

**BESIII粲强子物理重大项目**

**BESIII**

# 阈值处中性粲介子量子关联性研究进展

---

**张宇**

**南华大学**

**负责人：彭海平**

**承担单位：中国科学技术大学**

**合作单位：南华大学**



**兰州大学，2025/08/08**

- 研究意义及动机
- 研究内容及目标
- 研究进展

- 研究意义及动机
- 研究内容及目标
- 研究进展

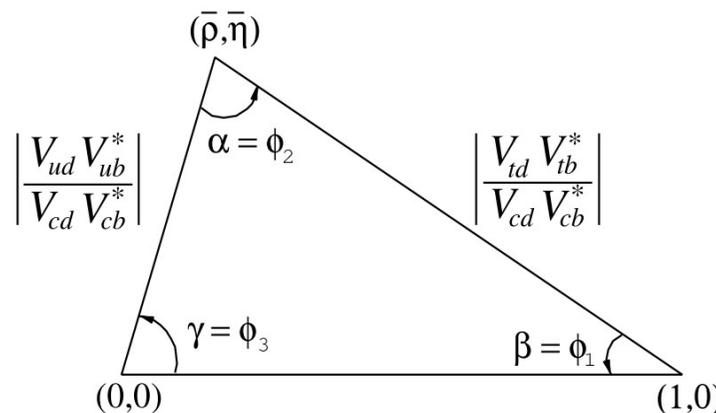
CKM矩阵元中的**复相位**是标准模型中**CP破坏**的重要来源，CKM矩阵的**么正性**是检验**标准模型**以及**寻找新物理**的重要途径

$$V = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\bar{\rho} - i\bar{\eta}) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta}) & -A\lambda^2 & 1 \end{bmatrix} + O(\lambda^4)$$

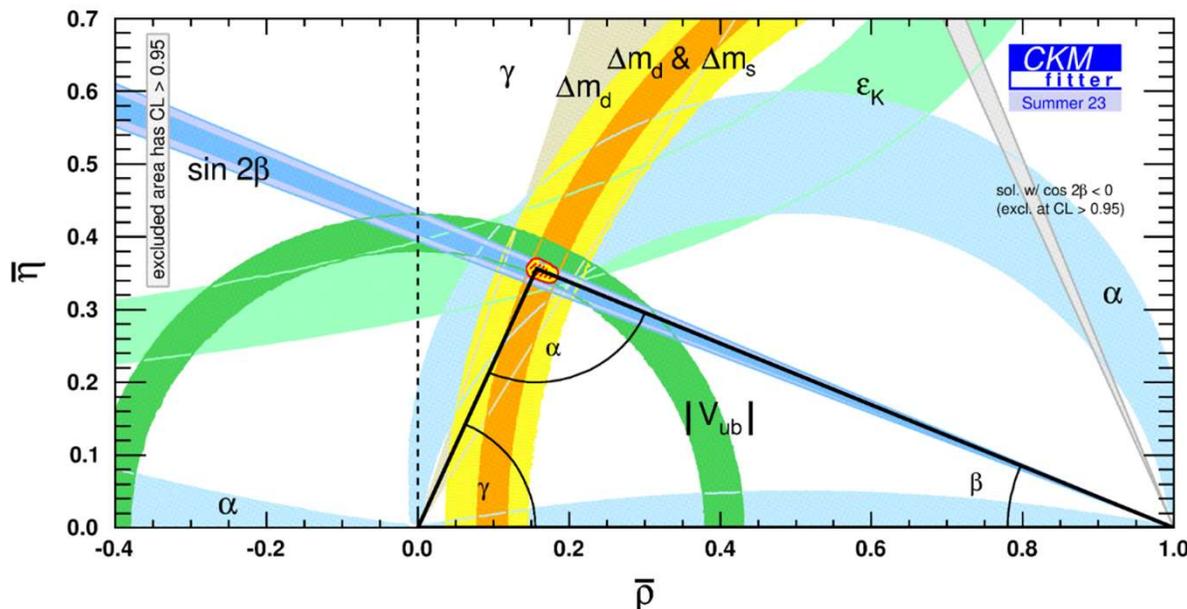
CKM矩阵在复平面上的几何描述:

$$V^\dagger V = \mathbf{1} \Rightarrow V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

