

国家重点研发计划 “粲强子衰变和标准模型的精确检验”

课题四：标准模型稀有过程和新物理的寻找

2025年课题进展报告

尤郑昀

中山大学

youzhy5@mail.sysu.edu.cn

2025年8月13日 贵州民族大学·贵阳



大纲

- 项目与课题背景介绍
- 课题任务
- 课题进展
- 总结



项目介绍

- 国家重点研发计划 “**粲强子衰变和标准模型的精确检验**” 2023YFA1606000
 - 项目承担单位：中科院高能物理所，负责人：李海波
 - 参与单位：河南师范大学、南华大学、中山大学、湖南大学、华南师范大学
 - 执行期限：五年，2023年12月 — 2028年11月
 - 课题一：**粲强子多体强子末态衰变研究**
 - 课题二：**利用粲强子含轻子衰变精确检验标准模型**
 - 课题三：**陶轻子物理和强子产生机制的实验研究**
 - 课题四：**标准模型稀有过程和新物理的寻找**



课题四研究团队

- 中山大学

- 尤郑昀 (新物理组协调人)、张晋 团队

- 研究生：袁朝阳、李静舒、黄凯旋、詹永华、李志军、宋天资、曾宇杰、廖明华、李绪泽、廖立波、方进

- 中国科学院高能物理研究所

- 李海波、傅成栋、张瑶、宫明 团队

- 研究生：谢凯吉，季旺，马呈龙，妙晗

- 南华大学

- 张宇 (新物理组协调人) 团队

- 研究生：史书宇、兰强、刘坤

共计： 教职工 7 人
研究生约 20 人

课题四：标准模型稀有过程和新物理的寻找



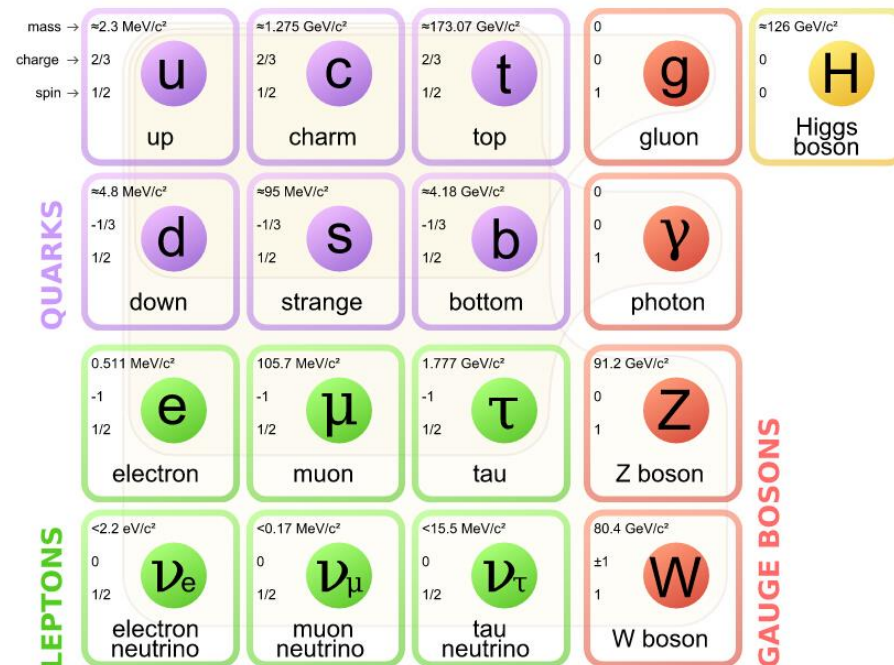
- 精确检验标准模型

- 标准模型占主导贡献过程
- 标准模型高度压低过程
- 标准模型禁戒过程

是否超出标准
模型理论预期?

- 寻找新物理

- 标准模型稀有过程（粲偶素弱衰变，FCNC）
- 新的观测量（超子电偶极矩、暗物质、奇特态）
- 标准模型禁戒过程（轻子味破坏，轻子数/重子数破坏）



标准模型

BESIII作为高亮度前沿实验，可为标准模型的精确检验和寻找新物理发挥重要作用

BESIII特色与优势

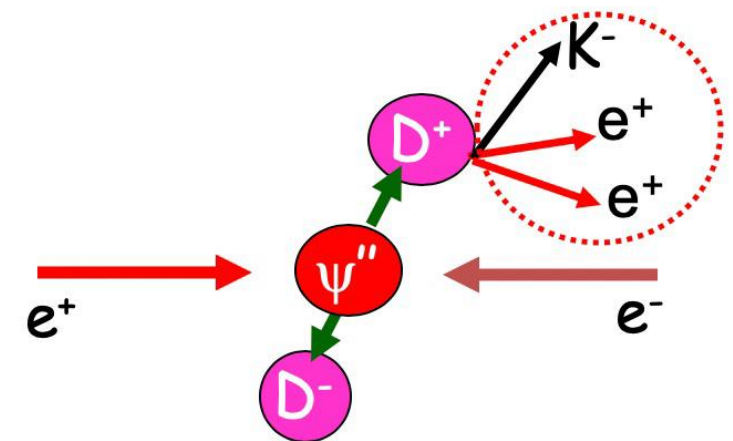
• 数据样本

- 正负电子对撞，本底干净
- 粲偶素阈值处产生截面大
- 数据统计量大，质量高

质心能量GeV	采集年份	积分亮度	产额
3.097	2009, 2012 2017-2019	$\sim 3.2 \text{ fb}^{-1}$	$10^{10} J/\psi$
3.686	2009, 2012 2021	$\sim 3.9 \text{ fb}^{-1}$	$2.7 \times 10^9 \psi'$
3.773	2010-2011 2022-2024	$\sim 20 \text{ fb}^{-1}$	$\sim 7.2 \times 10^7 D^0 \bar{D}^0$ $\sim 5.6 \times 10^7 D^+ D^-$

• 分析方法

- 关联标记 ($D\bar{D}$, $\Lambda\bar{\Lambda}$ 等正反超子对产生)
- 丢失能量/动量方法 (探测不可见的中微子、暗物质)
- 盲分析、可视化



