

《粲强子衰变和标准模型的精确检验》项目之课题一：

粲强子多体强子末态衰变研究

2025年度进展汇报

汇报人： 李惠静（河南师范大学）

承担单位： 河南师范大学

合作单位： 中国科学院高能物理研究所、
中山大学

2025年8月13日， 贵州民族大学



内容提要

- 研究背景
- 研究内容
- 研究进展
- 总结



Beijing Electron Positron Collider II



$$E_{cm} = 2 - 4.95 \text{ GeV}$$

2004, started construction

2009-2024, BESIII Physics run

Design Luminosity:

$$\mathcal{L}_D = 1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} @ E_{cm} = 3.773 \text{ GeV}$$

Peak luminosity:

$$2016 \text{ achieved } 1.0 \times \mathcal{L}_D$$

$$2023 \text{ achieved } 1.1 \times \mathcal{L}_D$$

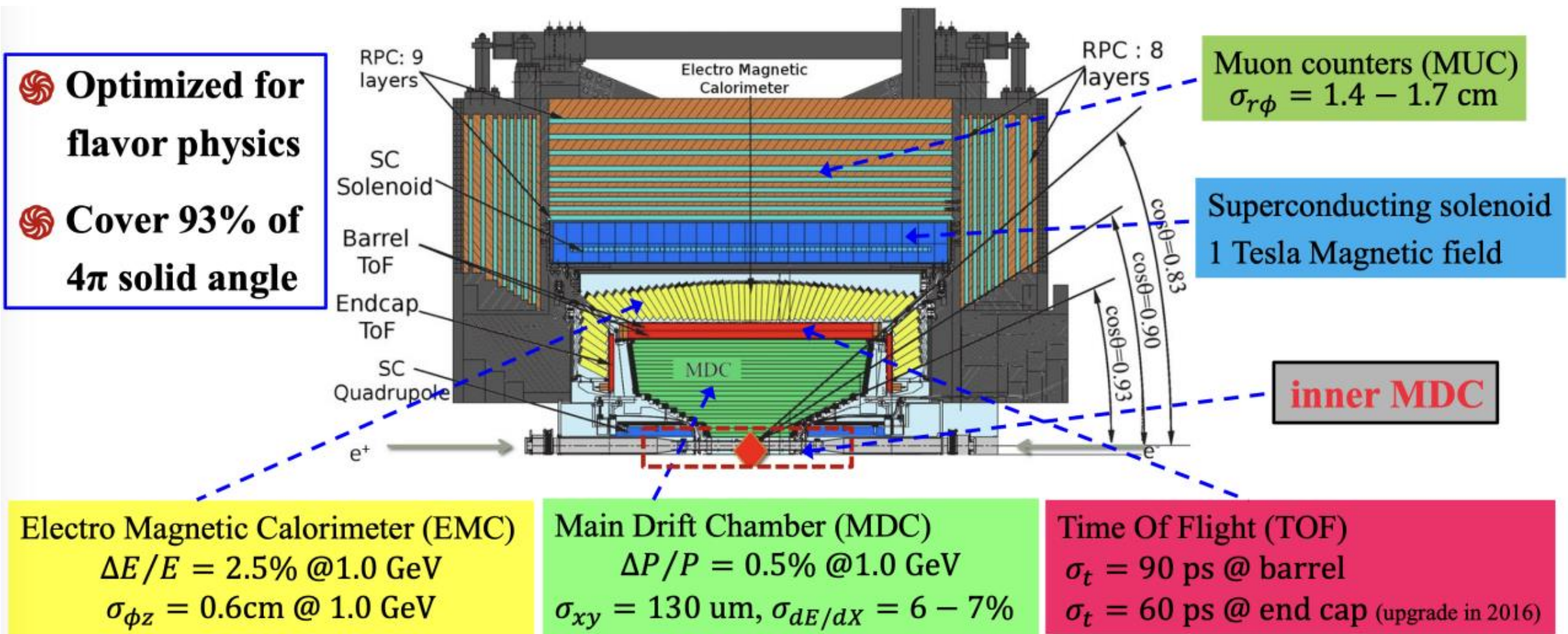
Jul. 1, 2024 – Aug. 31, 2028:

BEPCII upgrade → BEPCII-U

January 2025, restart

⊗ Luminosity $\times 3$ @ $E_{cm} = 4.7 \text{ GeV}$

⊗ Beam energy up to 2.8 GeV (2028)