B介子衰变CKM矩阵CP相角  $\alpha, \beta, \gamma$



实验上**独立测量**三个CP相角，**检验**三角形的**闭合性**，  
是对**电弱统一理论**的强有力检验



相角的**直接测量**结果:

$$\alpha = (86.2^{+3.9}_{-3.5})^\circ$$

$$\beta = (22.52^{+0.45}_{-0.44})^\circ$$

$$\gamma = (65.9^{+3.3}_{-3.5})^\circ$$

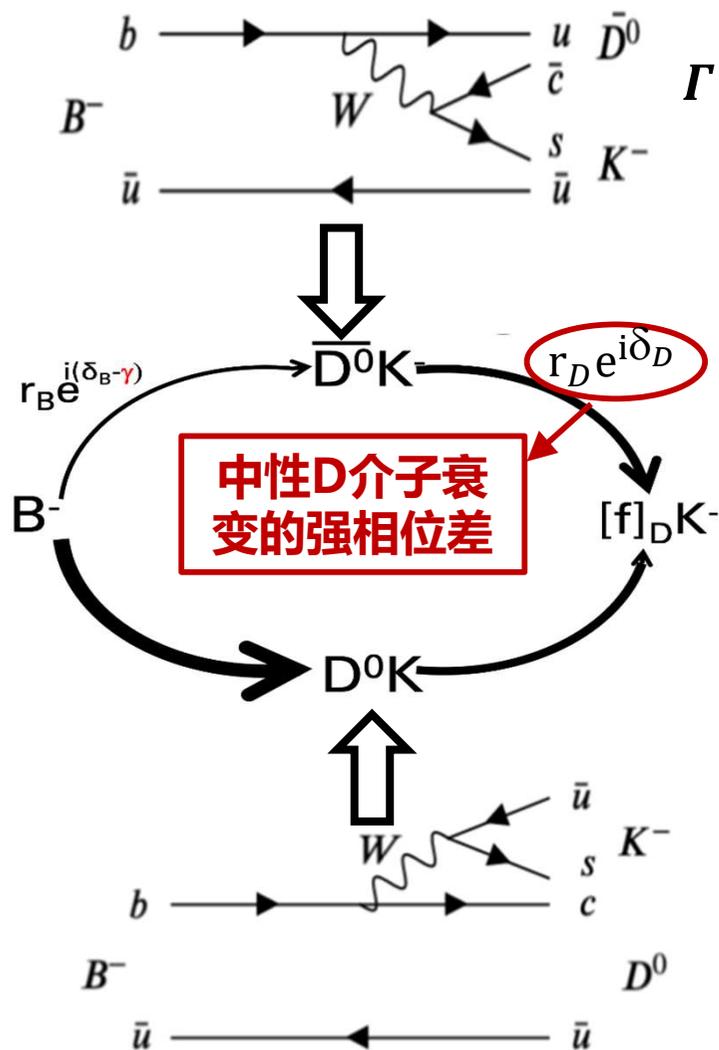
- 实验对 $\gamma$ 角开展大量**直接**测量:  $\gamma = (65.9^{+3.3}_{-3.5})^\circ$
- CKMFitter全局拟合**间接**测量:  $\gamma = (66.29^{+0.72}_{-1.86})^\circ$



**直接测量与间接测量相符，但误差仍需要改善**

**相角 $\gamma$ 的精度挑战**CKM么正性的检验，是粒子物理**研究重点之一**

**相角 $\gamma$ 可以通过 $B \rightarrow DK$ 过程测量，是唯一可在树阶测量的相角**



$$\Gamma(B^- \rightarrow [f]_D K^-) \propto 1 + r_B^2 r_D^2 + 2R_f r_D r_B \cos(\delta_B - \gamma - \delta_D)$$

$D^0 \rightarrow f$  和  $\bar{D}^0 \rightarrow f$  衰变参数

$$(r_D^f)^2 = \int |\bar{A}_f|^2 d\Phi / \int |A_f|^2 d\Phi,$$

$$R_f e^{-i\delta_D^f} = \frac{\int A_f^* \bar{A}_f d\Phi}{\sqrt{\int |A_f|^2 d\Phi \int |\bar{A}_f|^2 d\Phi}}$$