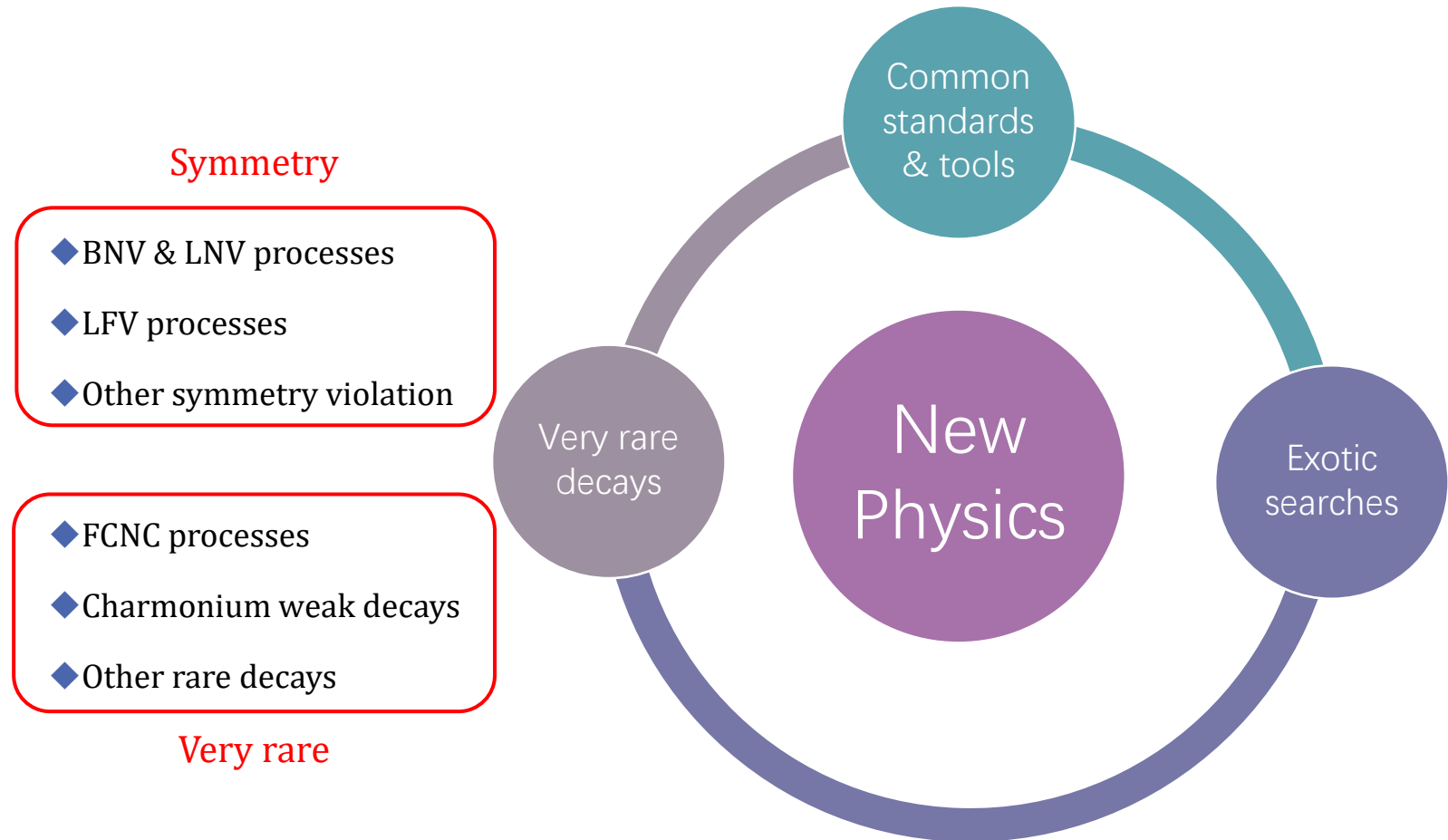
课题四任务

• 课题研究内容

- 对称性破坏稀有过程研究
- 超子电偶极矩测量
- 标准模型稀有衰变的系统研究

• 发表论文

- 6~10 篇



任务1：对称性破坏稀有过程研究

- 带电轻子味破坏

- $\psi' \rightarrow e^+ \mu^- / \tau^-$

- 分支比上限达到 10^{-8} 量级

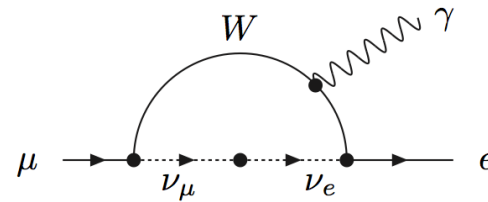
- 轻子数破坏

- $D^+ \rightarrow K^- / \pi^- e^+ e^+$

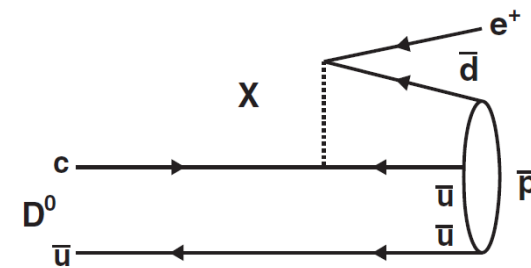
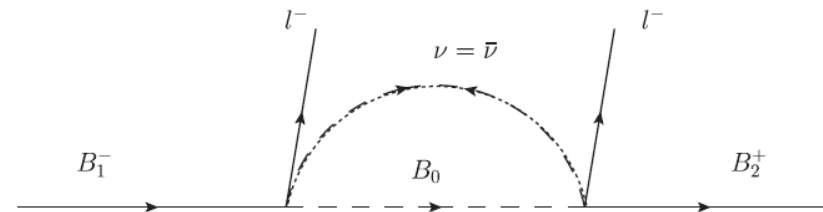
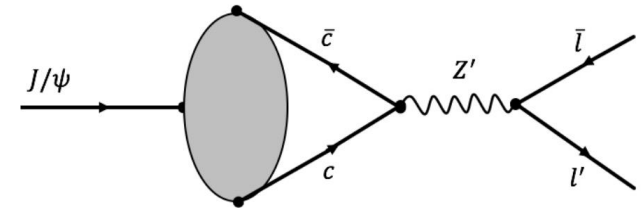
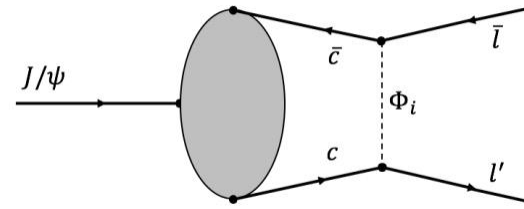
- 分支比上限达到 10^{-6} 量级

