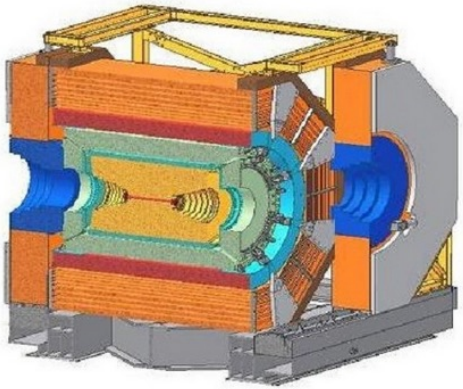


国家自然科学基金委重大项目

《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

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

成都理工大学， 2026/10/18

内容提要

- 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
- 其它相关文章
- 总结

内容提要

- 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
- 其它相关文章
- 总结

CKM矩阵

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

$$V_{\mathrm{CKM}}\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

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?

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

第一行的世界平均精度为 10^{-4}

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

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

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

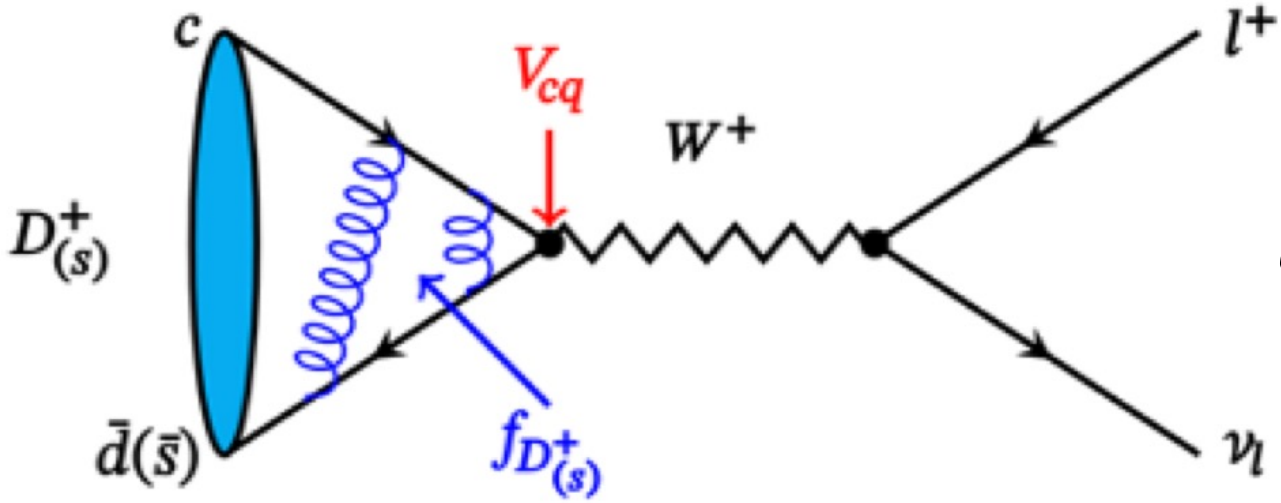
$$|V_{cd}|^2+|V_{cs}|^2+|V_{cb}|^2= 1.025 \pm 0.022$$

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

粲介子纯轻衰变

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



$l = e, \mu, \tau$

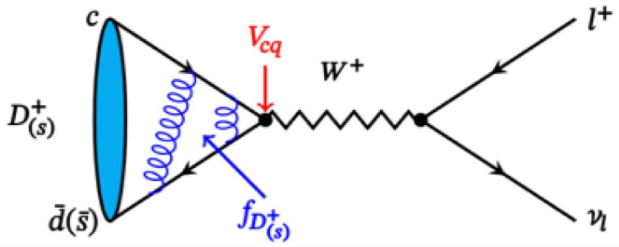
- **弱相互作用**：正反夸克对通过 W^+ 玻色子的湮灭 ➔ $|V_{cd(s)}|$
- **强相互作用**：粲夸克与轻夸克之间的胶子交换 ➔ $f_{D_{(s)}}$

