



BESIII中性粲介子量子关联进展

闫文昊
华中师范大学

兰州, 2025/08/07

- 研究动机
- 研究内容
- 研究进展
- 总结

- 研究动机
- 研究内容
- 研究进展
- 总结

➤ CKM矩阵:

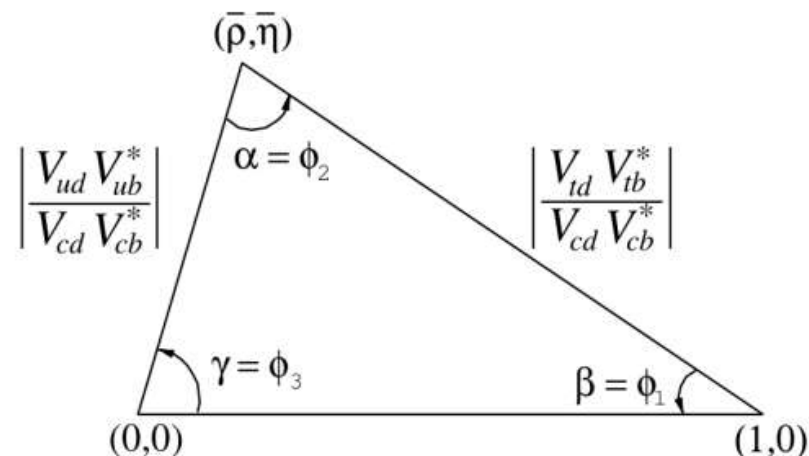
$$V = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\bar{\rho} - i\bar{\eta}) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \bar{\rho} - i\bar{\eta})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

其么正性是检验标准模型以及寻找新物理的重要途径

➤ 复平面上的几何表述:

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

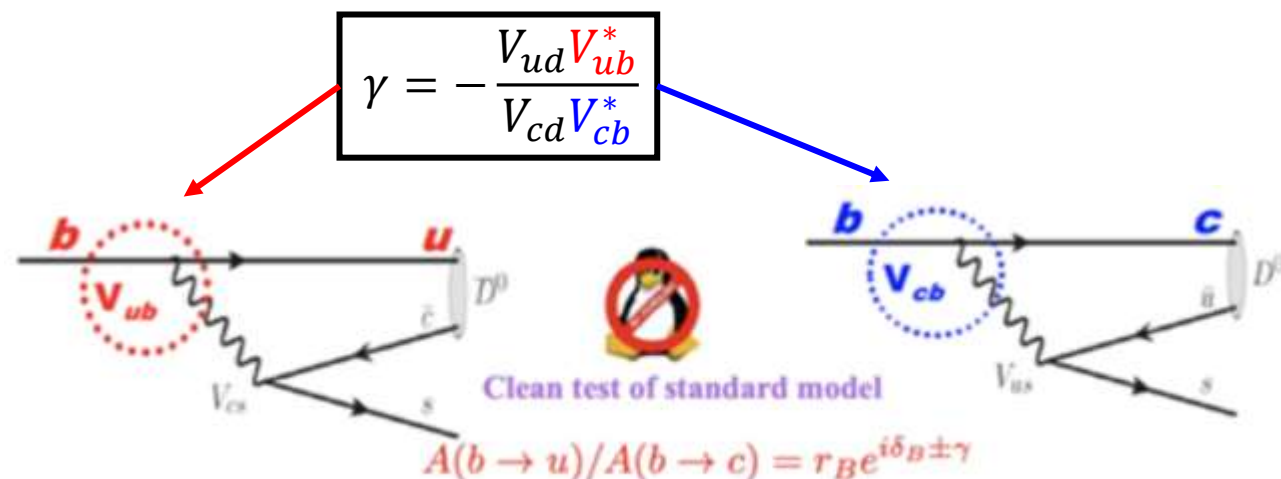
$b \rightarrow d$ 跃迁: 三个CP相角 α, β, γ



➤ 实验上测量三个相角: 检验三角形的封闭性; 检验电弱统一理论

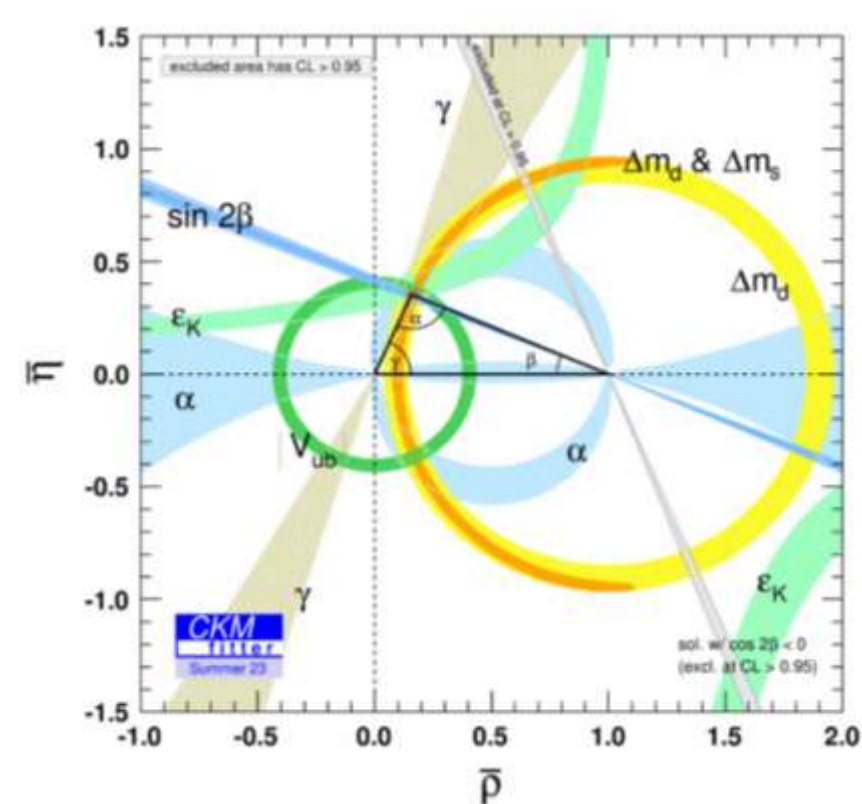
相角 γ 的测量

直接测量：树图阶 $B \rightarrow DK$ 衰变(本底干净)



基于不同 D 介子衰变的测量方法：

- 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)



