



STCF上量子关联 $D\bar{D}$ 衰变性质研究

Ying-Hao Wang¹, Yu Zhang², Pei-Rong Li¹
Xiao-Rui Lyu³, Yang-Heng Zheng³

¹LZU ²USC ³UCAS

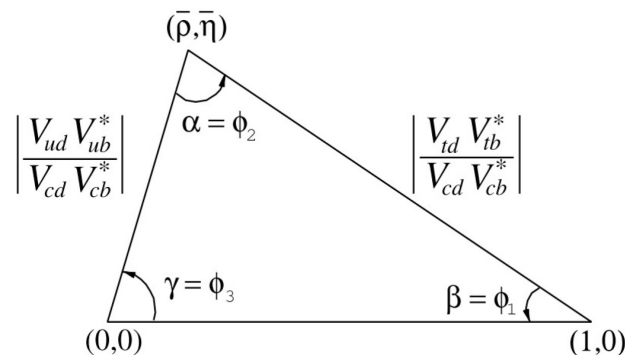
CKM幺正三角形:

- CKM矩阵元中的复相位是标准模型中CP破坏的重要来源，CKM矩阵的幺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:

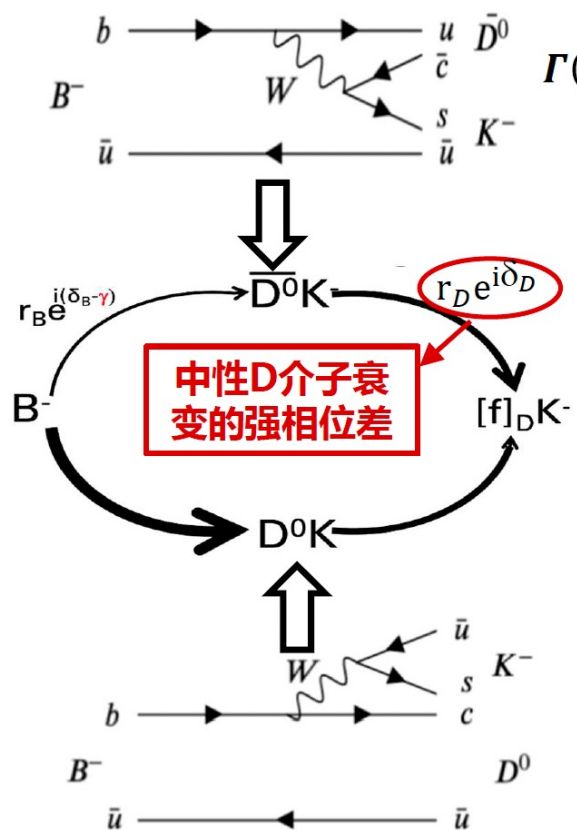
$$V^\dagger V = 1 \Rightarrow V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$



- B 介子衰变用来测量CKM矩阵CP相角 α, β, γ
- 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 γ 的测量:

- 通过 $B \rightarrow DK$ 过程测量, 是唯一可以在树阶测量的相角



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

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

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

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

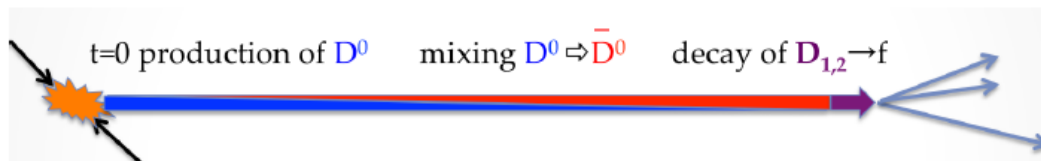
不同方法测量 γ 相角

- 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 $\leftarrow c_i, s_i$

- 中性粲介子衰变的强相位差参数是关键输入

中性 D 介子混合和CP破坏:

