

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



郑州，2024/05/12

□ 研究内容及目标

□ 研究团队简介

□ 当前进展

□ 总结

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

新物理可能会显著增强分支比!

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 (VMD)

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)

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

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

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

$$D^{0+} \rightarrow V l+l- / h l+l- / h h' l+l-$$

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

$$D \rightarrow (hh) \mu^+ \mu^- / (hh) e^+ e^-$$

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

$$D \rightarrow (h) p e^-$$

新物理过程寻找现状 (D^0)

□ **BESIII** 实验可以在末态包含电子和中性强子的过程的寻找中继续发挥优势

分支比上限 (90%置信区间)

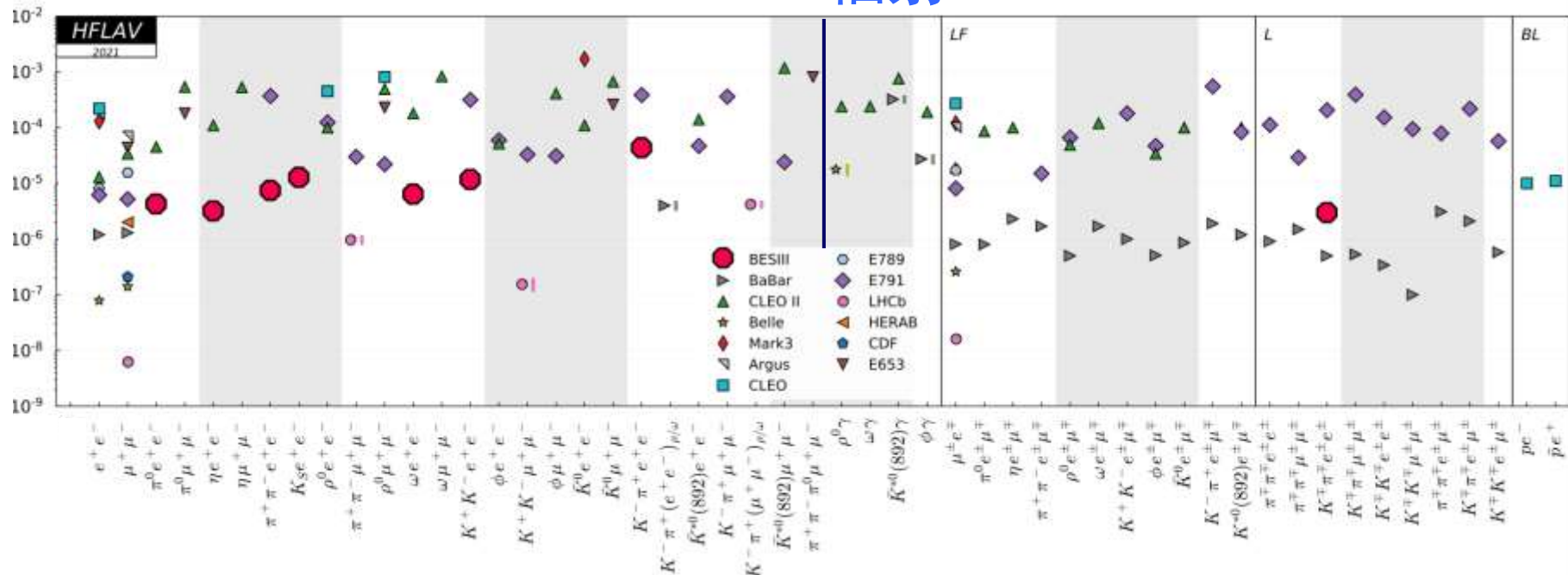
FCNC

辐射

LFV

LNV

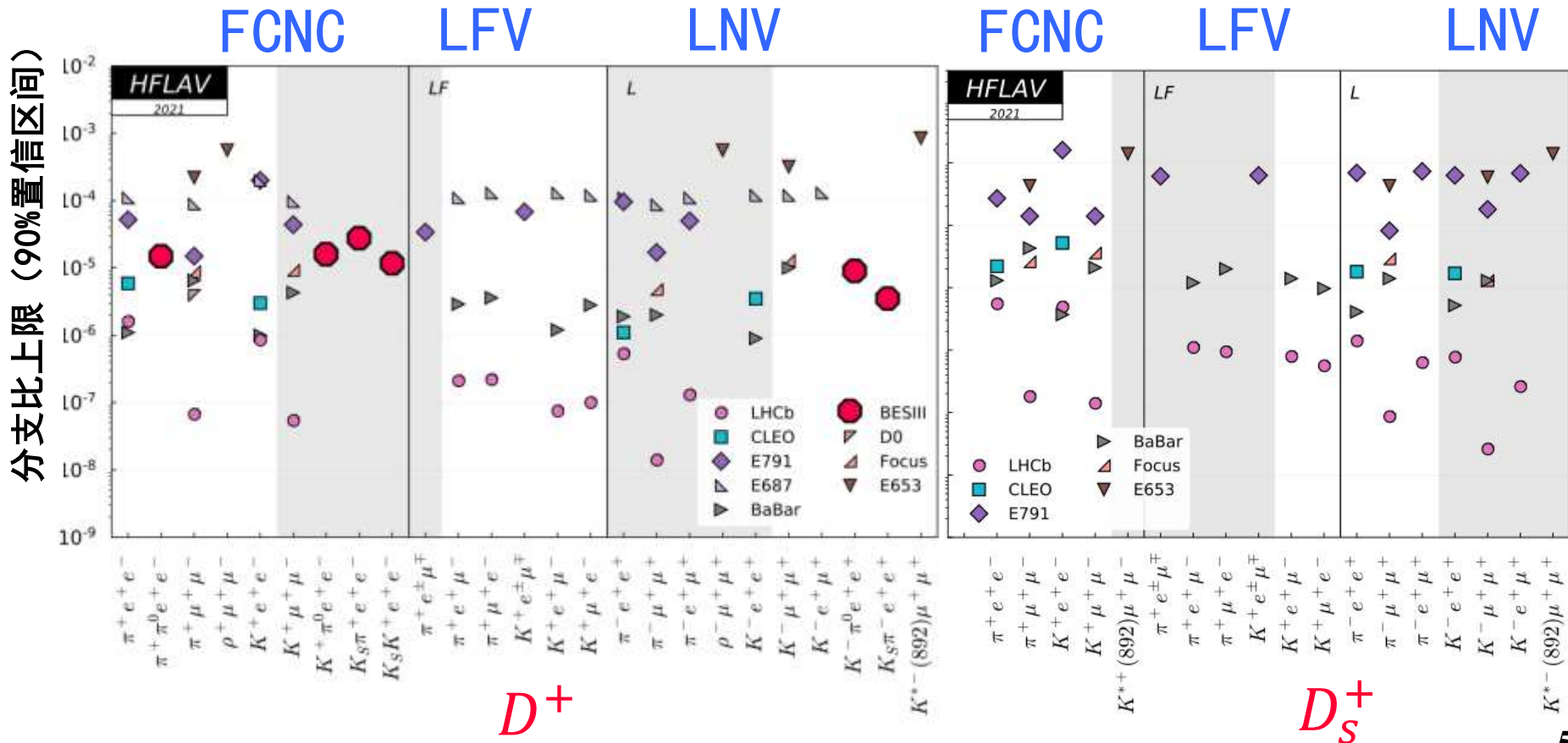
BNV



D^0

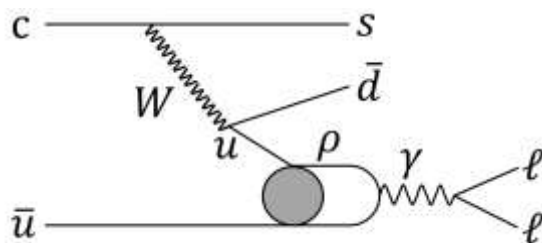
新物理过程寻找现状 ($D_{(s)}^+$)

