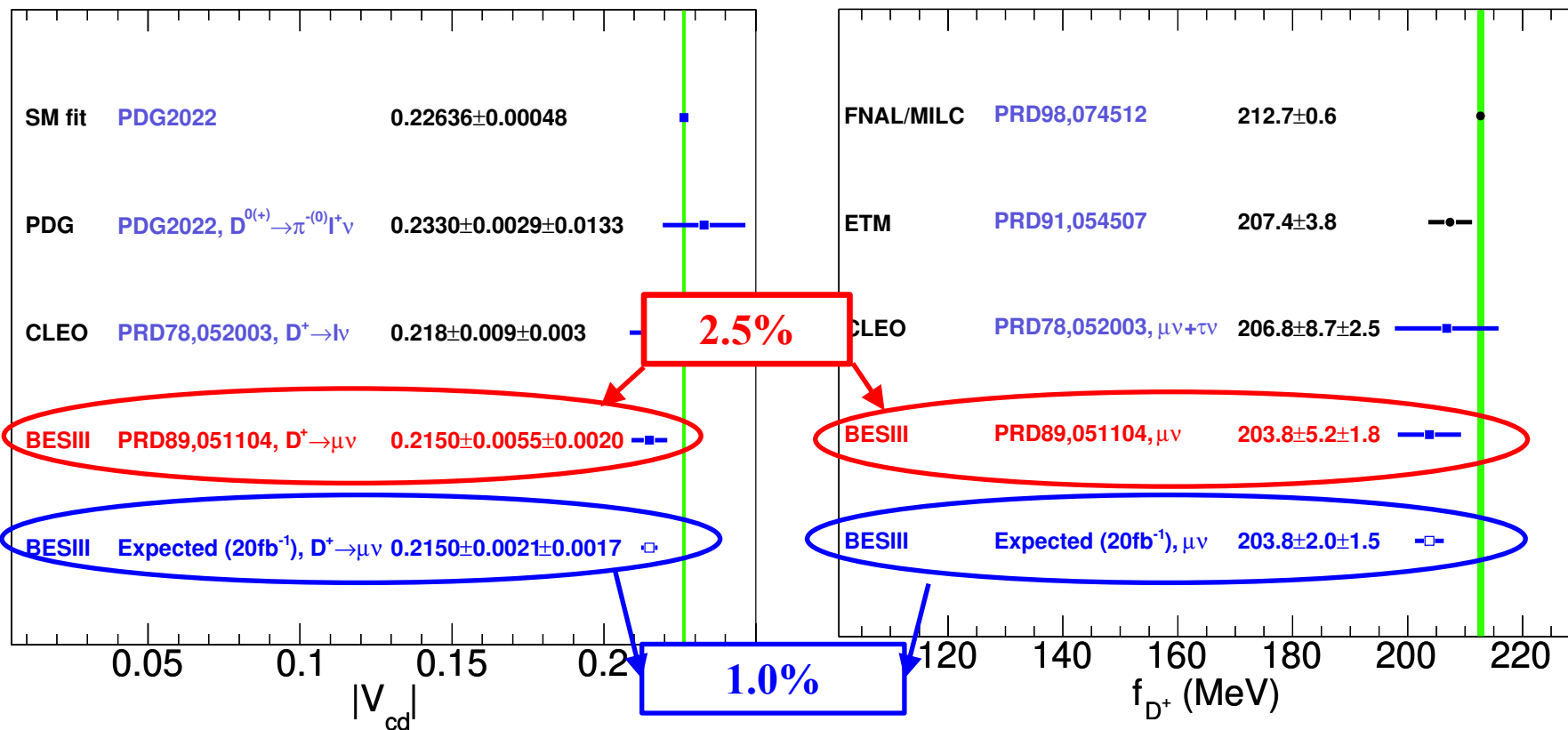
当前 $|V_{cd(s)}|$ 和 $f_{D(s)}$ 的世界平均值由BESIII实验测量结果主导



1.1%

国际上的研究现状

当前 $|V_{cd(s)}|$ 和 $f_{D(s)}$ 的世界平均值由BESIII实验测量结果主导



- 理论格点QCD精度：0.2%；单次实验精度：2-3%
- 主要实验：CLEO、Belle、BaBar 和 **BESIII**
- 当前**两倍以上**标准偏差的结果：
 - ◆ 实验与格点 QCD 计算的衰变常数 $f_{D_s} : f_D$ 之比值
 - ◆ 纯轻衰变和半轻衰变中测量的 $|V_{cs}|$
 - ◆ 实验和CKM全局拟合的 $|V_{cs}|/|V_{cd}|$ 比值