- 质量本征态 $\neq$ 味道本征态



$$|D_{1,2}\rangle = p |D^0\rangle \pm q |\bar{D}^0\rangle$$

p 和 q 是负数, 满足 $|p|^2 + |q|^2 = 1$, 决定了混合的强度与相位

- $D^0\bar{D}^0$ 混合与CP破坏参数:

$$x = (m_1 - m_2)/\Gamma$$

$$y = (\Gamma_1 - \Gamma_2)/2\Gamma$$

$$|q/p|$$

$$\phi = \arg(q/p)$$

混合

CP破坏

- D^0 介子包含粲夸克是研究上型夸克系统中振荡与 CP 破坏的关键场所
- 任何显著的 CP 破坏信号都可能是新物理的证据

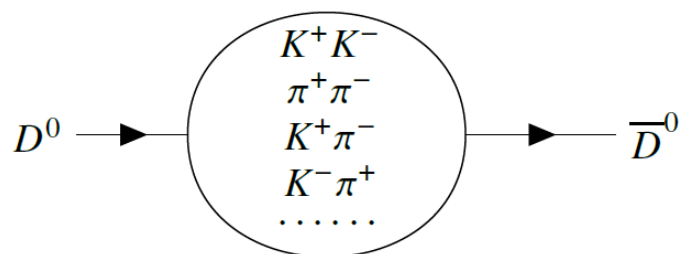
中性D介子混合:

- 标准模型下, $D^0\bar{D}^0$ 的混合来自于两类过程。

arXiv: hep-ph/0310076

✓ 短程过程:

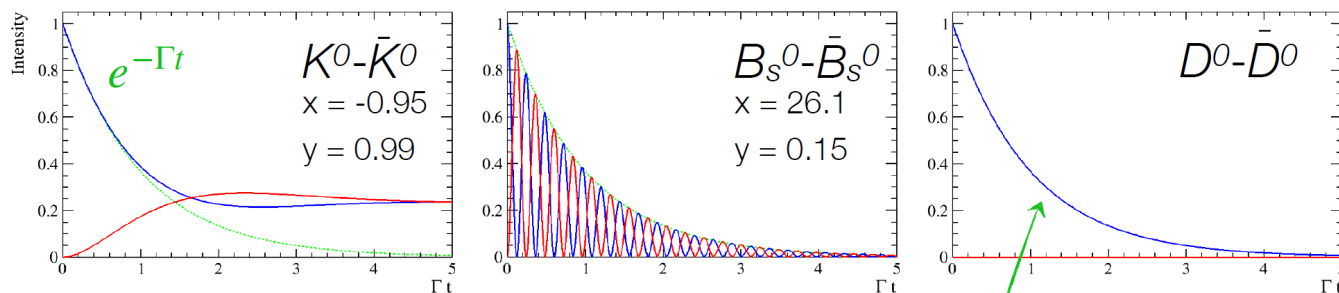
GIM机制压低, 发生混合的几率很小
贡献来自于箱图, $(x, y) \sim 10^{-7}$



✓ 长程过程:

强子中间态过程, $(x, y) \sim 10^{-3}$

非微扰能区, 理论计算十分困难

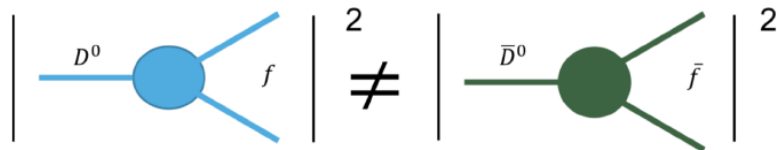


Tiny mixing in charm!

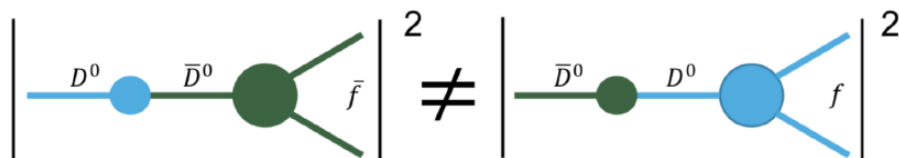
中性D介子CP破坏:

直接CP破坏:

$$\checkmark \quad |A_f|^2 \neq |\bar{A}_{\bar{f}}|^2$$



间接CP破坏

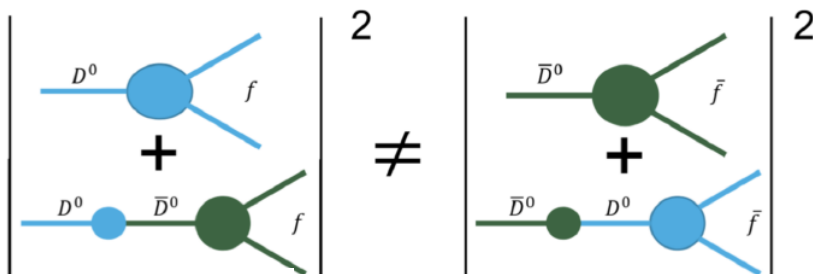


• 混合中的CP破坏

$$\checkmark \quad |q/p| \neq 1$$

• 混合和衰变之间的干涉导致的CP破坏

$$\checkmark \quad \arg(q/p) \neq 0$$



中性D介子混合参数测量现状:

- 混合参数的世界平均值由B工厂主导
- 通过 D^0 衰变的时间演化信息来提取混合参数
- 自共轭衰变
- 产生时为味道本征态的D介子数据($D^{*+} \rightarrow D^0(K_S\pi^+\pi^-)\pi^+$)

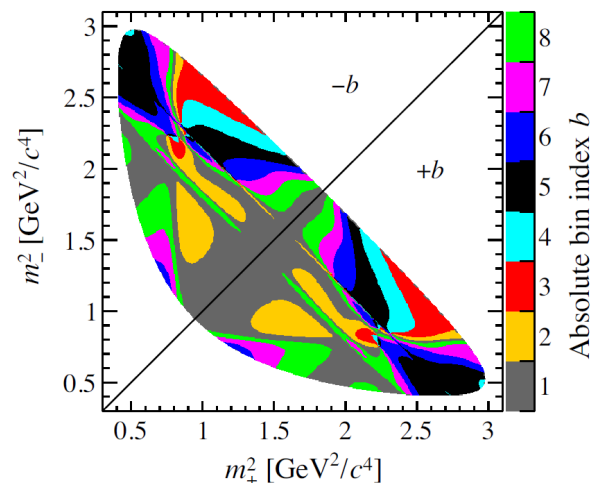
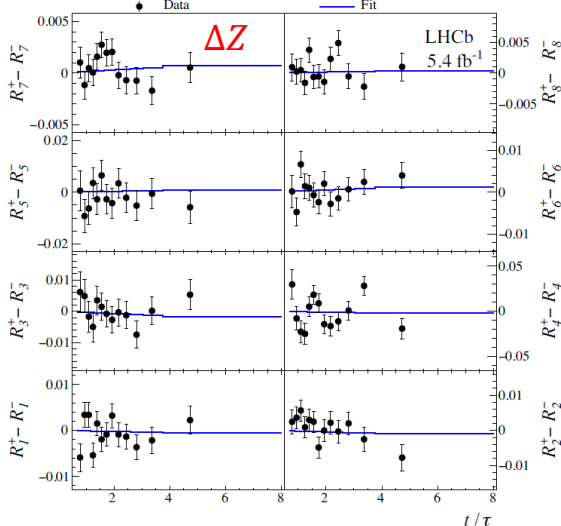
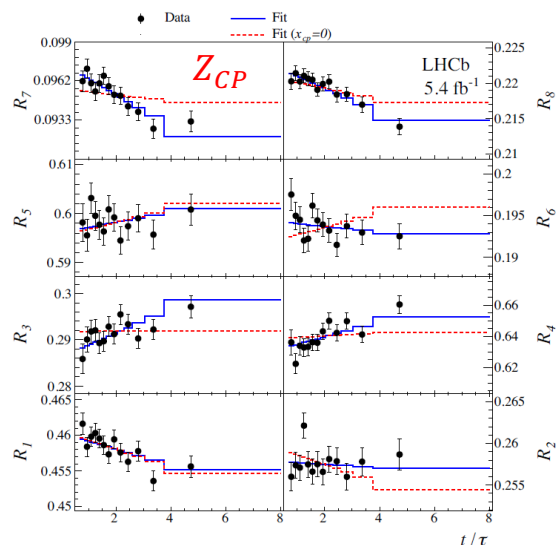
Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 111801
Erratum ibid. 131 (2023) 079901