- **BES III** 实验可以在末态包含电子和中性强子的过程的寻找中继续发挥优势
- 带电 $D_{(s)}$ 介子中存在更多的衰变过程尚未被寻找

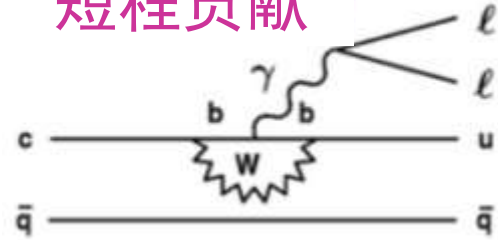


- 系统性的研究 $c \rightarrow ull$ 类型的如 $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^-$ 和 $D_{(s)} \rightarrow (h)\nu\bar{\nu}$ 等衰变过程 (h 代表介子)
- 对 $D_{(s)} \rightarrow (h)\nu\bar{\nu}$ 过程的搜寻同时对**不可见末态**过程做限制

长程贡献



短程贡献



□ 关键科学问题：

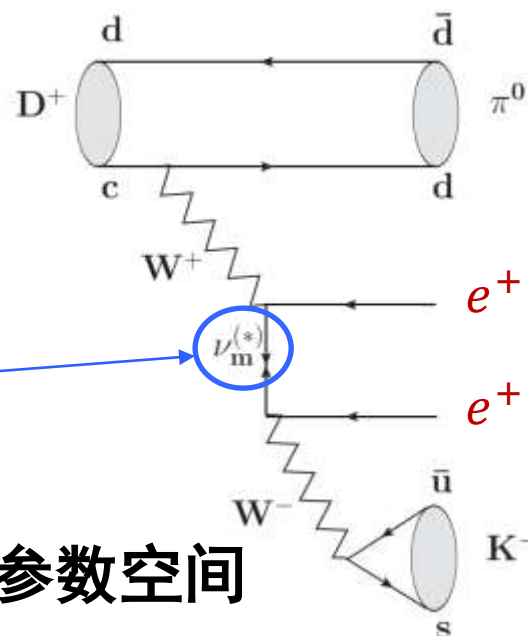
- **理解**来自矢量介子的**长程作用**的贡献，通过测量**短程贡献限制**相关的新物理
- **约束**暗物质相关新物理模型的参数空间

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)

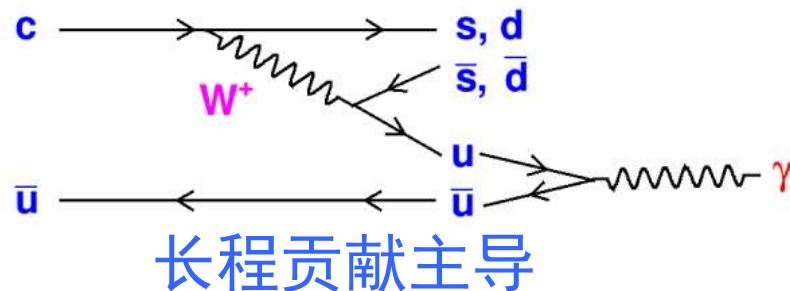
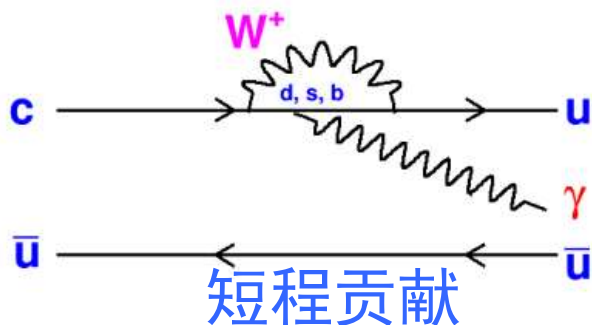
□ 关键科学问题：

- **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



□ 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 B 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

- 系统地研究FCNC相关过程，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，预期灵敏度最好可达 10^{-7}
- 系统地搜寻不可见末态过程，预期灵敏度可达 10^{-5}
- 系统地搜寻LNV、LFV、BNV过程，特别是末态包含 π^0 、 η 、 K_S^0 、 Λ 、 Σ^0 或中子的道，进行**首次搜寻**或压低分支比上限，预期灵敏度最好可达 10^{-7}
- 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**，预期灵敏度最好可达 10^{-6}

□ 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（已于今年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BES III成员单位开展紧密合作