## 不同方法测量 $\gamma$ 相角

- GLW方法:  $D \rightarrow CP$ 本征态  $\leftarrow F_+$
- ADS方法:  $D \rightarrow CF/DCS$ 态  $\leftarrow R_f, \delta_D^f$
- GGSZ方法:  $D \rightarrow$  自共轭多体衰变  $\leftarrow c_i, s_i$

**该测量由理论引起的误差可忽略，而中性粲介子衰变的强相位差参数是关键输入**

# 强相位差对相角 $\gamma$ 重要性

## LHCb实验测量相角 $\gamma$

□ CLEO-c实验测量结果  $\sigma(c_i/s_i) \sim 4^\circ$

2011 -2016:

$$\gamma = (80_{-9}^{+10})^\circ$$

$\sigma(\text{stat}) \sim 9^\circ$

$\sigma(\text{CLEO}) \sim 4^\circ, \sigma(\text{syst}) \sim 3^\circ$



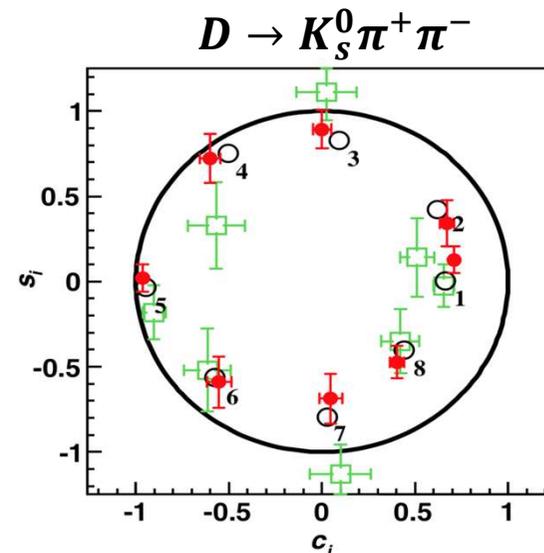
□ BESIII实验测量结果  $\sigma(c_i/s_i) \sim 1^\circ$

2011 -2018:

$$\gamma = (69 \pm 5)^\circ$$

$\sigma(\text{stat}) \sim 5^\circ$

$\sigma(\text{BESIII+CLEO}) \sim 1^\circ, \sigma(\text{syst}) \sim 1^\circ$



**BESIII 强相位差**  
PRL 124, 241802(2020)

□ LHCb和Belle II 继续获取更多的数据, 需要更精确的 $c_i/s_i$

Runs	Collected / Expected luminosity	Year attained	$\gamma/\phi_3$ sensitivity
LHCb Run-1 [7, 8 TeV]	3 fb <sup>-1</sup>	2012	8°
LHCb Run-2 [13 TeV]	5 fb <sup>-1</sup>	2018	4°
Belle-II Run	50 ab <sup>-1</sup>	2025	1.5°
LHCb phase-1 upgrade [14 TeV]	50 fb <sup>-1</sup>	2030	<1°
LHCb phase-2 upgrade [14 TeV]	300 fb <sup>-1</sup>	(>)2035	<0.4°

arXiv:1910.11775

Physics Briefing Book : Input  
for the European Strategy for  
Particle Physics Update 2020

$\sigma(c_i/s_i) < 0.5^\circ?$



LHCb-PUB-2016-025  
October 11, 2016

## LHCb和BESIII实验 经过多次研讨

### Synergy of BESIII and LHCb physics programmes

□ BESIII目前的结果对 $\gamma$ 相角的误差贡献为 $1^\circ$

#### Abstract

There is potential for BESIII open-charm measurements to have a significant impact on the LHCb physics programme. Despite the general purpose design of the LHCb detector there are certain inputs that can be better determined in other environments or in production mechanisms not accessible at the LHC. With the unprecedented amount of LHCb data that will become available over the one-to-two decades it is necessary to consider where additional inputs are essential, to avoid the situation where the uncertainty on a measurement is dominated by the lack of knowledge of an external input. This document considers the capabilities of the BESIII experiment to provide vital inputs into key LHCb measurements. A number of different potential measurements that could be pursued are discussed.