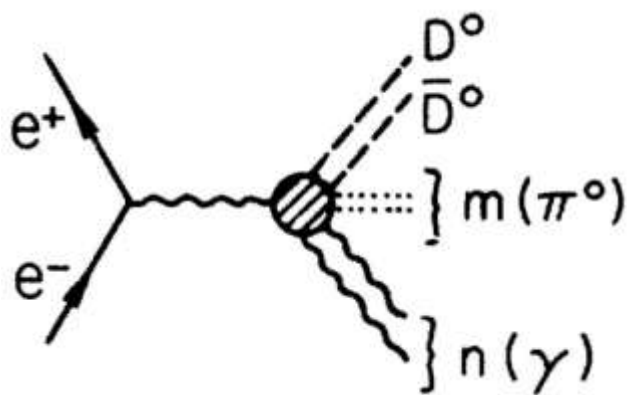
CKMfitter $\gamma_{ind} = (66.3^{+0.7}_{-1.9})^\circ$

LHCb $\gamma_{dir} = (66.4^{+2.8}_{-3.0})^\circ$

关键!! 中性 D 介子衰变的强相位信息输入(细节见附录)

中性粲介子强相位参数的测量

- $\psi(3770)$ 衰变中独特的量子关联效应，非常利于抽取强相位差信息



- $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^0 + m(\pi^0) + n(\gamma)$

- $C(D^0\bar{D}^0) = (-1)^{n+1}$

- 3.773 GeV: **C-odd** ($m=0, n=0$)

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

- $D^0\bar{D}^0 \rightarrow f + g$ 在不同相空间区域的衰变宽度:

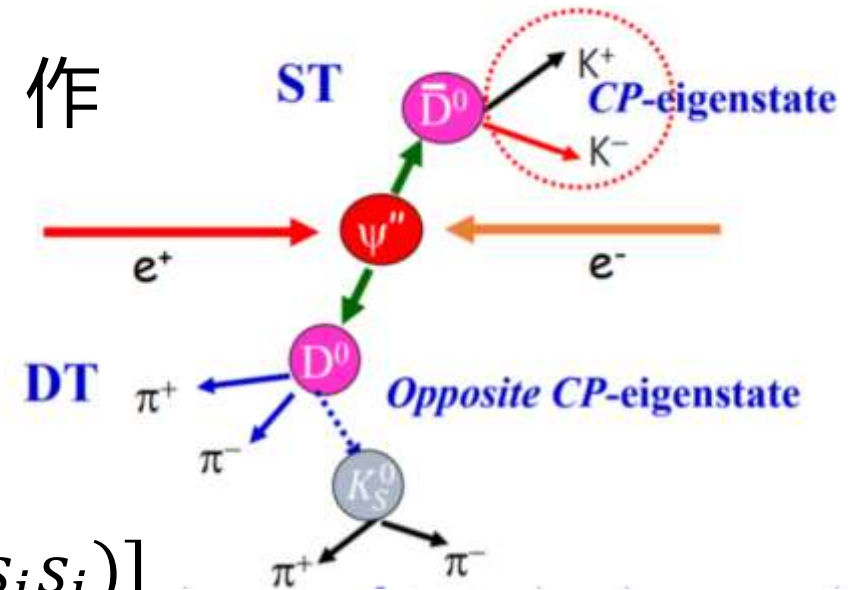
$$\begin{aligned}\boxed{\Gamma(f|g)} &= \iint |A_f(x)A_{\bar{g}}(y) - A_{\bar{f}}(x)A_g(y)|^2 dx dy \\ &= A_f^2 A_g^2 [(r_D^f)^2 + (r_D^g)^2 - \boxed{2R_f R_g r_D^f r_D^g \cos(\delta_D^g - \delta_D^f)}]\end{aligned}$$

- 观测不同区域的产额，可以在干涉项中提取到强相位信息

➤ 通过**粲味标记道**测量 D^0 衰变区间分宽度 $F_i(K_i)$, 作为输入参数

- $N \propto [K_i + K_{-i} - 2(2F_+ - 1)\sqrt{K_i K_{-i}} c_i]$

- $N \propto [K_i K_{-j} + K_{-i} K_j - 2\sqrt{K_i K_{-j} K_{-i} K_j} (c_i c_j + s_i s_j)]$

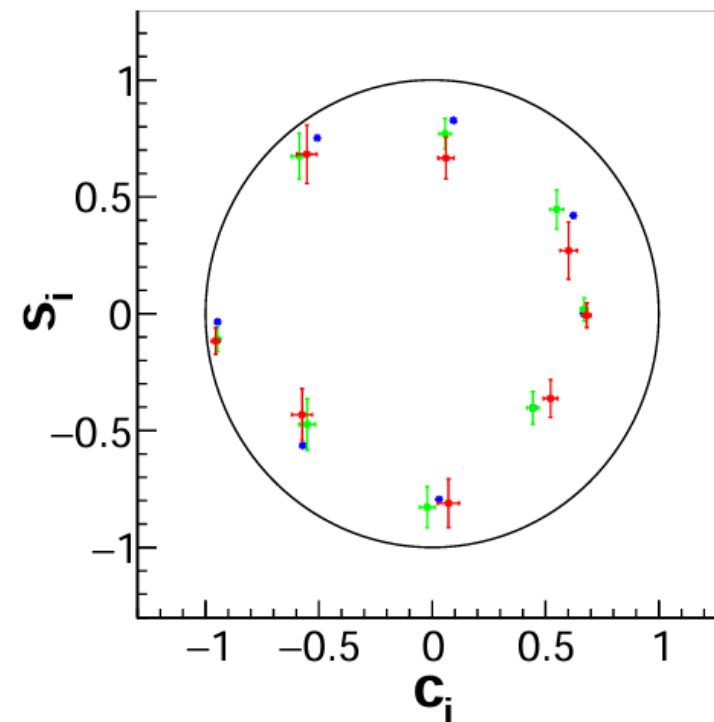


类型	标记道
粲味标记道	$K\pi, K\pi\pi^0, K\pi\pi\pi, K\eta$
偶CP标记道	$KK, \pi\pi, K_S^0\pi^0\pi^0, K_L^0\pi^0, \pi\pi\pi^0 (F_+ \sim 0.94)$
奇CP标记道	$K_S^0\pi^0, K_{S/L}^0\eta_{\gamma\gamma}/\pi\pi\pi^0, K_{S/L}^0\eta'_{\pi\pi\eta/\rho\gamma}, K_{S/L}^0\omega, K_L^0\pi^0\pi^0$
自共轭道	$K_S^0hh, K_L^0hh (h = \pi, K)$

强相位差对 γ 的贡献

LHCb实验测量 γ

- CLEO-c首次测得 c_i/s_i PRD 80,032002(2009)
 - 0.82fb^{-1} : 约 4°
- BESIII最新测得 c_i/s_i JHEP 06(2025)086
 - 7.93fb^{-1} : 约 0.9°



dataset	Int. Lum.	year	sensitivity
LHCb Run1 (7,8TeV)	3 fb^{-1}	2012	8°
LHCb Run2 (13TeV)	6 fb^{-1}	2018	4°
BelleII Run	50 ab^{-1}	2025	$1\text{--}2^\circ$
LHCb upgradel (14TeV)	50 fb^{-1}	2030	$<1^\circ$
LHCb upgradell (14TeV)	300 fb^{-1}	(>)2035	$<0.4^\circ$

- LHCb与Belle II 的更多数据
- BESIII更精确的强相位差信息
 - 20fb^{-1} 数据的结果

更准确的 γ 测量!!