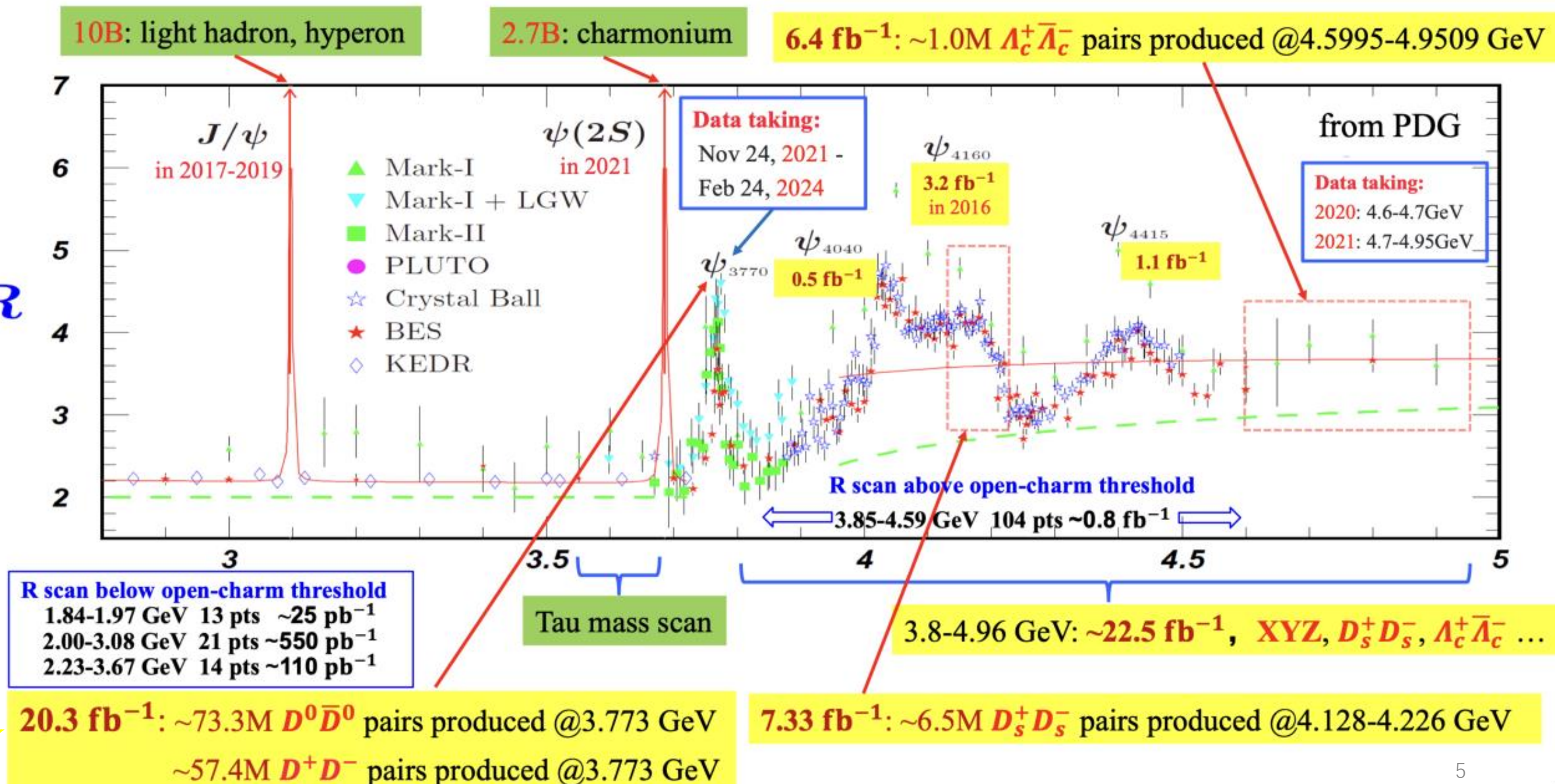
July 1 - December 31, 2024: Replace the inner MDC with
3 layers of cylindrical triple-GEM detectors



BESIII Data Sets

BESIII

R





项目简介

项目名称: 粲强子衰变和标准模型的精确检验

所属类别: 国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”专项

负责人: 李海波 研究员

承担单位: 中国科学院高能物理研究所

合作单位: 南华大学、湖南大学、中山大学、华南师范大学、河南师范大学

执行期限: 5年, 2023.12 - 2028.11

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

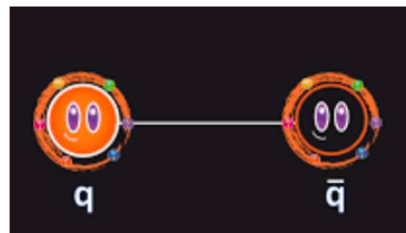


标准模型(SM)是当前描述微观世界最成功的模型,
量子色动力学(QCD)描述强相互作用, 是SM的两个组分之一

QCD的两个重要性质:



渐近自由



色禁闭

- 高能下QCD的渐近自由得到实验精确检验(2004年获诺贝尔奖)
- QCD色禁闭本质有待发展和检验
- 低能下非微扰QCD理论不完善, 理论工具结合实验观测

⇒ 提高低能QCD理论的预言能力!



