

BESIII上中性粲介子 D^0 的强相角测量

沈文涵 中国科学院大学
(代表BESIII合作组)

广州，中国物理学会高能物理分会学术年会，2025/07/16

- γ 角测量中的强相角输入
- BESIII上中性粲介子的强相角研究
 - 数据和研究方法
 - 自共轭过程 $K_{S,L}^0 h^+ h^-$
 - 准味道标记道 $K^- n \pi$
 - 混合CP共轭过程 $h^+ h^- \pi^0$
- 总结和展望

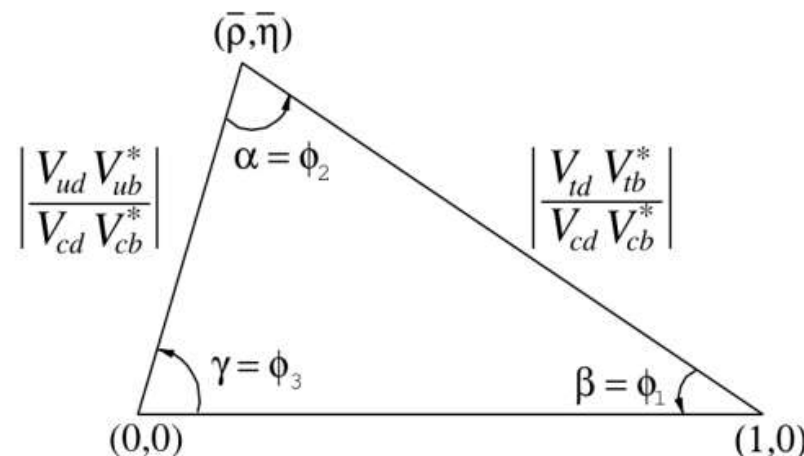
- CKM矩阵：描述夸克代际混合

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

- CKM矩阵复矩阵元是标准模型中CP破坏的唯一来源

- CKM矩阵么正性在复平面的几何表述：

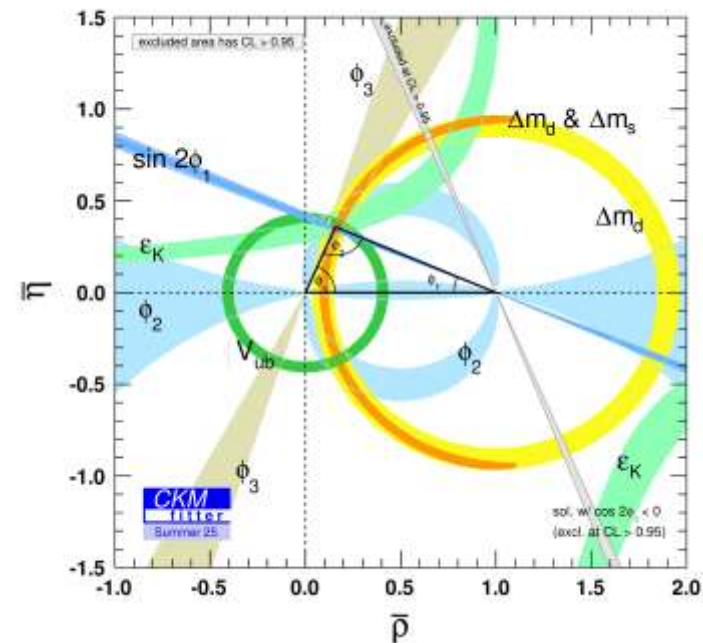
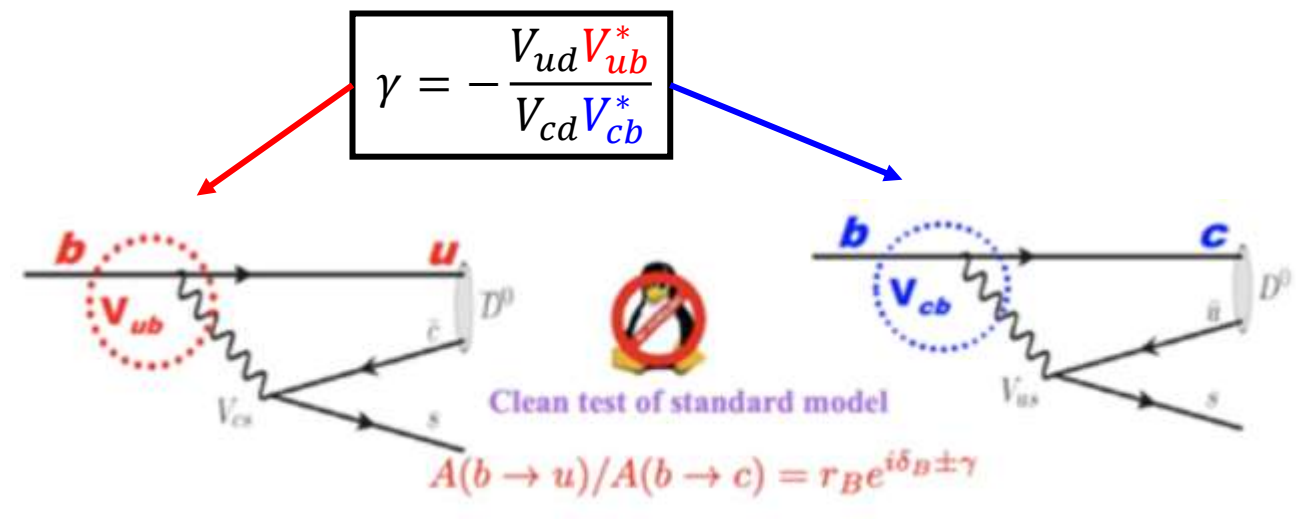
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$



- 么正三角形第三个角 γ 精确测量：
 - 理解标准模型CP破坏
 - 验证CKM矩阵么正性

直接测量: 测量 $B \rightarrow DK$ 中的 CP 不对称

间接测量: CKM矩阵幺正性约束



CKMfitter:

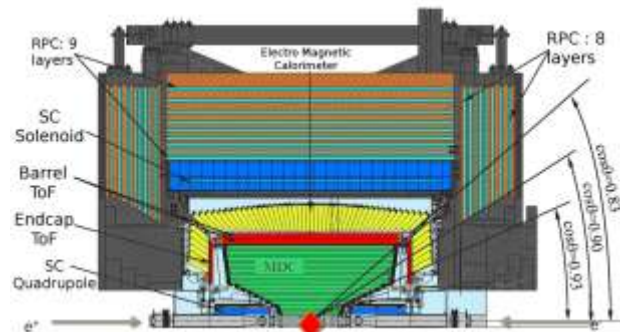
$$\gamma_{ind} = (66.2^{+0.7}_{-1.4})^\circ$$

