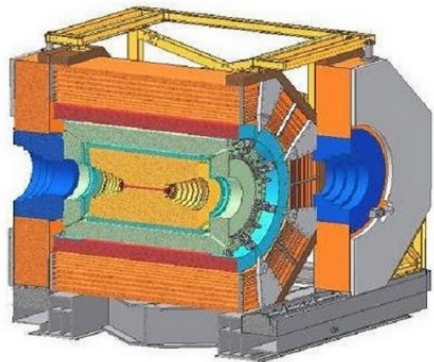




国家自然科学基金委重大项目
中期检查

BESIII

《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

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



兰州大学，2025/08/08

- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果
- 存在的问题及今后应采取的措施
- 总结

- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果
- 存在的问题及今后应采取的措施
- 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

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

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

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

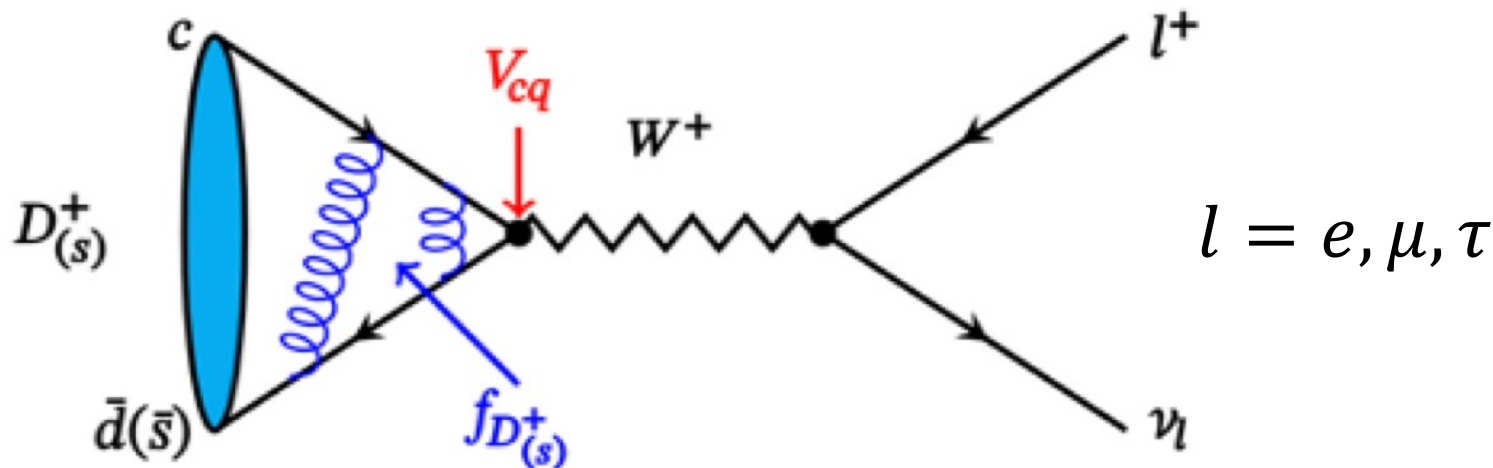
么正性要求之一

任意一行的平方和等于一

如果么正性不满足

新物理?

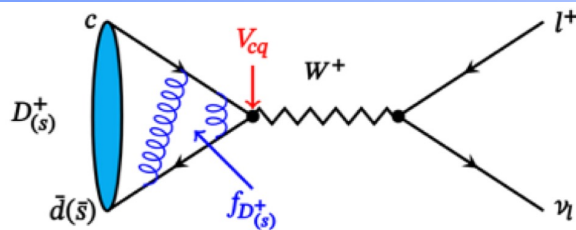
粲介子纯轻衰变是测量 $f_{D(s)}$ 和 $|V_{cd(s)}|$ 的理想场所



- **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

↓ $l = e, \mu, \tau$



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

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

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


$$\begin{aligned}\tau^+ &\rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ &\rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ &\rightarrow \rho^+ \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ &\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \bar{\nu}_\tau\end{aligned}$$

□ D^+ 介子的最好精度

◆ $|V_{cd}|$: 2.8% → 1%左右

◆ 衰变常数 f_D : 2.8% → 1%左右

◆ 轻子普适性检验 $B(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)/B(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$:
24% → 9%水平