#### 1 Executive summary

There are at least two vital sets of inputs to the LHCb physics programmes that are most easily accessed using the open-charm data accumulated at BESIII. The first is composed of strong-phase related measurements of neutral  $D$  mesons, whose knowledge is vital for a high precision measurement of the CKM angle  $\gamma$ . The use of existing CLEO-c measurements has allowed LHCb to include a wide range of  $D$  modes in its determination of the CKM angle  $\gamma$  using  $B \rightarrow DK$  decays, which together have made possible the currently achieved precision on this fundamental parameter of  $8^\circ$  [1]. These CLEO-c measurements themselves contribute an uncertainty of approximately  $2^\circ$  which, while small compared to the current statistical uncertainties, will soon become dominant as the LHCb rate of data collection increases.

The  $\Psi(3770)$  data already accumulated by the BESIII experiment are sufficient to bring the contribution from strong-phase uncertainties to approximately  $1^\circ$ . The goal of the LHCb phase-1 upgrade, due to start collecting data in 2021, is to measure  $\gamma$  with a precision of  $1^\circ$ , which will approximately match the uncertainty on this parameter from indirect constraints from other measurements. Therefore it would be most desirable to have strong-phase measurements from an even larger dataset so that the uncertainty from external inputs does not become dominant. For this reason the existing plan to take another  $15\text{-}20\text{ fb}^{-1}$  at this resonance would be very important and is highly encouraged. With this amount of data, the strong-phase contribution to the uncertainty on  $\gamma$  will remain sub-dominant throughout the physics programme of the approved LHCb phase-1 upgrade. Plans are also being formulated for a second, phase-2 upgrade, which would accumulate a much larger data set. In this case the input from a  $15\text{-}20\text{ fb}^{-1}$   $\Psi(3770)$  sample would be essential.

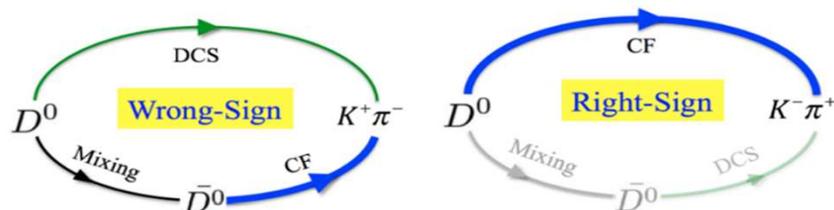
□ LHCb实验在Phase-I升级后,对 $\gamma$ 相角测量的目标精度为 $1^\circ$

□ 强烈需要BESIII实验基于 $20\text{fb}^{-1}$ 数据的强相位差的结果

# 强相角差在其他关键测量中

## □ $D^0 - \bar{D}^0$ 混合和CP破坏

$$\frac{d\Gamma(D^0(t) \rightarrow f)}{d\Phi_f} \propto |A_f|^2 e^{-\Gamma t} \left[ \frac{1 + |\lambda_f|^2}{2} \cosh(y\Gamma t) + \frac{1 - |\lambda_f|^2}{2} \cos(x\Gamma t) - \text{Re}(\lambda_f) \sinh(y\Gamma t) + \text{Im}(\lambda_f) \sin(x\Gamma t) \right]$$



**中性粲介子的强相位差**

## □ $B^0 \rightarrow D^{(*)0} \pi^0$ 衰变时间依赖的CP破坏以及企鹅图无关的 $\beta$ 测量

$$\Gamma(B^0(t) \rightarrow f) \propto e^{-\frac{t}{\tau_B}} \left[ 1 + \frac{1 - |\lambda_f|^2}{1 + |\lambda_f|^2} \cos(\Delta m_B t) - \frac{2\text{Im}(\lambda_f)}{1 + |\lambda_f|^2} \sin(\Delta m_B t) \right]$$
$$\text{Im}(\lambda_f) = \left| \frac{A(\bar{B}^0 \rightarrow f)}{A(B^0 \rightarrow f)} \right| \sin(\delta_f - 2\beta) \quad \delta_f = \arg(\eta_{CP}^{h^0} (-1)^L) + \delta_{fD}$$

