

BESIII

《北京谱仪BESIII实验上粲夸克
衰变中标准模型的精确检验》之课题五

粲强子衰变中探索新粒子和新相互作用

孙亮

武汉大学



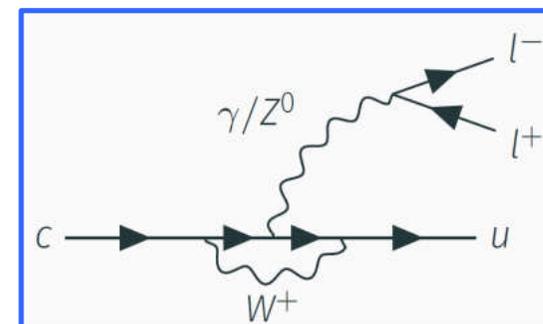
兰州大学，2025/08/08

- 研究内容及目标
- 研究团队简介
- 当前进展
- 总结

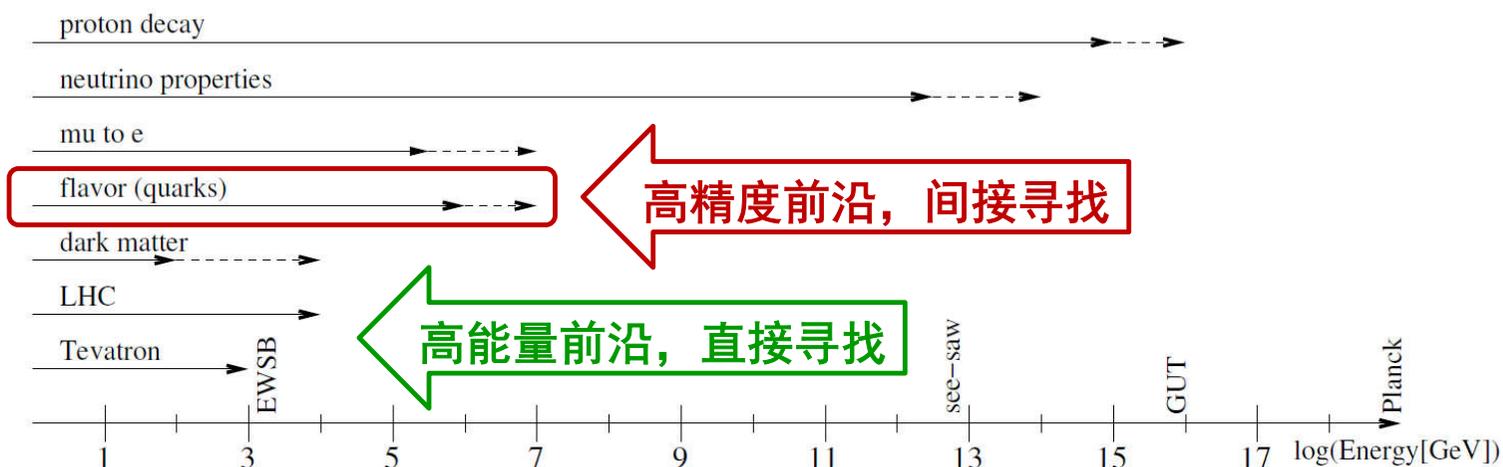
新物理的间接寻找

□ 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环境用来在稀有/禁戒衰变中检验标准模型和寻找新物理

基于标准模型分支比预言

10⁻⁰
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
10⁻⁶
10⁻⁷
10⁻⁸
10⁻⁹
10⁻¹⁰
10⁻¹¹
10⁻¹²
10⁻¹³
10⁻¹⁴
10⁻¹⁵

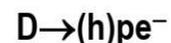
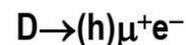
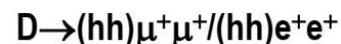
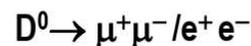
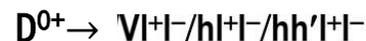
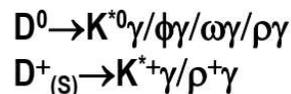
卡比玻允许
单卡比玻压低
双卡比玻压低

辐射衰变
长程贡献的双轻子过程：
矢量介子支配

短程贡献的双轻子过程：
味改变中性流 (FCNC)

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

新物理可能会显著增强分支比!