See also in [Phys. Rev. D 111 (2025) 11, 112011]
by Belle II

混合和间接CP破坏参数

$$p_{bj}^{\pm} \propto r_b + r_b \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} \text{Re}(z_{CP}^2 - \Delta z^2) + \frac{\langle t^2 \rangle_j}{4} |z_{CP} \pm \Delta z|^2 + \sqrt{r_b} \langle t \rangle_j \text{Re}[X_{\pm b}(z_{CP} \pm \Delta z)]$$

强相位差参数



首次观测到中性D介子的质量差

$$x = (3.98_{-0.54}^{+0.56}) \times 10^{-3}$$

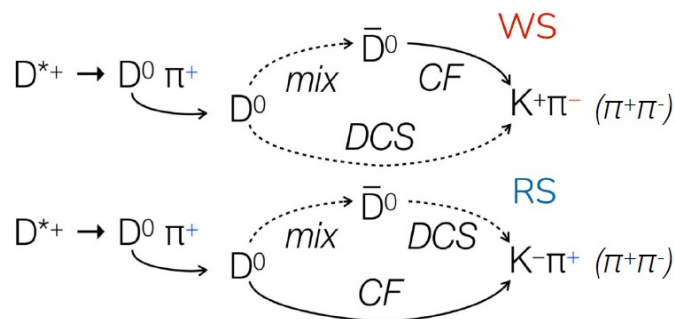
$$y = (4.6_{-1.4}^{+1.5}) \times 10^{-3}$$

$$|q/p| = 0.996 \pm 0.052$$

$$\phi = -0.056_{-0.051}^{+0.047}$$

中性D介子混合参数测量现状:

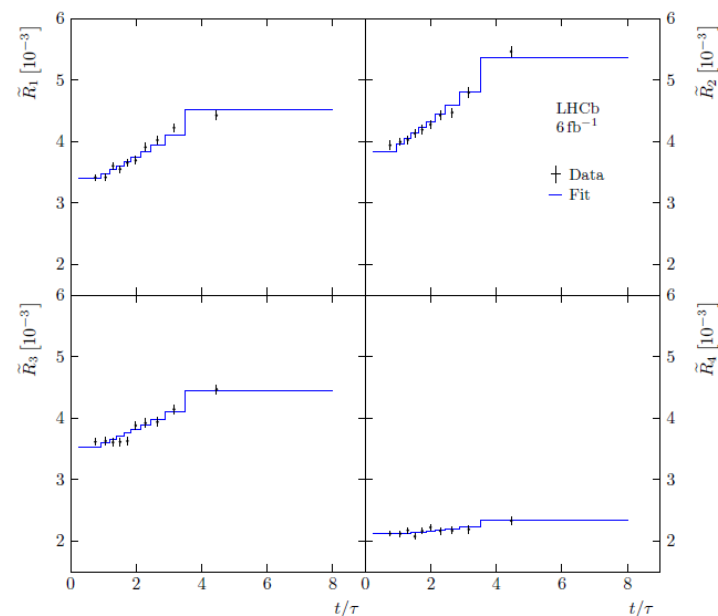
- 准味道本征态
- 产生时为味道本征态的D介子数据($D^{*+} \rightarrow D^0(K^\pm n\pi)\pi^+$)



$$R(t) \equiv \frac{\Gamma[D^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\pi^-](t)}{\Gamma[D^0 \rightarrow K^-\pi^+\pi^-\pi^+](t)} \approx r^2 - r\kappa y' \frac{t}{\tau} + \frac{x^2 + y^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2,$$