- 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

粲介子纯轻衰变

实验测得

$l = e, \mu, \tau$



$$\Gamma(D^+_{(s)} \to \ell^+ \nu_\ell) = \frac{G_F^2}{8\pi} f^2_{D^+_{(s)}} |V_{cd(s)}|^2 m_\ell^2 m_{D^+_{(s)}} \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m^2_{D^+_{(s)}}}\right)^2$$

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

研究内容

系统性地研究粲介子纯轻衰变

- 精确测量 $D^+_{(s)} \to \mu^+\nu_\mu$ 和 $D^+_{(s)} \to \tau^+\nu_\tau$
  - 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

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

- 寻找$D^+_{(s)} \to e^+\nu_e$、$D^+_{(s)} \to \gamma e^+\nu_e$和$D^+_{(s)} \to \gamma\mu^+\nu_\mu$
  - 检验标准模型预期， 结合理论与实验研究强相互作用

研究目标

- 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 $B(D^+ \to \tau^+ \nu_\tau)/B(D^+ \to \mu^+ \nu_\mu)$: 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 $B(D_s^+ \to \tau^+ \nu_\tau)/B(D_s^+ \to \mu^+ \nu_\mu)$: 4.7% → 3.5%水平
- 衰变常数比值 f_{D_s}/f_D : 3.4% → < 1.5%
- 将$D_{(s)}^+ \to e^+ \nu_e$ 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

执行情况

- **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$D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu$ 和 $D_s^+ \to \tau^+\nu_\tau$ ，　　$|V_{cs}|$和f_{Ds}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$D^+ \to \mu^+\nu_\mu$的研究，　$|V_{cd}|$和f_D基本达到目标精度;

  使用8fb^{-1}的$D^+ \to \tau^+\nu_\mu$已发表 。

  20fb^{-1}的即将进入memo。

- **粲介子纯轻辐射衰变：**

  成功应用深度学习方法完成了$D^+ \to \gamma e^+\nu_e$（已发表）和$D_s^+ \to \gamma e^+\nu_e$（memo）的研究;

  正在拓展深度学习方法于和$D_{(s)}^+ \to \gamma\mu^+\nu_\mu$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 $D_s^{*+} \to e^+\nu_e$ 以及首次测量 D_s^{*+} 的衰变常数（已发表）;