- 轻子数/重子数破坏

- $J/\psi \rightarrow p^+ / \Lambda_c e^-, D^0 \rightarrow \bar{p} e^+$

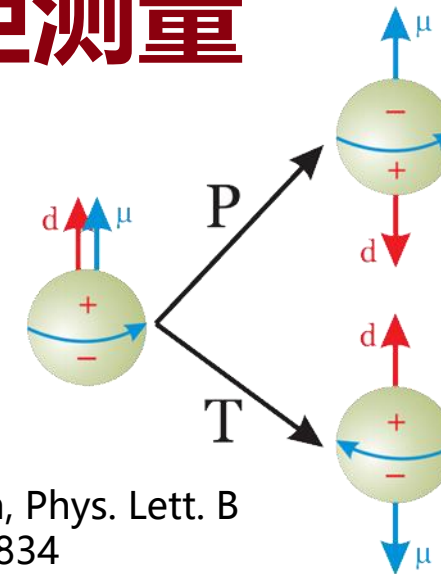


$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{1i}^2}{M_W^2} \right|^2 < 10^{-54}$$



任务2：超子电偶极矩测量

- 非零的固有电偶极矩 (EDM)
 - 现有介子 CP 破坏无法解释正反物质不对称性
 - 非零的 EDM $\Rightarrow$ 时间反演(T 宇称)破坏
 - T 破坏 $\Leftrightarrow CP$ 破坏

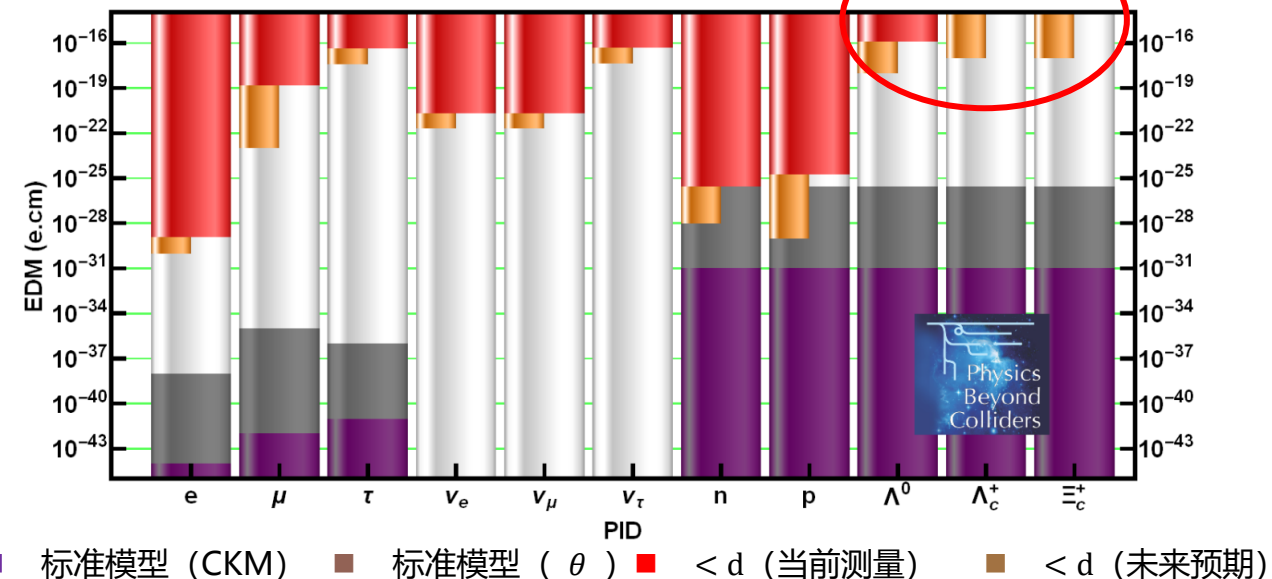


μ : 磁偶极矩
 d : 电偶极矩

X.G. He, J. P. Ma, Phys. Lett. B
839 (2023) 137834

实验测量

- BESIII产生海量量子纠缠超子对
- $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$, 及 Σ, Ξ, Ω
- Λ EDM上限达到 $10^{-18} e \cdot cm$ 量级