$$\gamma_{dir} = (66.4^{+2.7}_{-2.8})^\circ$$

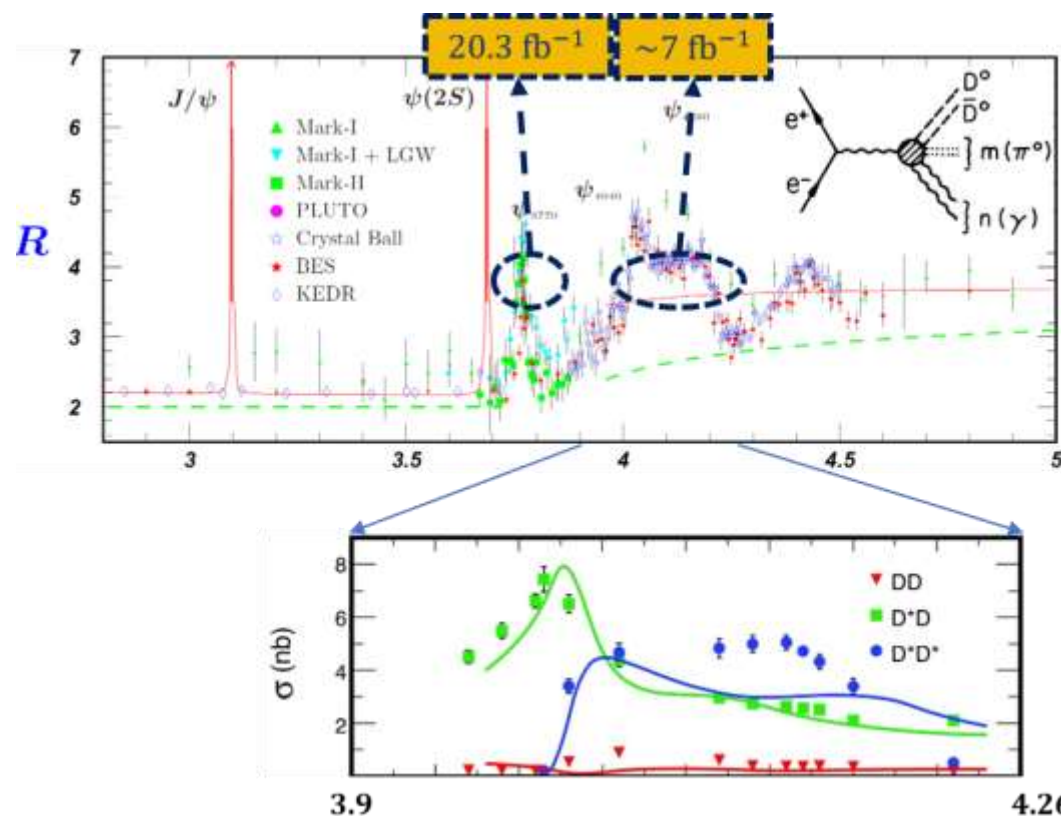
D衰变参数来源 $\rightarrow$ 不同的 γ 测量方法:

- GLW方法: CP 本征态 (F_+)
- ADS方法: CF/DCS 过程 (δ_D, R_D, r_D)
- BPGGZS方法: 自共轭多体末态 (c_i/s_i)

量子关联 $D^0\bar{D}^0$ 样本



BESIII收集的最大量子关联 $D^0\bar{D}^0$ 样本可以作为模型无关测量强相角差的良好实验平台。



$\psi(3770)$:

C-odd: $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^0$

$\Gamma[(e^+e^-)\psi(3770) \rightarrow [S]_D[T]_{\bar{D}}]$

$\propto A_S^2 A_T^2 [(r_D^S)^2 + (r_D^T)^2 - 2R_S R_T r_D^S r_D^T \cos(\delta_D^S - \delta_D^T)]$

粲介子混合效应可以忽略 $\sim O(x^4, y^4)$

4009-4230MeV 能量区间:

C-odd: $e^+e^- \rightarrow D^{(*)0}\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \pi^0(\pi^0)D^0\bar{D}^0$

C-even: $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \gamma D^0\bar{D}^0$

C-even: $e^+e^- \rightarrow D^{*0}\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \gamma\pi^0 D^0\bar{D}^0$

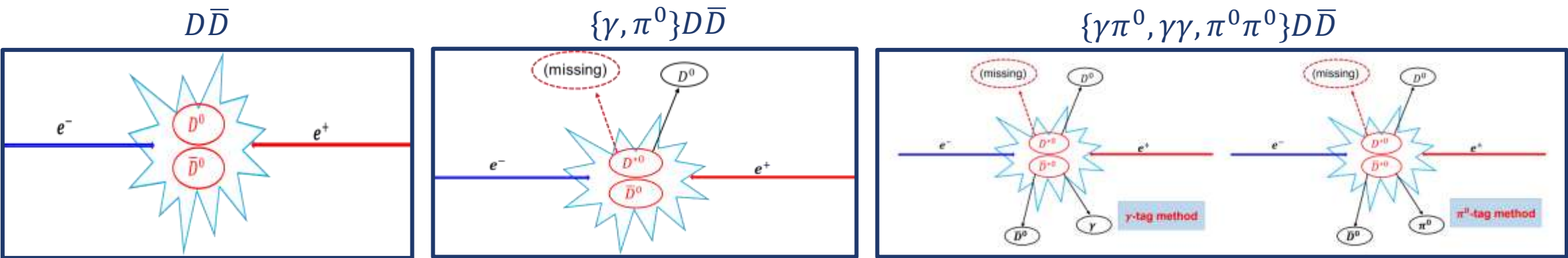
$\Gamma[(e^+e^-)_{4009-4230} \rightarrow \gamma(\pi^0)[S]_D[T]_{\bar{D}}]$

$\propto A_T^2 [(r_D^S)^2 + (r_D^T)^2 + 2R_S R_T r_D^S r_D^T \cos(\delta_D^S - \delta_D^T)]$

$- 2y(R_S r_D^S \cos \delta_D^S + R_T r_D^T \cos \delta_D^T) + 4x(R_S r_D^S \sin \delta_D^S + R_T r_D^T \sin \delta_D^T)]$

与粲介子混合参数有关

➤ 采用重建两侧D介子的**双标记方法**(Double-Tag)重建数据。

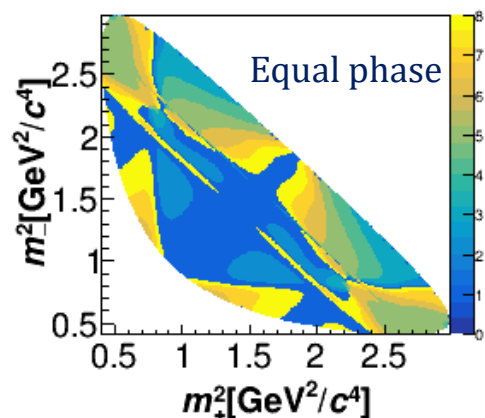


➤ 利用多种标记道测量D衰变参数，提高统计量

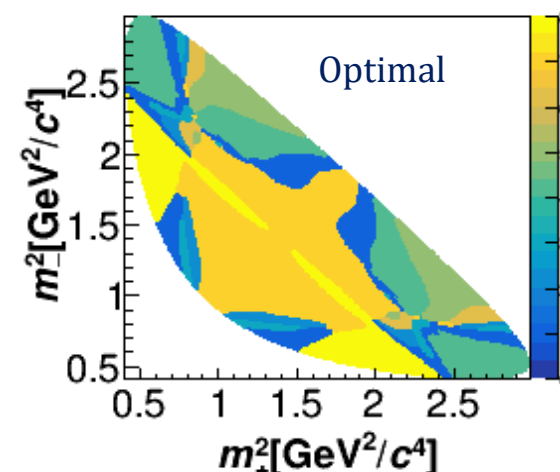
类型	标记道
粲味标记道	$K\pi, K\pi\pi^0, K\pi\pi\pi, K\pi\nu$
偶CP标记道	$KK, \pi\pi, K_S^0\pi^0\pi^0, K_L^0\pi^0, \pi\pi\pi^0 (F_+ \sim 0.94)$
奇CP标记道	$K_S^0\pi^0, K_S^0\eta_{\gamma\gamma/\pi\pi\pi^0}, K_S^0\eta'_{\pi\pi\eta/\rho\gamma}, K_S^0\omega, K_L^0\pi^0\pi^0$
自共轭道	$K_S^0hh, K_L^0hh (h = \pi, K)$

