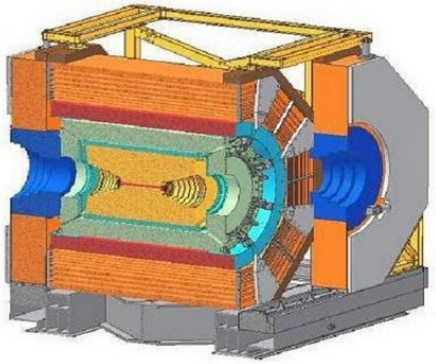


《北京谱仪BESIII实验上粲夸克
衰变中标准模型的精确检验》之课题五

粲强子衰变中探索新粒子和新相互作用

孙亮

武汉大学

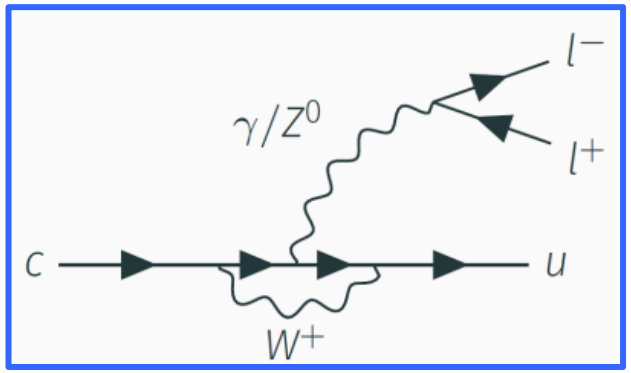
成都理工大学，2026/10/18

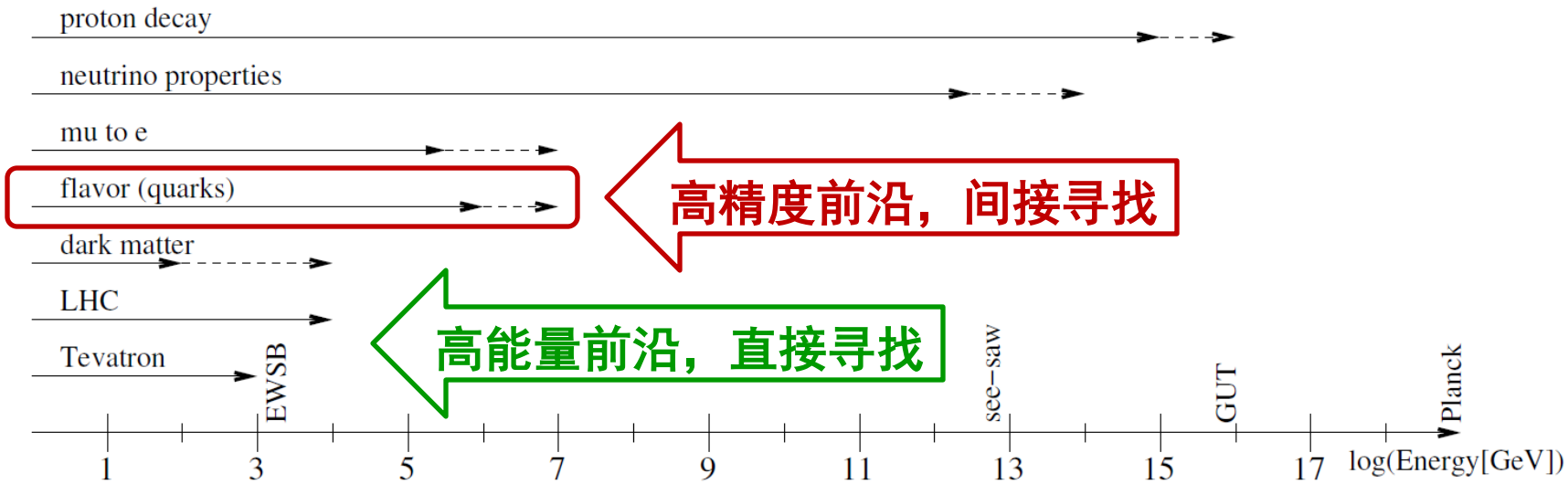
内容提要

- 研究内容及目标
- 研究团队简介
- 当前进展
- 总结

新物理的间接寻找

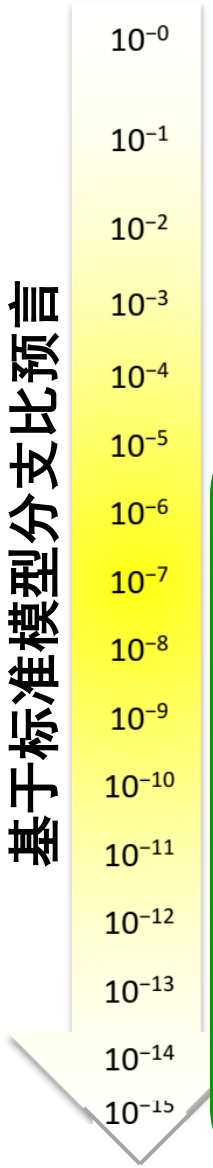
- 精确测量重味强子衰变过程：
  - 味改变中性流过程，标准模型禁戒过程，辐射衰变过程……
- 可以探测到更高能标，是直接寻找的重要补充





不同实验上能侦测到的能标

稀有粲强子衰变一览



粲强子提供了一个独特的环境用来在稀有/禁戒衰变中检验标准模型和寻找新物理

卡比玻允许

单卡比玻压低

双卡比玻压低

新物理可能会显著增强分支比！

辐射衰变

长程贡献的双轻子过程：矢量介子支配

$D^0 \to K^{*0}\gamma/\phi\gamma/\omega\gamma/\rho\gamma$

$D^+_{(s)} \to K^{*+}\gamma/\rho^+\gamma$

短程贡献的双轻子过程：味改变中性流(FCNC)

$D^{0+} \to VV'(l^+l^-)/\ hV(l^+l^-)/\ hh'V(l^+l^-)$

$D^{0+} \to Vl^+l^-/hl^+l^-/hh'l^+l^-$