该测量结果可与受企鹅图污染的“黄金过程”  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  测量的 $\beta$ 结果直接比较，备受关注

**中性粲介子的强相位差，是基本观测量，与粲介子内部强相互作用紧密相关，对刻度和理解非微扰QCD具有特殊地位**

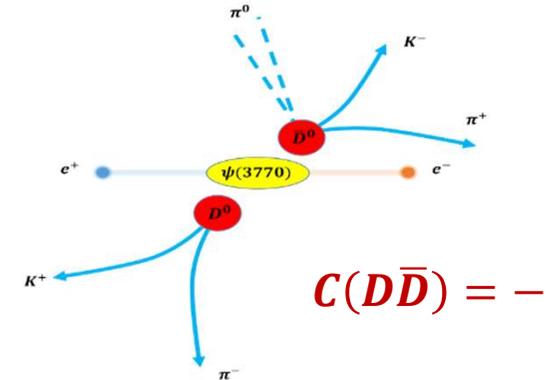
$\psi(3770)$  独特的量子关联数据是测量强相位差的**最佳途径**

□  $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}$  衰变振幅:

$$|\psi(3770)\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|D^0\rangle|\bar{D}^0\rangle - |\bar{D}^0\rangle|D^0\rangle)$$

□  $\psi(3770) \rightarrow D\bar{D} \rightarrow fg$  含时间衰变振幅:

$$A(f, t_1; g, t_2) = \frac{(\langle f|H|D^0(t_1)\rangle\langle g|H|\bar{D}^0(t_2)\rangle - \langle f|H|\bar{D}^0(t_1)\rangle\langle g|H|D^0(t_2)\rangle)}{\sqrt{2}}$$



□ 不同相空间区间衰变宽度:

$$\Gamma(f|g) \propto \left(1 + \frac{y^2 - x^2}{2}\right) \left[ (r_D^f)^2 + (r_D^g)^2 - 2r_D^f r_D^g R_f R_g \cos(\delta_D^f - \delta_D^g) \right] + \frac{y^2 + x^2}{2} \left[ 1 + (r_D^f r_D^g)^2 - 2r_D^f r_D^g R_f R_g \cos(\delta_D^f + \delta_D^g) \right]$$

$\propto$  观测事例数
相干系数 强相位差

强相位差  $c_i/s_i$  在干涉项  $\rightarrow$  测量不同相空间区域的产额便可提取  $c_i/s_i$

实际测量巧妙地利用**特殊标记道**来**简化测量**，**控制系统误差**：

□ 通过**粲味标记道**直接测量 $D^0$ 衰变区间分宽度 $K_i$ ，为测量 $c_i/s_i$ 奠定基础

□ 通过**CP标记道**测量 $c_i$ ：

$$N(f_i, g)/N_{ST}(g) \propto \left( K_i^f + K_{-i}^f - 2\sqrt{K_i^f K_{-i}^f} c_i^f (2F_+^g - 1) \right)$$

□ 通过**自共轭道**(已测的 $K_S \pi^+ \pi^-$ ,  $K_L \pi^+ \pi^-$ 等)测量 $c_i/s_i$

$$N(f_i, g_j) \propto \left( K_i^f K_{-j}^g + K_{-i}^f K_j^g \mp 2\sqrt{K_i^f K_{-j}^g K_{-i}^f K_j^g} (c_i^f c_j^g + s_i^f s_j^g) \right)$$

类型	标记道
粲味标记道	$K^\pm \pi^\mp, K^\pm \pi^\mp \pi^0, K^\pm \pi^\mp \pi^\pm \pi^\mp, K^\pm e^\mp \nu$
偶 CP 标记道	$K^+ K^-, \pi^+ \pi^-, K_S^0 \pi^0 \pi^0, K_L^0 \pi^0, K_L^0 \omega, \pi^+ \pi^- \pi^0$
奇 CP 标记道	$K_S^0 \pi^0, K_S^0 \eta(\gamma\gamma, \pi^+ \pi^- \pi^0), K_S^0 \eta'(\rho\gamma, \pi^+ \pi^- \eta(\gamma\gamma)), K_S^0 \omega, K_L^0 \pi^0 \pi^0$
自共轭道	$K_S^0 \pi^+ \pi^-, K_L^0 \pi^+ \pi^-$