$K_{S,L}^0 h^+ h^-$ 的强相角测量

- $B \rightarrow DK, D \rightarrow K_S^0 h^+ h^- (h = \pi, K)$ 是当前最高精度的单一道 γ 测量衰变。
 - 非平庸强相角差 $\Delta\delta_D$;
 - 具有足够统计量;
 - 具有丰富的末态和相空间结构;
- BPGGSZ方法: 对Dalitz图分组, 联立组内的CP不对称
 - 等相位分组 (equal phase): 粲介子混合
 - 最优分组 (optimal): γ 测量



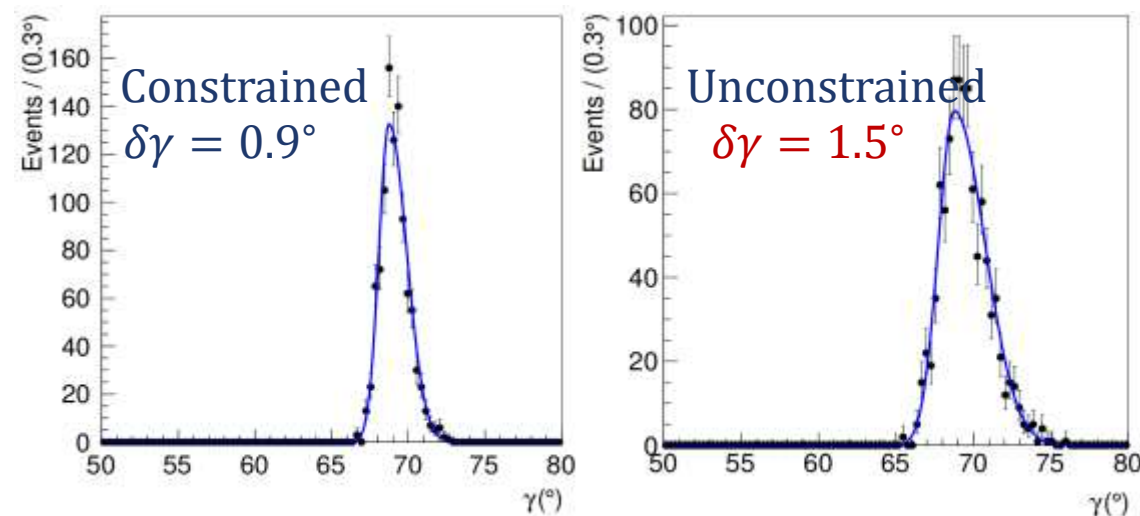
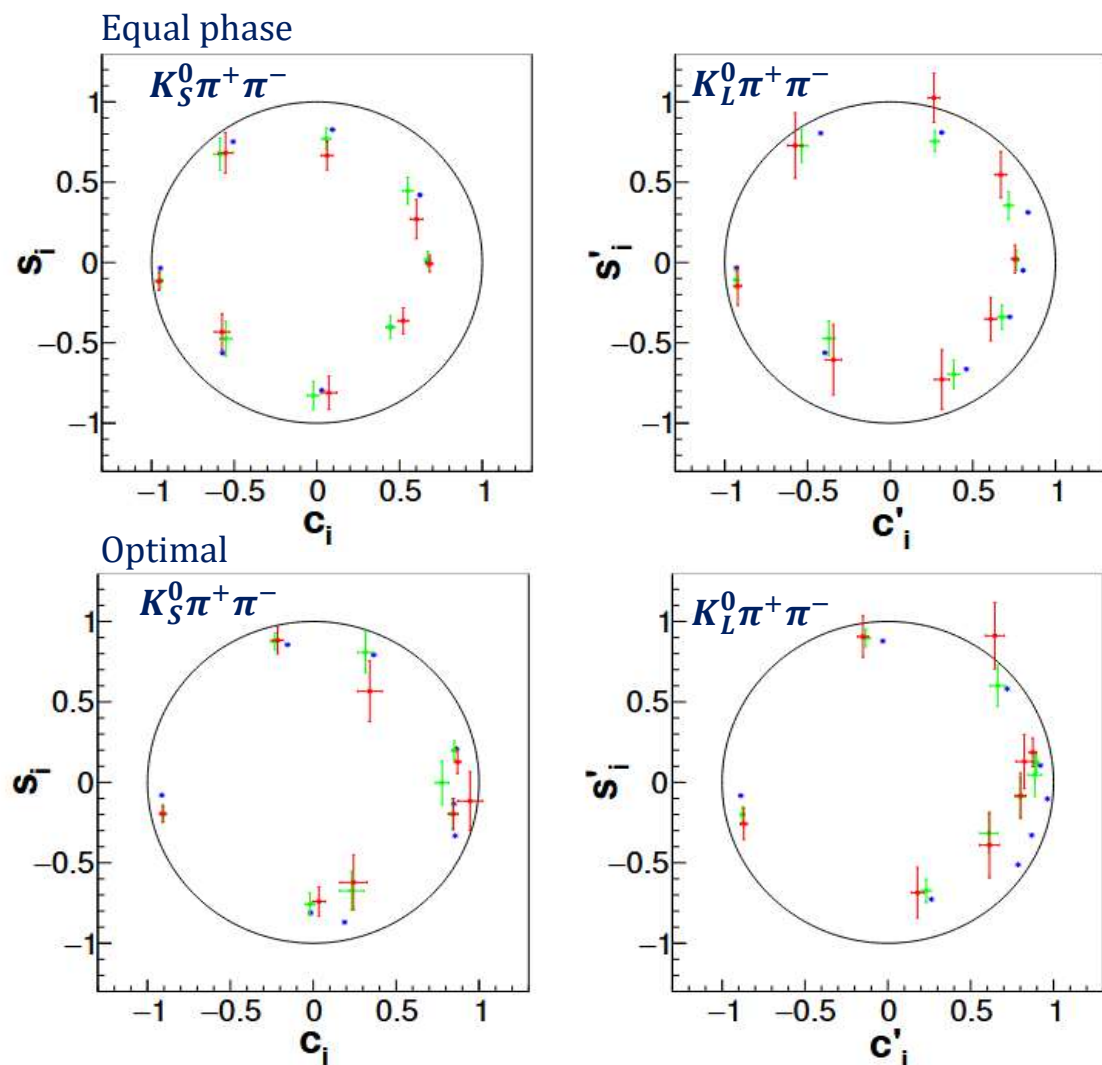
$$c_i = \frac{1}{\sqrt{F_i F_{-i}}} \int_i dX |A(X)| |\bar{A}(X)| \cos[\delta_D(X)]$$
$$s_i = \frac{1}{\sqrt{F_i F_{-i}}} \int_i dX |A(X)| |\bar{A}(X)| \sin[\delta_D(X)]$$
$$F_i = \frac{\int_i dX |A_F|^2}{\int dX |A_F|^2}$$