□ D_s^+ 介子的最好精度

◆ $|V_{cs}|$: 1.1% → 1%左右

◆ 衰变常数 f_{D_s} : 1.1% → 1%左右

◆ 轻子普适性检验 $B(D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)/B(D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$:
4.7% → 3.5%水平

□ 衰变常数比值 f_{D_s}/f_D : 3.4% → < 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

□ CKM 矩阵元 $|V_{cs}|$ 以及 D_s^+ 介子的衰变常数:

已完成全部计划的测量, 包含 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 和 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$,
 $|V_{cs}|$ 和 f_{D_s} 达到目标精度。

□ CKM 矩阵元 $|V_{cd}|$ 以及 D^+ 介子的衰变常数:

已完成 $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 的研究, $|V_{cd}|$ 和 f_D 基本达到目标精度;

已使用 8fb^{-1} 完成 $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\mu$ 的研究, 正在开展基于全部数据和更多 τ^+ 衰变的研究计划。

□ 粲介子纯轻辐射衰变 :

成功应用深度学习方法完成了 $D^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ 的研究;

正在拓展深度学习方法于 $D_s^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ 和 $D_{(s)}^+ \rightarrow \gamma \mu^+ \nu_\mu$ 的研究。

□ D_s^{*+} 和 D^{*+} 纯轻衰变的首次测量 : (新增研究计划)

首次观测到 $D_s^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$ 以及首次测量 D_s^{*+} 的衰变常数;

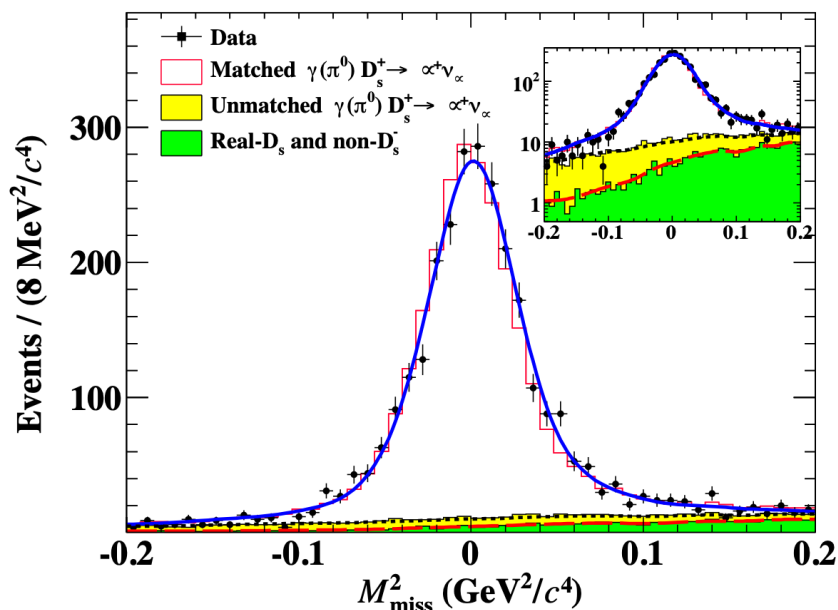
首次寻找 $D^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$ 和 $D^{*+} \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 。

- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果**
- 存在的问题及今后应采取的措施
- 总结

主要成果: f_{D_s} 和 $|V_{cs}|$

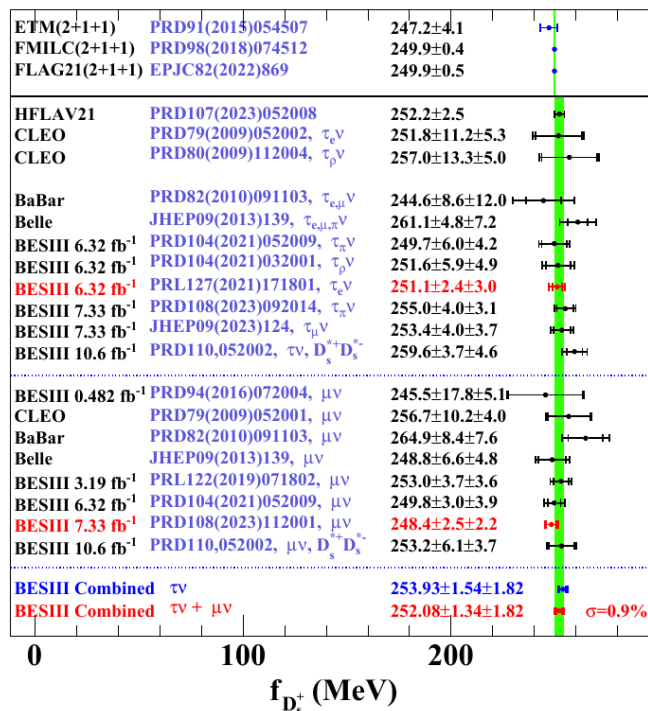
$$D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu + \tau^+ \nu_\tau$$