CKM矩阵元中的**复相位**是标准模型(SM)中**CP破坏**的重要来源,
 CKM矩阵的**么正性**是检验SM和寻找新物理的重要途径。

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

CKM矩阵么正性: $V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = I$

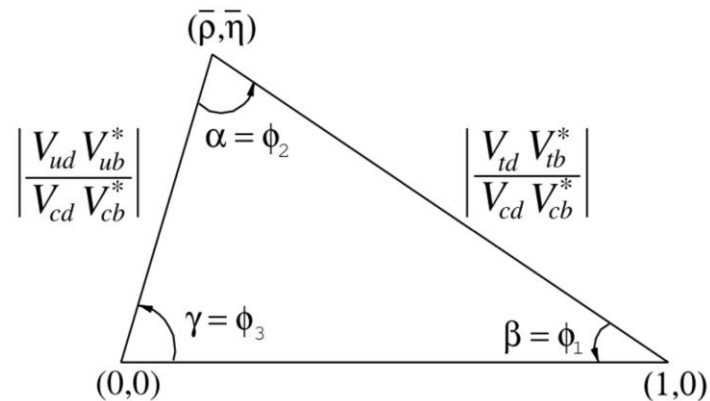


在B介子中: $V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0$



$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ ?$$

复平面上的么正性三角形



实验上**独立测量**三个CP破坏相角(α, β, γ), **检验**三角形的**闭合性**, 是对SM中**电弱统一理论**的强有力检验。

γ 相角的SM计算的理论误差**几乎可忽略不计**, 是**精确检验CP破坏和SM**的重要物理参数。



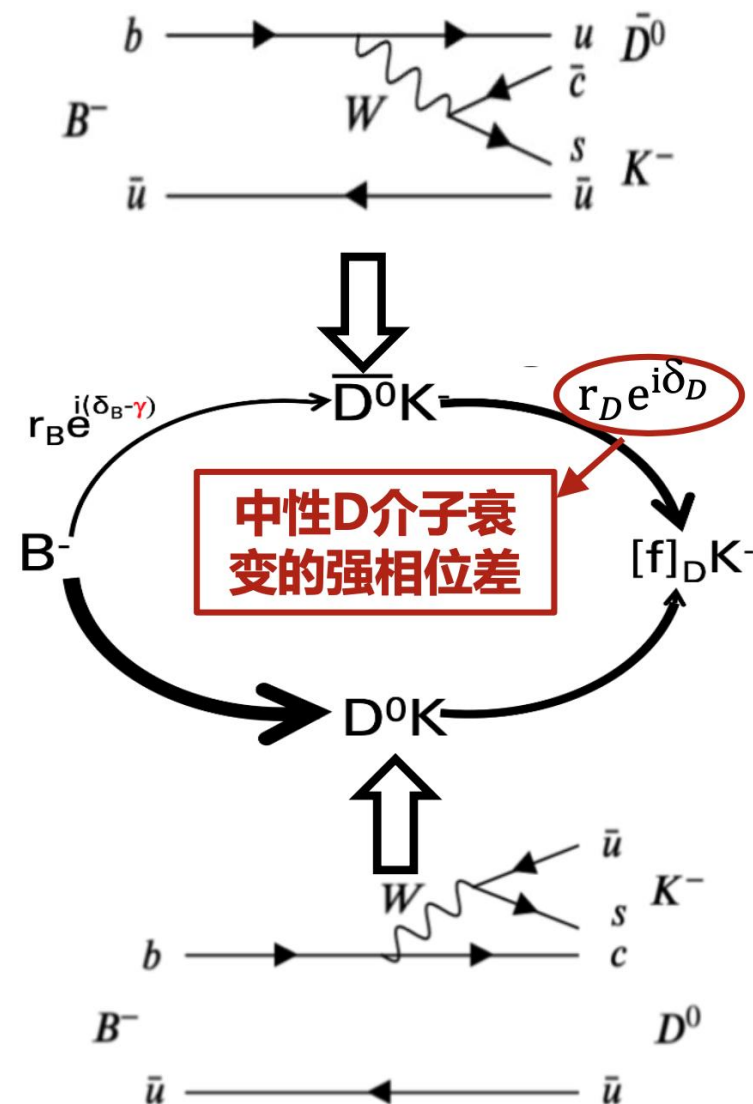
□ γ 相角：通过 $B^\pm \rightarrow Dh^\pm$ 过程测量，是**唯一**可在头阶树图测量的相角。

$$\Gamma(B^\pm \rightarrow Dh^\pm) \propto |\gamma_B e^{i(\delta_{B^\pm} + \gamma)} + \boxed{r_D e^{-i\delta_D}}|^2$$

□ BESIII在3.773 GeV能量点采集的 20 fb^{-1} 积分亮度的 $D^0 \bar{D}^0$ 量子关联样本是**精确测量**强相位差 δ_D 的最佳途径。

$$e^+ e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^0 \bar{D}^0, \quad C(D^0 \bar{D}^0) = -1$$

□ 强相位差 δ_D 在理解 D^0 衰变中的**非微扰QCD效应**，精确测量**混合参数**以及**非直接CP**等研究中具有**独特地位**。





□ 研究粲夸克与末态轻夸克之间的强、弱作用的场所

- 揭示粲介子衰变动力学机制、检验SU(2)同位旋对称性和SU(3)味对称性
- 检验并刻度理论计算非微扰效应的参数化方法和唯象模型
- 为理论计算 D 衰变 CP 破坏和中性 D 介子混合提供实验输入

□ 重味物理研究的基础

- 标定其他粲强子衰变的分支比测量
- 为 B 物理研究提供关键输入

□ 研究轻强子谱，发展和完善基于夸克模型的理论

- 理解 $a_0(980)$ 、 $f_0(980)$ 等轻强子的内部结构
- 理解高激发态 K_1 介子的结构与混合机制



□ 任务1：中性粲介子强相位差研究

- 使用分bin或不分bin方法测量强相位差参数；
- 测量平均强相位差和关联因子参数；

指标：完成4项强相位差测量，使中性粲介子衰变过程对CKM相角 γ 测量的误差贡献小于0.5度。

□ 任务2：卡比玻允许/压低的绝对分支比

- 测量相应过程的绝对分支比和CP不对称；

指标：完成14-17项卡比玻允许/压低过程的绝对分支比测量，发表文章3篇以上。

□ 任务3：强子衰变振幅分析

- 测量中间准两体 $D \rightarrow SP$ 、 VP 、 VV 、 AP 、 TP 、 VA 的强度、相位和分支比；
- 利用振幅模型确定CP-even比分的比例，为相应强相位测量提供分区间依据；
- 测量 $D \rightarrow VV$ 的极化状态；

指标：系统开展粲介子多体强子末态振幅分析，发表文章8篇以上。



- PDG收录的 D^0 和 D^+ 的衰变分支比总和分别不足80%和85%
- 一些分支比较大的衰变道至今未被测量、或测量精度不足
- 实验上还未能完整理解粲强子的强子衰变
- 参考道测量精度不足：重味物理研究的主要系统误差来源

参考道分支比测量现状 PDG 2023

$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	$(3.937 \pm 0.030)\%$
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	$(9.38 \pm 0.16)\%$
$D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$	$(5.37 \pm 0.10)\%$
$\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$	$(6.26 \pm 0.29)\%$

分支比总和测量现状

$D^0 \rightarrow \text{anything}$	$< 80\%$
$D^+ \rightarrow \text{anything}$	$< 85\%$
$D_s^+ \rightarrow \text{anything}$	$< 60\%$
$\Lambda_c^+ \rightarrow \text{anything}$	$< 70\%$



- $D \rightarrow K3\pi$ 、 $KK\pi\pi$ 四体衰变振幅分析不足，现有结果差异大
 - $D \rightarrow VV$ 研究不足，导致矢量介子的极化研究缺乏
 - $D \rightarrow AP$ 现有结果冲突，无法理解轴矢量介子的衰变机制
 - 导致理论无法精确预期 D 衰变的 CP 破坏和 D^0 介子的混合
- $D \rightarrow K4\pi$ 五体衰变至今无振幅分析研究
 - $D \rightarrow AV$ 的实验结果极其缺乏
- 振幅分析可以系统理解强子谱



- 理论预期： $\frac{\text{双Cabibbo压低衰变分支比}}{\text{相应Cabibbo允许衰变分支比}} = \tan^4 \theta_c (\sim 0.29\%)$

θ_c 为 CKM Cabibbo 混合角

- BESIII发现 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$ 的比值**比理论预期高三倍**

衰变机制的差异，干涉效应？

PRL125, 141802 (2020)