- 研究动机
- 研究内容
- 研究进展
- 总结

类别	衰变	内容
三体	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	Dalitz图分析 确定偶CP比例 确定中间共振态
	$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	
	$D^0 \rightarrow K^+ K^- \eta$	
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \eta$	
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0$	
四体	$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	确定偶CP比例 确定中间共振态
	$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0 \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \eta$	

- 精确测量多体自共轭过程CP本征态成分比例
- 为GLW方法测量 γ 角提供输入

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

- 精确测量强相差参数 c_i/s_i
- 深入理解相空间分布，探索新的测量方法
- 为BPGGSZ方法测量 γ 提供相关输入

➤精确测量**关联因子**和**平均强相位差参数**

类别	衰变	内容
卡比玻允许	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	测量关联因子 R_D, r_D 测量平均强相位差参数 δ_D
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	
	$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$	
卡比玻压低	$D^0 \rightarrow K_S^0 K^- \pi^+$	

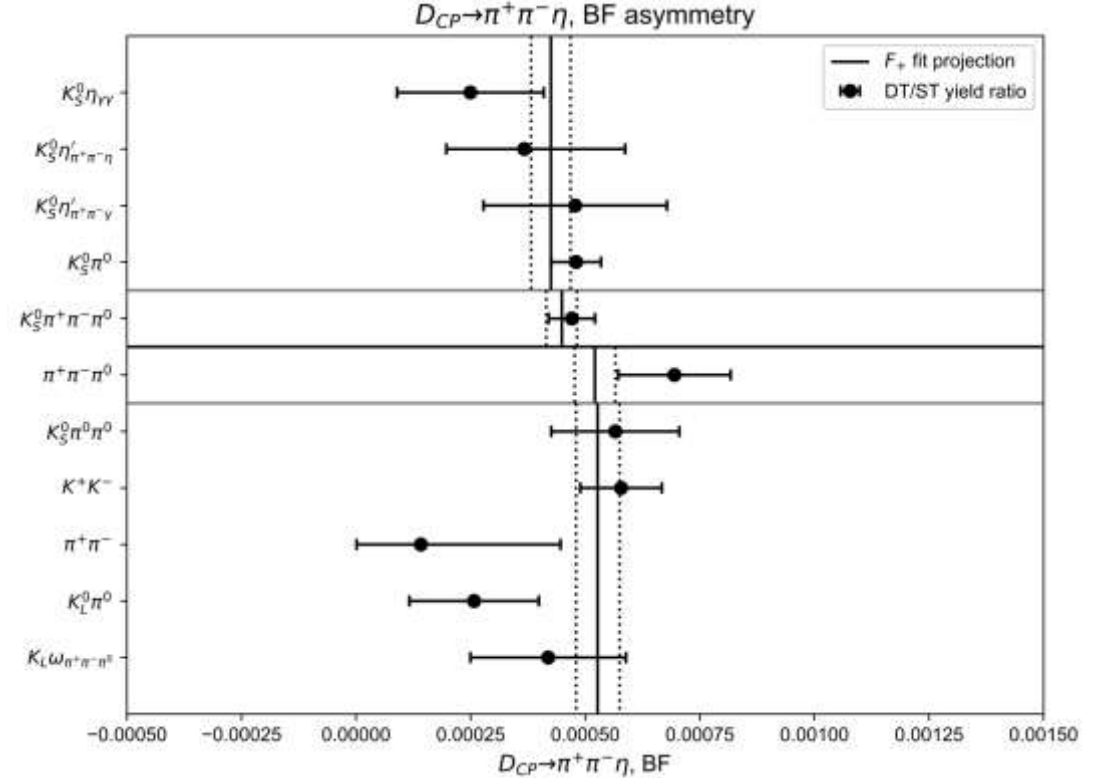
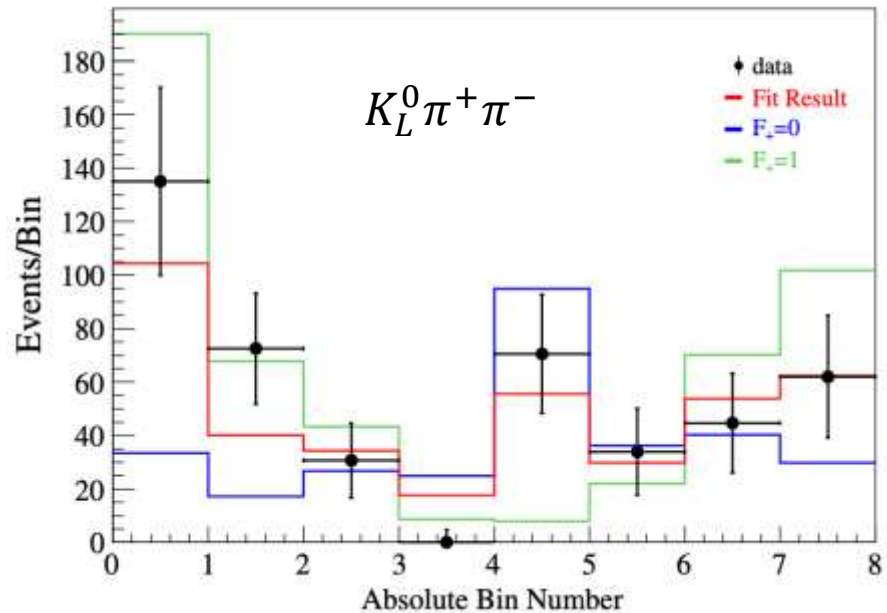
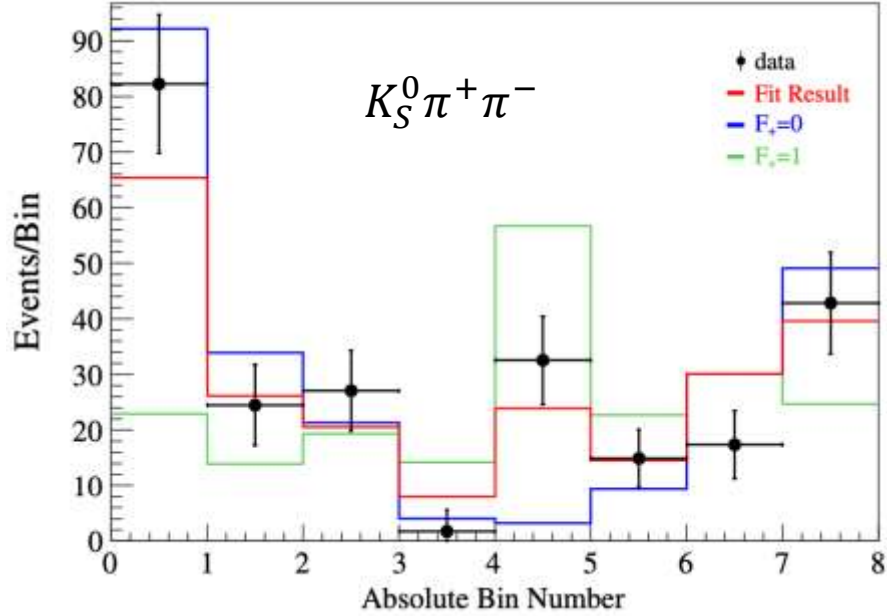
- 研究**卡比玻允许**和**卡比玻压低**的衰变末态的性质
- 为**ADS方法**精确测量 γ 提供参数输入