7.33 fb⁻¹ @4.128-4.226 GeV



PRD 108, 112001 (2023)

f_{D_s} 的实验测量比较

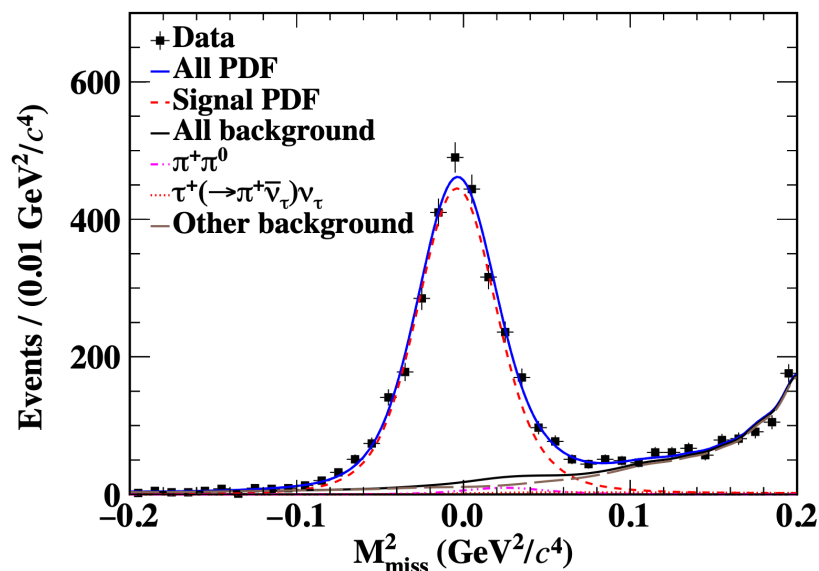


- 完成了 $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 以及 $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 多个 τ^+ 衰变道的测量。
- $f_{D_s} = 252.1(1.3)(1.8)$ MeV ; 精度: 0.9%。
- $|V_{cs}| = 0.9820(52)(71)$; 精度: 0.9%。
- 以世界最高精度测量了 f_{D_s} 和 $|V_{cs}|$, 达到目标精度。

主要成果: f_D 和 $|V_{cd}|$

$$D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

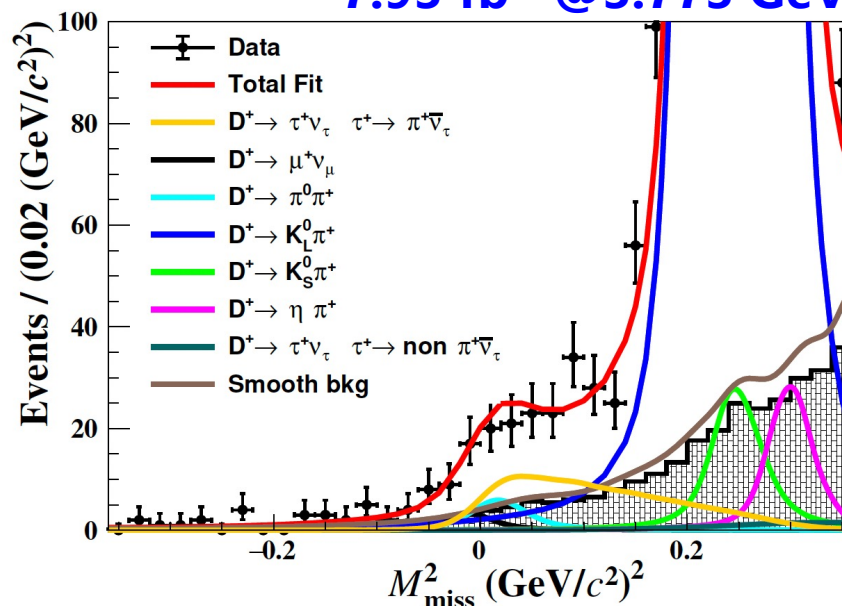
20.3 fb⁻¹ @ 3.773 GeV



PRL 135, 061801 (2025)

$$D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau, \tau^+ \rightarrow \pi^+ \nu_\tau$$