时间依赖的衰变率

arXiv: 2510.04963

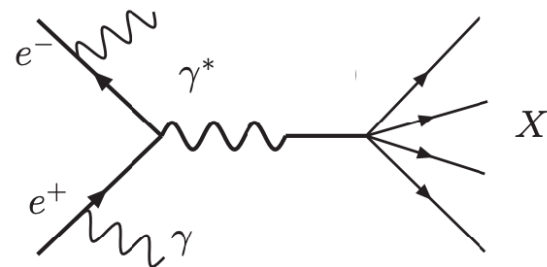


e^+e^- 对撞中的量子关联:

- $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow X$ 过程中满足**C宇称守恒**

- ✓ 虚光子 γ^* 的C宇称为-1 (奇C宇称)

- ✓ 末态体系X的C宇称也需为-1 → 量子关联



- $e^+e^- \rightarrow D^0\bar{D}^0$ 过程

- ✓ 阈值产生的 $D^0\bar{D}^0$ 系统为奇C宇称量子关联, 已被CLEO和BESIII实验证实

- ✓ 应用于测量 D^0 介子衰变中的强相差参数, 为 γ 角测量、 D^0 介子混合以及CP破坏研究提供输入

- $e^+e^- \rightarrow XD^0\bar{D}^0$ 过程

- ✓ BESIII实验首次研究了伴随额外粒子(γ/π^0)后, $D^0\bar{D}^0$ 系统的量子关联

- ✓ 为研究提供了新的机遇 {
 - 强相差参数测量
 - 混合参数测量

区别于B工厂, 时间无关的测量

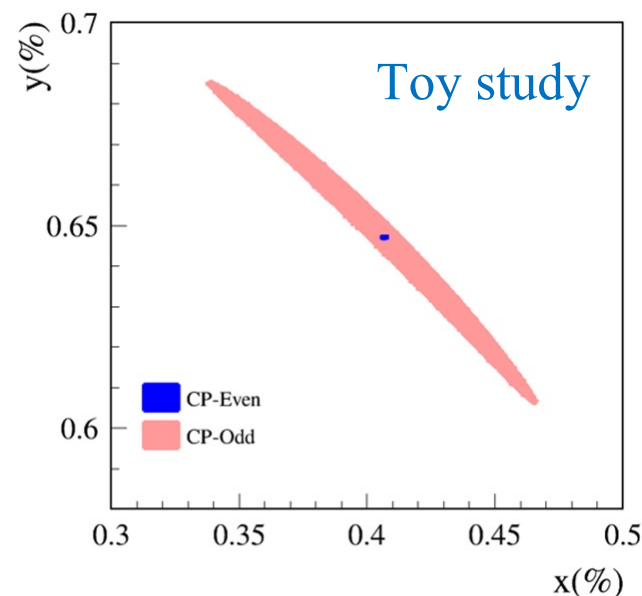
- STCF的高亮度数据样本有望进一步提升量子关联及相关物理参数的测量精度

中性 D 介子对量子关联:

- $D^0\bar{D}^0$ 量子关联衰变率:

$$\begin{aligned} \frac{\Gamma_C(S;T)}{|A_S|^2|A_T|^2} \propto & (2+C)(x^2+y^2)\left[\left|\frac{p}{q}\right|^2 + (r_D^S)^2(r_D^T)^2\left|\frac{q}{p}\right|^2 + 2CR_S R_T r_D^S r_D^T \cos(\delta_D^S + \delta_D^T - 2\phi)\right] \\ & + [2 - (2+C)(x^2 - y^2)][(r_D^S)^2 + (r_D^T)^2 + 2CR_S R_T r_D^S r_D^T \cos(\delta_D^S - \delta_D^T)] \\ & - \underline{2(1+C)y[R_T r_D^T \left(\left|\frac{p}{q}\right| + \left|\frac{q}{p}\right| (r_D^S)^2 \cos(\delta_D^T - \phi) + CR_S r_D^S \left(\left|\frac{p}{q}\right| + \left|\frac{q}{p}\right| (r_D^T)^2 \cos(\delta_D^S - \phi)\right)}\right] \\ & + \underline{2(1+C)x[R_T r_D^T \left(\left|\frac{p}{q}\right| - \left|\frac{q}{p}\right| (r_D^S)^2 \sin(\delta_D^T - \phi) + CR_S r_D^S \left(\left|\frac{p}{q}\right| - \left|\frac{q}{p}\right| (r_D^T)^2 \sin(\delta_D^S - \phi)\right)}\right]. \end{aligned}$$