  首次寻找$D^{*+} \to e^+\nu_e$和$D^{*+} \to \mu^+\nu_\mu$ （已发表）。

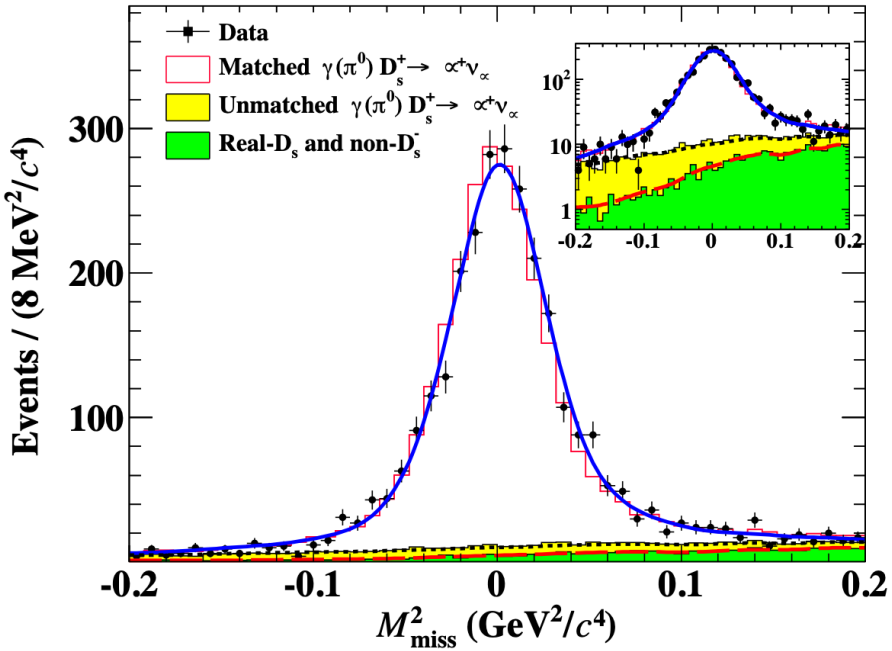
内容提要

- 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**
- 其它相关文章
- 总结

主要成果：f_{D_s}和$|V_{cs}|$

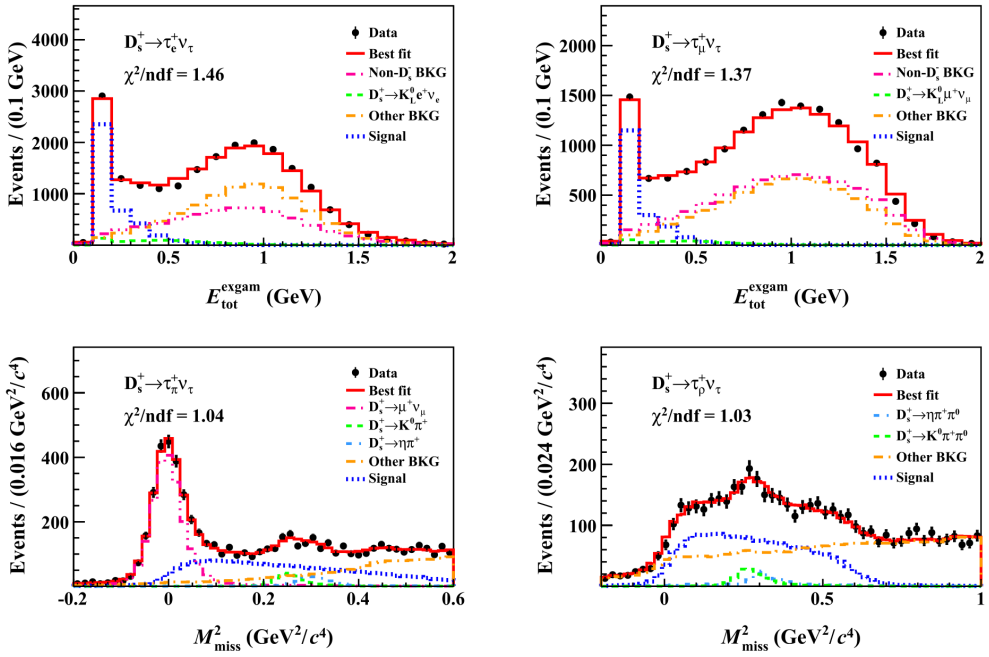
$D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu$+$\tau^+\nu_\tau$+

7.33 fb^{-1} @4.128-4.226 GeV



PRD 108, 112001 (2023)

多个 τ^+ 衰变过程的联合拟合



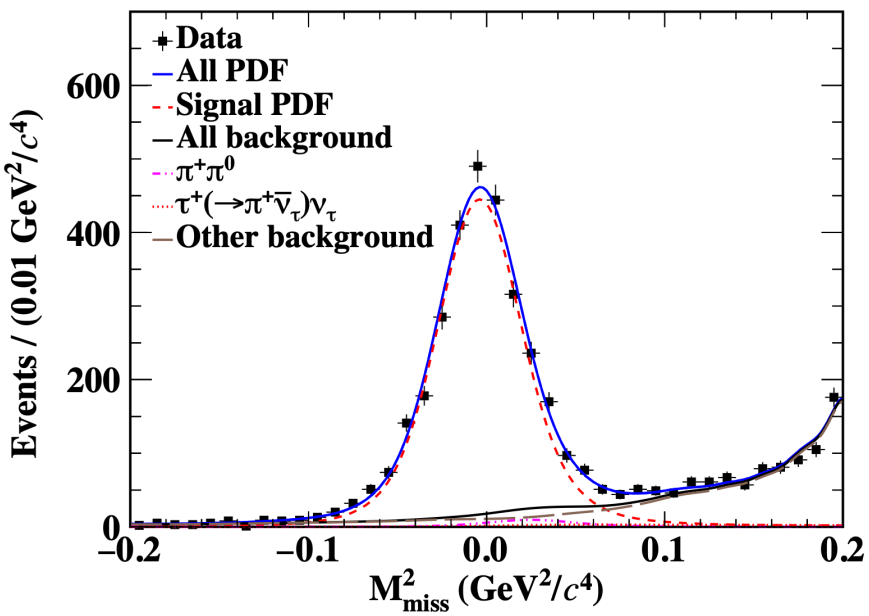
PRD 114, 033004 (2026)