7.93 fb⁻¹ @ 3.773 GeV



JHEP01(2025)089

□ $f_D = 47.53(48)(24)(12)$ MeV; 精度1.2%。

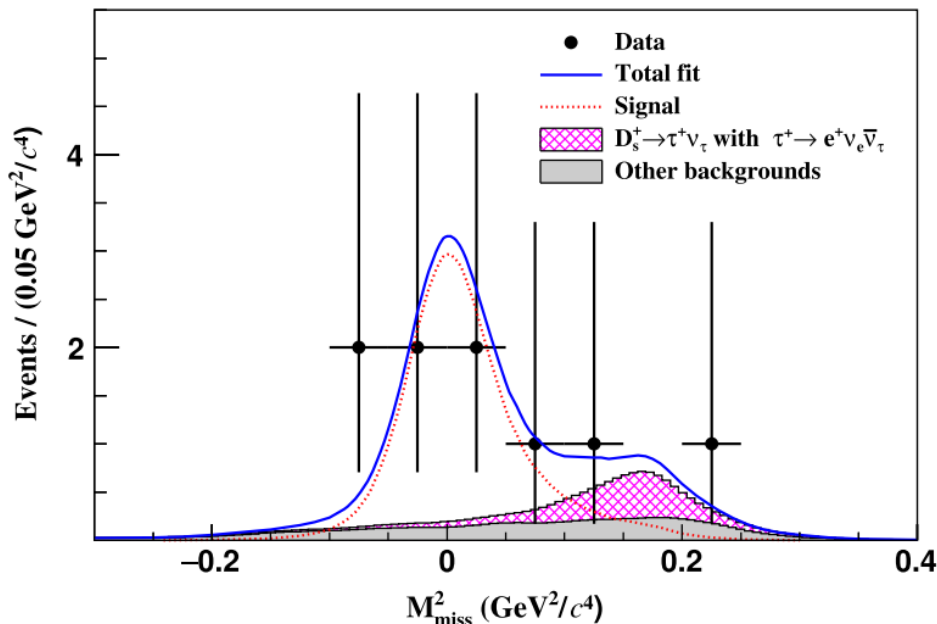
□ $|V_{cd}| = 0.2242(23)(11)(9)$; 精度1.2%。

□ 以世界最高精度测量 f_D 和 $|V_{cd}|$ ，将当前精度提高了2.3倍，基本完成了研究目标。

主要成果： D_s^{*+} 和 D^{*+} 的研究

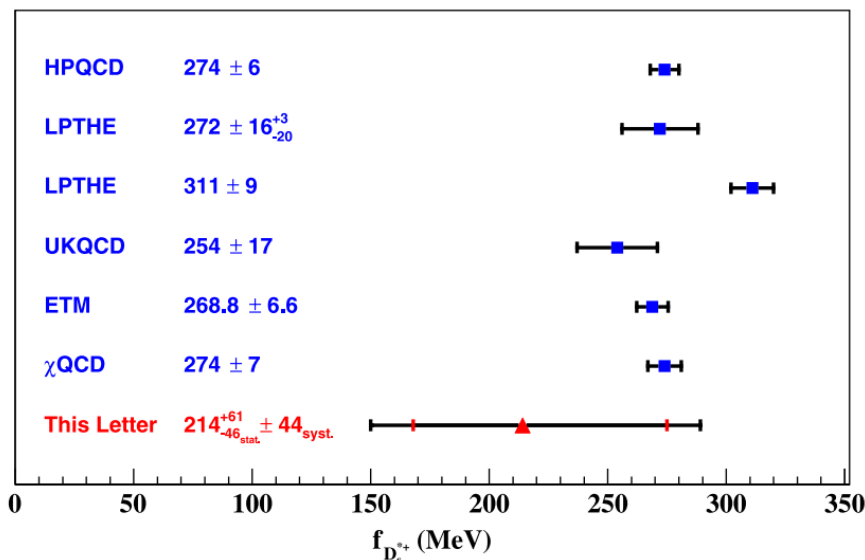
$$D_s^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$$

7.33 fb⁻¹ @4.128-4.226 GeV



PRL 131, 141802 (2023)