$D^0 \to \mu^+\mu^-/e^+e^-$

禁戒(对称性破坏)过程：轻子数(LNV)、轻子味(LFV)、重子数(BNV)

$D \to (hh)\mu^+\mu^+/(hh)e^+e^+$

$D \to (h)\mu^+e^-$

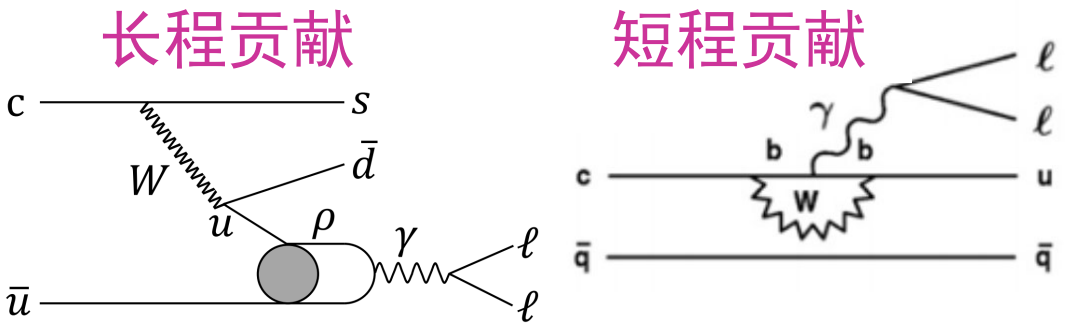
$D \to (h)pe^-$

课题总体研究目标

- 系统地研究味改变中性流相关含e^+e^-过程，特别是末态包含π^0、η或K_S^0的道，进行首次搜寻或压低分支比上限
- 系统地搜寻粲介子到不可见（$\nu\bar{\nu}$）末态过程
- 系统地搜寻$D_{(s)} \to h(h)e^+e^+$ 、$D_{(s)} \to h(h)e^{\pm}\mu^{\mp}$、$D_{(s)} \to Baryon + e^{\pm}$过程，特别是末态包含$\pi^0$、$\eta$、$K_S^0$ 、Λ^0 、Σ^0或中子的道，进行首次搜寻或压低分支比上限
- 对各类$D_{(s)}^+ \to V\gamma$ 和$D_{(s)} \to K_1\gamma$辐射衰变过程进行首次搜寻
- 以上过程分支比搜索灵敏度预计在10^{-4} –10^{-5} 量级或更好

课题内容一：味改变中性流过程

- 系统性的研究$c \to ull$类型的如$D_{(s)} \to h(h)e^+e^-$和$D_{(s)} \to (h)\nu\bar{\nu}$ 等衰变过程（h代表介子）
- 对$D_{(s)} \to (h)\nu\bar{\nu}$ 过程的搜寻同时可以对**不可见**末态过程做限制