BESIII 的近阈粲介子样本在粲介子纯轻衰变的测量中预期达到国际最佳精度

- 立项依据
- 研究内容、研究目标以及研究方案
- 课题进展
- 总结

综合系统性地研究粲介子**纯轻衰变**

- 精确测量 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D_{(s)}^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$
 - ◆ 抽取**CKM矩阵元** $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$
 - ◆ 抽取粲介子**衰变常数** $f_{D_{(s)}}$
 - ◆ 检验轻子普适性
- 寻找 $D_{(s)}^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 、 $D_{(s)}^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ 和 $D_{(s)}^+ \rightarrow \gamma \mu^+ \nu_\mu$
 - ◆ 检验标准模型预期，结合理论与实验研究强相互作用

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \rightarrow \rho^+ \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau \end{array} \right.$$

- D^+ 介子的最好精度
 - ◆ $|V_{cd}|$: 2.8% \rightarrow 1%水平
 - ◆ 衰变常数 f_D : 2.8% \rightarrow 1%水平
 - ◆ 轻子普适性检验 $B(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)/B(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$:
24% \rightarrow 9%水平
- D_s^+ 介子的最好精度
 - ◆ $|V_{cs}|$: 1.1% \rightarrow 0.8%水平
 - ◆ 衰变常数 f_{D_s} : 1.1% \rightarrow 0.8%水平
 - ◆ 轻子普适性检验 $B(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)/B(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$:
4.7% \rightarrow 3.5%水平
- 衰变常数比值 f_{D_s}/f_D : 3.4% \rightarrow $< 1.5\%$
- 将 $D_{(s)}^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ 分支比的灵敏度提升至 10^{-7} 水平
- 首次测定並研究粲介子辐射纯轻衰变机制

$DKXD_s^*$ 数据



高能区

$D_s D_s^*$ 或 $D^+ D^-$ 数据

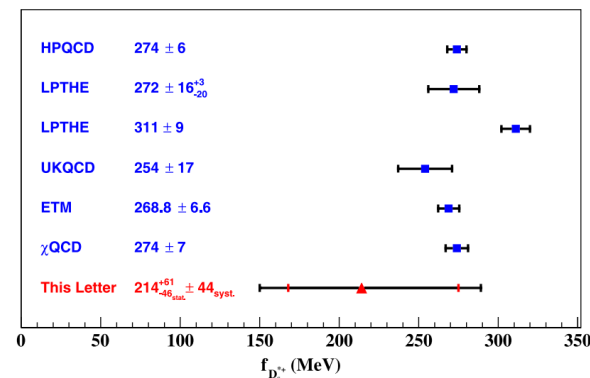
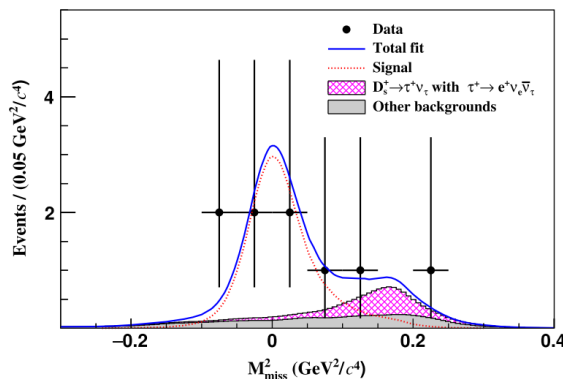


近阈值

- 与Belle(II)和LHCb实验相比，BESIII数据样本有**低本底、低系统误差**等优点
- BESIII数据样本在近阈值粲介子能区**统计量最大、质量最好**
 - ◆ **$20 \text{ fb}^{-1} D^+$ 数据**
 - ◆ 运用更多**不同能量点**的 **D_s^+ 数据**
(4.13-4.16 GeV 以及 4.23 GeV以上)
- **缪子计数器**有助于获取最干净的 $D_{(s)}^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 衰变信号
- 整合**不同能量点**的数据，联合拟合**不同衰变道**，预期获取世界上**精度最高**的成果

- 立项依据
- 研究内容、研究目标以及研究方案
- 课题进展
- 总结

- Improved measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (PRD **108**, 112001, Tengjiao Wang, 7.33 fb^{-1})
- Updated measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ via $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$ (PRD **108**, 092014 (2023), Chen Xia , 7.33 fb^{-1})
- Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ via $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau$ (JHEP09(2023)124 by Liangchen Liu , 7.33 fb^{-1})
- First Experimental Study of the Purely Leptonic Decay $D_s^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$ (PRL **131**, 141802 (2023), by Zhenwu Ge)



- Search for the leptonic decays $D^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$ and $D^{*+} \rightarrow \mu^+ \nu_e$ (Spokesperson stage, by Hui Li)
- Improved measurement of branching fraction of $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ (CWR stage, by Tengjiao Wang, 8 fb^{-1})
- Search for the leptonic decay $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ (CWR stage, by Nan Zhang, 8 fb^{-1})
- Branching Fraction of the $B(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)$ decay via $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$ (complete memo review, 8 fb^{-1})
- Search for $D^{*+} \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ with Deep Learning (memo, by Yangu Li)
- Study of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ (simultaneous fit, preparing memo, by Jiahui Qiao)