- 探索更多双Cabibbo压低衰变
- 需要对相关衰变开展振幅分析，研究末态相互作用和内部共振结构，
理解双Cabibbo压低分支比异常的本质

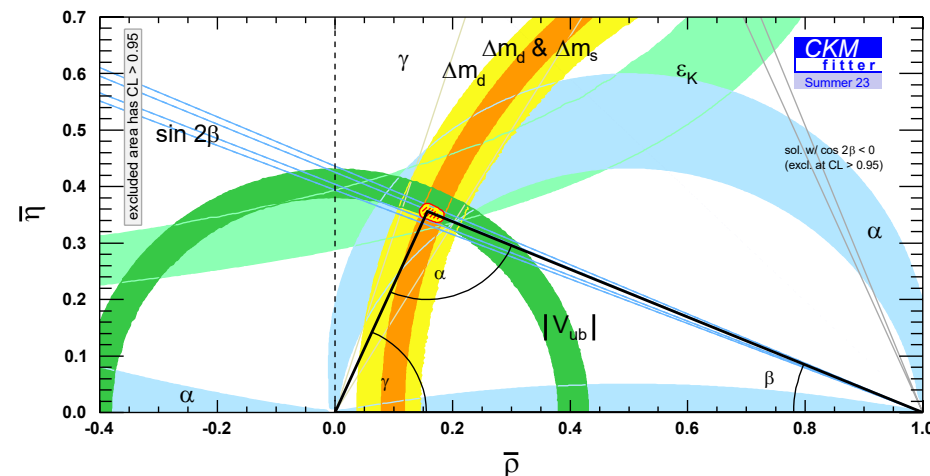


研究现状： γ 相角

实验直接测量： $\gamma = (65.9^{+3.3}_{-3.5})^{\circ}$

CKMFitter全局拟合间接测量： $\gamma = (66.29^{+0.72}_{-1.86})^{\circ}$

直接测量误差远大于全局拟合，精度急需改善。



实验组	(预期) 获取 的积分亮度	年份	$\gamma \equiv \phi_3$ 精度	BESIII强相位差 δ_D 对 γ 相角测量约束
LHCb Run-1 [7, 8 TeV]	3 fb^{-1}	2012	8°	$0.9 - 1.3^{\circ} (2.93 \text{ fb}^{-1})$ $< 0.5^{\circ} (20 \text{ fb}^{-1})$
LHCb Run-2 [7, 8 TeV]	6 fb^{-1}	2018	4°	
Belle II Run	50 ab^{-1}	2025	1.5°	
LHCb upgrade I [14 TeV]	50 fb^{-1}	2030	$< 1^{\circ}$	
LHCb upgrade II [14 TeV]	300 fb^{-1}	(>)2035	$< 0.4^{\circ}$	



衰变道	进展
$D^0 \rightarrow K_{S,L}^0 \pi^+ \pi^-$	7.93 fb⁻¹, 分bin, JHEP 06, 086 (2025), 对γ相角的误差贡献为0.9°; 7.93 fb⁻¹, 不分bin联合测量, BAM-00827, 首次与LHCb联合测量γ相角, 衰变率作傅立叶展开; 20 fb⁻¹, 进行中
$D^0 \rightarrow K_{S,L}^0 K^+ K^-$	7.93 fb⁻¹, 不分bin联合测量, BAM-00827, 首次与LHCb联合测量γ相角, 衰变率作傅立叶展开; 20 fb⁻¹, 进行中
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	20. fb⁻¹, PRD 112, 012015 (2025), 对γ相角的误差贡献为10°
$D^0 \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	20 fb⁻¹, 进行中



衰变道	进展
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	7.93 fb ⁻¹ , PRD 111, 012007 (2025) ,
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	CP-even 本征态比例: $F_+^{\pi^+ \pi^- \pi^0} = 0.746 \pm 0.010 \pm 0.004$; $F_+^{K^+ K^- \pi^0} = 0.631 \pm 0.014 \pm 0.011$.
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	7.13 fb ⁻¹ @4.13 – 4.23 GeV, arXiv:2506.07907[hep-ex] , $\delta(K^- \pi^+) = (192.8_{-12.4}^{+11.0+1.9})^\circ$
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	2.93 fb ⁻¹ , PRD 110, 112008 (2024) , CP-even 本征态比例: $F_+^{4\pi} = 0.746 \pm 0.010 \pm 0.004$; 强相位差测量, 对 γ 相角的误差贡献为1.5° or 2°



详见-14日沈文涵的报告

衰变道	测量量	现状
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$F_+/c_i s_i$	7.93 fb ⁻¹ F_+ finished; 20 fb ⁻¹ $c_i s_i$ on going
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	$F_+/c_i s_i$	7.93 fb ⁻¹ F_+ finished
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	F_+	20 fb ⁻¹ BAM01001
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	$F_+/c_i s_i$	2.93 fb ⁻¹ $F_+, c_i s_i$ finished; 20 fb ⁻¹ $c_i s_i$ on going
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	$F_+/c_i s_i$	2.93 fb ⁻¹ F_+ finished; 20 fb ⁻¹ $c_i s_i$ on going
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$	$c_i s_i$	7.93 fb ⁻¹ finished; 20 fb ⁻¹ on going
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 K^+ K^-$	$c_i s_i$	2.93 fb ⁻¹ finished; 20 fb ⁻¹ on going
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 h^+ h^- (h = \pi, K)$	Fourier coefficients	7.93 fb ⁻¹ BAM00827
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$F_+/c_i s_i$	2.93 fb ⁻¹ F_+ finished; 20 fb ⁻¹ $c_i s_i$ arXiv: 2502. 12873
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	δ_D	2.93 fb ⁻¹ finished; Latest: BAM00900
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	δ_D, R_D	2.93 fb ⁻¹ finished; 7.93 fb ⁻¹ BAM00899
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$		
$D^0 \rightarrow K_S^0 K^\mp \pi^\pm$	δ_D, R_D	20 fb ⁻¹ on going