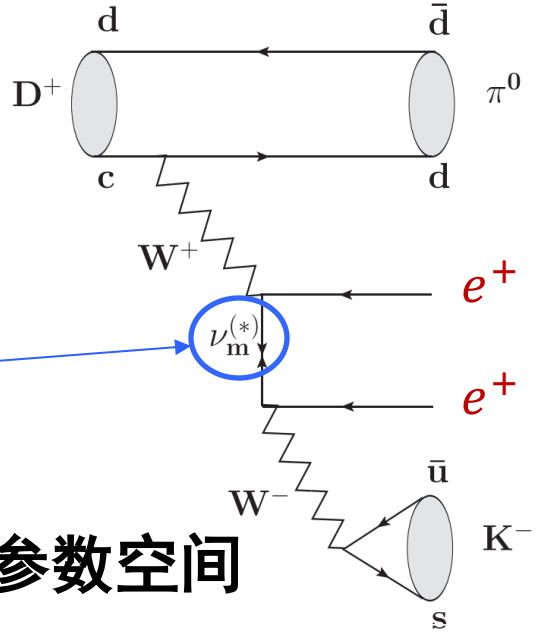
- 关键科学问题：
  - **理解**来自矢量介子的**长程作用**的贡献，通过测量**短程**贡献**限制**相关的新物理
  - **约束**暗物质相关新物理模型的参数空间

课题内容—执行情况

研究内容	相关衰变道	基于实验数据	当前状态
系统性的研究$D_{(s)} \to h(h)e^+e^-$相关过程	$D_s^+ \to \pi^+\phi(e^+e^-)$ $D_s^+ \to \rho^+(\pi^+\pi^0)\phi(e^+e^-)$ $D_s^+ \to \pi^+\pi^0e^+e^-$ $D_s^+ \to K^+\pi^0e^+e^-$ $D_s^+ \to K_S^0\pi^+e^+e^-$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	已发表：PRL 133 (2024) 121801
	$D \to h(h')e^+e^-$, $h^{(\prime)} = K^+, \pi^+, K_S^0, \pi^0, \omega, \eta$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已发表：PRD 113 (2026) 092010
首次搜寻粲介子到不可见末态相关过程	$D^+ \to \pi^+ + invisible$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	进行中（已进入合作组内审，draft阶段）
	$D_s^+ \to K^+\nu\bar{\nu}$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	进行中（已进入合作组内审，draft阶段）

课题内容二：对称性破坏过程

- 寻找$D_{(s)} \to h(h)e^+e^+$**轻子数破坏**过程
- 寻找$D_{(s)} \to h(h)e^\pm\mu^\mp$**轻子味破坏**过程
- 寻找$D_{(s)} \to Be^\pm$**重子数破坏**过程（B代表重子）



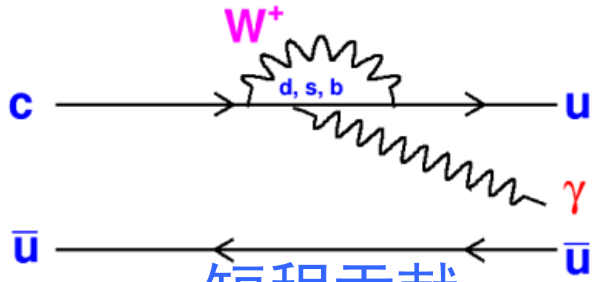
- 关键科学问题：
  - **限制**马约拉纳中微子质量
  - **检验**轻子普适性
  - **约束**大统一理论等新物理的参数空间