- $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$: 尝试除了 $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$ 过程外的其余衰变道。相较于 D_S^+ : 信号过程压低, 主要本底来自CF过程 (Ying-Chao Xu)
- Search for $D^+ \rightarrow \gamma \mu^+ \nu_\mu$ (Yangu Li)
- Search for $D_S^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ 和 $D_S^+ \rightarrow \gamma \mu^+ \nu_\mu$ (Panting Ge)
- Search for $D_S^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ (Nan Zhang)

- 立项依据
- 研究内容、研究目标以及研究方案
- 课题进展
- 总结

- 精确测量CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 以及粲介子衰变常数 $f_{D(s)}$ 是**检验标准模型、寻找新物理**的关键。
- 课题依托BESIII实验，利用世界上最大的近阈值粲介子数据样本，系统性开展粲介子纯轻衰变的精确测量。
- $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\mu$ 的任务已完成。 $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ ， $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 、 $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\mu$ 基于 8 fb^{-1} 进展顺利。
- $D^+ \rightarrow \gamma l^+ \nu_l$ 已基本完成关键技术的开发。即将开展 $D_s^+ \rightarrow \gamma l^+ \nu_l$ 。
- 完成原定任务以外的 $D_{(s)}^{*+} \rightarrow l^+ \nu_l$ 。

	BESIII	BESIII	Belle	Belle II
Luminosity	2.9 fb ⁻¹ at 3.773 GeV	20 fb ⁻¹ at 3.773 GeV	1 ab ⁻¹ at Υ(nS)	50 ab ⁻¹ at Υ(nS)
$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$	5.1% _{stat.} 1.6% _{syst.} [4]	1.9% _{stat.} 1.3% _{syst.}	—	3.0% _{stat.} 1.8% _{syst.} [54]
f_{D^+} (MeV)	2.6% _{stat.} 0.9% _{syst.} [4]	1.0% _{stat.} 0.8% _{syst.}	—	—
V _{cd}	2.6% _{stat.} 1.0%* _{syst.} [4]	1.0% _{stat.} 0.8%* _{syst.}	—	—
$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)$	20% _{stat.} 13% _{syst.} [5]	8% _{stat.} 5% _{syst.}	—	—
$\frac{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)}{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)}$	20% _{stat.} 13% _{syst.} [5]	8% _{stat.} 5% _{syst.}	—	—
Luminosity	3.2 fb ⁻¹ at 4.178 GeV	6 fb ⁻¹ at 4.178 GeV	1 ab ⁻¹ at Υ(nS)	50 ab ⁻¹ at Υ(nS)
$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$	2.8% _{stat.} 2.7% _{syst.} [6]	2.1% _{stat.} 2.2% _{syst.}	5.3% _{stat.} 3.8% _{syst.}	0.8% _{stat.} 1.8% _{syst.}
$f_{D_s^+}$ (MeV)	1.5% _{stat.} 1.6% _{syst.} [6]	1.0% _{stat.} 1.2% _{syst.}	—	—
V _{cs}	1.5% _{stat.} 1.6% _{syst.} [6]	1.0% _{stat.} 1.2% _{syst.}	—	—
$f_{D_s^+}/f_{D^+}$	3.0% _{stat.} 1.5% _{syst.} [6]	1.4% _{stat.} 1.4% _{syst.}	—	—
$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)$	2.2% _{stat.} 2.6% _{syst.} [†]	1.6% _{stat.} 2.4% _{syst.}	3.7% _{stat.} 5.4% _{syst.}	0.6% _{stat.} 2.7% _{syst.}
$f_{D_s^+}$ (MeV)	1.1% _{stat.} 1.5% _{syst.} [†]	0.9% _{stat.} 1.4% _{syst.}	—	—
V _{cs}	1.1% _{stat.} 1.5% _{syst.} [†]	0.9% _{stat.} 1.4% _{syst.}	—	—
$\bar{f}_{D_s^+}^{\mu\&\tau}$ (MeV)	0.9% _{stat.} 1.0% _{syst.} [†]	0.6% _{stat.} 0.9% _{syst.}	1.6% _{stat.} 2.0% _{syst.}	0.3% _{stat.} 1.0% _{syst.}
$\bar{V}_{cs}^{\mu\&\tau}$	0.9% _{stat.} 1.0% _{syst.} [†]	0.6% _{stat.} 0.9% _{syst.}	—	—
$\frac{\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)}{\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)}$	3.6% _{stat.} 3.0% _{syst.} [†]	2.6% _{stat.} 2.8% _{syst.}	6.4% _{stat.} 5.2% _{syst.}	0.9% _{stat.} 3.2% _{syst.}