- 研究动机
- 研究内容
- **研究进展**
- 总结

➤多体自共轭过程的CP本征态成分比例的研究

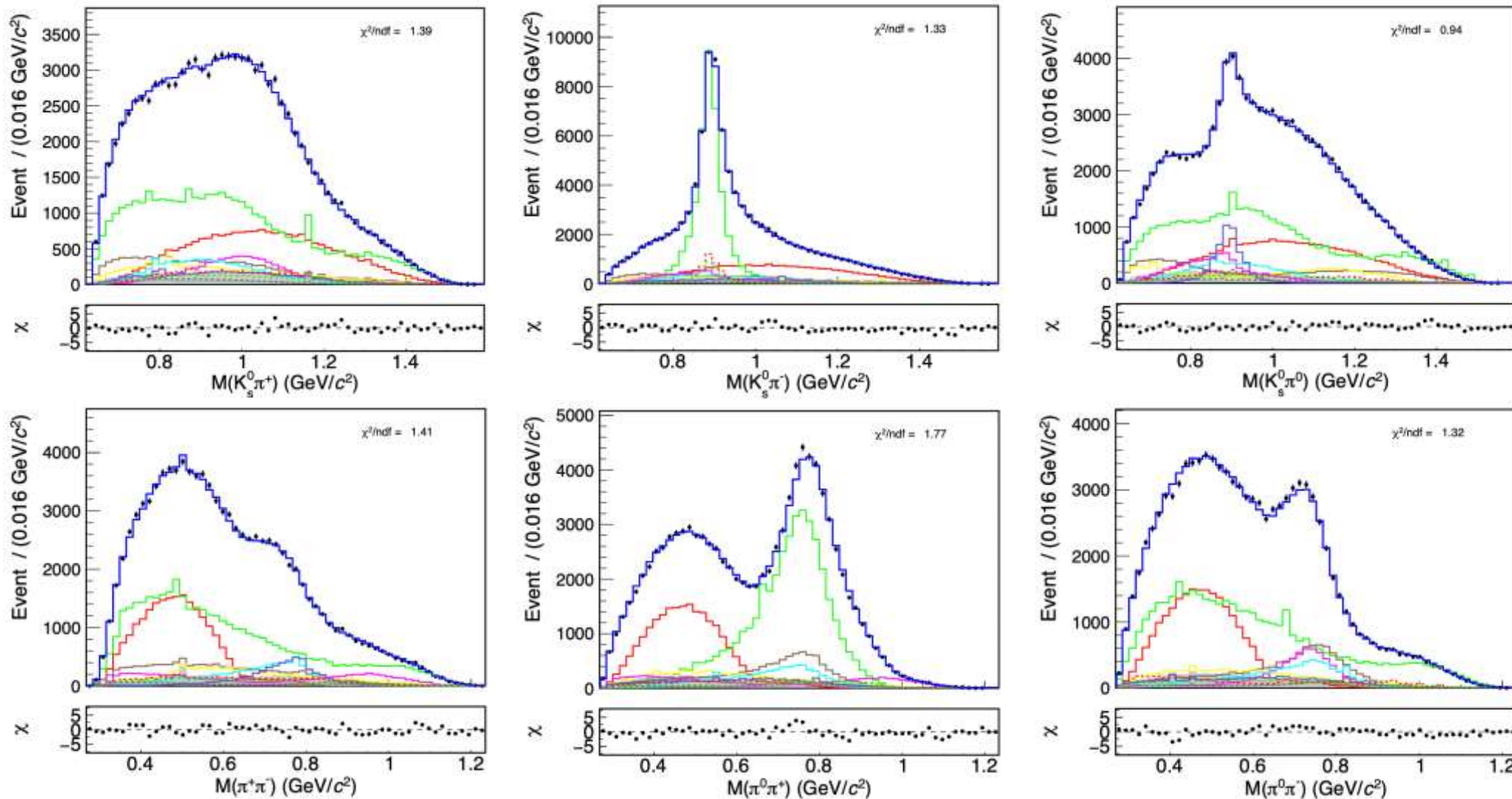
衰变	进展	BESIII过去结果
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	振幅分析: 进行中 (20fb ⁻¹)	PRD 111, 012007(2025) 7.93fb ⁻¹
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	振幅分析: 进行中 (20fb ⁻¹)	
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	F_+ : BAM01001(Memo) 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \eta$	振幅分析: charm group review 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \eta$	振幅分析: BAM00802(SP approval) 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0$	振幅分析: BAM00756(SP approval) 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	振幅分析: 进行中 (20fb ⁻¹)	CPC 48, 083001(2024) 2.93fb ⁻¹
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \eta$	振幅分析: 进行中 (20fb ⁻¹)	-
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0 \pi^0$	振幅分析: BAM00998(Memo) 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	F_+ 、振幅分析: BAM01025(Memo) 20fb ⁻¹	-

$F_+ : D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$ (BAM01001 20fb^{-1})



- CP tag: $0.449 \pm 0.036 \pm 0.006$
- $K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$: $0.406 \pm 0.075 \pm 0.007$
- Combine: $0.436 \pm 0.030 \pm 0.004$