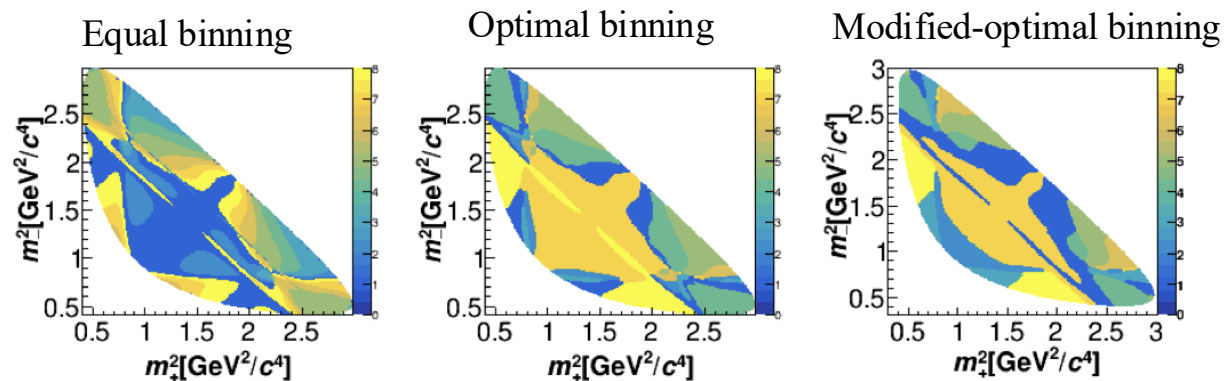


研究进展：任务1- $D \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 强相位差测量

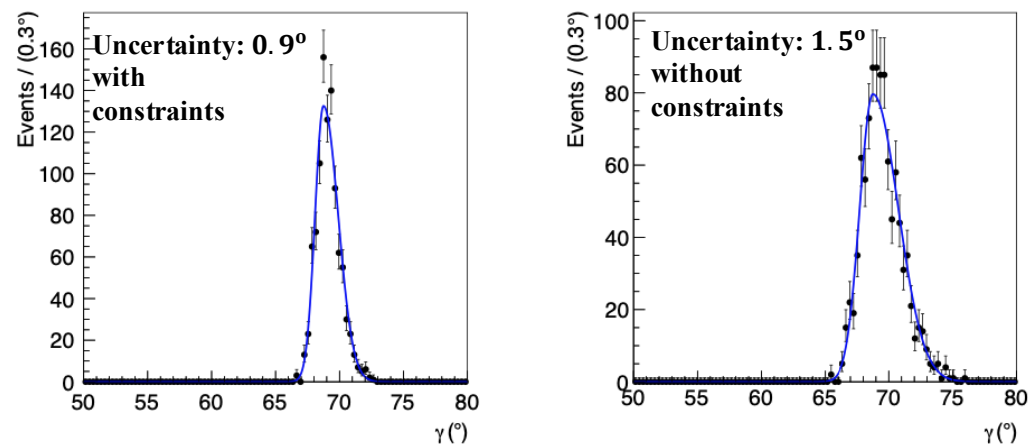
BESIII

- $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$ with 7.93 fb^{-1} @ 3.773 GeV
- Input for direct measurements of γ

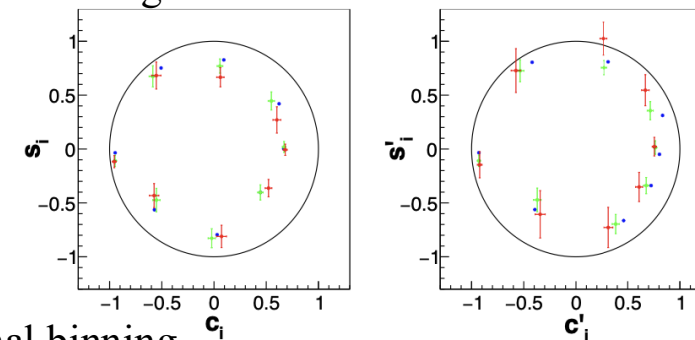
JHEP 06, 086 (2025)



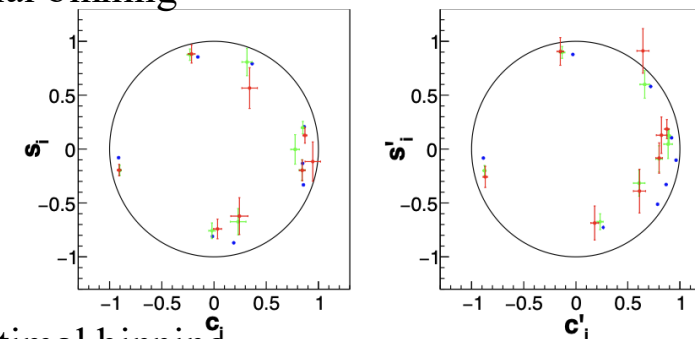
- Impact on γ measurement



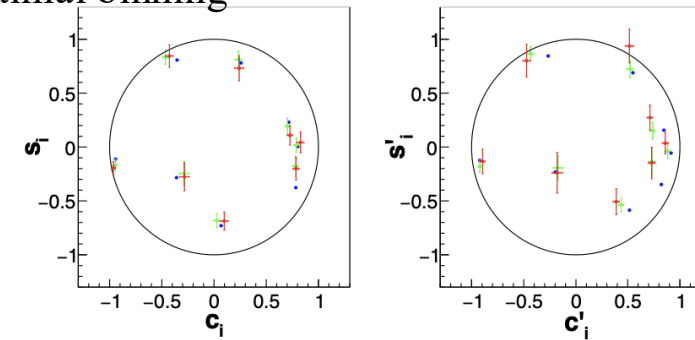
Equal binning



Optimal binning



Modified-optimal binning





类别	衰变过程	进展
D^0 介子的卡比玻允许	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1717, charm group 审核
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0 \pi^0$	• 进行中
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1669, charm group 审核
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , 进行中
自共轭卡比玻允许	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , BAM-01025
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	• 2.93 fb ⁻¹ , BAM-00735
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0 \pi^0$	• 16 fb ⁻¹ , DocDB-1414, charm group 审核



研究进展：任务2-卡比玻允许/压低的绝对分支比

BESIII

类别	具体衰变过程	进展
D^+ 介子 卡比玻 允许/压 低	$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1717, charm group 审核
	$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	
	$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^0$	
	$D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$	
	$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	
	$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$	• 7.93 fb ⁻¹ , 进行中
	$D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	
	$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \eta$	• 2.93 fb ⁻¹ , PRL132, 131903 (2024)