课题相关研究现状（已公开）

衰变道	当前状态	类型
$D^0 \rightarrow pe^-, \bar{p}e^+$	已发表: PRD 105 (2022) 032006	BNV & LNV
$D^\pm \rightarrow n(\bar{n})e^\pm$	已发表: PRD 106 (2022) 112009	BNV & LNV
$\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \gamma$	已发表: PRD 107 (2023) 052002	Radiative
$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^-$	arXiv:2404.05973, submitted to PRL	FCNC, VMD

已发布结果一览

PRD 105 (2022) 032006

$$\mathcal{B}_{D^0 \rightarrow \bar{p}e^+} < 1.2 \times 10^{-6}$$

$$\mathcal{B}_{D^0 \rightarrow pe^-} < 2.2 \times 10^{-6},$$

◆ 利用 2.93 fb⁻¹ 3.773 GeV 数据

PRD 106 (2022) 112009

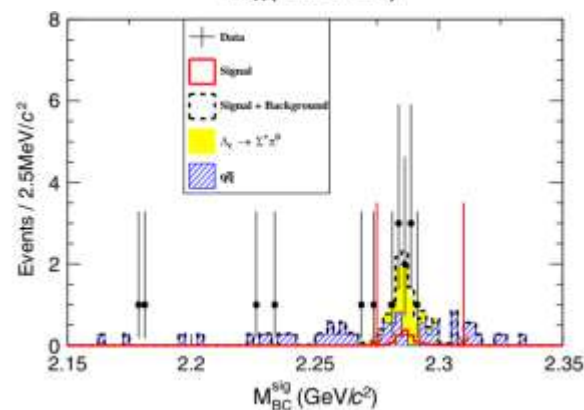
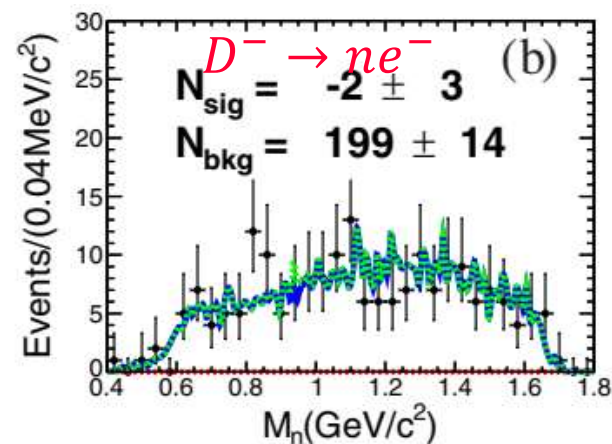
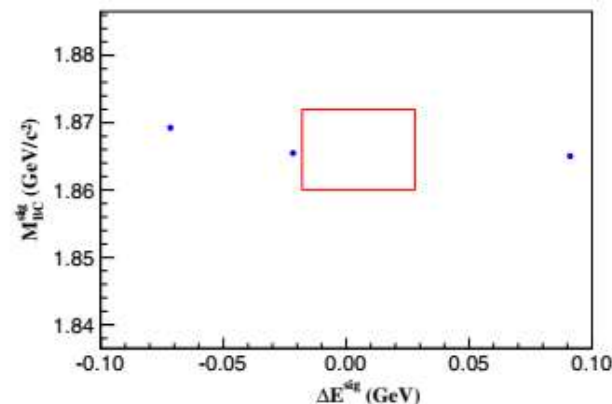
$$\mathcal{B}_{D^+ \rightarrow \bar{n}e^+} < 1.43 \times 10^{-5}$$