振幅分析: $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$ (BAM01025 20fb⁻¹)



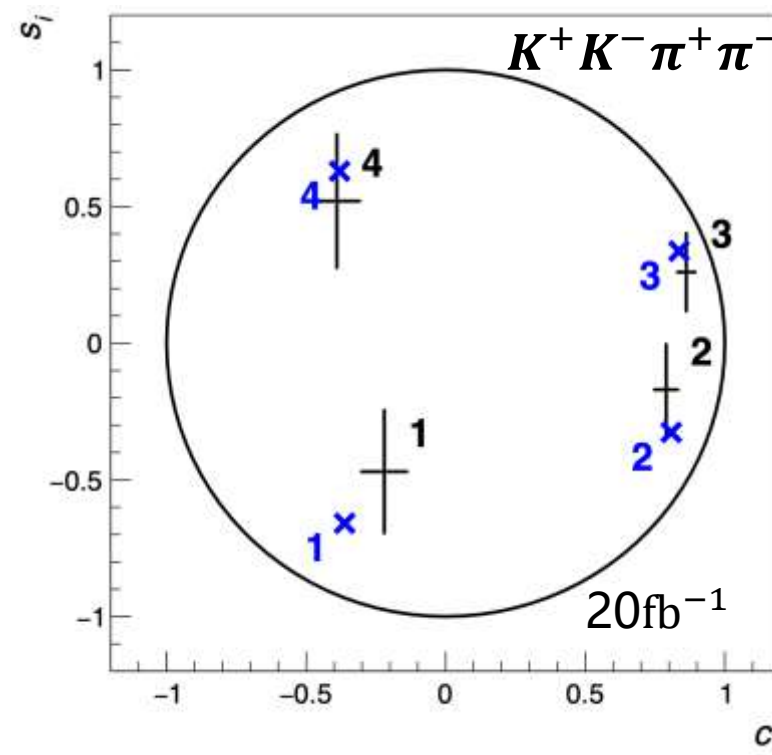
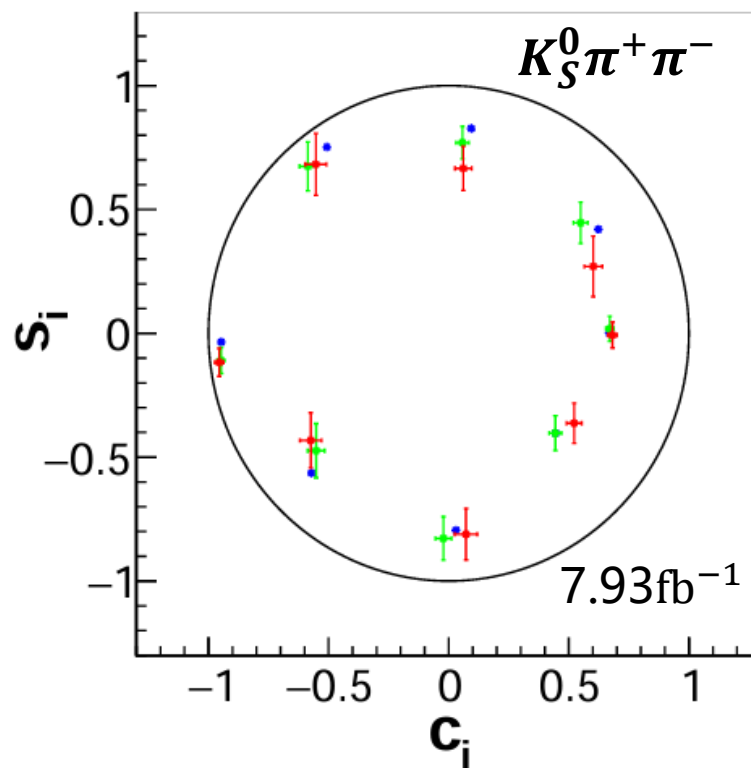
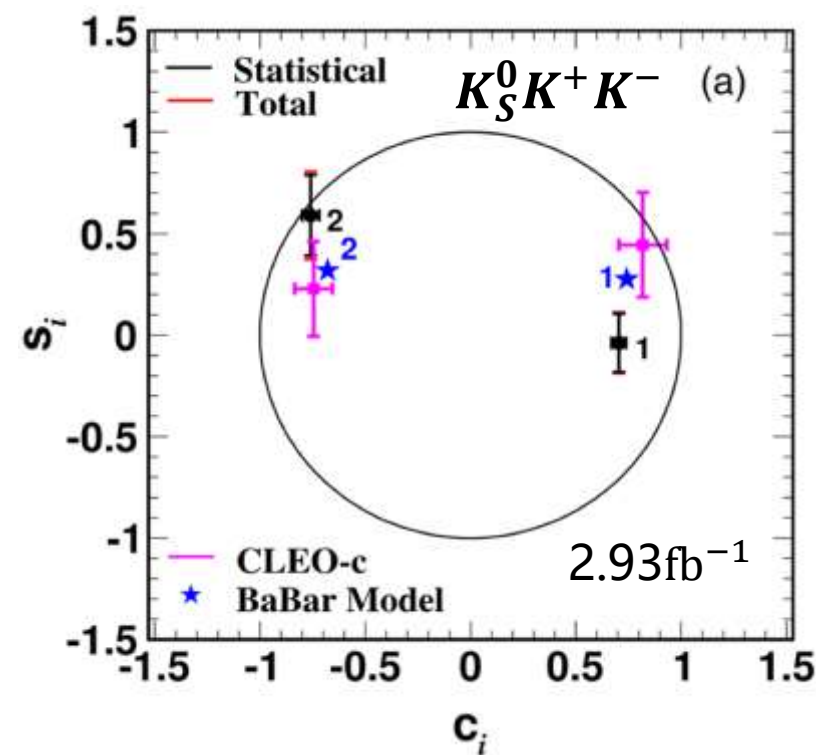
➤ $\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0) = (5.55 \pm 0.02 \pm 0.03)\%$

➤ PDG: $(5.08 \pm 0.60)\%$

➤ Model $F_+ = 0.257 \pm 0.002 \pm 0.006$

➤ 自共轭道强相位差参数 c_i/s_i 的测量

衰变	进展	BESIII过去结果
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$	进行中 20fb ⁻¹	JHEP 06(2025)086 7.93fb ⁻¹
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 K^+ K^-$	进行中 20fb ⁻¹	PRD 102, 052008(2020) 2.93fb ⁻¹
$D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 h^+ h^- (h = \pi, K)$	Unbinned联合测量: BAM827(Memo) 7.93fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	进行中 20fb ⁻¹	PRD 110, 112008(2024) 2.93fb ⁻¹
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	arXiv: 2502. 12873 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	进行中 20fb ⁻¹	-
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	进行中 20fb ⁻¹	-