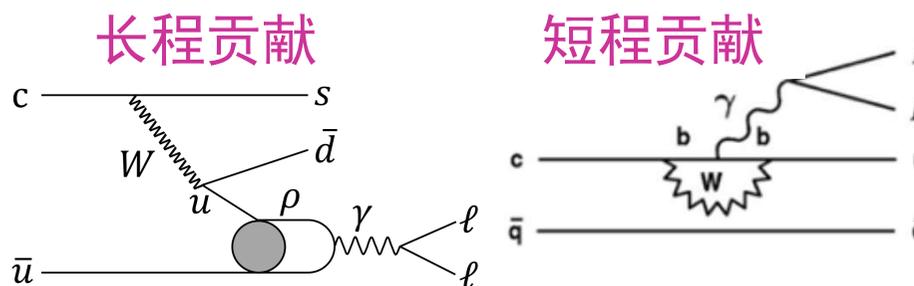


课题总体研究目标

- 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 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^+$ 、 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^\pm\mu^\mp$ 、 $D_{(s)} \rightarrow Baryon + e^\pm$ 过程，特别是末态包含 π^0 、 η 、 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 $D_{(s)}^+ \rightarrow V\gamma$ 和 $D_{(s)} \rightarrow K_1\gamma$ 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 $c \rightarrow ull$ 类型的如 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^-$ 和 $D_{(s)} \rightarrow (h)\nu\bar{\nu}$ 等衰变过程 (h 代表介子)
- 对 $D_{(s)} \rightarrow (h)\nu\bar{\nu}$ 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

课题内容一执行情况

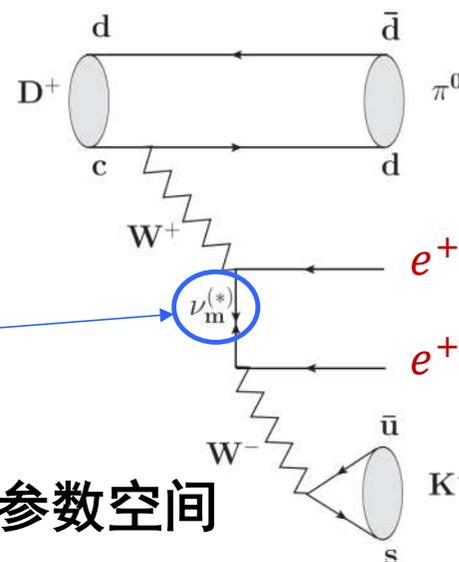
研究内容	相关衰变道	基于实验数据	当前状态
系统性的研究 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^-$ 相关过程	$D_s^+ \rightarrow \pi^+\phi(e^+e^-)$ $D_s^+ \rightarrow \rho^+(\pi^+\pi^0)\phi(e^+e^-)$ $D_s^+ \rightarrow \pi^+\pi^0e^+e^-$ $D_s^+ \rightarrow K^+\pi^0e^+e^-$ $D_s^+ \rightarrow K_S^0\pi^+e^+e^-$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128-4.226 GeV	已发表: PRL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

课题内容二：对称性破坏过程

- 寻找 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^+$ 轻子数破坏过程
- 寻找 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^\pm\mu^\mp$ 轻子味破坏过程
- 寻找 $D_{(s)} \rightarrow Be^\pm$ 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



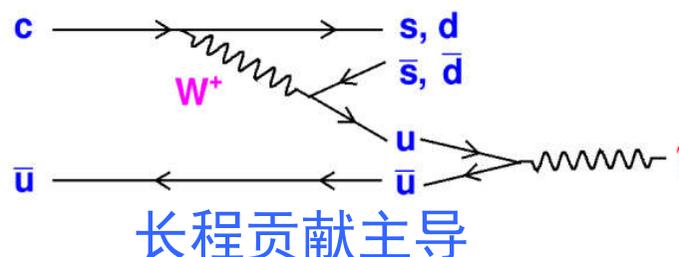
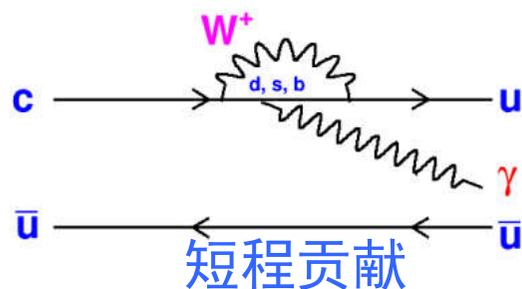
课题内容二执行情况