- 完成了$D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu$ 以及$D_s^+ \to \tau^+\nu_\tau$ 多个 τ^+衰变道的联合拟合。
- $f_{Ds} = 252.1(1.3)(1.8)$ 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$|V_{cd}|$

$D^+ \to \mu^+\nu_\mu$

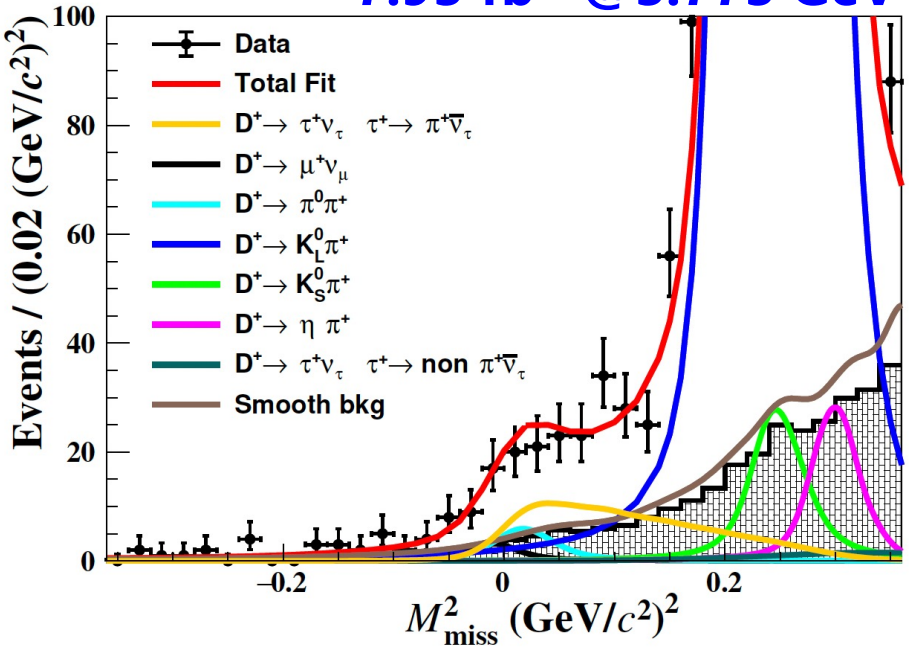
20.3 fb^{-1} @3.773 GeV



PRL 135, 061801 (2025)