任务3：标准模型稀有衰变的系统研究

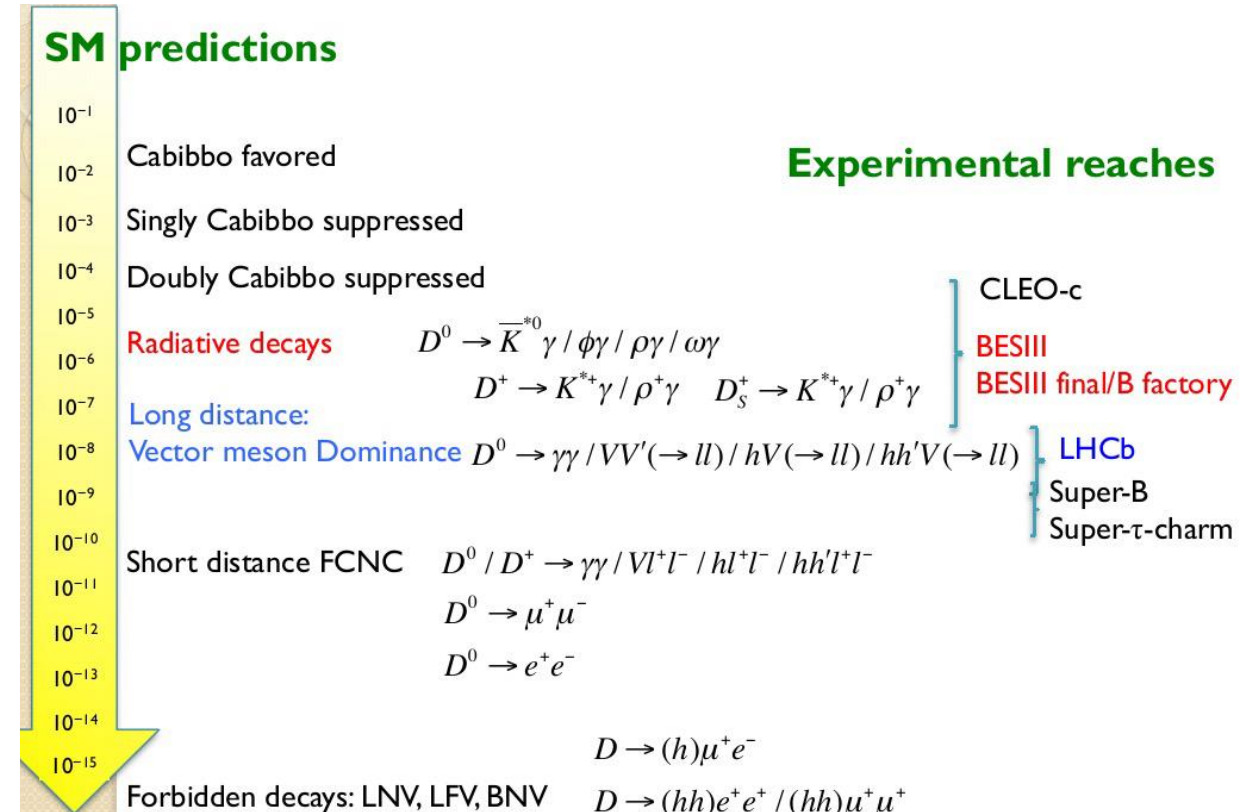
• 粲偶素弱衰变

- $J/\psi(\psi') \rightarrow D_s^- \rho^+ / \pi^+$ (强子末态)
- $J/\psi(\psi') \rightarrow D_s^- e^+ \nu_e / \mu^+ \nu_\mu$ (半轻末态)
- 分支比上限达到 10^{-7} 量级

• 粲强子FCNC过程

- $J/\psi \rightarrow D^0 e^+ e^- / \mu^+ \mu^-$
- $D^+ \rightarrow K^+ / \pi^+ e^+ e^-$
- 分支比上限达到 $10^{-5} \sim 10^{-7}$ 量级

• 其他稀有过程



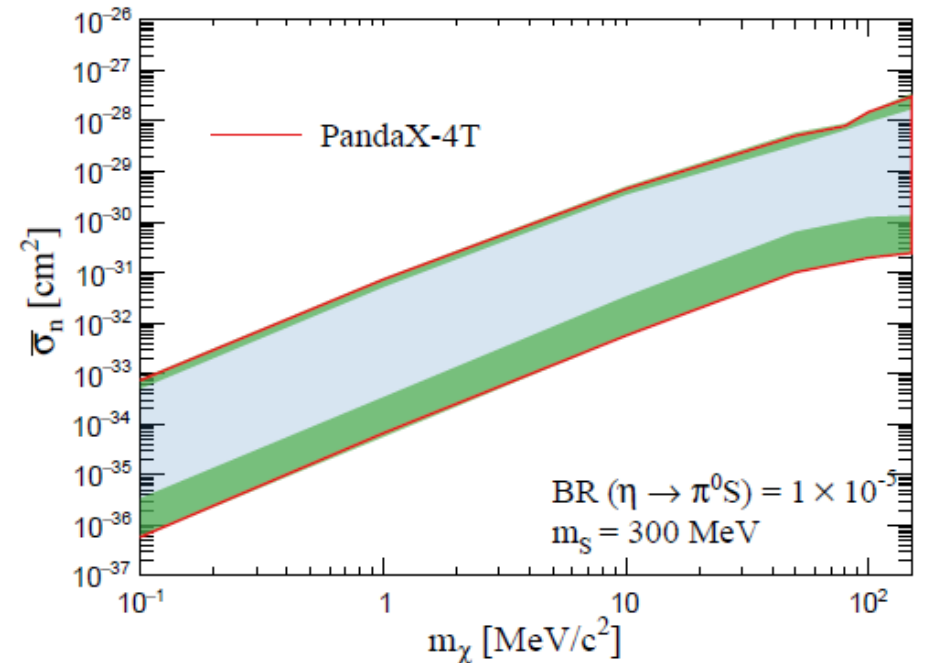
课题任务以外的新探索

- 暗物质寻找

- 对撞机上寻找暗物质粒子的优势
 - 四动量守恒，大质量粒子可直接产生
- 通过丢失动量的方法寻找暗物质
- 通过末态粒子重建不变质量寻找反常

- BESIII实验优势

- 高统计量的粲偶素、粲强子及中间态粒子
- 对不可见衰变、暗物质耦合更精确的限制



PandaX Collaboration,
Search for Light Dark Matter from the Atmosphere
in PandaX-4T
Phys. Rev. Lett. 131, 041001 (2023)



课题进展1 对称性破坏过程

- 课题指标

- 中期指标: 完成 $\psi(3686) \rightarrow e\mu$ 过程, 发表实验文章1 篇

- $\psi(3686) \rightarrow e^+\mu^-$ 上限: 1.4×10^{-8} , [arXiv](#), 投稿PRL

复旦/中大 袁铭宽

- 完成时指标: 完成 $\psi(3686) \rightarrow e\mu$ 、 $e\tau$ 等对称性破坏过程的上限测量, 最好精度达到 10^{-8} 量级; 发表实验文章2-3 篇

- $\psi(3686) \rightarrow e^+\tau^-$ [新物理组会报告](#)

北大/中大 李小康

- 其他相关分析

- $J/\psi \rightarrow \mu^+\tau^-$ [BAM-919](#)