$D \rightarrow K_{S(L)}^0 \pi^+ \pi^-$ c/s_i 测量

7.93 fb⁻¹ $\psi(3770)$ data

JHEP 06 (2025) 086



- 引入模型约束 $\Delta c_i = c_i - c'_i$ 和 $\Delta s_i = s_i - s'_i$ 提高精度
- 与模型在 2σ 内符合
- 首次给出不含模型约束的 c/s_i 测量结果
- 与BESIII下之前分析相比, 对 γ 测量不确定性贡献降低了30%
- Toy研究表明, 使用无约束的 c/s_i 测量 γ 使中心值偏移 0.5°
- LHCb最新 γ 测量使用了本测量的 c/s_i 输入(arXiv:2605.03501), 测量结果为 $\gamma = (68.1 \pm 6.7)^\circ$, 表明制约 γ 测量精度的仍然主要是B衰变的统计误差

arXiv: 2604.05712, 2604.05701

- $B \rightarrow DK$ 的衰变率可以写成:

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

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

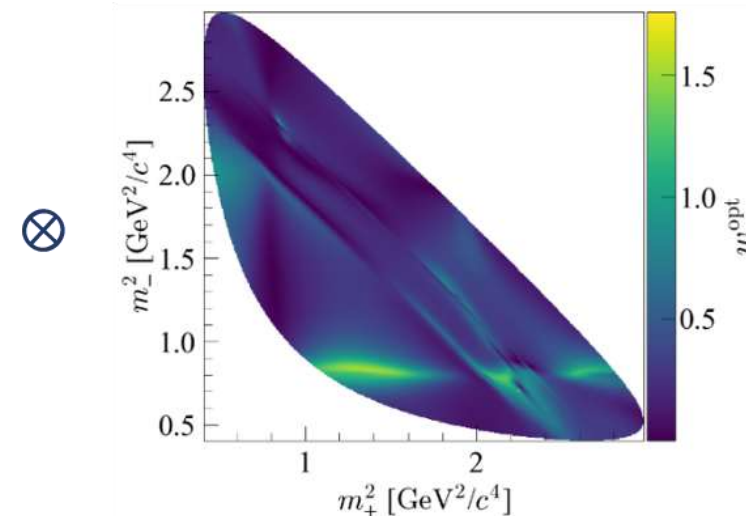
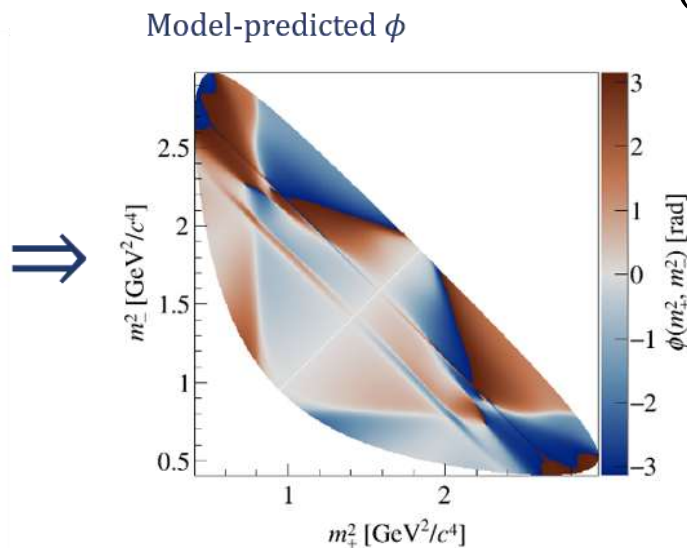
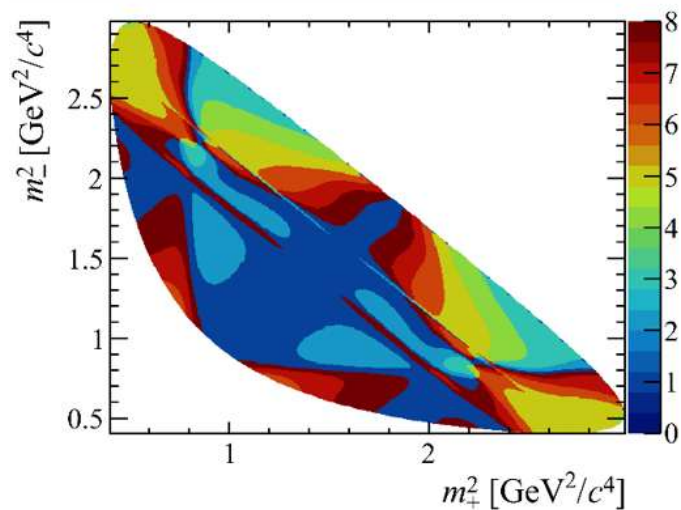
$$B^+: \bar{p}_B(\mathbf{z}) \propto \bar{p}_D(\mathbf{z}) + (x_+^2 + y_+^2) p_D(\mathbf{z}) + 2[x_+ \mathcal{C}(\mathbf{z}) - y_+ \mathcal{S}(\mathbf{z})]$$

$$D^0/\bar{D}^0 \rightarrow K_S^0 h^+ h^- \text{ decay density}$$

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

- 相较于传统方法对衰变率在组内求和，傅里叶方法对相空间每个点处作通过模型估计的强相角差 $\phi \equiv \delta_D(z) - \delta_D(\bar{z})$ 作傅里叶展开，可以利用相空间上每个点的信息。

$$w_n(z) \equiv \begin{cases} w^{opt}(z) \cos[k\phi(z)], & n = 2k \\ w^{opt}(z) \sin[k\phi(z)], & n = 2k - 1 \end{cases} \quad \bar{w}_n(z) \equiv \begin{cases} w^{opt}(\bar{z}) \cos[k\phi(z)], & n = 2k \\ w^{opt}(\bar{z}) \sin[k\phi(z)], & n = 2k - 1 \end{cases}$$



arXiv: 2604.05712, 2604.05701

- 基于B衰变和D衰变的振幅，可以得到傅里叶级数所具有的级数关系：

- LHCb:

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

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

- BESIII:

$$p_{\text{flav}}(z) \propto [p_D(z) + (x_D^2 + y_D^2)\bar{p}_D(z) - 2R_D(x_D C(z) - y_D S(z))]$$