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

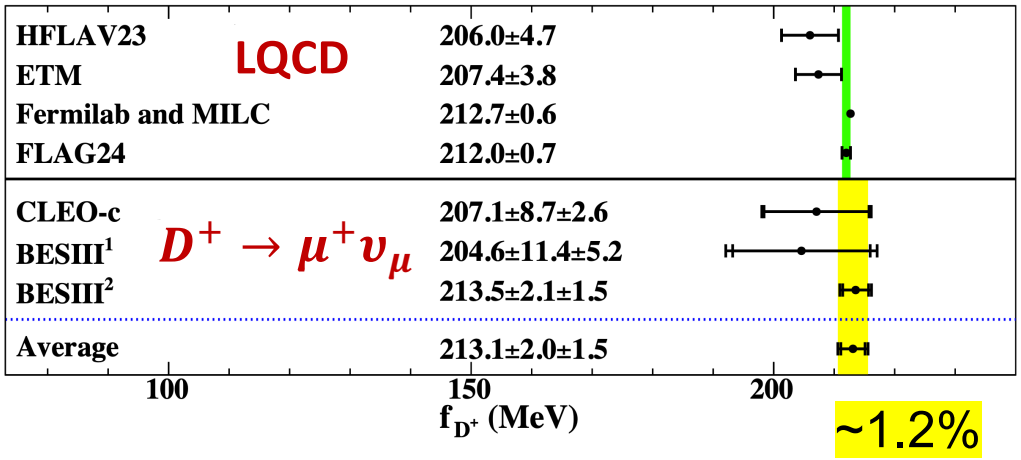
7.93 fb^{-1} @3.773 GeV



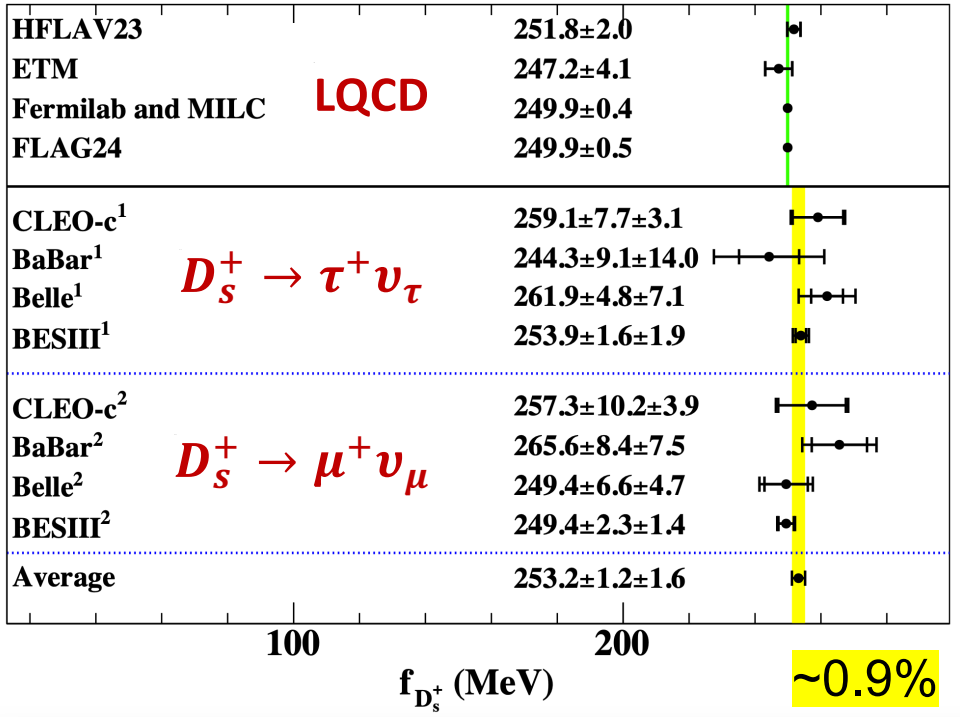
JHEP01(2025)089

- $f_D = 47.53(48)(24)(12)$ 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 。**