南开 李明浩

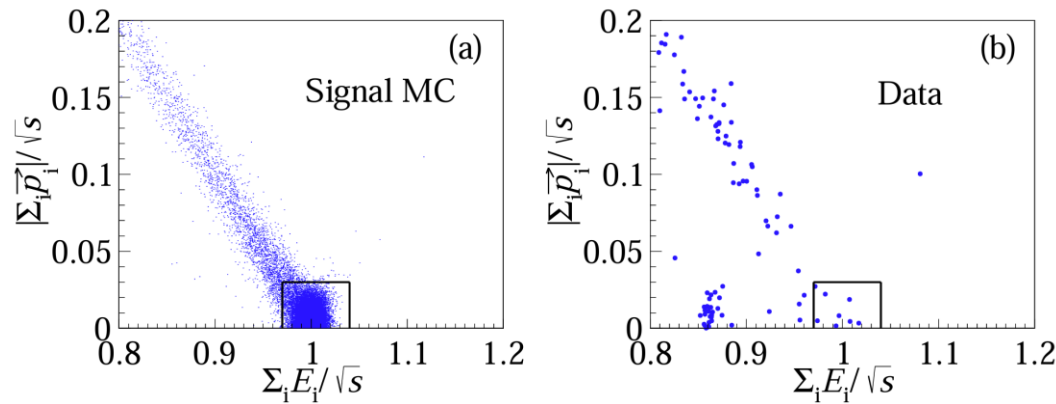
- $\psi(3686) \rightarrow \mu^+\tau^-$ [新物理组会报告](#)

中大 范恺欣

$\psi(3686) \rightarrow e^+ \mu^-$

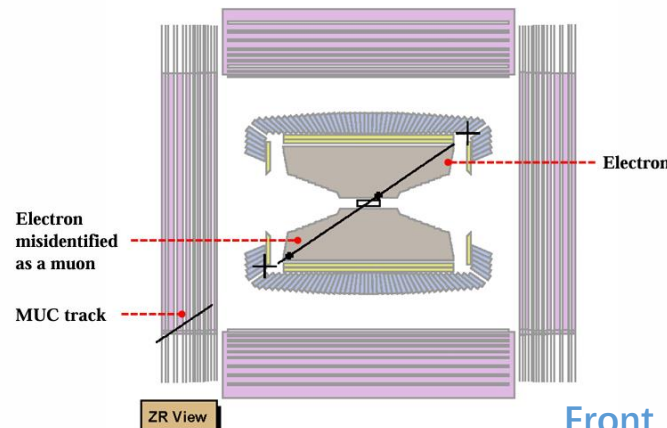
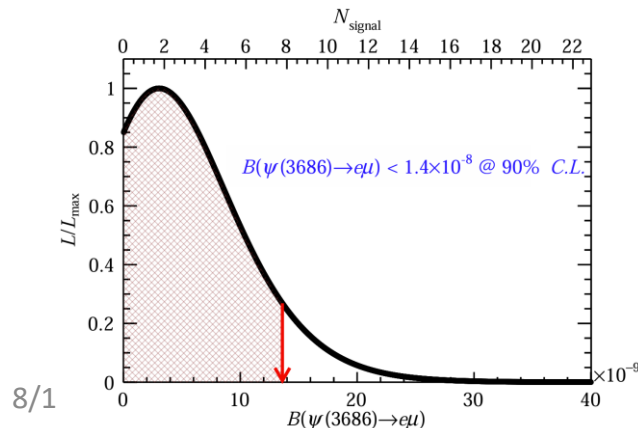
arXiv: 2507.10331

- 分析 $(2367.0 \pm 11.1) \times 10^6$ $\psi(3686)$ 事例
- $\psi(3686) \rightarrow e\mu$ 两条背对背电子和缪子径迹
- 信号区内观测到8个事例，与预期本底数6.2相符
- $\mathcal{B}(\psi(3686) \rightarrow e\mu) < 1.4 \times 10^{-8} @ 90\% C.L.$
- 使用EFT对Wilson系数计算了上限



$$\mathcal{L}_{\text{EFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{\Lambda_{\text{odd}}} \sum_i C_i^{(5)} \mathcal{O}_i^{D=5} + \frac{1}{\Lambda_{\text{even}}^2} \sum_i C_i^{(6)} \mathcal{O}_i^{D=6} + \dots$$

Wilson coef./GeV ⁻²	$\ell_1 \ell_2$	J/ψ	$\psi(2S)$
$ C_{DL/DR}^{\ell_1 \ell_2} / \Lambda^2 $	$e\mu$	1.8×10^{-4}	7.3×10^{-4}
	$e\tau$	5.0×10^{-5}	—
$ C_{VL/VR}^{q\ell_1 \ell_2} / \Lambda^2 $	$e\mu$	1.8×10^{-6}	6.0×10^{-6}
	$e\tau$	1.1×10^{-5}	—
$ C_{TL/TR}^{q\ell_1 \ell_2} / \Lambda^2 $	$e\mu$	0.80	2.7
	$e\tau$	0.23	—





课题进展1 对称性破坏过程

– 其他LFV分析(9)

- $\chi_{cJ} \rightarrow e^+ \mu^-$
- $\eta' \rightarrow e^+ \mu^-$
- $D_0 \rightarrow e^+ \tau^-$
- $\chi_{cJ} \rightarrow e^+ \tau^- / \mu^+ \tau^-$
- $\psi(3686) \rightarrow e^+ \mu^- + inv$
- $\eta/\eta' \rightarrow \mu^+ \mu^+ e^- e^-$
- $J/\psi \rightarrow \gamma e^+ \tau^- / \mu^+ \tau^-$
- $J/\psi \rightarrow \gamma e^+ \mu^-$
- $D_s \rightarrow hh' \mu^+ e^-$

BAM-669 CWR

BAM-948

PSM

Memo review @ NPG

Memo review @ NPG

Memo review @ NPG

Memo review @ NPG

新物理组会报告

新物理组会报告

14日宋天资报告

北大 相腾

北大/中大 李小康

中大 李志军

Indiana Johnathan

南大 黄盼

南开 杨耘赫

吉大 Vindy

吉大 Vindy

武大 孙亮



课题进展1 对称性破坏过程

– 轻子数破坏 LNV 分析(8)

