

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



合肥, 2023/04/07

- 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<sup>-0</sup>  
10<sup>-1</sup>  
10<sup>-2</sup>  
10<sup>-3</sup>  
10<sup>-4</sup>  
10<sup>-5</sup>  
10<sup>-6</sup>  
10<sup>-7</sup>  
10<sup>-8</sup>  
10<sup>-9</sup>  
10<sup>-10</sup>  
10<sup>-11</sup>  
10<sup>-12</sup>  
10<sup>-13</sup>  
10<sup>-14</sup>  
10<sup>-15</sup>

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)

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

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

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

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

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

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

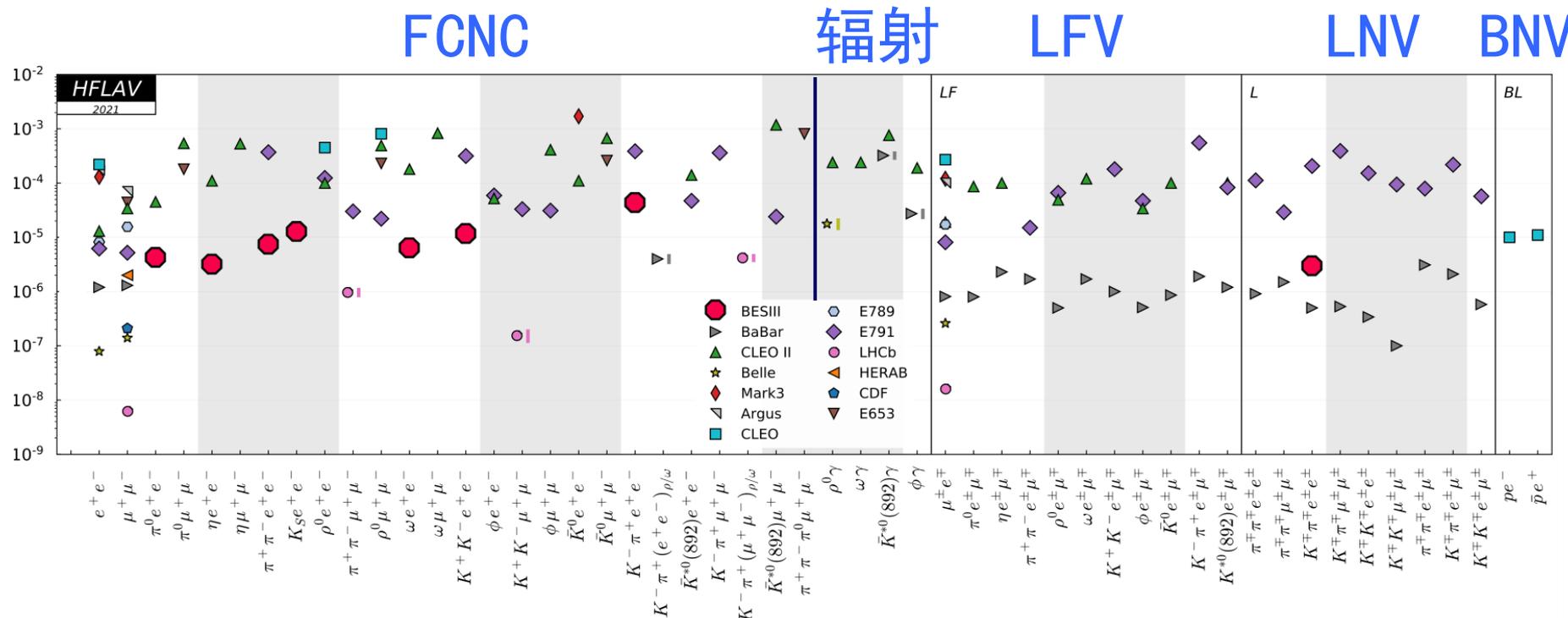
$$D \rightarrow (h) \mu^+ e^-$$

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

# 新物理过程寻找现状 ( $D^0$ )

□ **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

分支比上限 (90%置信区间)