课题内容二执行情况

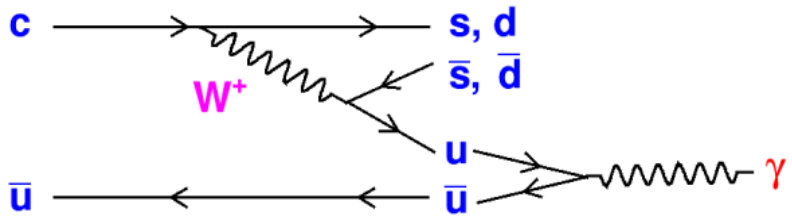
研究内容	相关衰变道	基于实验数据	当前状态
寻找$D_{(s)} \to h(h)e^+e^+$ **轻子数破坏过程**	$D_s^+ \to \phi\pi^-e^+e^+$ $D_s^+ \to \phi K^-e^+e^+$ $D_s^+ \to \pi^-\pi^0e^+e^+$ $D_s^+ \to K^-\pi^0e^+e^+$ $D_s^+ \to K_S^0\pi^-e^+e^+$ $D_s^+ \to K_S^0K^-e^+e^+$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	已发表：JHEP 01 (2025) 109
寻找$D_{(s)} \to h(h)e^\pm\mu^\mp$ **轻子味破坏过程**	$D_s^+ \to \pi^-\pi^0e^\pm\mu^\mp$ $D_s^+ \to K^-\pi^0e^\pm\mu^\mp$ $D_s^+ \to K_S^0\pi^-e^\pm\mu^\mp$ $D_s^+ \to K_S^0K^-e^\pm\mu^\mp$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	进行中（已进入合作组内审）
寻找$D_{(s)} \to Be^\pm$**重子数-轻子数联合破坏过程**	$D^0 \to pe^-, \bar{p}e^+$	2.93 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已发表：PRD 105 (2022) 032006
	$D^+ \to ne^+, \bar{n}e^+$	2.93 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已发表：PRD 106 (2022) 112009
	$D^+ \to \Lambda^0\ell^+, \Sigma^0\ell^+$ $D^+ \to \bar{\Lambda}^0\ell^+, \bar{\Sigma}^0\ell^+$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	进行中（Memo out）
	$D_s^+ \to \Lambda^0\ell^+, \Sigma^0\ell^+$ $D_s^+ \to \bar{\Lambda}^0\ell^+, \bar{\Sigma}^0\ell^+$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	进行中（已进入合作组内审）

课题内容三：辐射衰变过程

- 寻找尚未发现的$D_{(s)}^{+} \to V\gamma\ (V = \rho, \overline{K}^{*})$过程
- 寻找$D_{(s)} \to K_1(\to K\pi\pi)\gamma$ 过程



短程贡献



长程贡献主导

- 关键科学问题：
  - 验证基于量子色动力学的长程非微扰效应的计算，并为底介子的辐射衰变的理论计算提供重要输入
  - 对B工厂上通过$B \to K_1\gamma$ 过程测量光子极化寻找新物理提供重要实验输入

课题内容三执行情况

研究内容	相关衰变道	基于实验数据	当前状态
寻找$D_{(s)} \to V\gamma$过程	$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+\gamma$	4.5 fb-1 @ 4.6-4.7 GeV	已发表：PRD 107 (2023) 052002
	$D^+ \to \rho^+\gamma, K^{*+}\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已发表：JHEP 12 (2024) 206
	$D_s^+ \to \rho^+\gamma$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	已发表：JHEP 11 (2024) 119
	$D_s^+ \to K^{*+}\gamma$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	已发表：JHEP 07 (2026) 266
	$D^0 \to \omega\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已投稿PRL（arXiv:2610.21982）
	$D^0 \to \phi\gamma, \bar{K}^{*0}\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	进行中（已进入合作组内审）
	DCS $D^0 \to K^{*0}\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	进行中（已进入合作组内审）
	$D^0 \to \rho^0\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	进行中（已进入合作组内审）
寻找$D_{(s)} \to A\gamma$过程	$D^{0,+} \to K_1(1270)\gamma$	20.3 fb^{-1} @ 3.773 GeV	已发表：PRD 114 (2026) 012020
	$D_s^+ \to K_1(1270)\gamma$	7.33 fb^{-1} @ 4.128-4.226 GeV	进行中（已进入合作组内审）