类别	衰变过程	进展
双卡比玻压低	$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0$	20.3 fb⁻¹, arXiv:2506.15533[hep-ex] $B(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = (1.45 \pm 0.06 \pm 0.06) \times 10^{-4}$ $B(D^+ \rightarrow K^+ \eta) = (1.17 \pm 0.10 \pm 0.03) \times 10^{-4}$ $B(D^+ \rightarrow K^+ \eta') = (1.88 \pm 0.15 \pm 0.06) \times 10^{-4}$
	$D^+ \rightarrow K^+ \eta$	
	$D^+ \rightarrow K^+ \eta'$	
	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	20.3 fb⁻¹, JHEP 06, 220 (2025)
	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$	
	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	
	$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$	
	$D^+ \rightarrow K^+ K^+ K^-$	



- 20.3 fb⁻¹, JHEP 06, 220 (2025), DCS

Signal decay	$\mathcal{B}_{\text{DCS}}^{\text{This work}} (\times 10^{-4})$	$\mathcal{B}_{\text{DCS}}^{\text{PDG}} (\times 10^{-4})$	$\mathcal{B}_{\text{CF}}^{\text{PDG}} (\times 10^{-2})$	$\mathcal{B}_{\text{DCS}}^{\text{This work}} / \mathcal{B}_{\text{CF}} (\%)$	$\times \tan^4 \theta_C$
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	$1.30 \pm 0.09 \pm 0.04$	1.50 ± 0.07	3.947 ± 0.030	0.328 ± 0.027	1.14 ± 0.09
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^+$	$2.38 \pm 0.19 \pm 0.12$	2.65 ± 0.06	8.22 ± 0.14	0.289 ± 0.028	1.00 ± 0.10
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$	$3.06 \pm 0.21 \pm 0.10$	3.06 ± 0.16	14.4 ± 0.6	0.212 ± 0.021	0.74 ± 0.07
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	$1.40 \pm 0.27 \pm 0.09$	< 3.6	8.86 ± 0.23	0.158 ± 0.036	0.55 ± 0.12
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \eta$	$1.04 \pm 0.16 \pm 0.08$	—	1.88 ± 0.05	0.555 ± 0.092	1.93 ± 0.32
$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \eta$	< 0.7	—	0.449 ± 0.027	< 1.78	< 6.19
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$	$4.50 \pm 0.12 \pm 0.35$	4.91 ± 0.09	9.38 ± 0.16	0.480 ± 0.019	1.67 ± 0.07
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \eta$	$1.56 \pm 0.22 \pm 0.04$	—	—	—	—
$D^+ \rightarrow K^+ (\pi^+ \pi^- \eta)_{\text{non-}\eta'}$	$0.67 \pm 0.18 \pm 0.02$	—	0.135 ± 0.012	5.0 ± 1.4	17.3 ± 4.8
$D^+ \rightarrow K^+ K^+ K^-$	$0.51 \pm 0.05 \pm 0.01$	0.614 ± 0.011	—	—	—
$D^+ \rightarrow K^+ \eta \eta$	$0.59 \pm 0.23 \pm 0.02$	—	—	—	—

Significantly larger

Expectation: $R = \mathcal{B}(\text{DCS}) / \mathcal{B}(\text{CF}) \sim (0.5 - 2.0) \tan^4 \theta_C$



研究进展：任务3-强子衰变振幅分析

类别	衰变过程	进展
三体 末态	$D^0 \rightarrow K_{S,L}^0 K^+ K^-$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1716, charm group 审核
	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta, D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$	• 7.93 fb ⁻¹ , PRD 110 (2024) L111102
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , BAM-00756, SP阶段
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	• 16 fb ⁻¹ , 进行中
	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1718, charm group 审核
	$D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta'$	• 7.9 fb ⁻¹ , 进行中
	$D^+ \rightarrow \pi^+ \eta \eta$	• 20.3 fb ⁻¹ , arXiv:2505.12086[hep-ex]
	$D^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+$	• 7.93 fb ⁻¹ , PRD 110, 092006 (2024)
	$D^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 K^+$	• 7.93 fb ⁻¹ , BAM-00838
	$D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$	• 20.3 fb ⁻¹ , 进行中
	$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$	• 20.3 fb ⁻¹ , BAM-00947
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$	• 20.3 fb ⁻¹ , DocDB-1669, charm group 审核



类别	衰变过程		进展
四体 末态	$D \rightarrow K3\pi$	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , BAM-01025
		$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0 \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , charm group审核
		$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	• 7.93 fb ⁻¹ , JHEP 05, 195 (2025)
		$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	• 7.93 fb ⁻¹ , BAM-00703
	$D \rightarrow KK\pi\pi$	$D^0 \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^- \pi^0$	• 7.93 fb ⁻¹ , BAM-00844
		$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0 \pi^0$	• 20.3 fb ⁻¹ , BAM-00998, draft 阶段
		$D^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^+ \pi^-$	• 7.93 fb ⁻¹ , 进行中
		$D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^0$	• 7.93 fb ⁻¹ , 进行中
	$D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$		• 7.93 fb ⁻¹ , 进行中



类别	衰变过程		进展
五体 末态	$D \rightarrow K4\pi$	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	20.3 fb^{-1} , BAM-00735
		$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	20.3 fb^{-1} , 进行中
		$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^-$	20.3 fb^{-1} , 进行中

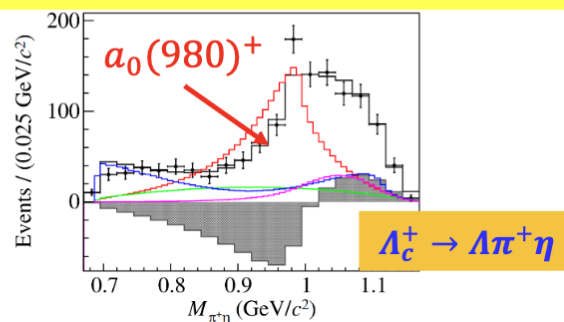


研究进展：任务3-强子衰变振幅分析

粲强子强子衰变的振幅分析，发现末态含 $a_0(980)$ 的一系列新衰变

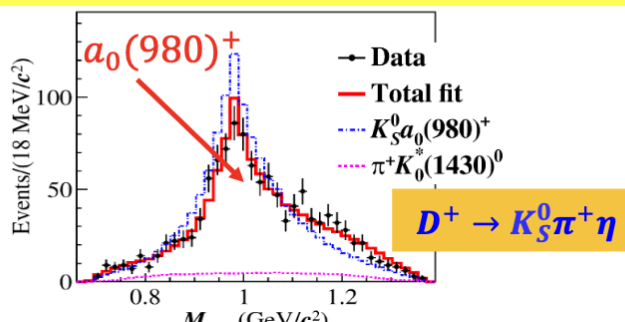
发现 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+$