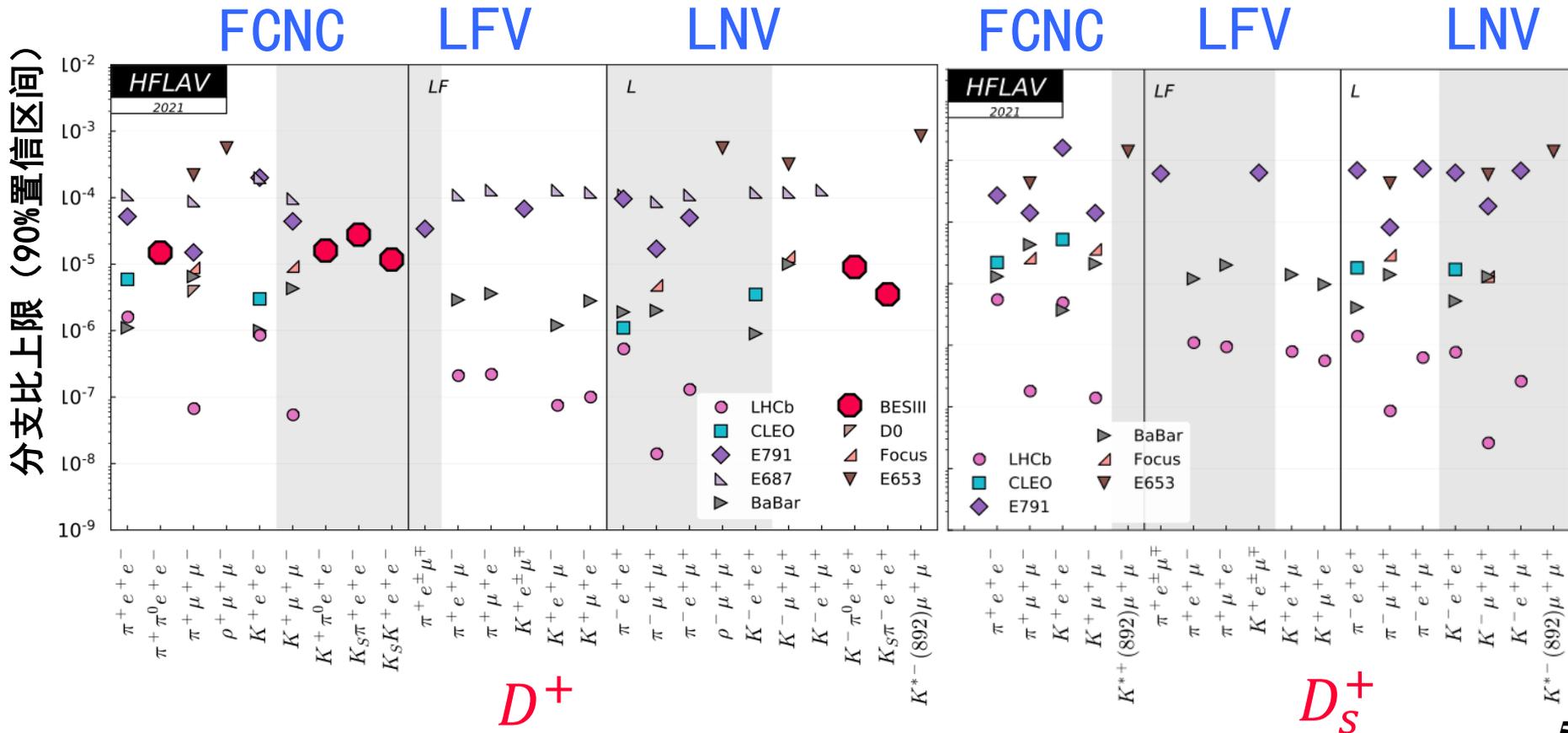


$D^0$

# 新物理过程寻找现状 ( $D_{(s)}^+$ )

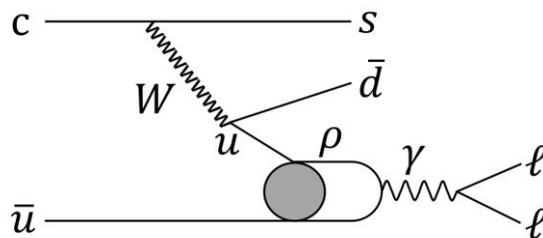
□ **BESIII** 实验可以在末态包含电子和中性强子的过程的寻找中继续发挥优势

□ 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

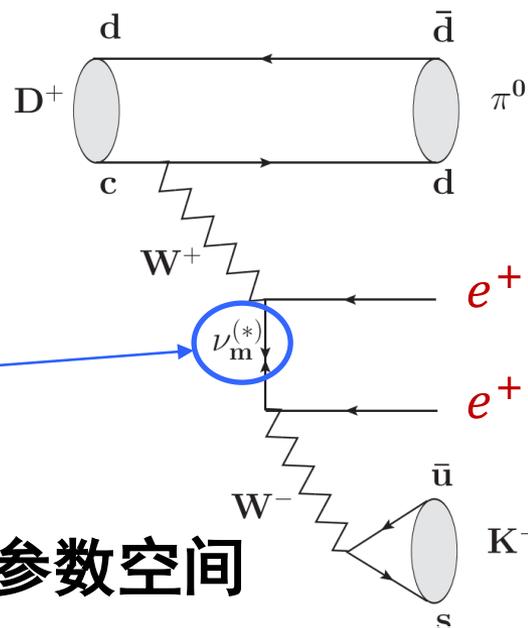
□ 寻找  $D_{(s)} \rightarrow h(h)e^+e^+$  **轻子数破坏过程**