课题当前成果总览

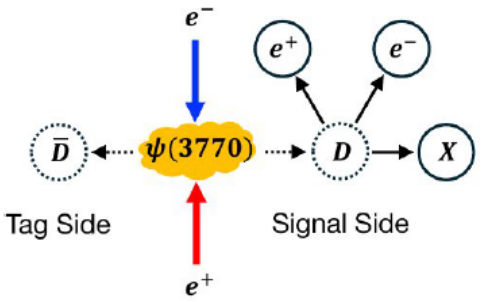
研究内容	相关衰变道	基于实验数据	发表情况
味改变中性流过程	$D_s^+ \to h(h')e^+e^-$	7.33 fb^{-1}	PRL 133 (2024) 121801
	$D \to h(h')e^+e^-$	20.3 fb^{-1}	PRD 113 (2026) 092010
轻子数破坏过程	$D_s^+ \to hh'e^+e^+$	7.33 fb^{-1}	JHEP 01 (2025) 109
重子数破坏过程	$D^0 \to pe^-, \bar{p}e^+$	2.93 fb^{-1}	PRD 105 (2022) 032006
	$D^+ \to ne^+, \bar{n}e^+$	2.93 fb^{-1}	PRD 106 (2022) 112009
辐射衰变	$\Lambda_c^+ \to \Sigma^+\gamma$	4.5 fb^{-1}	PRD 107 (2023) 052002
	$D^+ \to \rho^+\gamma, K^{*+}\gamma$	20.3 fb^{-1}	JHEP 12 (2024) 206
	$D_s^+ \to \rho^+\gamma$	7.33 fb^{-1}	JHEP 11 (2024) 119
	$D_s^+ \to K^{*+}\gamma$	7.33 fb^{-1}	JHEP 07 (2026) 266
	$D^{0,+} \to K_1(1270)\gamma$	20.3 fb^{-1}	PRD 114 (2026) 012020
	$D^0 \to \omega\gamma$	20.3 fb^{-1}	arXiv:2610.21982