- 偶 C 宇称($C = +1$)量子关联的 D 介子对衰变率中含有混合参数和CP破坏参数的一阶项，测量敏感度更高
- 联合奇 C 宇称($C = -1$)量子关联的 D 介子对可同时测量混合参数、CP破坏参数和强相差参数等



STCF模拟样本:

- 质心系能量: 3.773 GeV 和 4.030 GeV
- 积分亮度: 每个能量点1 ab⁻¹
- 模拟与重建框架基于OSCAR 2.7.0

	Component	Final State	$\mathcal{C}(D^0\bar{D}^0)$
Coherent	$D^0\bar{D}^0$	$D^0\bar{D}^0$	Odd
	$D^{*0}\bar{D}^0$	$\gamma D^0\bar{D}^0$	Even
		$\pi^0 D^0\bar{D}^0$	Odd
	$D^{*0}\bar{D}^{*0}$	$\gamma\pi^0 D^0\bar{D}^0$	Even
		$\gamma\gamma(\pi^0\pi^0)D^0\bar{D}^0$	Odd
Incoherent	$D^{*+}D^{*-}$	$\pi^+\pi^-D^0\bar{D}^0$	-
	$D^{*+}D^-$	$\pi^+D^0D^-$	-

测量方法:

- $e^+e^- \rightarrow XD^0\bar{D}^0$, 末态系统量子关联

- 态函数为:

$$\Psi = 1/\sqrt{2}(|D^0\rangle|\bar{D}^0\rangle + C|\bar{D}^0\rangle|D^0\rangle)$$

- 模型无关的测量
- 双标记方法, 通过不同衰变标记重建信号衰变

- 信号道: $K\pi$ 、 $K\pi\pi^0$ 、 $K\pi\pi\pi$.

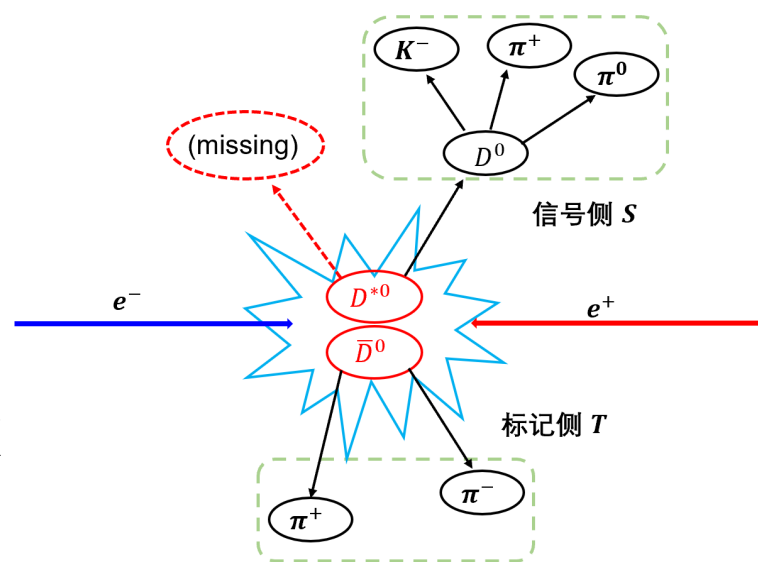
- 标记道:

✓ Flavor tag: $K\pi$, $K\pi\pi^0$, $K\pi\pi\pi$ (like-sign and opposite sign for $K\eta\pi$).

✓ CP -even tag: KK , $\pi\pi$, $\pi\pi\pi^0$.

✓ CP -odd tag: $K_S\pi^0$, $K_S\eta$.