□ 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)

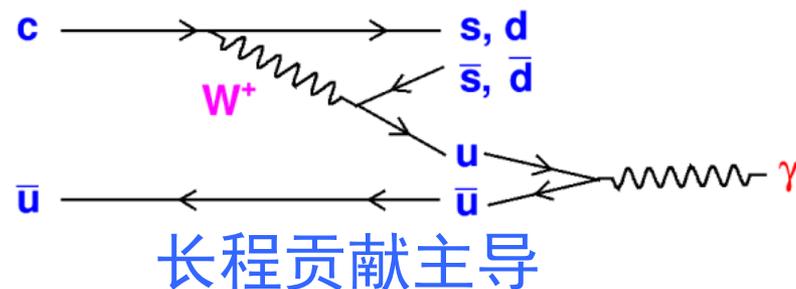
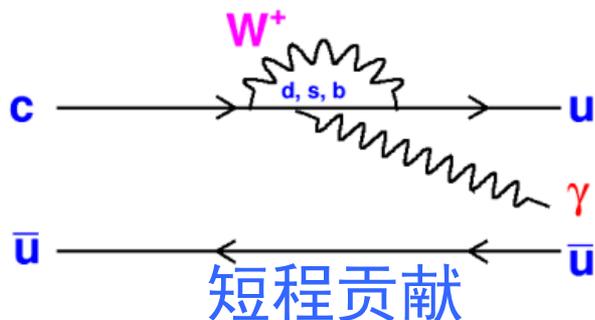
□ 关键科学问题：

- **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 $\pi^0$ 、 $\eta$ 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 $\pi^0$ 、 $\eta$ 、 $K_S^0$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma^0$ 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：姜侯兵
  - 三名研究生
  - 作为本科生科研训练课程的一部分，先后有5名以上的学生参与了稀有 $D_s^+$ 衰变的搜寻，并有多人次在合作组会上报告了工作进展
- 团队同时与其他BES III成员单位开展紧密合作

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
$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^-$	Under review	FCNC, VMD
$D_s^+ \rightarrow hh'e^+e^+$	进行中	LNV
$D_s^+ \rightarrow \rho^+(K^{*+})\gamma$	进行中	Radiative
$D^+ \rightarrow \rho^+(K^{*+})\gamma$	Under review	Radiative
$D^0 \rightarrow \omega\gamma$	Under review	Radiative
$D^0 \rightarrow \phi(\bar{K}^{*0})\gamma$	Under review	Radiative
$D_s^- \rightarrow \Lambda e^-$	进行中	BNV & LNV
...	...	...

# 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<sup>-1</sup> 3.773 GeV 数据

PRD 106 (2022) 112009

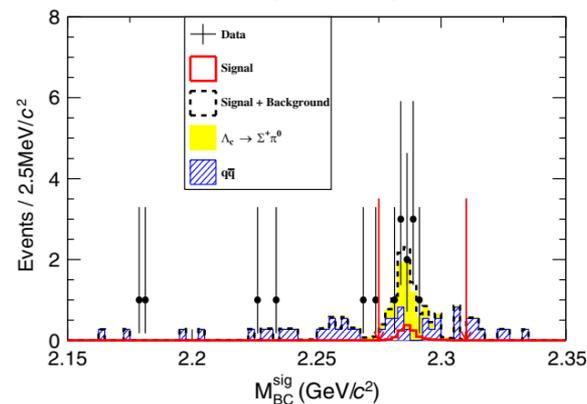
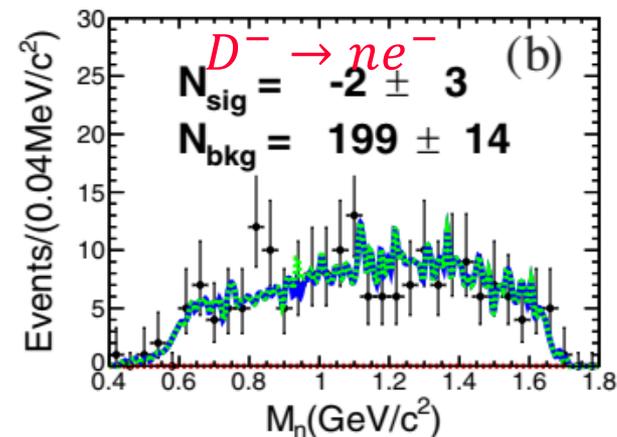
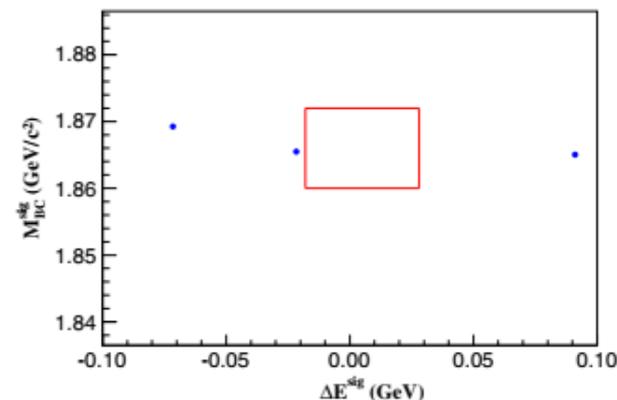
$$\mathcal{B}_{D^+ \rightarrow \bar{n}e^+} < 1.43 \times 10^{-5}$$