截至2026.10已发表见刊课题相关10篇合作组论文，1篇在投

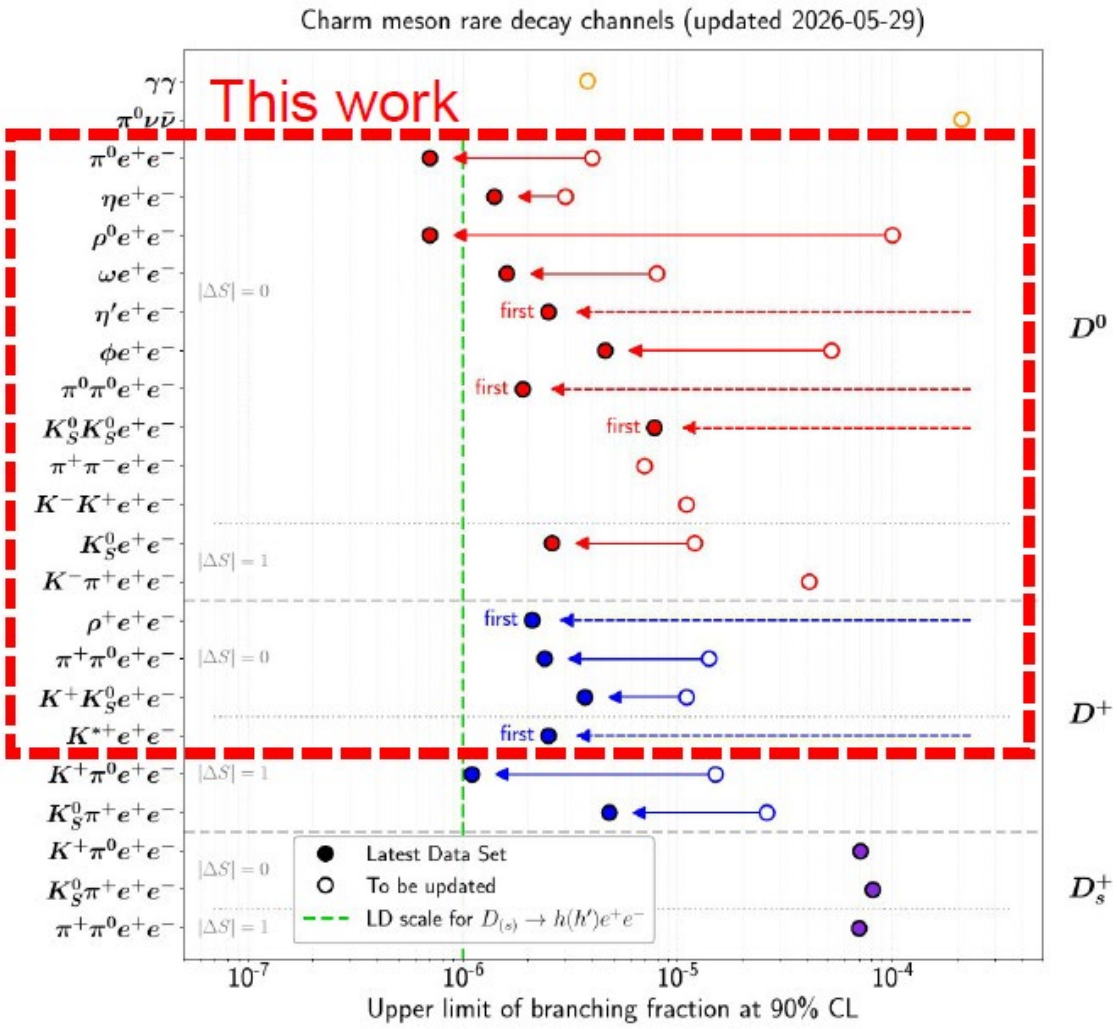
$D^+ \to h(h')e^+e^-$

PRD 113 (2026) 092010

- 基于双标记方法



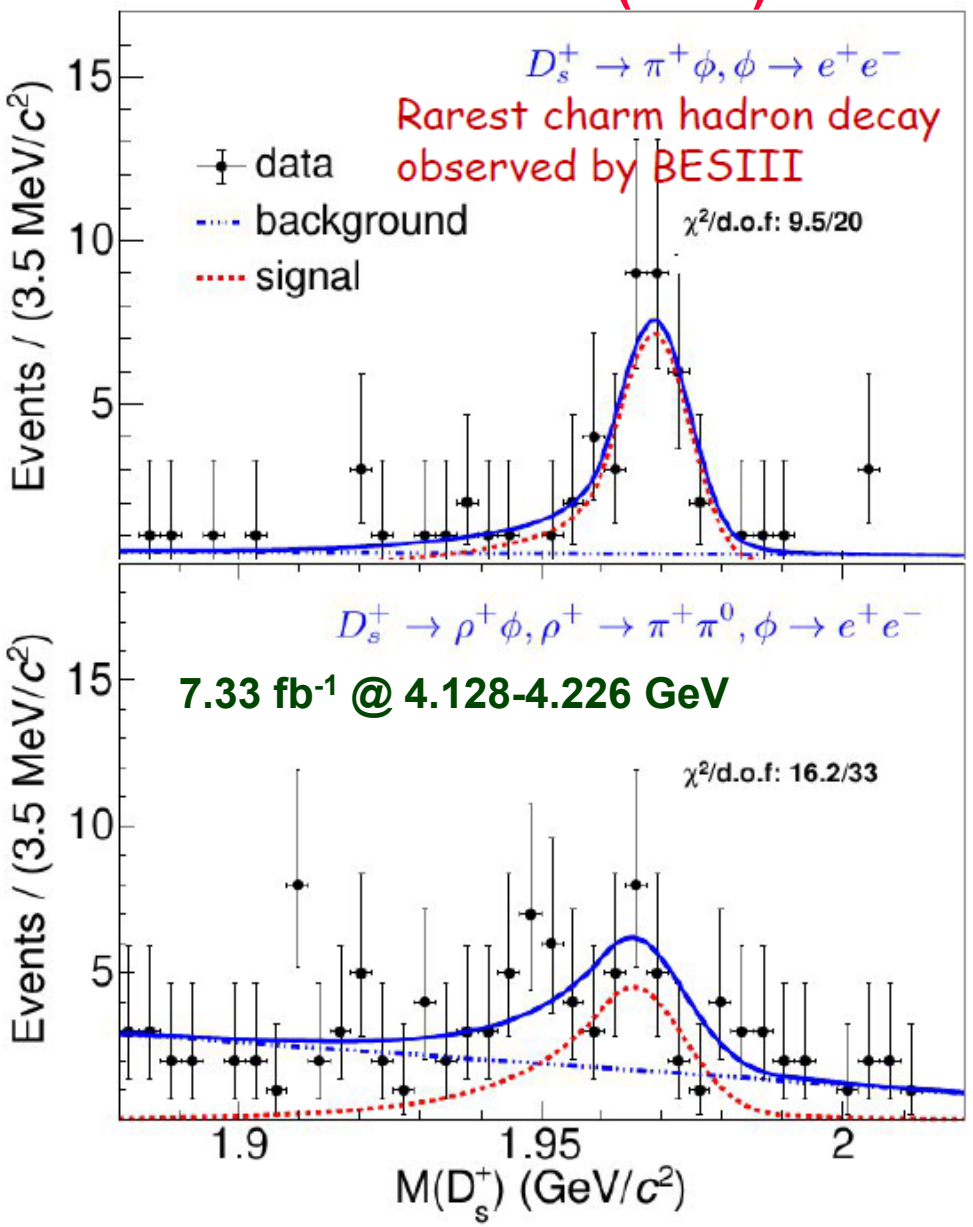
- 对于16个稀有衰变道，分支比上限确立在10^{-6}–10^{-7}量级，其中大部分为首次搜寻或大幅提升已有上限