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

课题内容三：辐射衰变过程

□ 寻找尚未发现的 $D_{(s)}^+ \rightarrow V\gamma$ ($V = \rho, \bar{K}^*$) 过程

□ 寻找 $D_{(s)} \rightarrow K_1(\rightarrow K\pi\pi)\gamma$ 过程



□ 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 $B \rightarrow K_1\gamma$ 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 $D_{(s)} \rightarrow V\gamma$ 过程	$\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+\gamma$	4.5 fb ⁻¹ @ 4.6-4.7 GeV	已发表: PRD 107 (2023) 052002
	$D^+ \rightarrow \rho^+\gamma, K^{*+}\gamma$	20.3 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	已发表: JHEP 12 (2024) 206
	$D_s^+ \rightarrow \rho^+\gamma$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128-4.226 GeV	已发表: JHEP 11 (2024) 119
	$D^0 \rightarrow \omega\gamma$	20.3 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	进行中 (已进入合作组内审)
	$D^0 \rightarrow \phi\gamma, \bar{K}^{*0}\gamma$	20.3 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	进行中 (已进入合作组内审)
	$D_s^+ \rightarrow K^{*+}\gamma$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128-4.226 GeV	进行中 (已进入合作组内审)
寻找 $D_{(s)} \rightarrow K_1\gamma$ 过程	$D^{0,+} \rightarrow K_1(1270)\gamma$	20.3 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	进行中 (已进入合作组内审, CWR)
	$D_s^+ \rightarrow K_1(1270)\gamma$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128-4.226 GeV	进行中

课题当前成果总览

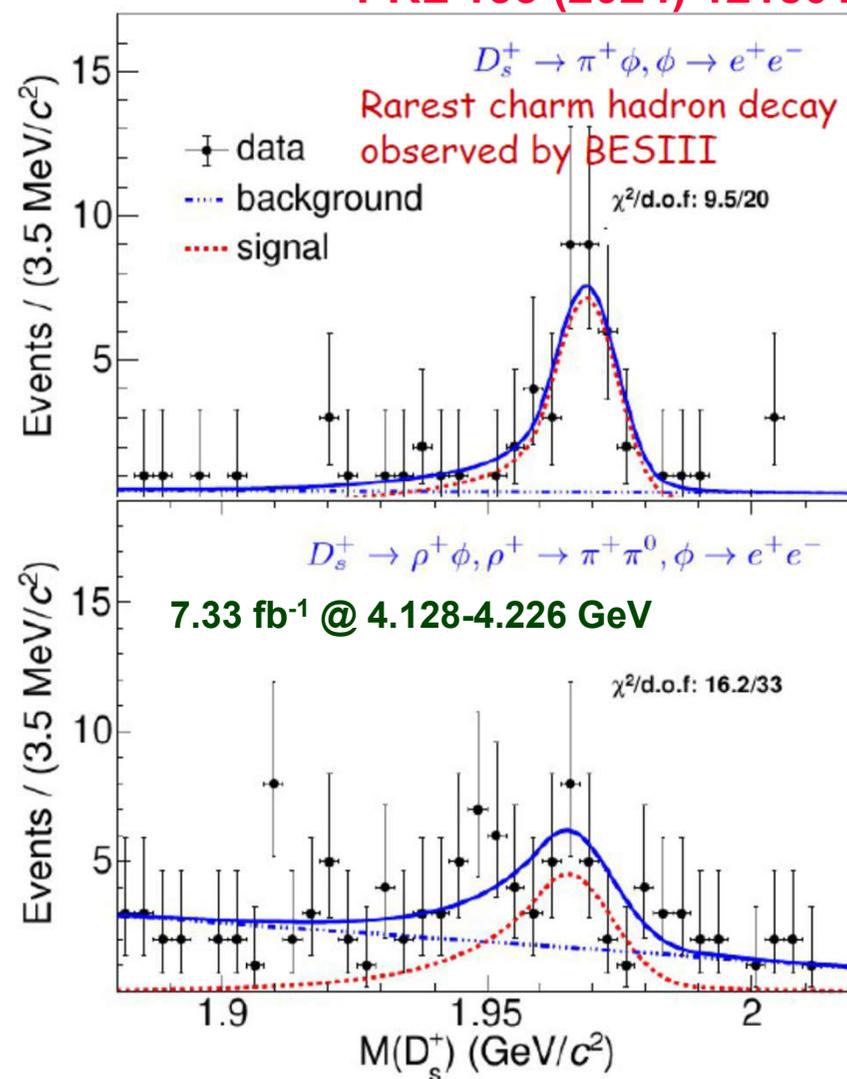
研究内容	相关衰变道	基于实验数据	发表情况
味改变中性流过程	$D_s^+ \rightarrow h(h')e^+e^-$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128–4.226 GeV	PRL 133 (2024) 121801
轻子数破坏过程	$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^+$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128–4.226 GeV	JHEP 01 (2025) 109
重子数破坏过程	$D^0 \rightarrow pe^-, \bar{p}e^+$	2.93 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	PRD 105 (2022) 032006
	$D^+ \rightarrow ne^+, \bar{n}e^+$	2.93 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	PRD 106 (2022) 112009
辐射衰变	$\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+\gamma$	4.5 fb ⁻¹ @ 4.6–4.7 GeV	PRD 107 (2023) 052002
	$D^+ \rightarrow \rho^+\gamma, K^{*+}\gamma$	20.3 fb ⁻¹ @ 3.773 GeV	JHEP 12 (2024) 206
	$D_s^+ \rightarrow \rho^+\gamma$	7.33 fb ⁻¹ @ 4.128–4.226 GeV	JHEP 11 (2024) 119