- $D_s \rightarrow hh'e^+e^+$
- $\omega \rightarrow \pi^+\pi^+e^-e^-$
- $J/\psi \rightarrow K^+K^+e^-e^-$
- $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^+e^-e^-$
- $\eta \rightarrow \pi^+\pi^+e^-e^-$
- $\Xi^- \rightarrow \Sigma^+e^-e^-$
- $D^+ \rightarrow h^-e^+e^+$
- $\Omega^- \rightarrow \Sigma^+\mu^-\mu^-$

JHEP 01 109 (2025)

CPC接收

投稿CPC

BAM-651

BAM-770

BAM-926

Memo review @ NPG

新物理组会报告

14日张广义报告

武大 刘雪吟

南开 高枝

南开 车国荣

南开 徐溯

南开 刘新平

北大 柴新宇

中大 范恺欣/丁然

复旦 朱稳定



课题进展1 对称性破坏过程

14日张广义报告

– 重子数破坏 **BNV** 分析(4)

- $\Lambda\bar{\Lambda}$ oscillation

PRD 111, 052014 (2025)

山大 王少杰

- $J/\psi \rightarrow p^+ e^-$

PRD 111, 112010 (2025)

南开 车国荣

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

Memo review @ NPG

南开 刘良辰

- $D_s \rightarrow \Lambda/\Sigma^0 e^+/\mu^+$

Memo review @ NPG

苏大 陈超



课题进展2 超子电偶极矩测量

- 课题指标

- 中期指标：完成 Λ 超子 EDM 的测量，发表实验文章1篇

- Λ EDM 上限： $10^{-19} e \cdot cm$ 量级，投稿 Science

国科大 张剑宇

- 完成时指标：完成1-2 项超子（如 Λ 和 Ξ 超子） EDM 测量，最好精度达到 $10^{-18} e \cdot cm$ 量级；发表实验文章1-2 篇

- Ξ^- EDM 测量

物理软件会报告

国科大 张铨正

- Ξ^0 EDM 测量

新物理组会报告

国科大 谢凯吉

- 其他相关分析

14日张铨正报告

- Σ^+ EDM 测量

BAM-1012

国科大 殷晓越

- Σ^0 EDM 测量

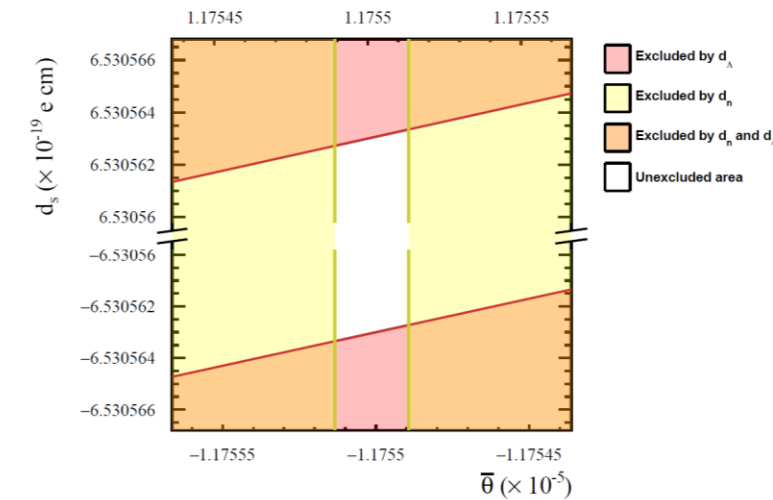
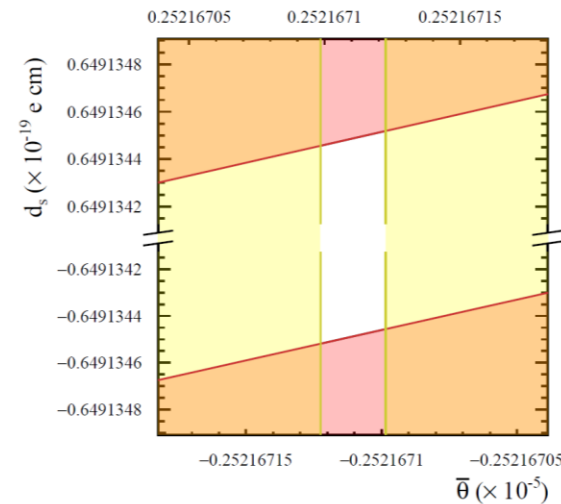
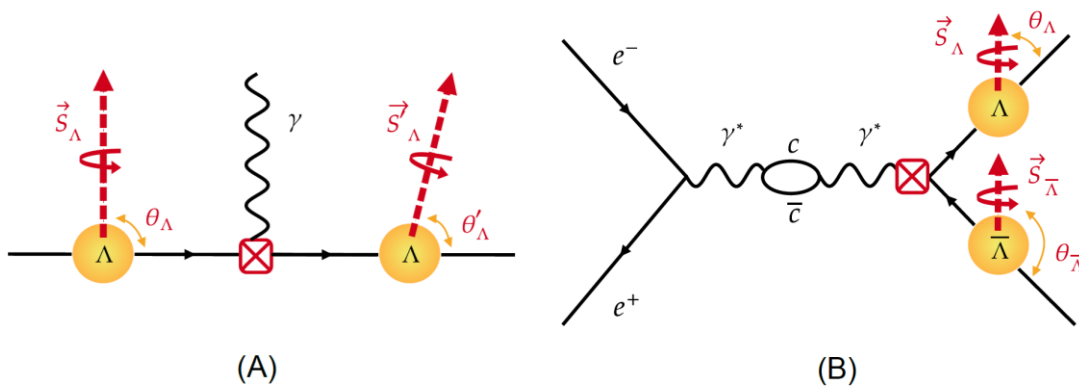
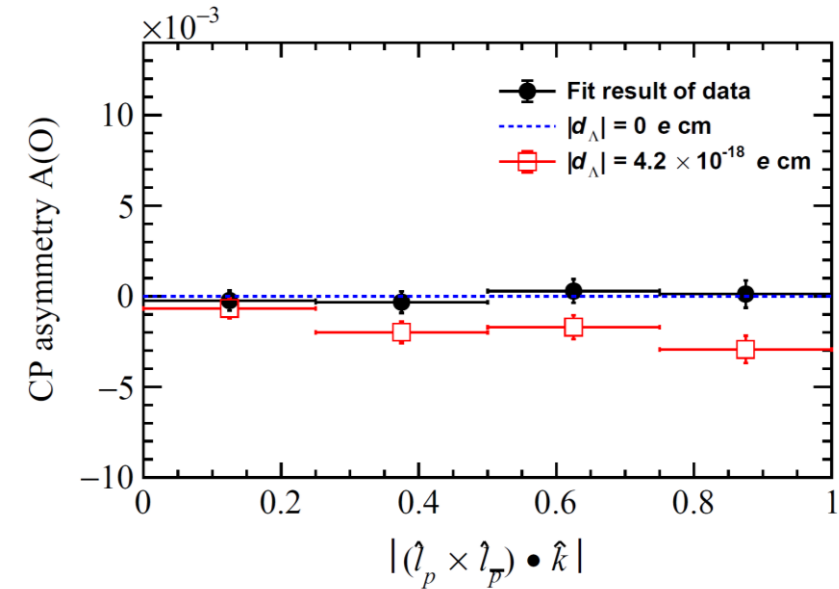
新物理组会报告