$$\mathcal{B}_{D^+ \rightarrow ne^+} < 2.91 \times 10^{-5}$$

◆ 利用 4.5 fb⁻¹ 4.60–4.70 GeV 数据

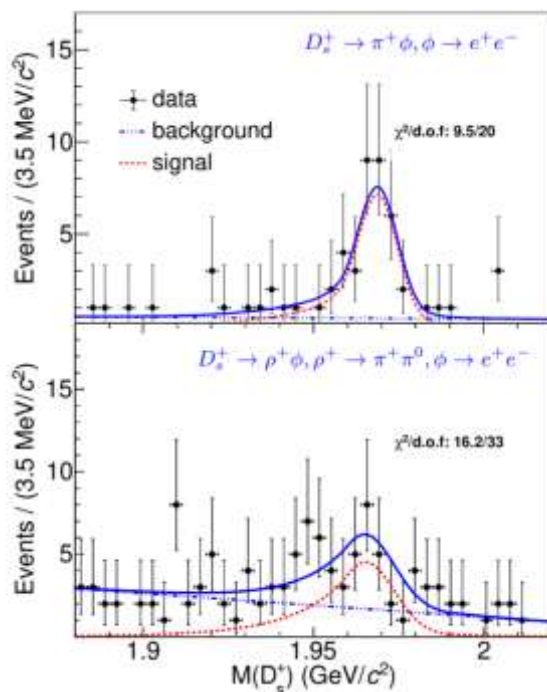
PRD 107 (2022) 052002

$$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \gamma) < 4.4 \times 10^{-4}$$



$D_s^+ \rightarrow h(h')e^+e^-$ 的搜寻工作

- D_s^+ 到 e^+e^- 的四体衰变道的首次搜寻
- 基于4.128–4.228 GeV能区总积分亮度为 7.3 fb^{-1} 的数据
- 单标方法搜寻信号
- $D_s^+ \rightarrow \rho^+(\pi^+\pi^0)\phi(e^+e^-)$ 的首个证据



Decay	N_{sig}	ϵ (%)	$\mathcal{B} (\times 10^{-5})$
$D_s^+ \rightarrow \pi^+\phi, \phi \rightarrow e^+e^-$	$38.2^{+7.8}_{-6.8}$	25.1	$1.17^{+0.23}_{-0.21} \pm 0.03$
$D_s^+ \rightarrow \rho^+\phi, \phi \rightarrow e^+e^-$	$37.8^{+10.3}_{-9.6}$	12.1	$2.44^{+0.67}_{-0.62} \pm 0.16$

Decay	N_{sig}	ϵ (%)	$\mathcal{B} (\times 10^{-5})$
$D_s^+ \rightarrow \pi^+\pi^0e^+e^-$...	7.4	< 7.0
$D_s^+ \rightarrow K^+\pi^0e^+e^-$...	5.3	< 7.1
$D_s^+ \rightarrow K_S^0\pi^+e^+e^-$...	6.7	< 8.1

详情见刘雪吟昨天的报告

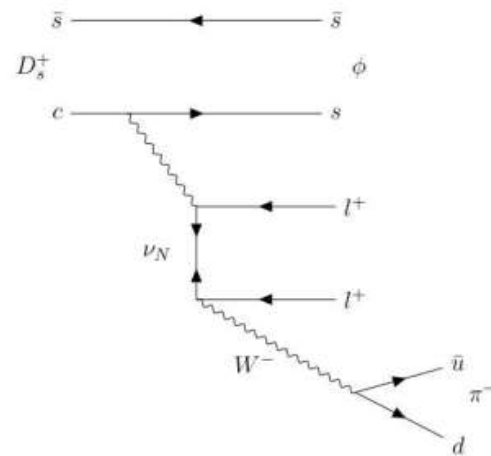
课题相关研究现状（进行中）

衰变道	当前状态	类型
$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^+$	BAM-786, draft stage	LNV
$D_s^+ \rightarrow \rho^+\gamma$	BAM-762, CWR	Radiative
$D^+ \rightarrow \rho^+(K^{*+})\gamma$	BAM-667, CWR	Radiative
$D^0 \rightarrow \omega\gamma$	BAM-708, memo review	Radiative
$D^0 \rightarrow \phi(\bar{K}^{*0})\gamma$	BAM-592, draft stage	Radiative
$D^{0,+} \rightarrow K_1(1270)\gamma$	BAM-837, memo review	Radiative
$D_s^- \rightarrow \Lambda e^-$	Memo out	BNV & LNV
$D_s^+ \rightarrow K^{*+}(K^+\pi^0)\gamma$	WG Status Report	Radiative
$D_s^+ \rightarrow K_1^+(K^+\pi^+\pi^-)\gamma$	WG Status Report	Radiative
$D^+ \rightarrow \pi^+ + invisible$	WG Status Report	FCNC, exotic, etc.
$D_s^+ \rightarrow hh'e^\pm\mu^\mp$	WG Status Report	LFV
...