PRL 134 (2025) 021901, 6.1 fb^{-1} @4.6 – 4.843 GeV



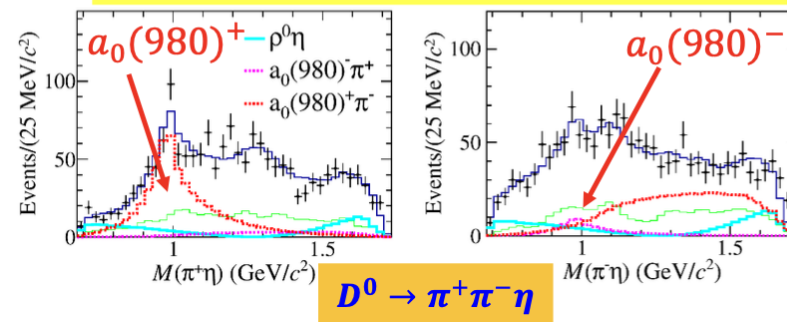
发现 $D^+ \rightarrow K_S^0 a_0(980)^+$

PRL 132 (2024) 131903, 2.93 fb^{-1} @3.773 GeV



发现 $D \rightarrow a_0(980)\pi$

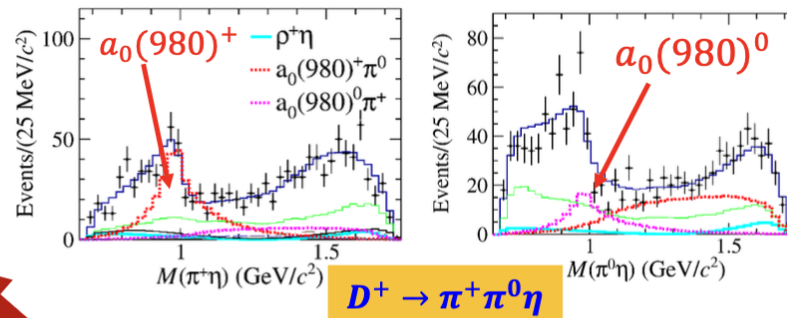
PRD 110 (2024) L111102, 7.9 fb^{-1} @3.773 GeV



$$\begin{aligned} \mathcal{B}(D^+ \rightarrow K_S^0 a_0(980)^+, a_0(980)^+ \rightarrow \pi^+ \eta) &= (1.33 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.04_{\text{syst}})\% \\ \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+, a_0(980)^+ \rightarrow \pi^+ \eta) &= (1.05 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.05_{\text{syst}} \pm 0.07_{\text{ext}})\% \\ \mathcal{B}(D^0 \rightarrow a_0(980)^+ \pi^-) &= (0.55 \pm 0.05 \pm 0.07) \times 10^{-3} \\ \mathcal{B}(D^0 \rightarrow a_0(980)^- \pi^+) &= (0.07 \pm 0.02 \pm 0.01) \times 10^{-3} \\ \mathcal{B}(D^+ \rightarrow a_0(980)^+ \pi^0) &= (0.95 \pm 0.12 \pm 0.05) \times 10^{-3} \\ \mathcal{B}(D^+ \rightarrow a_0(980)^0 \pi^+) &= (0.37 \pm 0.10 \pm 0.04) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

比值为: $7.5_{-0.8}^{+2.5} \pm 1.7$

比值为: $2.6 \pm 0.6 \pm 0.3$



衰变分支比的测量结果比理论预测高1-2数量级

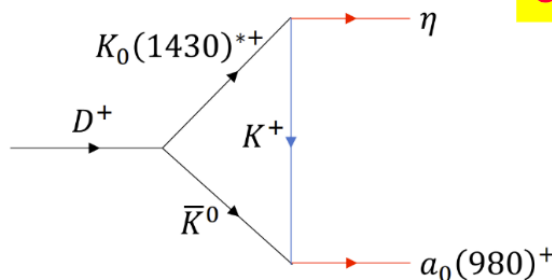
为理解粲强子的强子衰变机制和确定奇特态 $a_0(980)$ 内部结构，提供了重要实验信息。



研究进展：任务3-强子衰变振幅分析

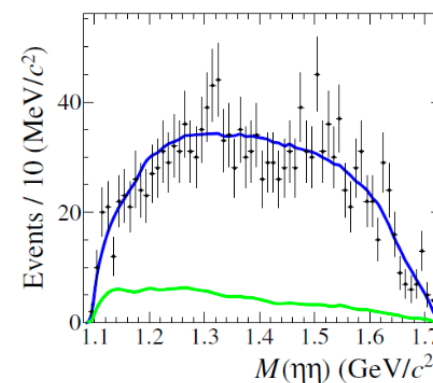
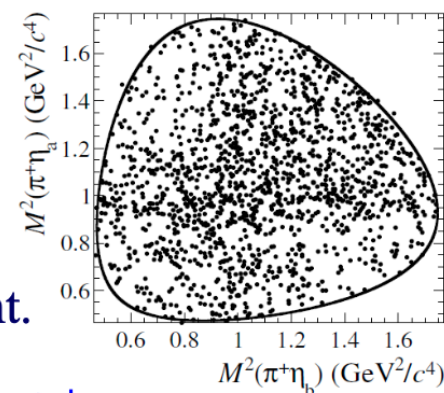
Amplitude analysis of $D^+ \rightarrow \pi^+ \eta \eta$

First observation of an altered $a_0(980)$ line-shape due to triangle loop rescattering



arXiv:2505.12086, 20.3fb⁻¹ @3.773GeV

Fit1: $P_{a_0(980)}$ three-channel coupled Flatte formulae, the fitted pole position is inconsistent with previous measurement.