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

◆ 利用 4.5 fb<sup>-1</sup> 4.60–4.70 GeV 数据

PRD 107 (2022) 052002

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



- $D_s^+$  到  $e^+e^-$  的四体衰变道目前尚无实验结果
- 基于 4.128–4.228 GeV 能区总积分亮度为 7.3 fb<sup>-1</sup> 的数据
- 单标方法搜寻信号
- 预计实验结果：
  - 首次对  $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \phi (\rightarrow e^+e^-)$  道进行基于观测的分支比测量结果
  - 首次找到  $D_s^+ \rightarrow \rho^+ (\rightarrow \pi^+ \pi^0) \phi (\rightarrow e^+e^-)$  衰变的迹象
  - 对  $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 e^+e^-$  (*non- $\phi$* ),  $D_s^+ \rightarrow K^+ \pi^0 e^+e^-$ , 和  $D_s^+ \rightarrow K_s^0 \pi^+ e^+e^-$  等衰变进行首次搜寻, 预计分支比上限在  $10^{-5}$  量级
- 该工作目前正在 draft 撰写阶段

□  $D_s^+$  到  $e^+e^+$  的四体轻子数破坏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<sup>-1</sup> 的数据

□ 单标方法搜寻信号

□ 预计实验结果:

➤ 对  $D_s^+ \rightarrow \pi^- \pi^0 e^+ e^+$ ,  $D_s^+ \rightarrow K^- \pi^0 e^+ e^+$ ,

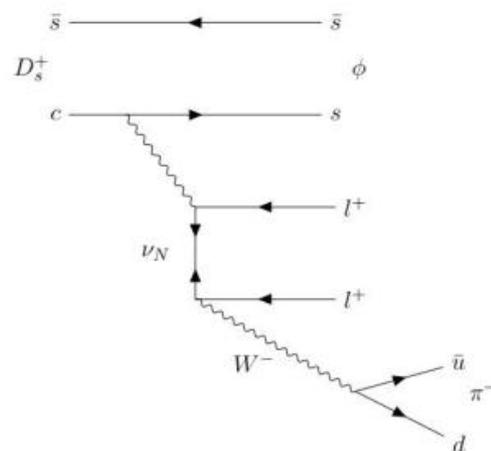
$D_s^+ \rightarrow K_S^0 \pi^- e^+ e^+$ ,  $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^- e^+ e^+$ ,

$D_s^+ \rightarrow \phi \pi^- e^+ e^+$ ,  $D_s^+ \rightarrow \phi K^- e^+ e^+$  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



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

# $D_s^+ \rightarrow V\gamma$ 的搜寻工作

□当前尚无 $D_s^+$ 辐射衰变的实验结果

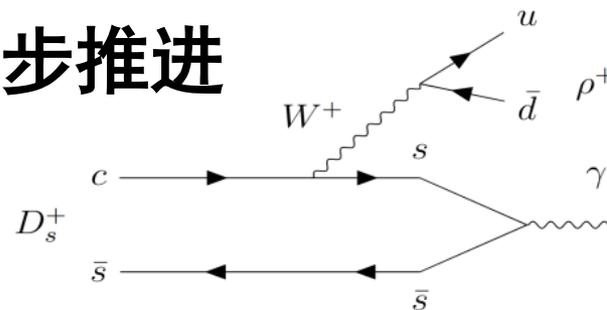
□理论预言 $D_s^+ \rightarrow \rho^+ \gamma$ 分支比可能高达 $10^{-3}$ 量级:

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]	$4.7\times 10^{-5}$

□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

□ $D_s^+ \rightarrow K^{*+} \gamma$ 的搜寻工作也将同步推进



- 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，已发表三篇论文，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：
  - 今年预计两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