衰变常数



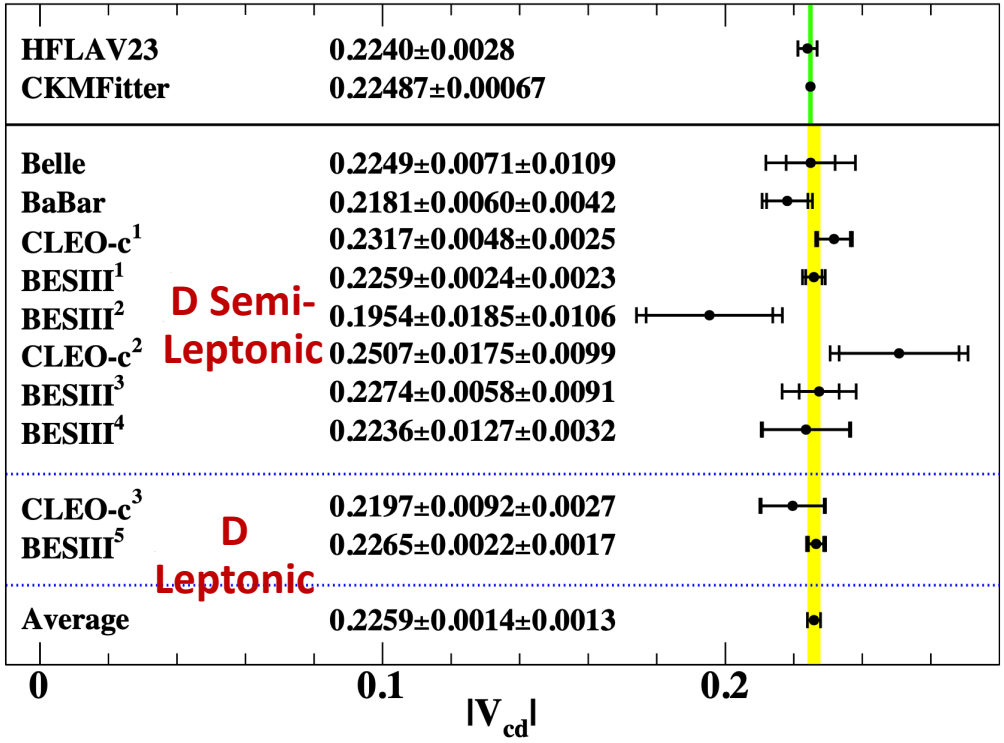
~1.2%



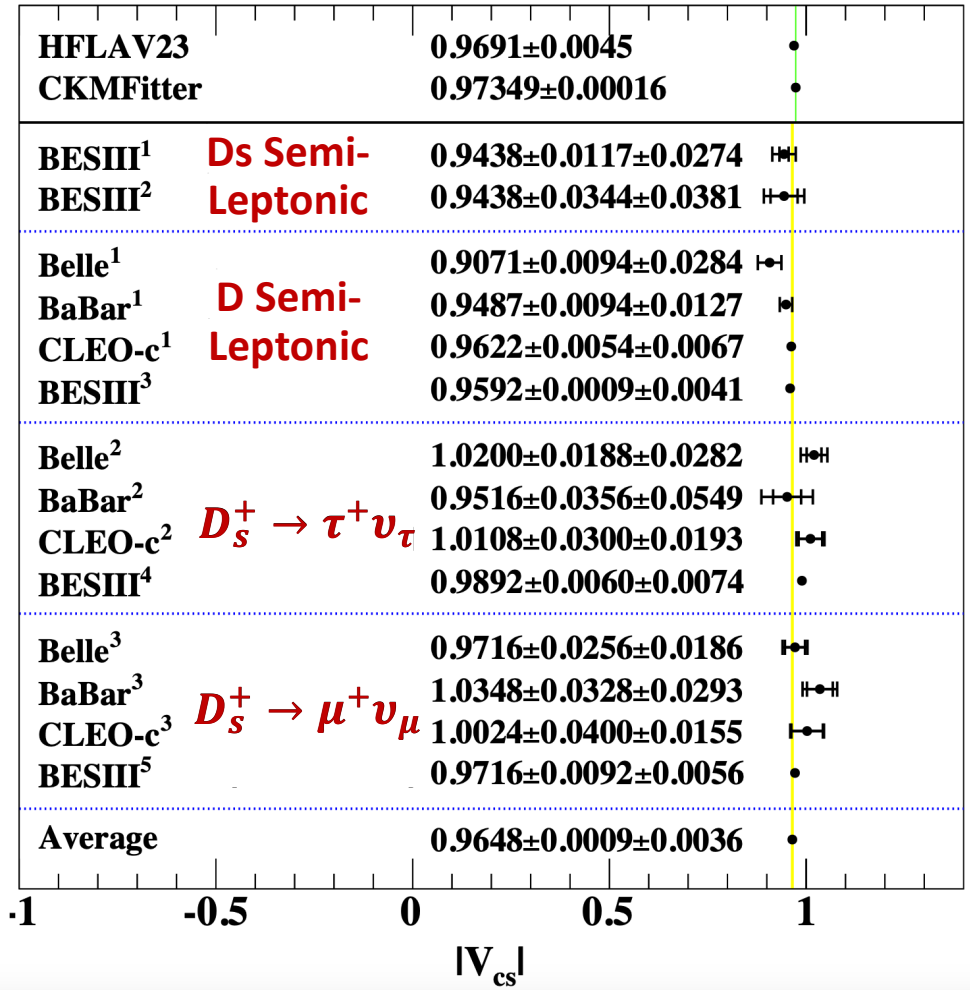
~0.9%

Precision is worse than LQCD

$|V_{cd}|$和$|V_{cs}|$



Statistical uncertainty dominates

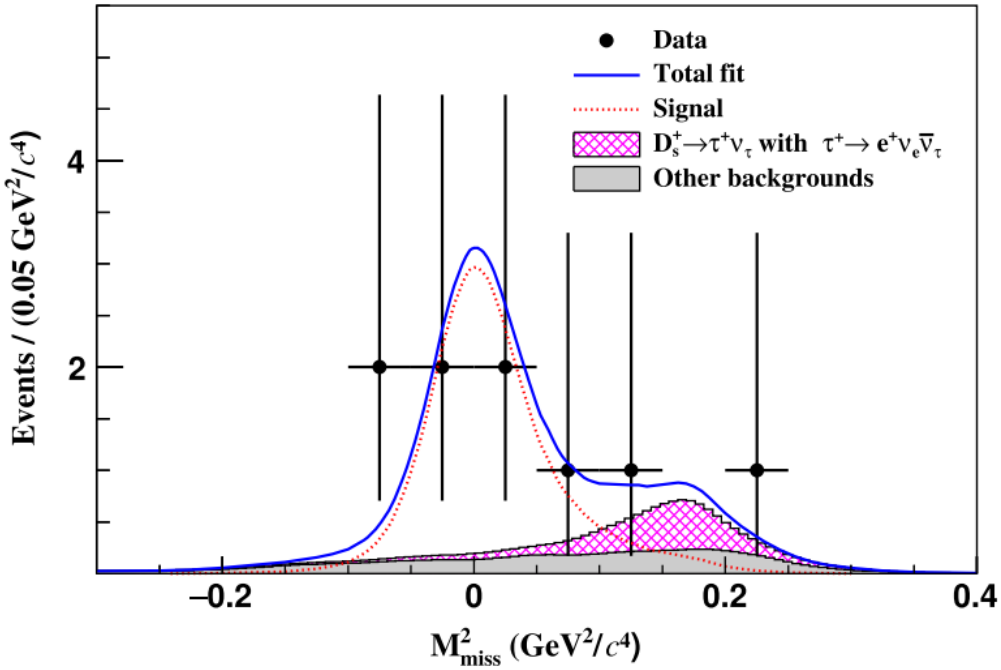