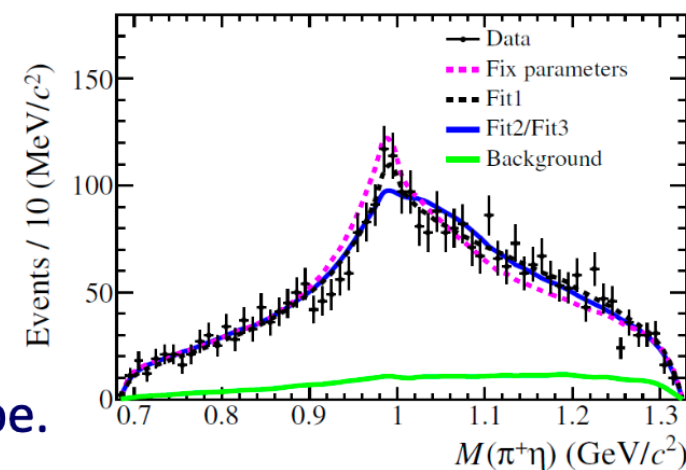
To consider the rescattering process $D^+ \rightarrow \bar{K}_0^*(1430)^0 K^+ \rightarrow a_0(980)^+ \eta$ we perform Fit2 and Fit3

Fit2: $(1 + |C|e^{i\phi_C} A_{\text{loop}}) P_{a_0(980)}$

Fit3: $(1 + |C| A_{\text{loop}}) P_{a_0(980)}$ with ϕ_C fixed to zero.

$$|C| = 0.113 \pm 0.015_{\text{stat.}} \pm 0.048_{\text{syst.}}$$

Fit2 and Fit3 give good descriptions of the altered $a_0(980)$ line-shape.



BF measurement

$$\frac{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \pi^+ \eta \eta)}{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow a_0(980)^+ \eta) \mathcal{B}(a_0(980)^+ \rightarrow \pi^+ \eta)} = (3.67 \pm 0.12_{\text{stat.}} \pm 0.06_{\text{syst.}}) \times 10^{-3}$$



- 综合系统性开展中性粲介子强相位差测量、卡比玻允许/压低衰变过程的绝对分支比测量、以及多体强子末态振幅分析，对于探索非微扰QCD性质、检验电弱统一理论具有重要意义。
- 研究成果将保障未来十年以上国际粒子物理领域 γ 相角、 $D^0\bar{D}^0$ 混合参数和CP破坏等关键参数的精确测量。
- 各项工作基本上都已顺利开展，稳步推进。
- 敬请期待 20 fb^{-1} $\psi(3770)$ 数据的更多成果。

谢谢！



课题任务			时间节点		2023	2024		2025		2026		2027		2028	
					12	1-6	7-12	1-6	7-12	1-6	7-12	1-6	7-12	1-6	7-11
课题一： 粲强子多体强子末态 衰变研究	3.773 GeV 新数据获取与质量检查														
	粲介子强子衰变绝对分支比的测量	D^0 介子卡比玻允许过程													
		D^+ 介子卡比玻允许/压低过程													
	粲介子多体强子衰变的振幅分析研究	振幅分析工具													
		三体衰变													
		四体、五体衰变													
	粲介子双卡比玻压低衰变的振幅分析研究														
	中性粲介子强子衰变强相位差研究														

Unbinned: 与LHCb的联合测量

➤ $B \rightarrow DK$ 的衰变率

$$x_{\pm} + iy_{\pm} = r_B e^{i(\delta_B \pm \gamma)} \quad \text{LHCb input}$$

$$B^-: p_B(z) \propto p_D(z) + (x_-^2 + y_-^2) \bar{p}_D(z) + 2[x_- \mathcal{C}(z) + y_- \mathcal{S}(z)]$$

$$B^+: \bar{p}_B(z) \propto \bar{p}_D(z) + (x_+^2 + y_+^2) p_D(z) + 2[x_+ \mathcal{C}(z) - y_+ \mathcal{S}(z)]$$

BESIII input

BESIII input

$$D^0/\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h^- \text{衰变率}$$

$$(\mathcal{C}, \mathcal{S}) = \sqrt{p_D \bar{p}_D} (\cos, \sin)(\phi)$$

➤ 基于 B 、 D 介子衰变的数据, 通过 $B \rightarrow Dh, D \rightarrow K_S^0 h'^+ h'^- (h^{(\prime)} = \pi, K)$

直接测量 γ

➤ LHCb和BESIII基于新方法的首次联合测量

➤ 所用数据

- BESIII: $7.93 \text{ fb}^{-1} \psi(3770)$ data
- LHCb: 9 fb^{-1} Run1+Run2 data

➤ 对衰变率 p_B, p_D 和强相差 C, S 加权求和得到傅里叶系数 $a_n^{B,D,C,S}$

□ B衰变

- $a_n^{B+} = h_B [a_n^{D+} + (x_-^2 + y_-^2) a_n^{D-} + 2(x_- a_n^C + y_- a_n^S)]$

□ D衰变

- 味标记道

$$a_n^{flav} = h_{flav} [a_n^{D+} + (x_D^2 + y_D^2) a_n^{D-} - 2R_D (x_D a_n^C - y_D a_n^S)] \approx a_n^{D+}$$

- CP标记道

$$a_n^{CP\pm} = h_{CP\pm} [a_n^{D+} + a_n^{D-} \mp a_n^C]$$

- 自共轭道

$$a_{mn}^{DD} = h_{DD} [a_m^{D+} a_n^{D-} + a_m^{D-} a_n^{D+} - 2(a_m^C a_n^C + a_m^S a_n^S)]$$

➤ 展开的最高阶数由toy研究决定，联合拟合中 $K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 和 $K_S^0 K^+ K^-$ 分别取2和1，但提供更高阶(3, 2)的系数结果(见附录)

➤ 基于系数公式拟合得到CP破坏参数 $x_{\pm} = r_B \cos(\delta_B \pm \gamma)$ 和 $y_{\pm} = r_B \sin(\delta_B \pm \gamma)$