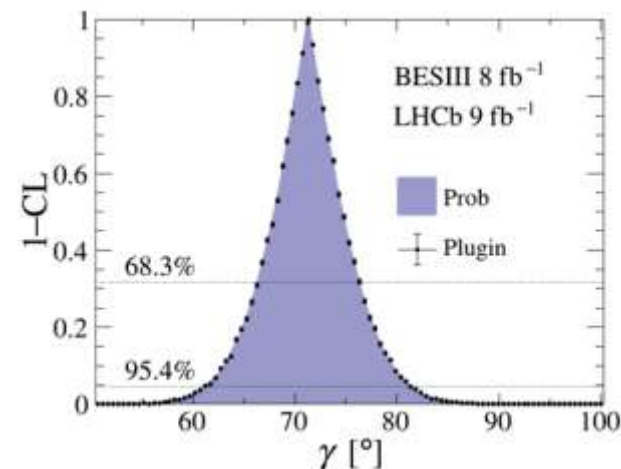
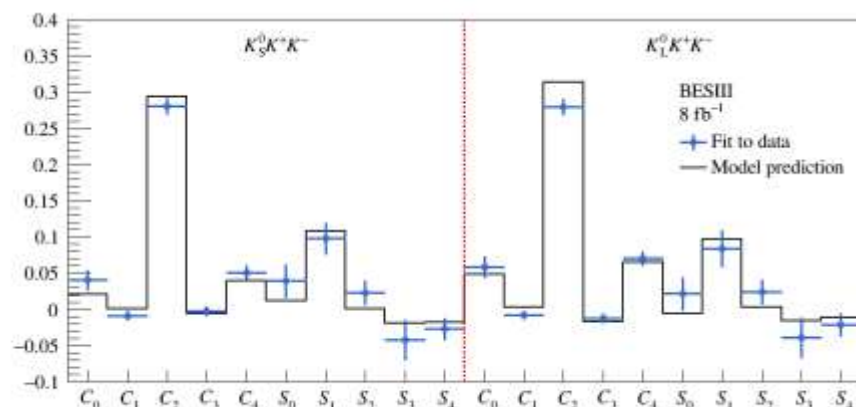
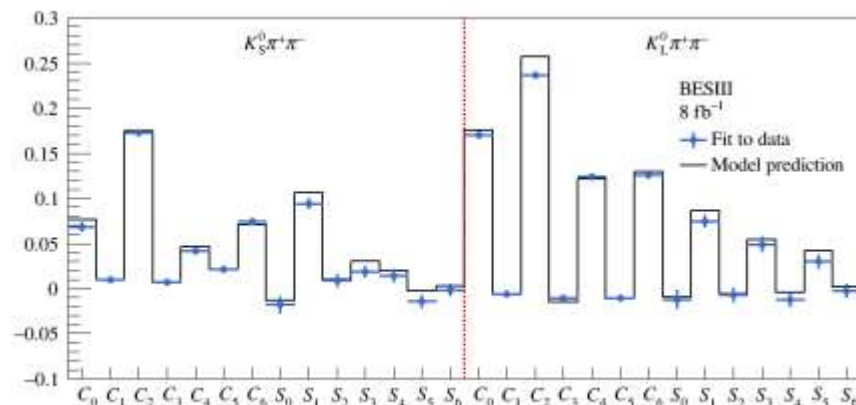
$$p_{CP\pm}(z) \propto [p_D(z) + \bar{p}_D(z) \mp C(z)]$$

$$p_{DD}(z) \propto [p_{D_1}(z)\bar{p}_{D_2}(z) + \bar{p}_{D_1}(z)p_{D_2}(z) - 2(C_{D_1}(z)C_{D_2}(z) + S_{D_1}(z)S_{D_2}(z))]$$

- 本研究是LHCb和BESIII的首次联合分析，需求B衰变和量子关联D衰变数据样本
- B衰变级数 $p_B(z)/\bar{p}_B(z)$ 和不同标记道的D衰变级数 $p_{\text{flav}}(z)/p_{CP\pm}(z)/p_{DD}(z)$ 为实验可观测量。
- 联立级数关系拟合得到CP破坏参数 $x_{\pm} = r_B \cos(\delta_B \pm \gamma)$ 和 $y_{\pm} = r_B \sin(\delta_B \pm \gamma)$

强相角差参数和 γ 测量结果

arXiv: 2604.05712, 2604.05701



$$\begin{aligned}\gamma &= (71.3 \pm 5.0)^\circ, \\ r_B^{DK} &= 0.0949^{+0.0086}_{-0.0085}, \\ \delta_B^{DK} &= (121.6^{+5.6}_{-5.9})^\circ, \\ r_B^{D\pi} &= 0.0064^{+0.0021}_{-0.0019}, \\ \delta_B^{D\pi} &= (311^{+17}_{-20})^\circ.\end{aligned}$$

- 联合拟合同时给出了强相角差参数 $C(z)/S(z)$ 和 γ 测量结果，提供了目前最精确的单一道 γ 测量结果 $(71.3 \pm 5.0)^\circ$
- 强相角差参数 $C(z)/S(z)$ 对 γ 测量的误差贡献为 0.6°

C-even 量子关联样本的首次测量

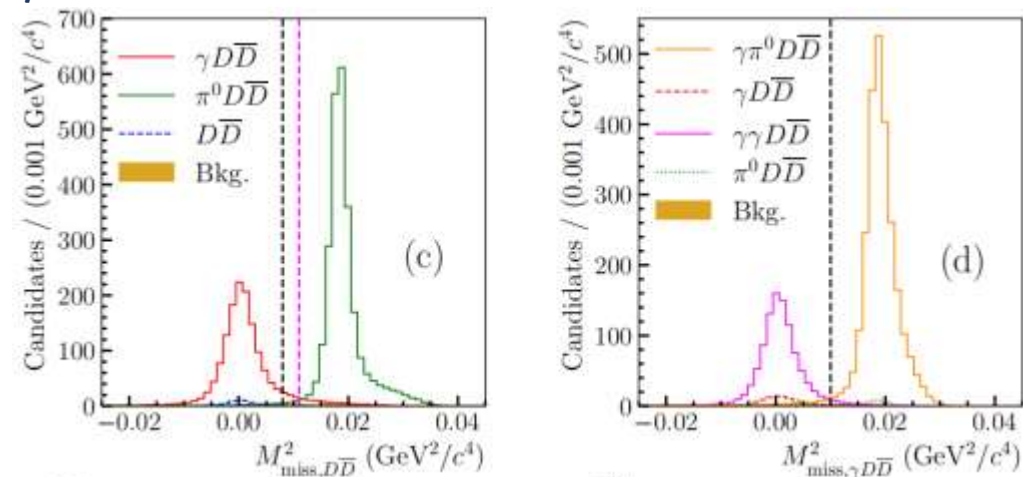
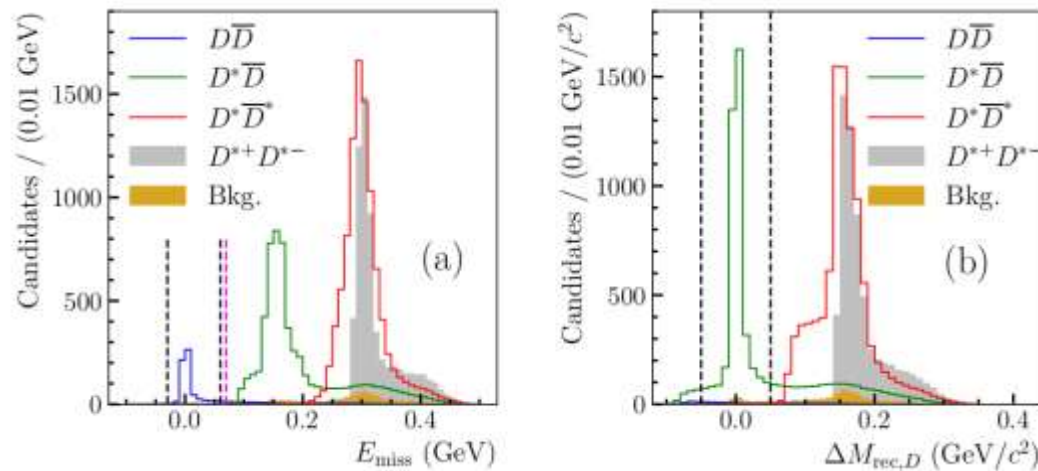
PRL 135 (2025) 171901, PRD 112 (2025) 072006