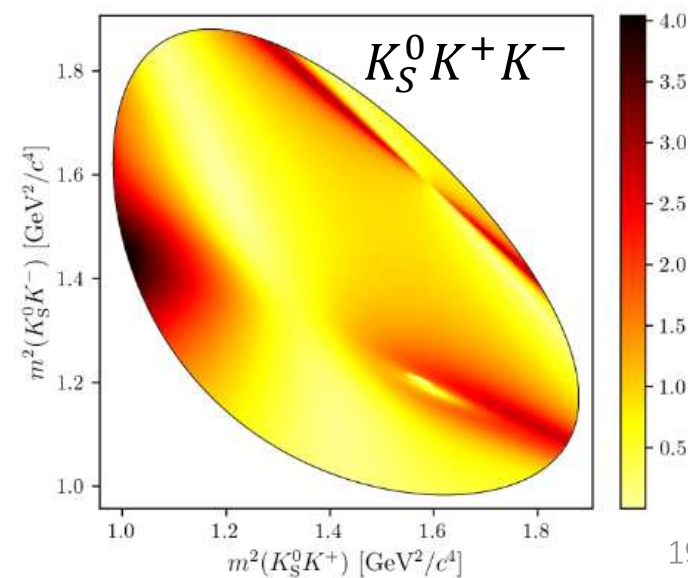
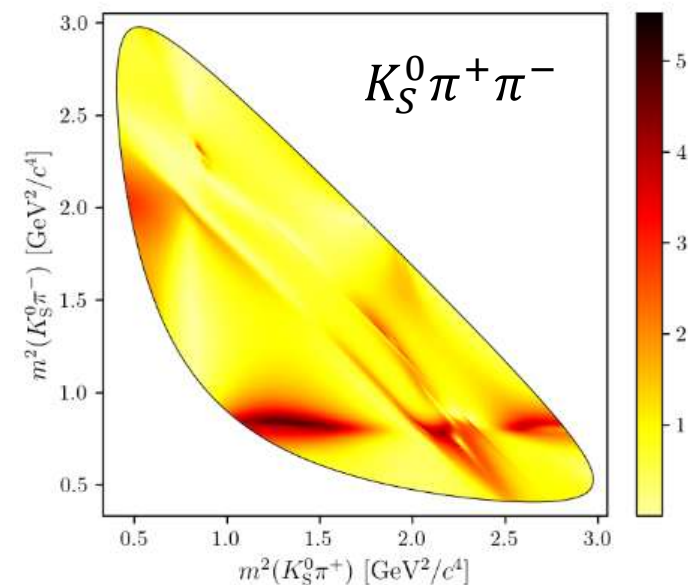


➤ $K_S^0 h^+ h^-$ ($h = \pi, K$): 对 γ 测量的误差约有 0.9° 的贡献

➤ $K^+ K^- \pi^+ \pi^-$: 该衰变道的首次测量, 在 $B^\pm \rightarrow DK^\pm, D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ 测量中对 γ 的误差贡献约为 10°

Unbinned: Optimal Fourier method

- BPGGSZ方法中，分bin过程相当于定义一个权重 ω_i ，对处于第 i 个bin中的事例： $\omega_i = 1$ ，对其他事例为0
- 为了充分利用相空间中每一个点的信息，通过不分bin的方法对衰变率作傅立叶展开
- 基于 B 介子衰变振幅和本底、效率等实验上的信息，定义optimal weight ω_z 来优化、提高对 γ 的灵敏度



➤ $B \rightarrow DK$ 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 $B \rightarrow Dh, D \rightarrow K_S^0 h'^+ h'^- (h^{(')} = \pi, K)$

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 $y_{\pm} = r_B \sin(\delta_B \pm \gamma)$

➤ BESIII强相差系数结果对 γ 的贡献

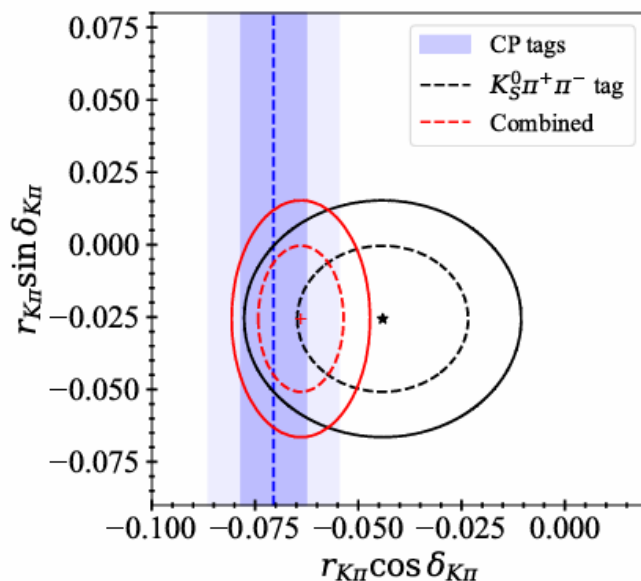
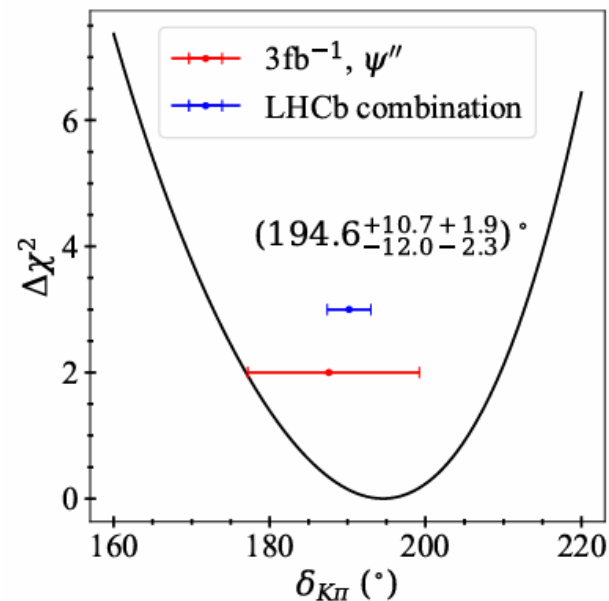
方法	BESIII数据样本	贡献
binned, toy	2.93fb^{-1}	1.4°
binned, toy	7.93fb^{-1}	1.0°
unbinned, toy	7.93fb^{-1}	1.1°