截至2025.01已发表见刊课题相关7篇合作组论文

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

PRL 133 (2024) 121801

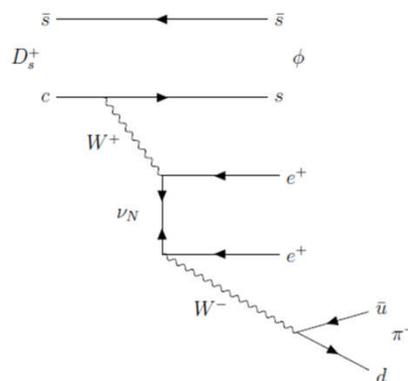
- BESIII 合作组主页予以高亮公开报道
- $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \phi(e^+e^-)$ 分支比精度较之前提升3倍
- 首次找到 $D_s^+ \rightarrow \rho^+ \phi(e^+e^-)$ 过程的证据
- 首次搜寻了一系列 $D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^-$ 四体过程，分支比上限确立在 10^{-5} 量级
- 加深了对 $c \rightarrow u\ell^+\ell^-$ 过程中的轻子普适性和 $D_s^+ \rightarrow V\gamma$ 衰变的理解



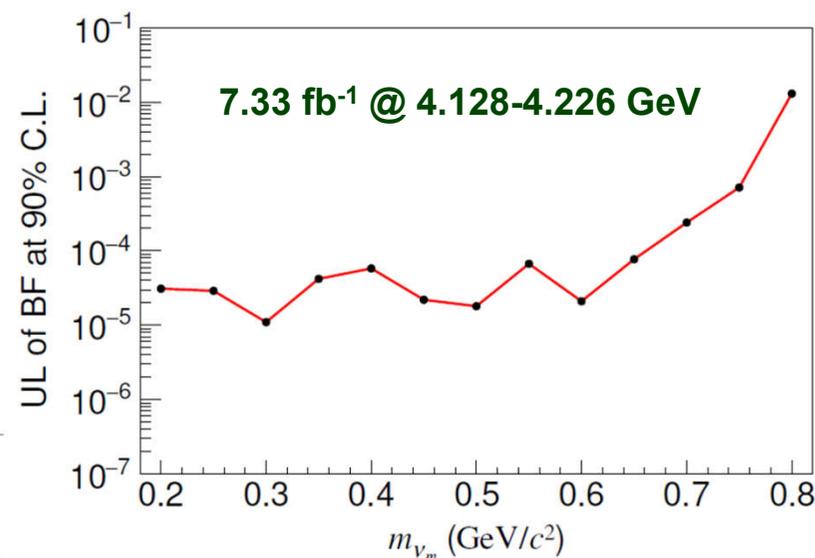
$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^+$

- 首次搜寻了一系列 $D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^+$ 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 ($D \rightarrow V\ell\nu_m$) 对马约拉纳中微子质量进行了扫描
- 限制了相关新物理模型的参数空间