基于MC样本对观测量进行选择，分离具有不同CP的量子关联样本

C-odd: $e^+e^- \rightarrow D^{(*)0}\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \pi^0(\pi^0)D^0\bar{D}^0$

C-even: $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \gamma D^0\bar{D}^0$

C-even: $e^+e^- \rightarrow D^{*0}\bar{D}^{*0} + c.c. \rightarrow \gamma\pi^0 D^0\bar{D}^0$

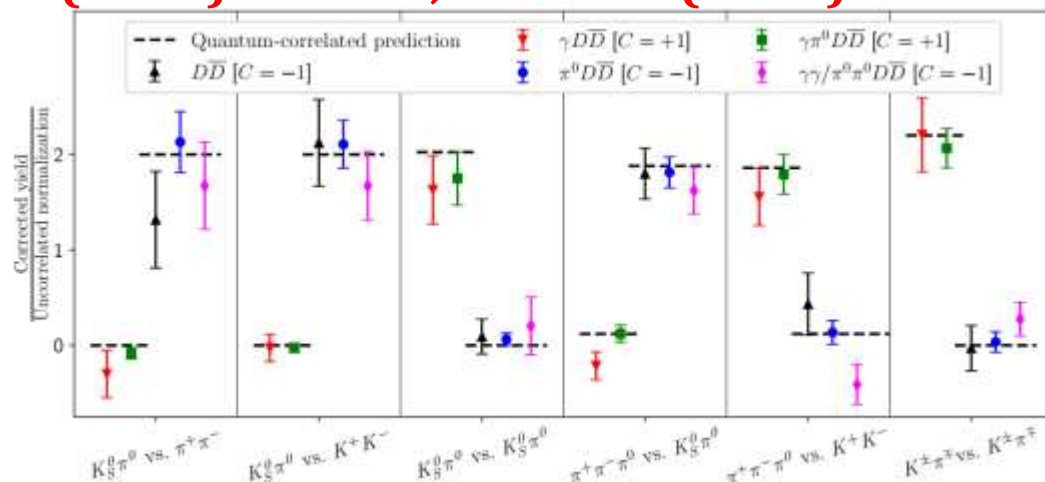


1. 利用末态粒子完全重建 D^0 和 $\bar{D}^0$
2. 利用 $D^0\bar{D}^0$ 和束流能量差 E_{miss} 对 $D\bar{D}$, $D^*\bar{D}$, $D^*\bar{D}^*$ 做初步鉴别。
3. 利用重建 $D^{(*)}$ 和反冲质量之间差的最小值 $\Delta M_{rec,D}$ 分辨 $D^*\bar{D}$ 和 $D^*\bar{D}^*$

对 $D^*\bar{D}$: 利用重建 $D\bar{D}$ 和 $D^*\bar{D}$ 动量得到未重建的缺失粒子质量 $M^2_{miss,D\bar{D}}$ 分辨 $\gamma D^0\bar{D}^0$ 和 $\pi^0 D^0\bar{D}^0$

对 $D^*\bar{D}^*$: 重建 γ 和 $D\bar{D}$ 。再利用缺失粒子质量分辨 $\gamma\pi^0 D^0\bar{D}^0$ 和 $\gamma\gamma D^0\bar{D}^0$

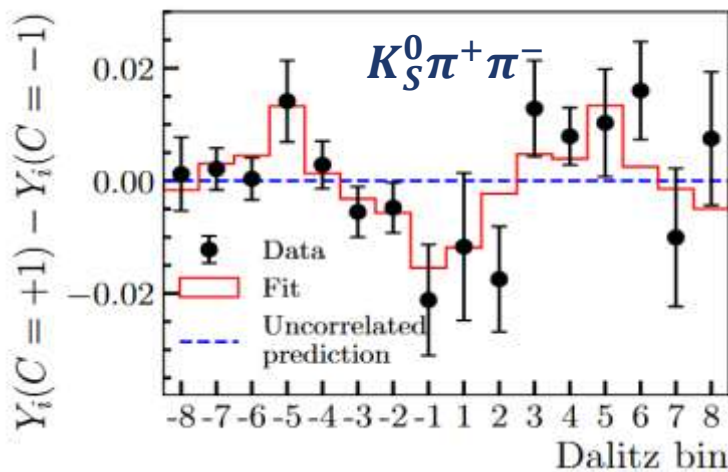
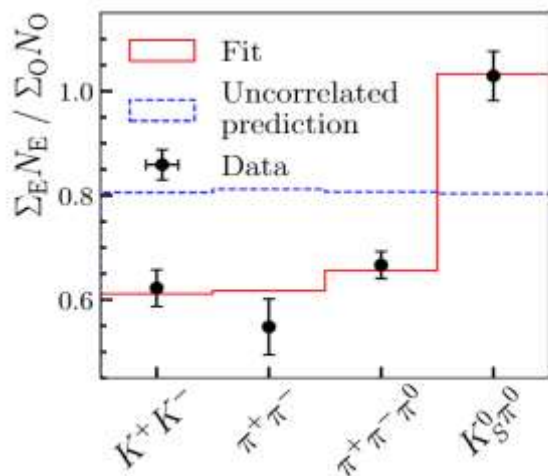
PRL 135 (2025) 171901, PRD 112 (2025) 072006