- 在binned测量中，提高BESIII统计量，可以降低所测输入参数对 γ 的误差贡献
- BESIII输入参数在两种方法中对 γ 的误差贡献近乎一致

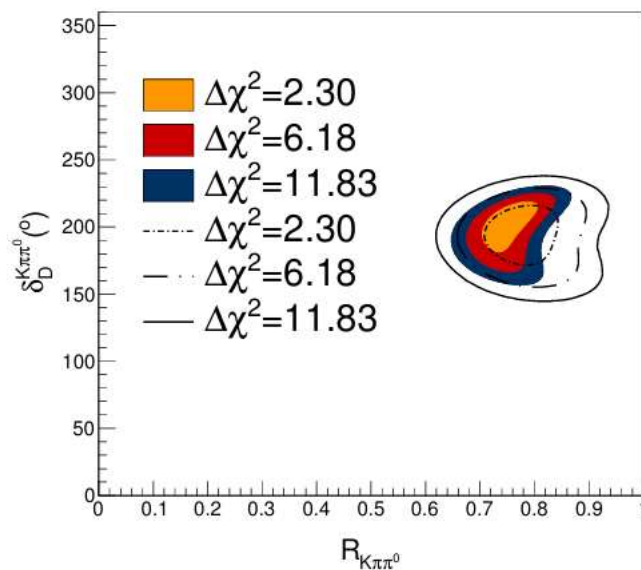
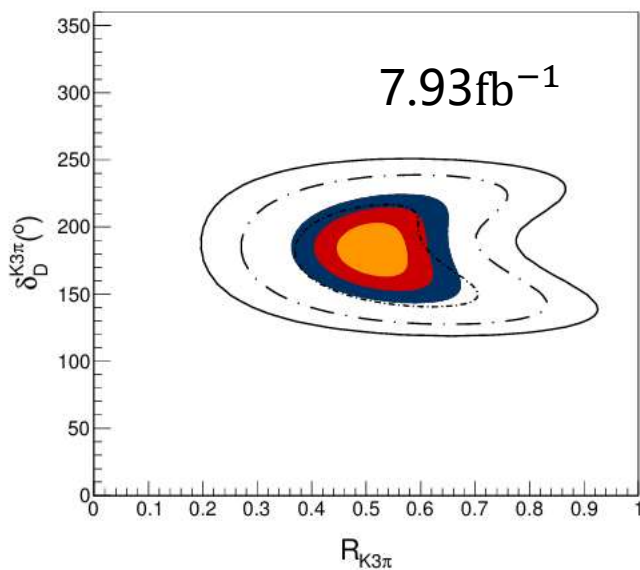
➤精确测量**关联因子**和**平均强相位差参数**

衰变道	进展	BESIII过去结果
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+$	r_D, δ_D : BAM00900(Journal review)	EPJC 82, 1009(2022)
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$	r_D, R_D, δ_D : BAM00899(CWR) 7.93fb^{-1}	JHEP 05, 164(2021)
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$		
$D^0 \rightarrow K_S^0 K^\mp \pi^\pm$	进行中 20fb^{-1}	-

关联因子、平均强相位差测量



- $\delta_{K\pi} = (192.8^{+11.0+1.9}_{-12.4-2.4})^{\circ}$
- 证明并利用**高能量点**下 $D^0 \bar{D}^0$ 的量子关联效应测量强相位参数
- 开辟了测量 D 介子强子参数和 $D^0 \bar{D}^0$ 混合参数的**新方法**



- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$ 过程有丰富的共振态
- 通过toy研究可以得到强相位参数对 γ 测量的影响

	7.9fb ⁻¹ BESIII data	Fix $K3\pi$ parameters
	9fb ⁻¹ LHCb data	9fb ⁻¹ LHCb data
Sensitivity on $\gamma(^{\circ})$	8.5	7.8

- 研究动机
- 研究内容
- 研究进展
- 总结

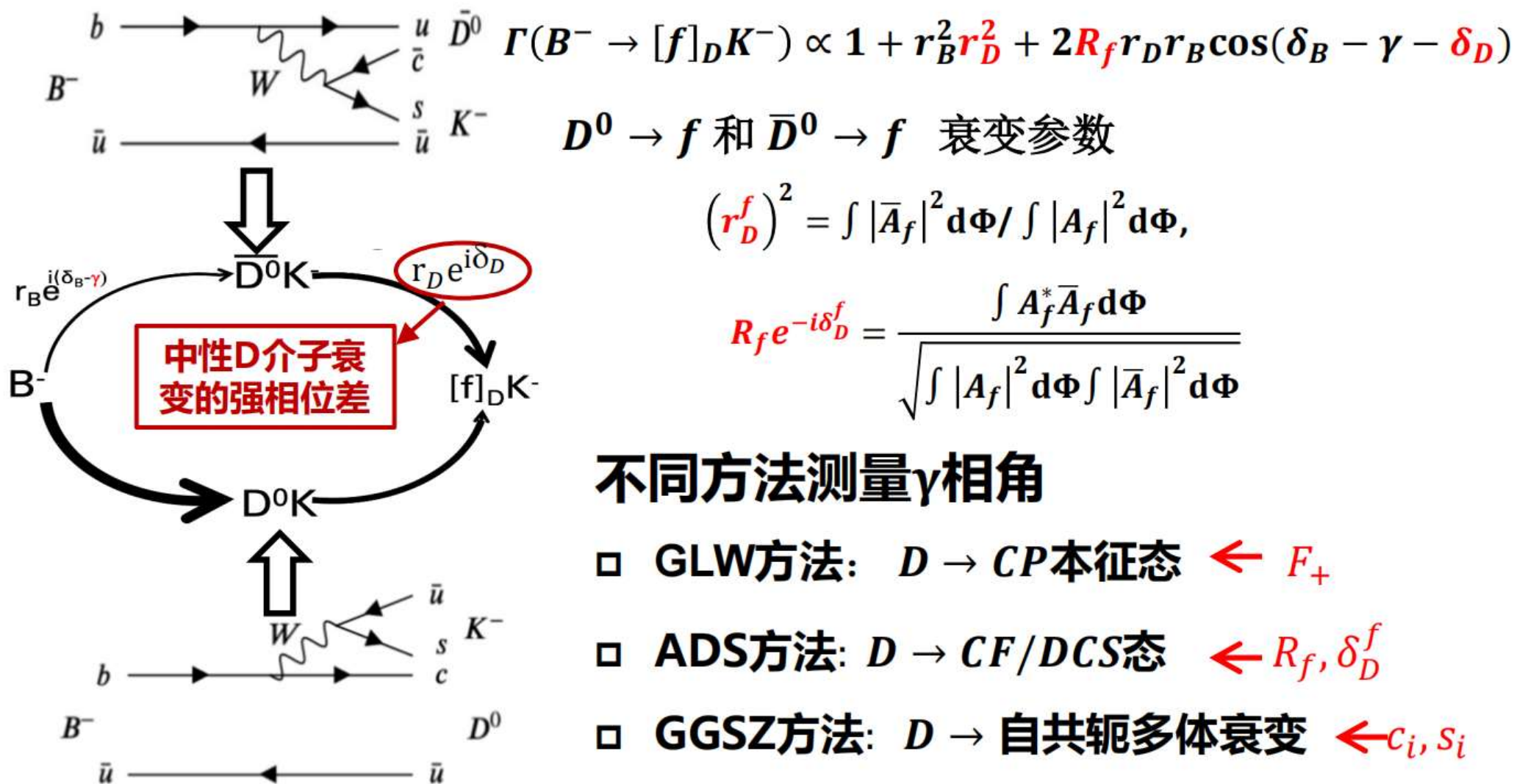
衰变道	测量量	现状
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$F_+/c_i s_i$	7.93 fb ⁻¹ F_+ finished; 20 fb ⁻¹ $c_i s_i$ on going
$D^0 \rightarrow K^+ K^- \pi^0$	$F_+/c_i s_i$	7.93 fb ⁻¹ F_+ finished
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	F_+	20 fb ⁻¹ BAM01001
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$	$F_+/c_i s_i$	2.93 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