国科大 王辰龙

Λ EDM

Submitted to Science

- 非零的超子EDM预示T宇称破坏, 即CP破坏
- 分析量子关联的 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$, 重建~3百万事例
- 通过 Λ 衰变末态重建和分析 $\Lambda \bar{\Lambda}$ 角分布
- CP破坏测量结果与数据与 Λ EDM零假设相符
- 对 Λ 超子EDM的测量精度上限达到 $10^{-19} e \cdot cm$ 量级





课题进展3 标准模型稀有衰变的系统研究

- 课题指标

- 中期指标：完成 $J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+ / \pi^+$ 、 $J/\psi \rightarrow D_s^- e^+ \nu_e$ 等粲偶素弱衰变测量，发表实验文章2篇

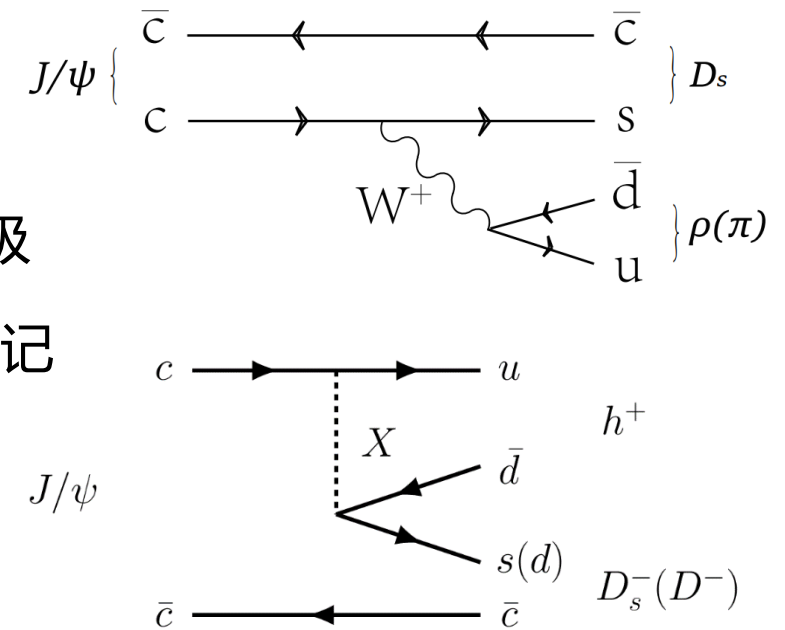
- $J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+ / \pi^+$ 上限: $8.0(4.1) \times 10^{-7}$, [arXiv](#), 投稿JHEP 中大 詹永华
 - $J/\psi \rightarrow D_s^- e^+ \nu_e$ BAM-842 CWR 中大 宋天资

- 完成时指标：完成粲偶素弱衰变等稀有衰变过程的上限测量，精度达到 $10^{-5} - 10^{-7}$ 量级；发表实验文章3-5 篇

- $J/\psi \rightarrow D^0 \mu^+ \mu^-$ 上限: 1.1×10^{-7} , JHEP 04 061 (2025) 中大 黄凯旋 李志军
 - $J/\psi(\psi') \rightarrow D^0 e^+ e^-$ BAM-952 中大 廖明华
 - $D^+ \rightarrow h(h') e^+ e^-$ BAM-1018 南华 兰强

$J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+ / \pi^+$

- 粲偶素的衰变由电磁与强衰变主导，弱衰变被强烈压低
- 标准模型计算 J/ψ 所有弱衰变分支比总在 10^{-8} 量级
- $J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+$ 在SM中Cabibbo允许的，预期最高可达 10^{-9} 量级
- 由于强衰变末态高本底，无法全重建 D_s^- ，使用 $D_s^- \rightarrow \phi e^- \bar{\nu}_e$ 标记
- 可能存在的新物理将进一步提升其分支比
- $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+) < 8.0 \times 10^{-7} @ 90 \% C.L.$
- $\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow D_s^- \pi^+) < 4.1 \times 10^{-7} @ 90 \% C.L.$



Model	QCDSR [2]	BSW [3]	CLFQM (2008) [4]	CLFQM (2024) [5]
$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+)(\times 10^{-10})$	$12.6^{+7.6}_{-6.0}$	$51.1^{+7.6}_{-6.0}$	28^{+0}_{-9}	$29.5^{+0.6+1.1+1.5}_{-0.5-1.4-1.9}$
$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow D_s^- \pi^+)(\times 10^{-10})$	$2.0^{+4.0}_{-0.2}$	$7.41^{+0.13}_{-0.23}$	$2.5^{+0.0}_{-0.1}$	$3.64^{+0.06+0.34+0.78}_{-0.06-0.38-0.96}$