- 研究意义及动机
- 研究内容及目标**
- 研究进展

## □ 多体自共轭过程的**CP本征态成分比例**的系统研究

类别	衰变道	研究内容
三体	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	奇偶CP标记, Dalitz分析 确定偶CP比例及中间共振态
	$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	
四体	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	四体末态全空间一致性研究 奇异CP标记, 确定偶CP比例
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	
首次测量	$D^0 \rightarrow K_S^0 \eta \pi^0$ (CP even)	寻找信号并确定产额, Dalitz分析中间共振态, 确定偶CP比例
	$D^0 \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$	
	$D^0 \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$	
	.....	

□ **精确**测量多体自共轭过程**CP本征态成分比例**

□ 为利用GLW方法测量相角 $\gamma$ 和测量 $D^0 \bar{D}^0$  CP破坏提供输入

## □ 自共轭过程**强相位差参数**的精确测量

类别	衰变道	研究方法
三体	$D \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$	相空间分区优化研究及衰变率傅里叶级数展开研究
	$D \rightarrow K_{S/L}^0 K^+ K^-$	
四体	$D \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	利用振幅分析结果，优化五维相空间分区
	$D \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	
	$D \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	
首次测量	$D \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	理论和实验上分别确定强相位差参数的具体形式
	$D \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	

□ 按照相角 $\gamma$ 精确测量要求**优先级**，精确测量**强相位差参数** $c_i/s_i$

□ 深入理解相关**相空间分区**等因素，探索**新的测量方法**

□ 为利用BPGGSZ方法精确测量相角 $\gamma$ **提供关键输入**

## □ 关联因子和平均强相位差参数的精确测量

类别	衰变道	研究方法
卡比玻允许/ 双卡比玻压低	$D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	测量相关的关联因子和 平均强相位差参数 $R_D$ 、 $r_D$ 和 $\delta_D$
	$D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	
	$D \rightarrow K^- \pi^+$	
单卡比玻压低	$D \rightarrow K_S^0 K \pi$	

□ 研究卡比玻允许/双卡比玻压低和单卡比玻压低的衰变末态性质

□ 精确测量相关的关联因子和平均强相位差参数 $R_D$ 、 $r_D$ 和 $\delta_D$ ，为ADS方法精确测量相角 $\gamma$ 提供输入

开展中性粲介子**量子关联效应**研究，以**国际最高精度**测量**偶CP成分比例、关联因子及强相差**等**关键参数**，**满足未来十年以上B物理实验精确测量相角 $\gamma$ 的输入参数需求**

- 全面系统地**精密测量**自共轭过程的CP本征态**偶CP成分比例**，**提高CP本征态标记道产额**
- **精密测量**自共轭过程强相位差参数 $c_i/s_i$ ，使其对 $\gamma$ 相角测量的误差贡献控制在**0.5°** (最好)的水平
- 实现对ADS和BPGGSZ两种方法测量相角 $\gamma$ 所采用的D介子衰变过程**CP本征态成分比例**的全面测量，**高精度地测量关联因子和平均强相位差等参数**

- 研究意义及动机
- 研究内容及目标
- 研究进展**

## □ 多体自共轭过程的CP本征态成分比例的系统研究

衰变道	进展
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	F <sub>+</sub> : <a href="#">PRD 111, 012007 (2025)</a> 8fb <sup>-1</sup>
$K^+ K^- \pi^0$	
$\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	F <sub>+</sub> : <a href="#">PRD 106, 092004 (2022)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	F <sub>+</sub> : <a href="#">PRD 108, 032003 (2023)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	F <sub>+</sub> : <a href="#">PRD 107, 032009 (2023)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$\pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	振幅分析: <a href="#">CPC 48, 083001 (2024)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$K_S^0 \eta \pi^0$	振幅分析: BAM-00802 (SP approval) 20fb <sup>-1</sup>
$\eta \pi^+ \pi^-$	振幅分析: <a href="#">PRD 110, L111102 (2024)</a> 8fb <sup>-1</sup> F <sub>+</sub> : BAM-01001 20fb <sup>-1</sup>
$\eta' \pi^+ \pi^-$	振幅分析: 进行中 20fb <sup>-1</sup> F <sub>+</sub> : 进行中 20fb <sup>-1</sup>