- 在**3.773 GeV**能量点处产生的 $D^0\bar{D}^0$ 样本是开展**量子关联性精确测量**的最理想场所
- 利用BESIII上的 $\psi(3770)$ 数据，可以系统性地开展**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 **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**
- 相关工作正在有序开展，基于 **2.93 fb^{-1} 或 7.93 fb^{-1}** 的许多成果已经发表，敬请期待基于 **20 fb^{-1}** 的成果

谢谢！

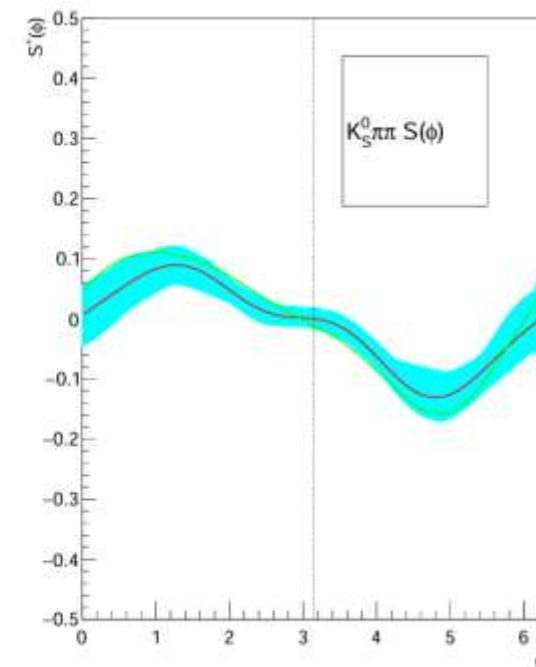
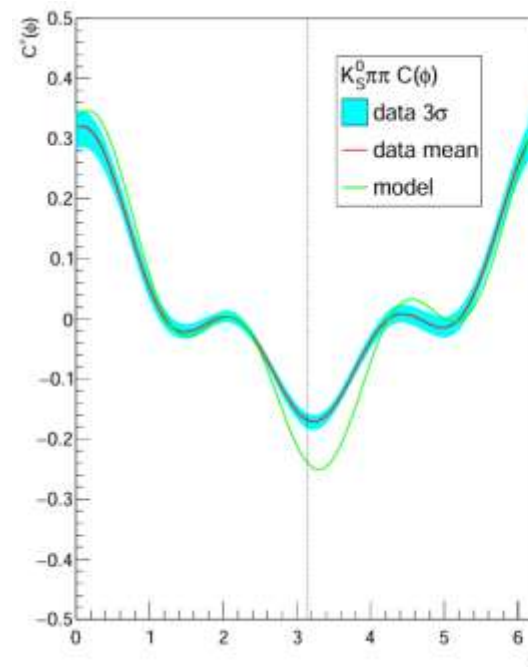
附录

强相位参数如何影响 γ



Unbinned: BESIII强相差系数结果

Order	a_n^C	b_n^C	a_n^S	b_n^S
$K_S^0 \pi^+ \pi^-$				
0	0.0690 ± 0.0038	-	-0.0185 ± 0.0087	-
1	0.1731 ± 0.0028	0.0099 ± 0.0023	0.0084 ± 0.0068	0.0940 ± 0.0052
2	0.0416 ± 0.0031	0.0067 ± 0.0021	0.0134 ± 0.0068	0.0186 ± 0.0064
3	0.0739 ± 0.0030	0.0210 ± 0.0024	-0.0025 ± 0.0065	-0.0142 ± 0.0067
$K_L^0 \pi^+ \pi^-$				
0	0.1702 ± 0.0038	-	-0.0123 ± 0.0100	-
1	0.2363 ± 0.0034	-0.0063 ± 0.0015	-0.0077 ± 0.0079	0.0749 ± 0.0062
2	0.1236 ± 0.0030	-0.0104 ± 0.0020	-0.0128 ± 0.0074	0.0491 ± 0.0080
3	0.1251 ± 0.0031	-0.0105 ± 0.0022	-0.0030 ± 0.0077	0.0295 ± 0.0071
$K_S^0 K^+ K^-$				
0	0.0383 ± 0.0108	-	0.0360 ± 0.0232	-
1	0.2806 ± 0.0090	-0.0124 ± 0.0055	0.0293 ± 0.0168	0.0985 ± 0.0206
2	0.0504 ± 0.0078	-0.0020 ± 0.0063	-0.0298 ± 0.0143	-0.0338 ± 0.0271
$K_L^0 K^+ K^-$				
0	0.0652 ± 0.0107	-	0.0183 ± 0.0235	-
1	0.2775 ± 0.0091	-0.0116 ± 0.0055	0.0307 ± 0.0172	0.0846 ± 0.0243
2	0.0715 ± 0.0079	-0.0110 ± 0.0062	-0.0236 ± 0.0145	-0.0306 ± 0.0275



➤ 基于测得的强相差系数，可画出强项差参数 $C(\phi)$, $S(\phi)$ 的分布，并与模型预测值比较