Lead by Semi-Leptonic, but exist tension with leptonic

主要成果：D_s^{*+}和D^{*+}的研究

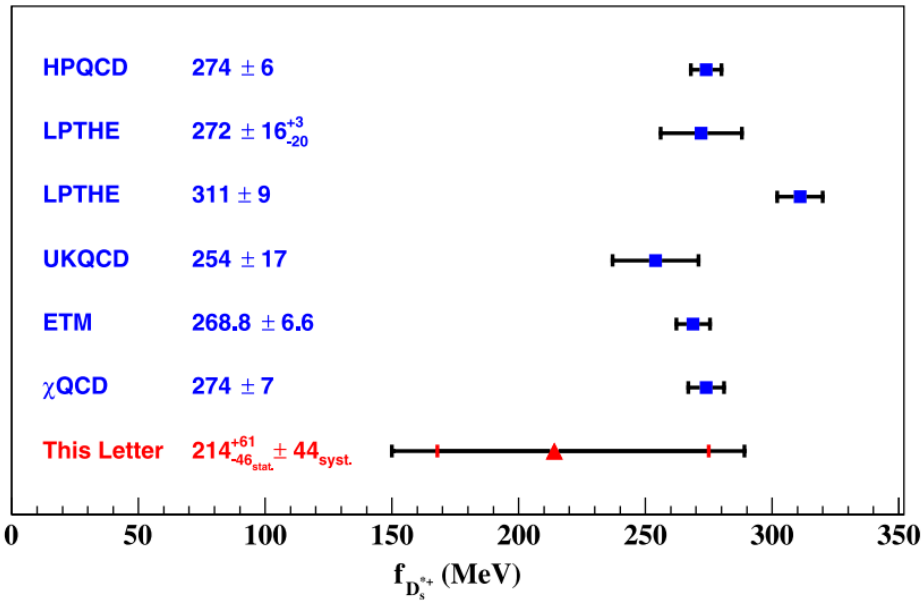
$D_s^{*+} \to e^+\nu_e$

7.33 fb^{-1} @4.128-4.226 GeV



PRL 131, 141802 (2023)