## □ 自共轭过程强相位差参数 $c_i/s_i$ 的精确测量

衰变道	进展
$K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$	$c_i/s_i$ : <a href="#">PRL 124, 241802 (2020)</a> 3fb <sup>-1</sup> $c_i/s_i$ : <a href="#">JHEP 06, 086 (2025)</a> 8fb <sup>-1</sup> <b>首次与 LHCb联合测量<math>\gamma</math>角</b> 不分bin测量1: BAM-00827 8fb <sup>-1</sup> $c_i/s_i$ , 不分bin测量2: 进行中 20fb <sup>-1</sup>
$K_{S/L}^0 K^+ K^-$	$c_i/s_i$ : <a href="#">PRD 102, 052008 (2020)</a> 3fb <sup>-1</sup> 不分bin测量1: BAM-00827 8fb <sup>-1</sup> $c_i/s_i$ : 进行中 20fb <sup>-1</sup>
$\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	$c_i/s_i$ : <a href="#">PRD 110, 112008 (2024)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	进行中 20fb <sup>-1</sup>
$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$c_i/s_i$ : <a href="#">PRD 112, 012015 (2025)</a> 20fb <sup>-1</sup>
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	进行中 20fb <sup>-1</sup>
$K^+ K^- \pi^0$	进行中 20fb <sup>-1</sup>

## □ 关联因子和平均强相位差参数的精确测量

衰变道	进展
$K^- \pi^+$	$r, \delta$ : <a href="#">EPJC 82, 1009 (2022)</a> 3fb <sup>-1</sup> 进行中 20fb <sup>-1</sup>
$K^- \pi^+ \pi^0$	$r, R, \delta$ : <a href="#">JHEP 05, 164 (2021)</a> 3fb <sup>-1</sup>
$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	BAM-00899 (CWR) 8fb <sup>-1</sup> 进行中 20fb <sup>-1</sup>
$K_S^0 K^{\mp} \pi^{\pm}$	振幅分析/强相位差 进行中 20fb <sup>-1</sup>

详细结果见6号报告：**BESIII上中性粲介子量子关联进展 (闫文昊)**

2022年1月—2022年12月：基于现有 $2.93 \text{ fb}^{-1}$ 的 $3.773 \text{ GeV}$ 数据，开展多体自共轭过程 $D \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 、 $D \rightarrow K^+K^-\pi^0$ 、 $D \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 、 $D \rightarrow K_S^0\pi^+\pi^-\pi^0$ 和 $D \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^-$ 等过程偶CP成分及中间共振态的研究，测量其比例；探索改进 $D \rightarrow K^\pm\pi^\mp$ 过程的测量方案，增加CP标记道、增加 $K_S^0\pi^+\pi^-$ 标记等；开展新采集实验数据的数据质量监测，并积极参与软件组的模拟工作，进一步完善蒙特卡罗模拟以减少数据与模拟之间的差异。理论团队完成对 $D \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 和 $D \rightarrow K^+K^-\pi^0$ 等过程强相位差测量相关的推导。

Finished 3/8/20  $\text{fb}^{-1}$

2023年1月—2023年12月：完成上一年度关于部分多体自共轭过程偶CP成分及中间共振态的研究工作，并撰写文章及发表，在国内和国际学术会议上报告相应的成果。完成改进的 $D \rightarrow K^\pm\pi^\mp$ 过程的测量并完成发表，在国际会议上报告改进的结果。对全部数据样本进行数据质量检查。在之前研究的基础上，利用全部数据样本开展 $D \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ 、 $D \rightarrow K_S^0\eta\pi^0$ 、 $D \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ 和 $D \rightarrow \eta'\pi^+\pi^-$ 等过程的偶CP成分测量。