D_s^{*+} 衰变常数实验与理论比较。



□ 首次测量 D_s^{*+} 衰变常数, $f_{D_s} = 214(^{+61}_{-46})(44)$ MeV, 为检验格点QCD计算开闢了新场所。

□ 首次寻找 D^{*+} 纯轻衰变过程。

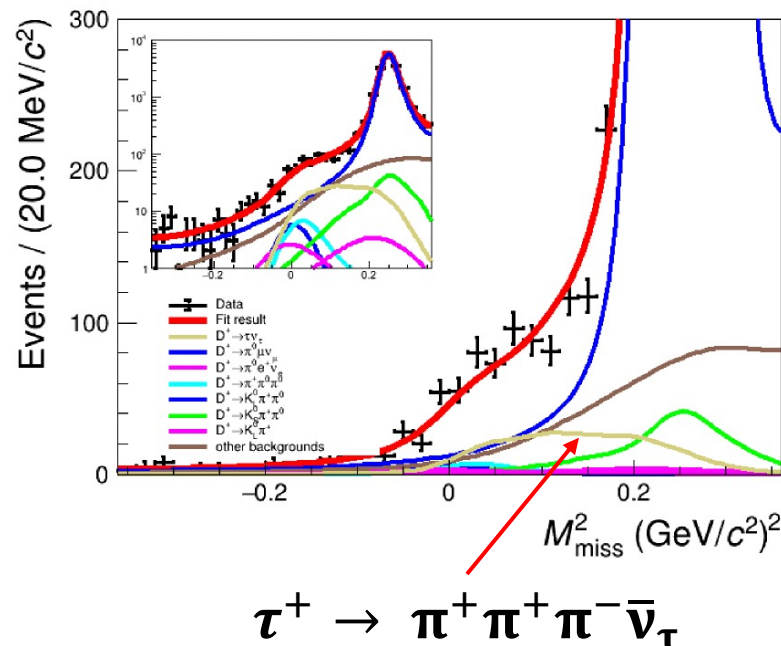
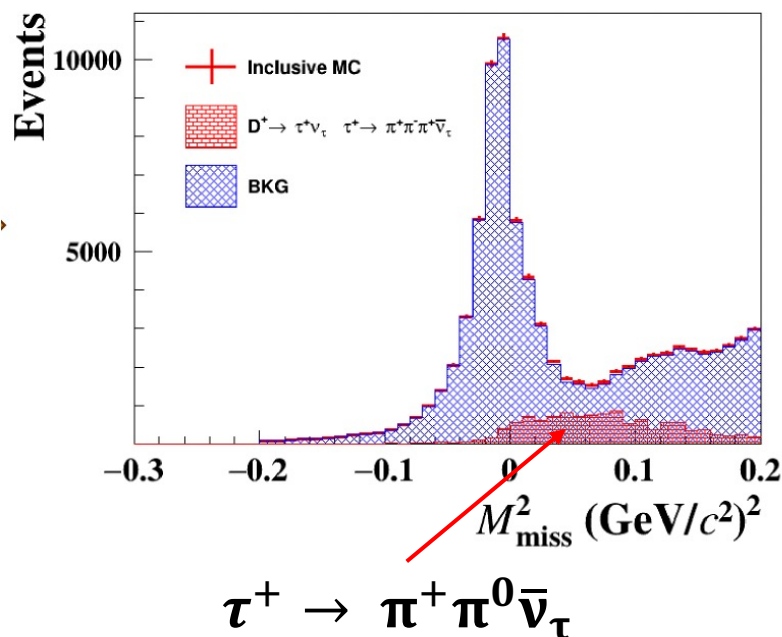
PRD 110, 012003 (2024)