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

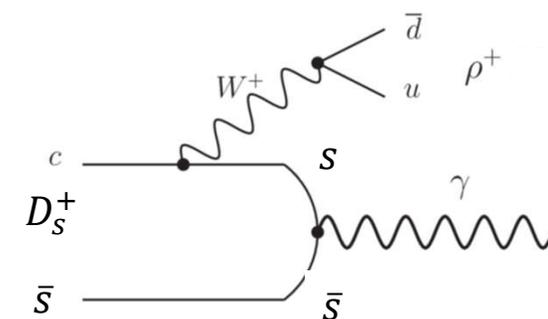
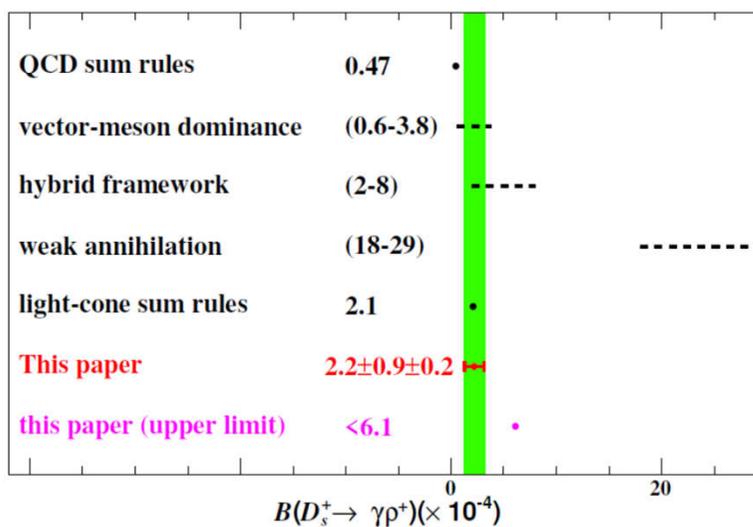
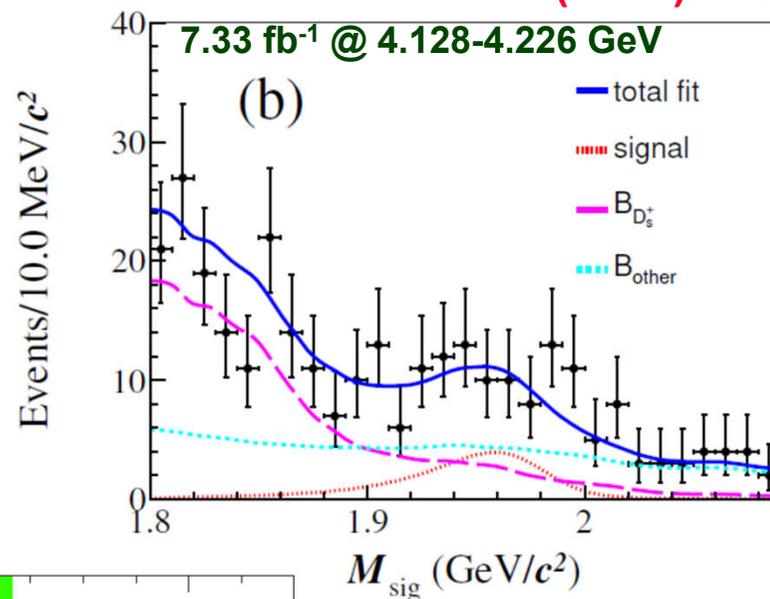


(a) $D_s^+ \rightarrow \phi\pi^-e^+e^+$ (CF).



$D_s^+ \rightarrow \gamma \rho(770)^+$

- 首次搜寻了 D_s^+ 的辐射衰变过程，分支比上限确实在 10^{-4} 量级
- 信号显著度在 2.5σ ，预示着不久的将来利用更多BES III数据有望找到该过程存在的证据
- 对不同基于QCD的理论计算进行了严格检验



卡比玻允许过程

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

人才培养情况

- 武汉大学作为该课题独立承担单位，在该课题执行期间，已培养毕业两位博士（2023.06，2024.01），出站一名博士后（2024.03）
 - 其中一位博士目前在河南师大任教，继续从事BES III相关研究
- 本单位当前有4名在读研究生从事该课题相关研究
- 本单位还通过该课题研究，培养了5名以上本科生走上了科研道路，并且在毕业后进入了约翰霍普金斯大学、苏黎世理工学院等世界知名学府继续从事高能物理相关研究

国际合作与交流情况

□ 本课题已资助三个国际会议报告：

- “Experimental status of charm decays”, 21th Conference on Flavor Physics and CP Violation (FPCP 2023), Lyon, France, May 29 - June 3, 2023
- “Lepton Flavor Universality Experimental Highlights”, 29th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2023), , Zhuhai, China, July 3-8, 2023
- “Search for New Physics at BESIII”, 43th International Symposium on Physics in Collision (PIC 2024), Athens, Greece, October 22 - 25, 2024

□ 2023年11月邀请英国华威大学教授Tim Gershon (LHCb合作组成员) 访问

□ 本课题组成员方勃于2024年春获得武汉大学和法国萨克雷大学联合培养博士学位

□ 举办2023年BESIII新物理研讨会



- 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，已发表七篇文章（PRL 1, PRD 3, JHEP 3），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）有望显著提升对稀有信号的搜索灵敏度