Draft 8  $\text{fb}^{-1}$

2024年1月—2024年12月：完成上一年度的工作并撰写文章和发表。开展 $D \rightarrow K_{S/L}^0\pi^+\pi^-$ 和 $D \rightarrow K_{S/L}^0K^+K^-$ 的研究工作，采用新的振幅展开技术优化测量方案提升测量精度，提取强相差参数 $c_i^{(\prime)}$ 和 $s_i^{(\prime)}$ 。开展 $D \rightarrow K^-\pi^+\pi^0$ 和 $D \rightarrow K^-\pi^+\pi^+\pi^-$ 过程量子关联和非关联的研究，完成观测量的提取等。在国内和国际会议上报道相关的实验进展及结果。

Amplitude analysis

2025年1月—2025年12月：完成上一年度开展的大部分工作并撰写文章和发表。继续深入研究 $D \rightarrow K_{S/L}^0\pi^+\pi^-$ 和 $D \rightarrow K_{S/L}^0K^+K^-$ 并力争将其对 $\gamma/\phi_3$ 的误差贡献做到 $0.4^\circ$ 以内。开展 $D \rightarrow K_S^0K^\mp\pi^\pm$ 的研究工作。更新对 $D \rightarrow K^\pm\pi^\mp$ 过程的测量，获得精度最高的 $r_D$ 和 $\delta_D$ 。探索开展新的强子衰变末态强相位差的测量方案，继续拓展关联因子和平均强相位差参数相关的测量。

Update with 8/20  $\text{fb}^{-1}$   
(on going)

	Decay	Parameters	2.93 fb <sup>-1</sup> $\psi(3770)$	Prospects
Self-conjugate	$K_{S,L}^0 \pi^+ \pi^-$	$c_i, s_i$	PRL 124 (2020) 241802 PRD 101 (2020) 112002	8 fb <sup>-1</sup> JHEP 06 (2025) 086 20 fb <sup>-1</sup> ongoing
	$K_{S,L}^0 K^+ K^-$	$c_i, s_i$	PRD 102 (2020) 052008	20 fb <sup>-1</sup> ongoing
	$\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 106 (2022) 092004 PRD 110 (2024) 112008	20 fb <sup>-1</sup> ongoing
	$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 107 (2023) 032009	20 fb <sup>-1</sup> PRD 112 (2025) 012015
	$K_{S,L}^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 108 (2023) 032003	$c_i, s_i$ : ongoing
“Flavour”	$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$\delta_D, R_D$	JHEP 05 (2021) 164	8 and 20 fb <sup>-1</sup> ongoing $D^* \bar{D}^{(*)}$ ongoing
	$K^- \pi^+ \pi^0$	$\delta_D, R_D$	JHEP 05 (2021) 164	8 and 20 fb <sup>-1</sup> ongoing $D^* \bar{D}^{(*)}$ ongoing
	$K^- \pi^+$	$\delta_D$	EPJC 82 (2022) 1009	20 fb <sup>-1</sup> ongoing $D^* \bar{D}^{(*)}$ : 2506.07906
	$K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$\delta_D, R_D$	—	20 fb <sup>-1</sup> ongoing
Quasi CP	$\pi^+ \pi^- \pi^0$ , $K^+ K^- \pi^0$	$F^+ / c_i, s_i$	—	8 fb <sup>-1</sup> PRD 111 (2025) 012007 20 fb <sup>-1</sup> ongoing

- 全面开展LHCb实验需求过程的测量，部分研究已完成，正在利用 8/20 fb<sup>-1</sup>数据开展研究
- 一些衰变过程的分析还处于振幅分析建立模型/初步进展阶段

- 阈值处成对产生的 $D\bar{D}$  样本是开展量子关联性精密测量的最理想场所
- 本课题利用BESIII上的 $\psi(3770)$ 数据，将系统性开展多体自共轭过程的CP本征态成分比例、强相位差、关联因子和平均强相位差等关键参数的精确测量
- 研究成果将保障未来十年以上国际粒子物理领域 $\gamma$ 相角、 $D^0 - \bar{D}^0$ 混合参数和CP破坏等关键参数的精密测量
- 相关工作正在有序开展，部分基于2.93/8/20 fb<sup>-1</sup>的成果已经发表