D_s^{*+} 衰变常数实验与理论的比较。



- 首次测量 D_s^{*+}衰变常数，$f_{Ds} = 214(^{+61}_{-46})(44)$ 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 $D_s^+ \to \tau^+\nu_\tau$ via $\tau^+ \to \mu^+\bar{\upsilon}_\tau\nu_\mu$	JHEP09(2023)104
3	Improved Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \to \mu^+\nu_\mu$	PRD 108, 112001 (2023)
4	The updated measurement of the branching fraction of $D_s^+ \to \tau^+\nu_\tau$ via $\tau^+ \to \pi^+\bar{\upsilon}_\tau$	PRD 108, 092014 (2023)
2	First Experimental Study of the Purely Leptonic Decay $D_s^{*+} \to e^+\nu_e$	PRL 131, 141802 (2024)
5	Search for the leptonic decays $D^{*+} \to e^+\nu_e$ and $D^{*+} \to \mu^+\nu_\mu$	PRD 110, 012003 (2024)
6	Measurement of the branching fraction of $D_s^+ \to l^+\nu_l$ via $e^+e^- \to D_s^{*+}D_s^{*-}$	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 $D^+ \to \tau^+\nu_\tau$	JHEP01(2025)089
9	Search for the leptonic decay $D^+ \to e^+\nu_e$	CPC 49, 063001 (2025)
10	Improved measurement of branching fraction of $D^+ \to \mu^+\nu_\mu$	PRL 135, 061801 (2025)
11	Search for the radiative leptonic decay $D^+ \to \gamma e^+\nu_e$ with Deep Learning	CPC 49, 083001 (2025)
12	Updated measurement of the branching fraction of $D_s^+ \to \tau^+\nu_\tau$	PRD 114, 033004 (2026)
13	Improved measurement of $D+ \to \tau+\nu$ (20 fb^{-1})	memo
14	Study of the $D_s^+ \to \gamma e^+\nu_e$	memo
15	Study of the $D_{(s)}^+ \to \gamma\mu^+\nu_\mu$	开展中

内容提要

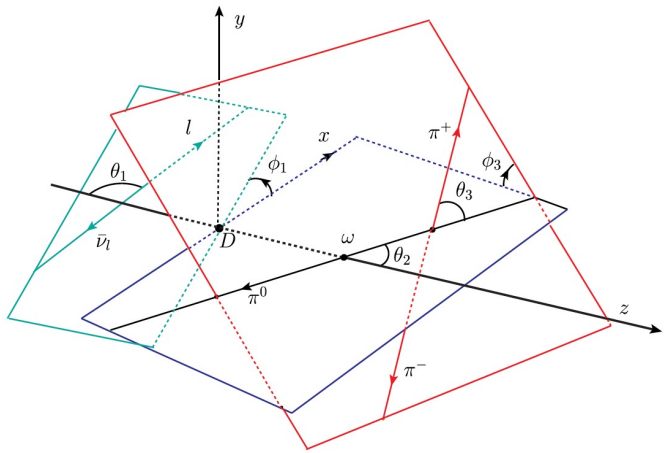
- 总体目标和研究内容按计划执行情况
- 取得的突出进展或成果
- **其它相关文章**
- 总结

其它相关文章

ANNUAL REVIEWS

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., Phys. Rev. D 110, 053007 (2024).

Y. Yu, H.S. Xie,1 H. Zhang, B.C. Ke et al., Phys. Rev. D 112, L071301 (2025).

五体半轻衰变的一般表达式，和角分佈研究，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

内容提要

- 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
- 其它相关文章
- **总结**

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。**其馀研究内容也都顺利开展中。
- 共发表BESIII合作组署名论文12篇(含2篇PRL)、另有相关综述与理论文章7篇 。