- [2] Eur. Phys. J.C 55, 607-613 (2008)
 [3] High Energy Phys. 2013, 706543 (2013)
 [4] Phys. Rev. D 78, 074012 (2008)
 [5] Eur. Phys. J.C 84, no.1, 65 (2024)

课题进展3 标准模型稀有衰变的系统研究



– 其他粲偶素弱衰变 (6)

- $\psi(3686) \rightarrow D_s^- \rho^+ / \pi^+$

BAM-853

- $J/\psi \rightarrow \bar{D}^0 K^{0*}$

BAM-869, CWR

- $\psi(3686) \rightarrow D_s^- e^+ \nu_e$

Memo review @ NPG

- $\psi(3686) \rightarrow D^- e^+ \nu_e$

新物理组会报告

- $J/\psi \rightarrow D^0 K^0$

新物理组会报告

- $J/\psi \rightarrow D^0 \phi$

新物理组会报告

14日詹永华报告

中大 曾宇杰

北大/中大 李小康

中大 李绪泽

中大 范恺欣

中大 黄伊晴

中大 聂小斐

课题进展3 标准模型稀有衰变的系统研究



– 其他FCNC衰变 (4)

- $J/\psi \rightarrow \gamma D^0$

PRD 110, 112012 (2024)

科大 王博

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

PRL 133, 121801 (2024)

武大 姜侯兵

- $D^+ \rightarrow h^+ e^+ e^-$

Memo review @ NPG

中大 范恺欣/丁然

- $D^0 \rightarrow h^0 e^+ e^-$

新物理组会报告

中大/南华 廖立波

14日廖明华报告



课题进展3 标准模型稀有衰变的系统研究

14日兰强报告

– 其他稀有衰变 (6)

• $\eta_c \rightarrow \gamma\gamma$	PRL 134, 181901 (2025)	中大 李志军
• $J/\psi(\psi') \rightarrow K_S^0 K_S^0$	投稿PRD	北大 王轩
• $CPV \text{ in } \psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$	投稿PRL	兰大 张景旭
• $\eta_c \rightarrow l^+ l^-$	BAM-836	郑大 乔晓珂
• $\Xi^0 \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$	BAM-976	复旦 刘兴淋
• $\eta(\eta') \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	新物理组会报告	武大 孙光豹



课题任务外其他分析进展

– 寻找暗粒子 (10)

- $D^0 \rightarrow \omega \gamma' / \gamma \gamma'$ PRD 111, L011103 (2025)
- $K_S^0 \rightarrow inv \text{ in } J/\psi \rightarrow \phi K_S^0 K_S^0$ JHEP 05, 092 (2025)
- $\Xi^- \rightarrow \pi^- + inv$ 投稿PLB
- $J/\psi \rightarrow \phi + inv$ 投稿PRL
- $\omega/\phi \rightarrow +inv$ BAM-870
- $\eta \rightarrow inv$ BAM-918
- $\eta \rightarrow \pi^0 + inv$ BAM-926, CWR
- $\Lambda \rightarrow inv$ BAM-990
- $D^- \rightarrow \pi^- + inv$ BAM-993
- $\Xi^0 \rightarrow \Lambda + inv$ BAM-1005

14日李志军报告

中大 李志军

北大 丁晓萱

北大 蒋沛成

高能所 吴金飞

南开 高枝

南开 王旨

中大 李志军

南开 徐溯

南开 刘良辰

中大 詹永华



课题任务外其他分析进展

– 寻找Exotics (2)

- BSM in $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ l^-$

BAM-803

武大 姜侯兵

- BSM in χ_{cJ} decay

BAM-910, CWR

南大 樊高峰



课题进度

考核指标 ²			中期指标进度 (2026/11)		完成时指标进度
指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 ³		完成时指标值/状态	
粲偶素和粲强子的对称性破坏过程研究；论文数量	已有 $J/\psi \rightarrow e\mu/e\tau$ 等上限测量过程；更多数据和衰变过程待研究。	完成 $\psi(3686) \rightarrow e\mu$ 过程，发表实验文章 1 篇。	√论文期刊审稿中	完成 $\psi(3686) \rightarrow e\mu, e\tau$ 等对称性破坏过程的上限测量，最好精度达到 10^{-8} 量级；发表实验文章 2-3 篇。	2项指标分析处于新物理组会阶段 ~20项分析进展中 - 已发表2篇论文
超子 EDM 测量；论文数量	Λ 超子 EDM 测量精度为 $10^{-16} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 量级。	完成 Λ 超子 EDM 的测量，发表实验文章 1 篇。	√论文期刊审稿中	完成 1-2 项超子（如 Λ 和 Ξ 超子）EDM 测量，最好精度达到 $10^{-18} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 量级；发表实验文章 1-2 篇。	2项指标分析处于新物理组会阶段 2项分析进展中
粲偶素和粲强子的稀有衰变研究（关键核心指标）；论文数量	之前发表的粲偶素弱衰变过程较少。	完成 $J/\psi \rightarrow D_s^- \rho^+, D_s^- \pi^+, D_s^- e \nu_e$ 等粲偶素弱衰变测量，发表实验文章 2 篇。	√论文期刊审稿中 论文CWR阶段	完成粲偶素弱衰变等稀有衰变过程的上限测量，精度达到 $10^{-5} - 10^{-7}$ 量级；发表实验文章 3-5 篇。	2项指标分析BAM阶段，1项已发表 15+项分析进展中



课题进度

- 定期召开课题交流会
 - 依托BESIII新物理组会，1次/月，各合作单位讨论课题分析进展
- 新物理研讨会
 - 每年一次，邀请理论家交流讨论
 - 2024.8 杭州，2025.8 贵阳
- 人才培养
 - 依托本课题，已毕业博士3人：袁朝阳、李静舒、黄凯旋

总结

- 在陶粲能区精确检验标准模型和寻找新物理，具有重要的科学意义
- 利用BESIII实验采集的高统计量粲偶素、粲强子数据，本课题开展
 - 对称性破坏稀有过程测量
 - 标准模型稀有衰变的系统研究
 - 超子电偶极矩测量
 - 其他可能的物理新探索
- 课题按计划进展，预期能够按时完成中期考核指标和课题任务

谢谢！