文章列表和正在进行的研究

No.	题目	期刊号
1	Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ via $\tau^+ \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\tau \nu_\mu$	JHEP09(2023)104
3	Improved Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	PRD 108, 112001 (2023)
4	The updated measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ via $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}_\tau$	PRD 108, 092014 (2023)
2	First Experimental Study of the Purely Leptonic Decay $D_s^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$	PRL 131, 141802 (2024)
5	Search for the leptonic decays $D^{*+} \rightarrow e^+ \nu_e$ and $D^{*+} \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	PRD 110, 012003 (2024)
6	Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow l^+ \nu_l$ via $e^+ e^- \rightarrow D_s^{*+} D_s^{*-}$	PRD 110, 052002 (2024)
7	Measurement of integrated luminosity of data collected at 3.773 GeV by BESIII from 2021 to 2024	CPC 48, 123001 (2024)
8	Measurement of the branching fraction of $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	JHEP01(2025)089
9	Search for the leptonic decay $D^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	CPC 49, 063001 (2025)
10	Improved measurement of branching fraction of $D^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	PRL 135, 061801 (2025)
11	Search for the radiative leptonic decay $D^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$ with Deep Learning	Accepted by CPC
12	Combined measurement of the branching fraction of $D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$	memo阶段(BAM-917)
13	Improved measurement of $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu$	年会报告
14	Study of the $D_{(s)}^+ \rightarrow \gamma \mu^+ \nu_\mu$ and $D_s^+ \rightarrow \gamma e^+ \nu_e$	开展中

- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果
- 存在的问题及今后应采取的措施**
- 总结

- 原依据数据积分亮度以及Ds分析的经验设定 $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 分支比目标精度为2.0%。
- 在工作中发现, $D^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 主要本底来自于 Cabbibo 许可衰变, D_s 的则来自于 Cabbibo 压低衰变。信噪比相差100倍!



- 首次使用深度学习在这分析上, 难估计预期精度。

- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果
- 存在的问题及今后应采取的措施
- **总结**

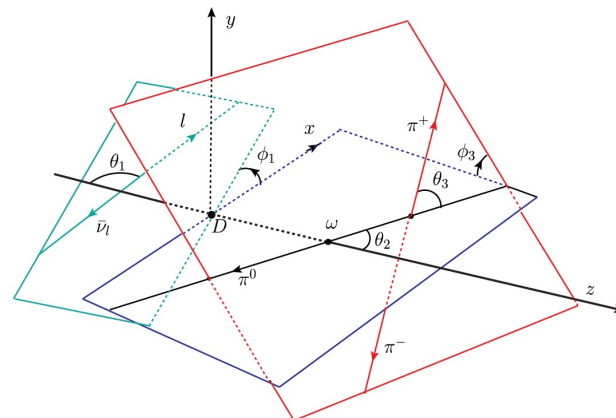
- 精确测量粲介子衰变常数 $f_{D(s)}$ 以及CKM矩阵元 $|V_{cd}|$ 和 $|V_{cs}|$ 是**检验标准模型、寻找新物理**的关键。
- 本课题基于BESIII实验采集的 $\psi(3770)$ 数据，系统性地通过研究粲介子纯轻衰变，**以世界最高精度测量 $f_{D(s)}$ 和 $|V_{cd(s)}|$ 。**
- **已完成主要研究目标，取得了系列重大进展。** 其余研究内容也都已经部署人力开展中。
- 共发表BESIII合作组署名论文10篇(含2篇PRL)、另有相关综述与理论文章6篇。

Annual Review of Nuclear and Particle Science

Recent Progress in Leptonic and Semileptonic Decays of Charmed Hadrons

B.-C. Ke, J. Koponen, H.-B. Li, and Y.H. Zheng, “Recent Progress in Leptonic and Semileptonic Decays of Charmed Hadrons”, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 73, 285-314 (2023).

粲介子含轻衰变综述文章



Y.C. Yu, H. Zhang, B.-C. Ke et al., “Five-body $D \rightarrow V$ semileptonic decays”, *Phys. Rev. D* 110, 053007 (2024).

五体半轻衰变的一般表达式，为课题四提供理论支持

$$d^5\Gamma = \frac{G_F^2 |V_{cs}|^2}{(4\pi)^6 m_{D_s}^3} X \beta_m \beta_l \mathcal{I}(m^2, q^2, \theta_{K^-}, \theta_\mu, \chi) dm^2 dq^2 d\cos\theta_{K^-} d\cos\theta_\mu d\chi,$$

轻子质量修正项

H. Zhang, B.-C. Ke, Y. Yu et al., “Lepton mass correction in partial wave analyses of charmed meson semi-leptonic decays”, *Chin. Phys. C* 47, 063101 (2023).

四体半轻衰变宽度的轻子质量修正，修正了四体缪子半轻测量中约1%的偏差

	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]
$f_{D^+}(\text{MeV})$	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.}
$f_{D_s^+}(\text{MeV})$	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.}
$f_{D_s^+}(\text{MeV})$	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.}	—	—
$\bar{f}_{D_s^+}^{\mu\&\tau}(\text{MeV})$	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.}