$D_s^+ \to h(h')e^+e^-$

PRL 133 (2024) 121801

- $D_s^+ \to \pi^+\phi(e^+e^-)$分支比精度较之前提升3倍
- 首次找到$D_s^+ \to \rho^+\phi(e^+e^-)$过程的证据
- 首次搜寻了一系列$D_s^+ \to hh'e^+e^-$四体过程，分支比上限确立在10^{-5}量级
- 加深了对$c \to u\ell^+\ell^-$过程中的轻子普适性和$D_s^+ \to V\gamma$衰变的理解

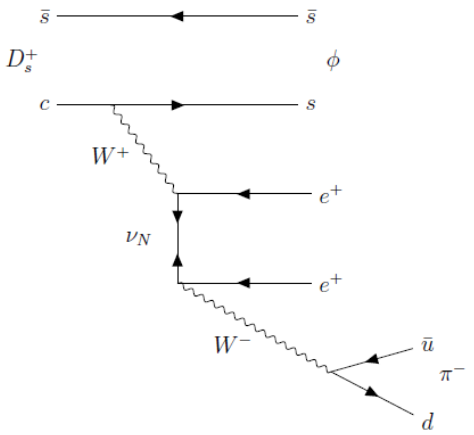


$D_s^+ \to hh'e^+e^+$

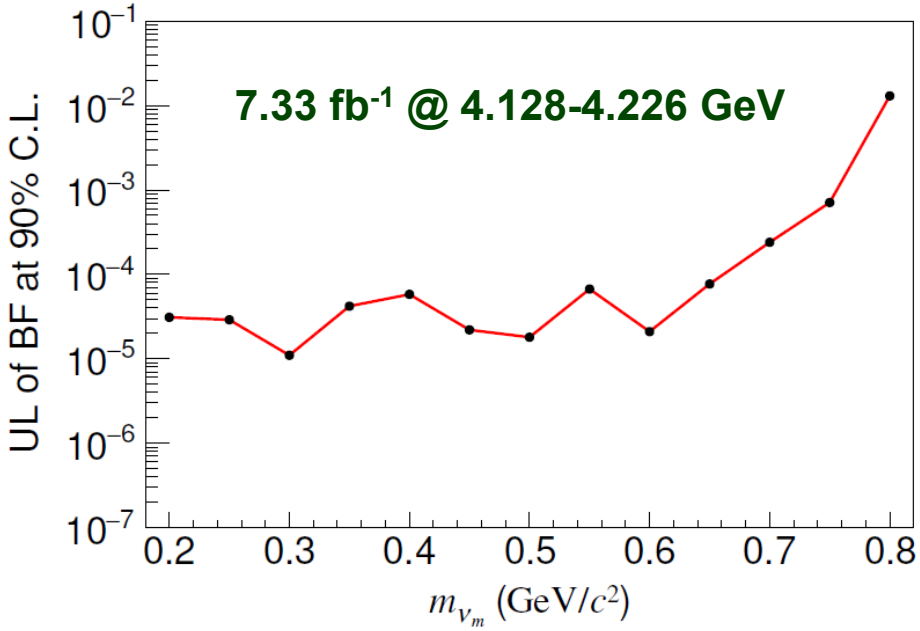
JHEP 01 (2025) 109

- 首次搜寻了一系列$D_s^+ \to hh'e^+e^+$四体轻子数破坏过程，分支比上限均确立在10^{-5}量级
- 首次在末态包含矢量介子的过程中（$D \to V\ell\nu_m$）对马约拉纳中微子质量进行了扫描
- 可用于限制相关新物理模型的参数空间