- 不同CP本征态的信号道和标记道产额，均符合C-even与C-odd量子关联样本的预期。

基于 7.13 fb^{-1} 4.13-4.23 GeV数据的 $\delta_{K\pi}$ 测量结果

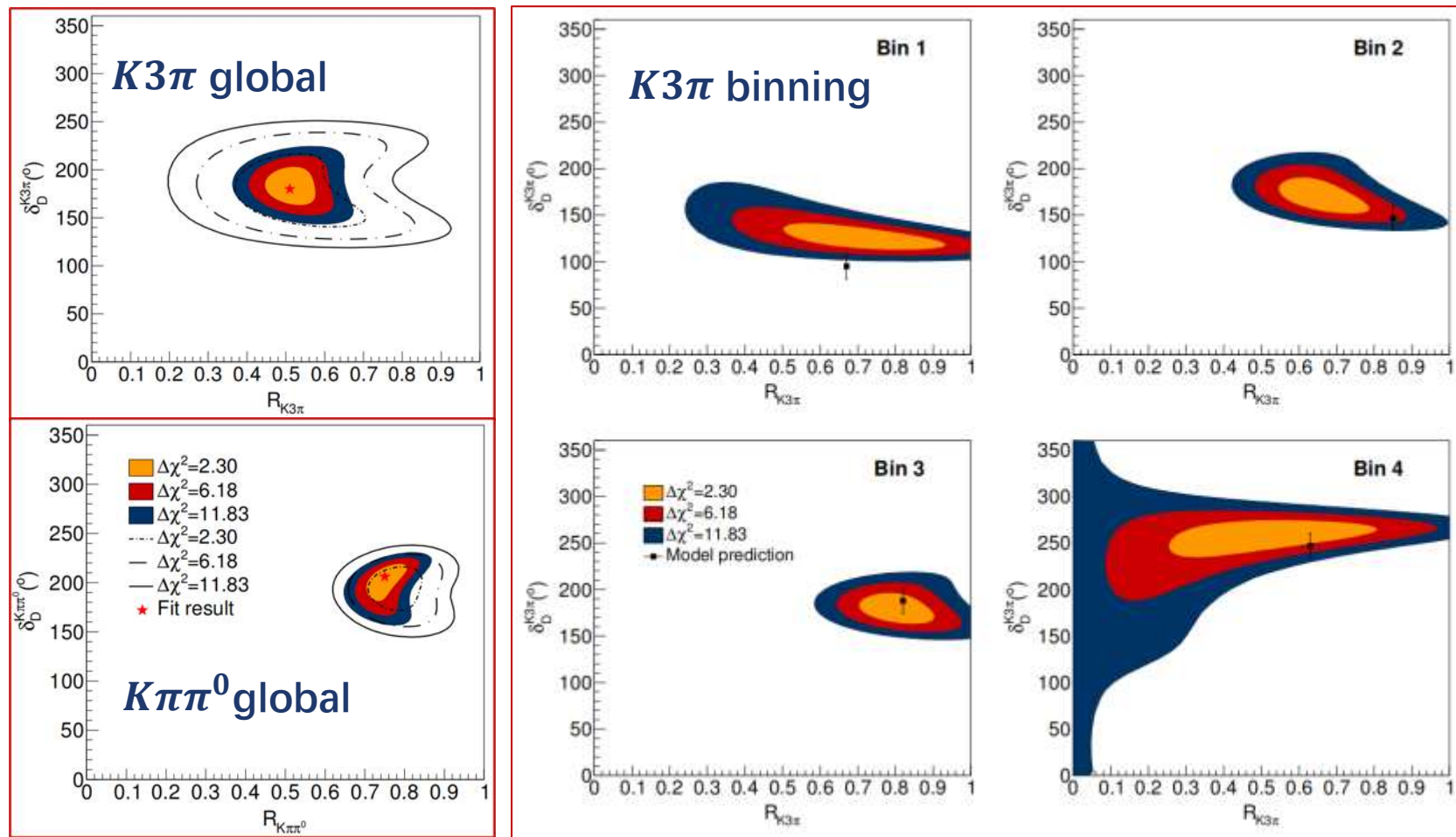
$$\delta_D^{K\pi} = (192.8_{-12.4}^{+11.0+1.9})^\circ$$



- 首次利用C-even量子关联样本进行的测量
- 讨论了在未来的超级陶粲装置(STCF)上利用更大样本进行粲介子混合和间接CP破坏研究的可行性。

$D \rightarrow K\pi\pi\pi$ 和 $D \rightarrow K\pi\pi^0$ 研究

arXiv: 2602.13002, $20.3 \text{ fb}^{-1} \psi(3770)$ data(accepted by JHEP)



利用目前最大的 $\psi(3770)$ 样本测量了关键味道标记道 $K\pi\pi\pi$ 和 $K\pi\pi^0$ 的强相角差参数。

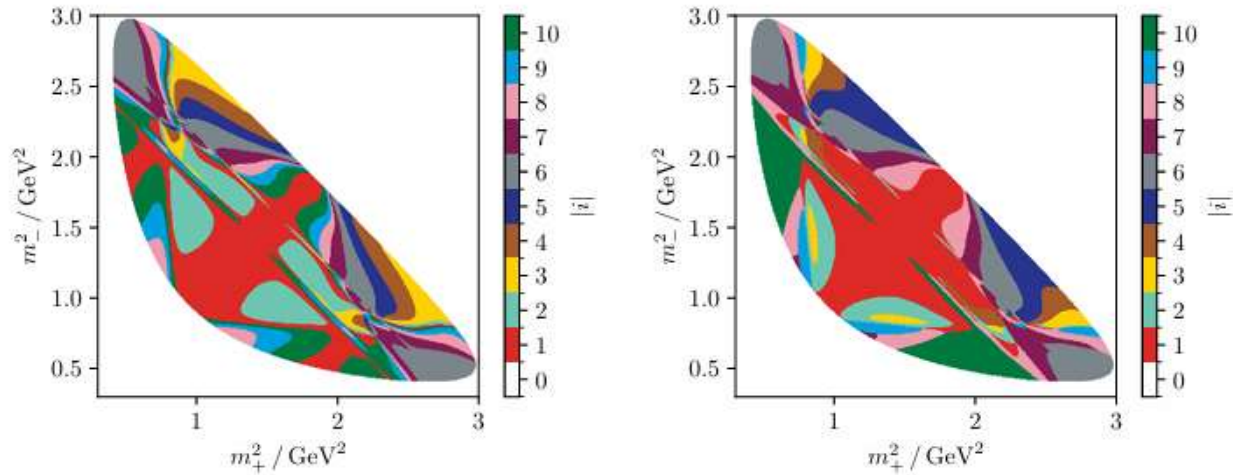
对包含丰富末态的 $K\pi\pi\pi$, 利用振幅模型分组并测量了分组强相角参数。

对 γ 角测量误差的贡献为 3.5° , 是 2.93 fb^{-1} 下的结果的 $1/1.7(60\%)$

BESIII	Decay	Parameters	Till 2024 (2.93 fb ⁻¹ $\psi(3770)$)	Till 2026.06	Prospects
Self-conjugate	$K_{S,L}^0 \pi^+ \pi^-$	c_i, s_i	PRL 124 (2020) 241802 PRD 101 (2020) 112002	7.93 fb ⁻¹ JHEP 06 (2025) 086	20.3 fb ⁻¹
	$K_{S,L}^0 K^+ K^-$	c_i, s_i	PRD 102 (2020) 052008		20.3 fb ⁻¹
	$K_{S,L}^0 h^+ h^-$	Unbinned	—	7.93 fb ⁻¹ arXiv: 2604.05712, 2604.05701	
	$\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 106 (2022) 092004 PRD 110 (2024) 112008		20.3 fb ⁻¹
	$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 107 (2023) 032009	20.3 fb ⁻¹ PRD 112 (2025) 012015	
	$K_{S,L}^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	$F^+ / c_i, s_i$	PRD 108 (2023) 032003		20.3 fb ⁻¹
Quasi-flavour	$K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(Binned) δ_D, R_D	JHEP 05 (2021) 164	7.93 fb ⁻¹ arXiv: 2602.13002	20.3 fb ⁻¹ and $D^* \bar{D}^{(*)}$
	$K^- \pi^+ \pi^0$	δ_D, R_D			
	$K^- \pi^+$	δ_D	EPJC 82 (2022) 1009	$D^* \bar{D}^{(*)}$: PRL 135 (2025) 171901, PRD 112 (2025) 072006	20.3 fb ⁻¹
	$K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	(Binned) δ_D, R_D	—		20.3 fb ⁻¹
Quasi-CP	$h^+ h^- \pi^0$	$F^+ / c_i, s_i$	—	7.93 fb ⁻¹ PRD 111 (2025) 012007	20.3 fb ⁻¹