- D_s^+ 到 e^+e^+ 的四体LNV过程目前尚无实验结果
- 基于4.128–4.228 GeV能区总积分亮度为 7.3 fb⁻¹的数据
- 单标方法搜寻信号
- 预计实验结果:

- 对 $D_s^+ \rightarrow \pi^- \pi^0 e^+ e^+$, $D_s^+ \rightarrow K^- \pi^0 e^+ e^+$,
 $D_s^+ \rightarrow K_S^0 \pi^- e^+ e^+$, $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^- e^+ e^+$,
 $D_s^+ \rightarrow \phi \pi^- e^+ e^+$, $D_s^+ \rightarrow \phi K^- e^+ e^+$ 等
衰变进行首次搜寻, 预计分支比上限
在 10^{-6} – 10^{-5} 量级

- 利用以上部分过程对Majorana中微子质量进行限制
该工作目前正在 **draft** 阶段



$D_s^+ \rightarrow \phi \pi^- l^+ l^+$ (CF)

$D_s^+ \rightarrow (V/A)\gamma$ 的搜寻工作

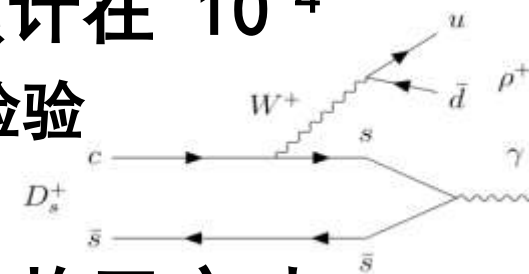
□当前尚无 D_s^+ 辐射衰变的实验结果

□理论预言 $D_s^+ \rightarrow \rho^+ \gamma$ 分支比可能高达 10^{-3} 量级:

Theory Frame	$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \gamma\rho^+)$
WA[JHEP 08 (2017) 091]	$(1.8-2.9)\times 10^{-3}$
Hybrid[EPJC 6 (1999) 471][PRD 56 (1997) 4302]	$(0.11-1.3)\times 10^{-3}$
PoleDiagram and VMD[PRD 52 (1995) 6383]	$(6-38)\times 10^{-5}$
QCD sum rules[PLB 358 (1995) 129]	4.7×10^{-5}

□BESIII对 $D_s^+ \rightarrow \rho^+ \gamma$ 的搜寻灵敏度预计在 $\sim 10^{-4}$

- 该工作将会对相关理论计算进行严格检验
- 该工作目前正在 **CWR** 阶段



□ $D_s^+ \rightarrow K^{*+} \gamma$ 和 $D_s^+ \rightarrow K_1^+ \gamma$ 的搜寻工作均已启动

- 2009年，CLEO已经采用 Generic tagging方法来测量 $D^+ \rightarrow \eta^{(\prime)} e^+ \nu_e$ 过程
- Generic tagging 方法预计有**两倍的信号产率**提升，无需对不同的ST道进行单独拟合
- 缺点&解决方案
 - 更高的本底水平：可以采用MVA来压低
 - 由于对D衰变道还不完全了解，MC的效率估计不可靠：使用归一化道进行刻度
- 在BES III，目前该方法正在被用于对稀有半轻衰变 $D \rightarrow K \omega e^+ \nu$ ，和 $D_s^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \gamma$ 、 $D_s^+ \rightarrow hh' e^\pm \mu^\mp$ 等稀有过程的寻找中

- 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
- 该课题目前进展顺利，已发表（投稿）四篇论文，多项分析工作稳步推进中
- 更多分析工作也在积极准备中，特别是基于新的 $\psi(3770)$ 数据的 D^0/D^+ 介子的稀有衰变搜寻
- 学生培养方面：
 - 已有多位参与该课题的博士生毕业
 - 更多的优秀本科生通过进行该课题相关科研被吸引进入高能实验