Decay channel	ϵ (%)	$\mathcal{B}_{\rm UL}$ ($\mathcal{B}_{\rm UL}^{\rm expected}$)
$D_s^+ \to \phi\pi^-e^+e^+$	3.0 ± 0.1	$6.9\ (3.5) \times 10^{-5}$
$D_s^+ \to \phi K^-e^+e^+$	1.8 ± 0.1	$9.9\ (10.8) \times 10^{-5}$
$D_s^+ \to K_S^0\pi^-e^+e^+$	6.4 ± 0.1	$1.3\ (2.4) \times 10^{-5}$
$D_s^+ \to K_S^0K^-e^+e^+$	4.0 ± 0.1	$2.9\ (2.3) \times 10^{-5}$
$D_s^+ \to \pi^-\pi^0e^+e^+$	6.4 ± 0.1	$2.9\ (2.7) \times 10^{-5}$
$D_s^+ \to K^-\pi^0e^+e^+$	5.1 ± 0.1	$3.4\ (3.9) \times 10^{-5}$

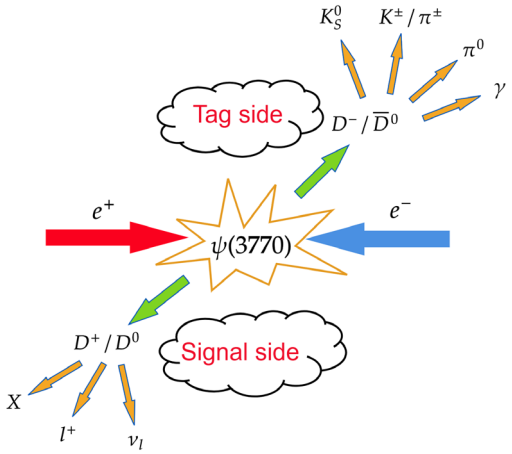


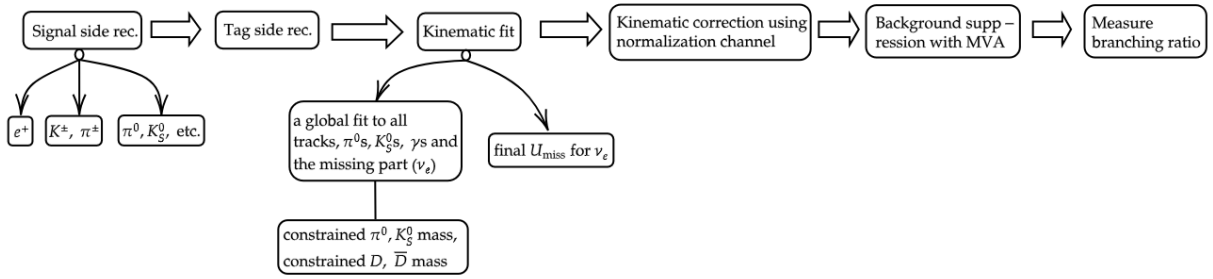
(a) $D_s^+ \to \phi\pi^-e^+e^+$ (CF).



Generic tagging method

- 2009年，CLEO已经采用 Generic tagging方法来测量 $D^+ \to \eta^{(\prime)} e^+ \nu_e$过程
- Generic tagging 方法预计有高达两倍的信号产率提升，无需对不同的ST道进行单独拟合
- 问题&解决方案
  - 更高的本底水平：采用MVA方法压低
  - Inclusive MC的效率估计不可靠：使用控制道进行效率刻度
- 目前该方法正在合作组内审中，已进入draft阶段
- 该方法已用在对稀有半轻衰变$D \to \bar{K}\eta e^+\nu_e$、$D \to \bar{K}Ke^+\nu_e$和$D \to \bar{K}\pi^0\pi^0 e^+\nu_e$的寻找中（三个工作均已进入合作组内审）





团队简介

- 该课题由武汉大学一家单位承担
- 团队构成：
  - 三名教师：孙亮，蔡浩，周详
  - 一名博士后：姜候兵（已于2024年3月份出站）
  - 五名研究生
  - 作为本科生科研训练课程的一部分，先后有多名学生参与了稀有D_s^+衰变的搜寻
- 团队同时与其他BESIII成员单位开展紧密合作

总结

- 通过研究粲强子的味改变中性流、对称性破坏、辐射衰变等过程可以用来对超出标准模型的新物理进行寻找
- 致力于发挥BESIII实验优势，在新物理寻找方面填补空白或提供世界上最高的分支比灵敏度
- 本课题目前各项研究工作按照计划进展良好，已发表10篇文章（PRL 1，PRD 5，JHEP 4），其中多项搜索为世界上首次
- 人才培养方面，已毕业两名博士，出站一名博后
- 新的实验方法（粲强子一般性标记算法，GNN/DNN技术等）显著提升了对稀有信号的搜索灵敏度