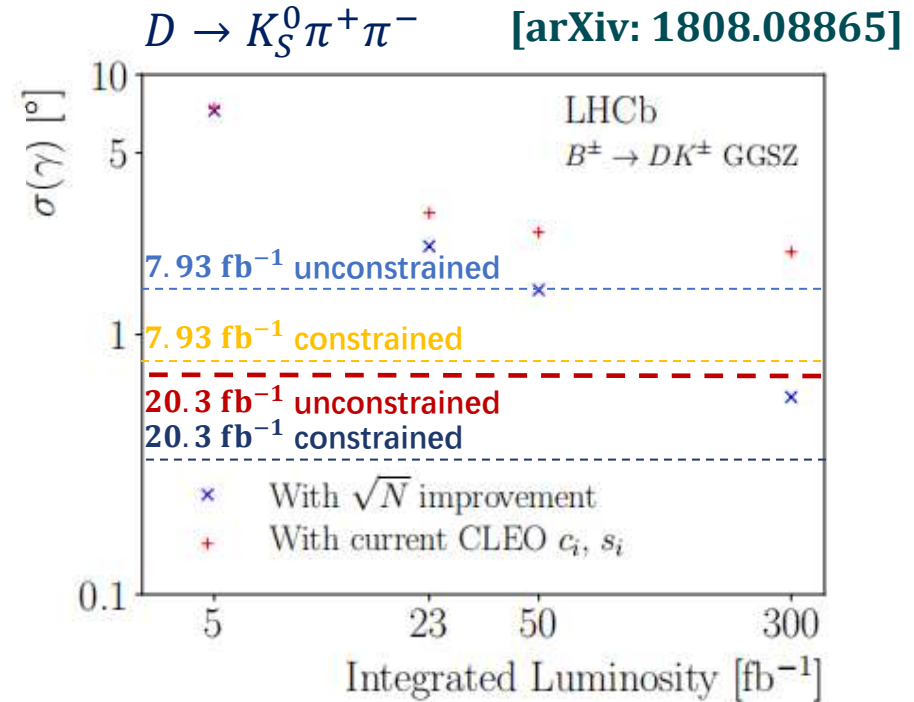
- BESIII利用其最大亮度的量子关联 $D^0 \bar{D}^0$ 样本，提供了高精度的强相位角差参数测量结果，为 γ 角测量和CPV研究提供了重要输入。
- BESIII参与发展和不分组方法 γ 角的首次实验测量，提高了测量精度和灵敏性
- BESIII发展了利用其他能量点的C-even量子关联样本进行实验测量。

new $K_S^0 \pi^+ \pi^-$ binning [arXiv:2606.13948](#)



(a) $\mathcal{N} = 10$ equal-phase scheme, $Q_\gamma = 0.833$

(b) $\mathcal{N} = 10$ NEWGAMMA scheme, $Q_\gamma = 0.942$



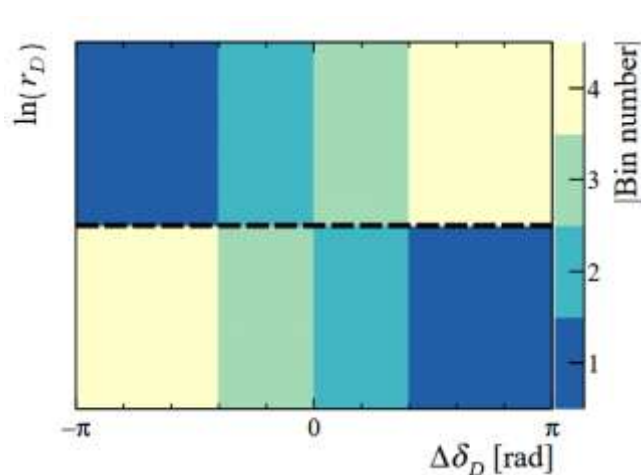
展望:

- LHCb基于其新B衰变数据开发了新的分组方法，提高了20%的统计敏感性。BESIII未来将利用此分组方法和新的不分组方法，联合更多衰变道测量强相角参数。
- 后续BESIII或STCF上的更大亮度量子关联样本，将在LHCb upgrade 和 Belle II 收集更多B介子数据后发挥越来越重要的作用。

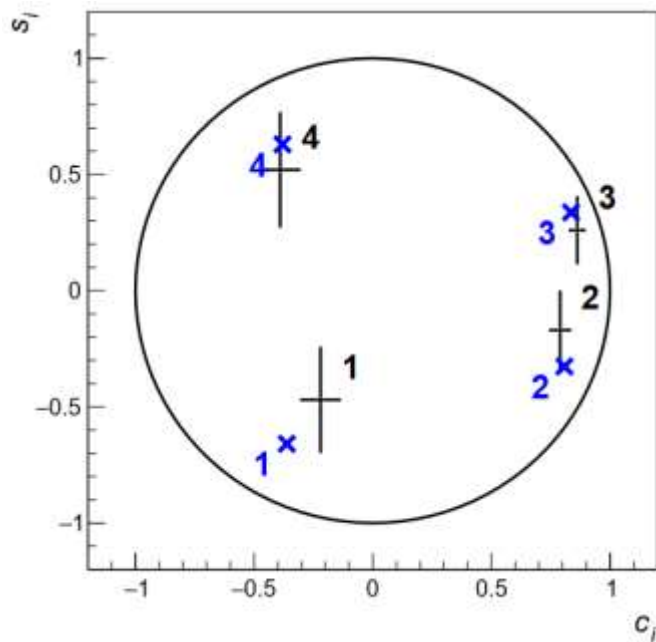
$D \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ 研究

PRD 112 (2025) 012015, $20.3 \text{ fb}^{-1} \psi(3770)$ data

- 在5维相空间上通过振幅模型优化分组, 达到模型依赖测量85%的灵敏度。



Binning scheme



Variable	Results	Model
K_{-4}	0.0871(27)(38)	0.086
K_{-3}	0.294(5)(6)	0.297
K_{-2}	0.400(7)(3)	0.398
K_{-1}	0.252(7)(12)	0.267
K_1	0.119(6)(6)	0.110
K_2	0.405(12)(2)	0.401
K_3	0.818(10)(10)	0.833

- 系该衰变道首次分组强相角参数测量
- 分组强相角参数 K_i , c/s_i 与振幅模型预测符合
- 对 γ 角测量的系统误差贡献为 10° , 与统计误差 12.7° 相当