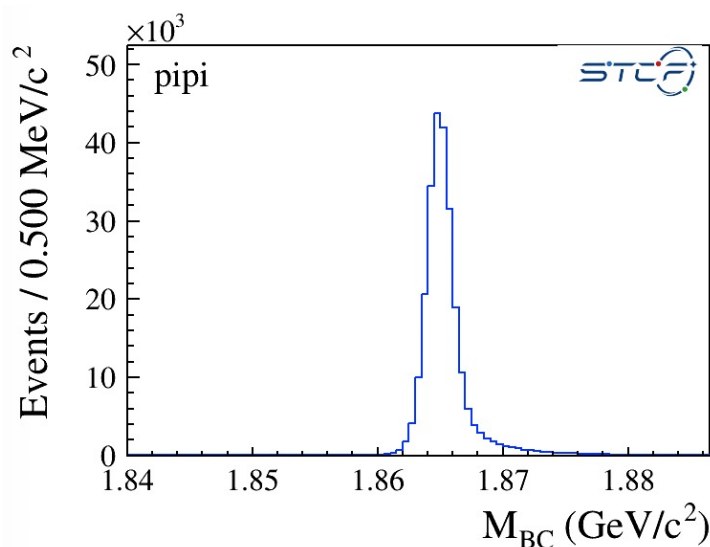
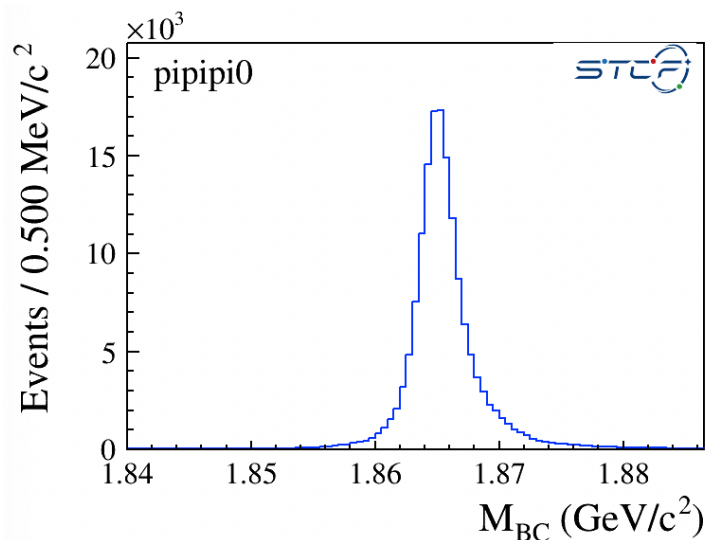
✓ Self-conjugate tag: $K_S\pi\pi$.



事例筛选:

- **Charged track**
 - ✓ $|V_r| < 1.0\text{cm}, |V_z| < 10.0\text{cm}, |\cos \theta| < 0.93.$
- **PID**
 - ✓ $K: \text{prob}(K) > 0 \ \&\& \ \text{prob}(K) > \text{prob}(\pi).$
 - ✓ $\pi: \text{prob}(\pi) > 0 \ \&\& \ \text{prob}(\pi) > \text{prob}(K).$
- **K_S^0**
 - ✓ π^+ and π^- with $|V_z| < 20\text{cm}, |\cos \theta| < 0.93$, and no PID are performed for π .
 - ✓ Primary vertex fit, $\chi^2 < 100.$
 - ✓ Second vertex fit, $L/\sigma > 2.$
 - ✓ $0.487 < M(\pi^+\pi^-) < 0.511 \text{ GeV}/c^2.$
- **π^0/η**
 - ✓ $E_{\text{barrel}} > 0.025 \text{ GeV} (\cos \theta < 0.8), E_{\text{encap}} > 0.05 \text{ GeV} (0.86 < \cos \theta < 0.92).$
 - ✓ $0.115 < M(\gamma\gamma) < 0.150 \text{ GeV}/c^2$ for $\pi^0.$
 - ✓ $0.480 < M(\gamma\gamma) < 0.580 \text{ GeV}/c^2$ for $\eta.$
 - ✓ 1C kinematic fit, $\chi^2 < 200.$

$\psi(3770) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$ 过程:

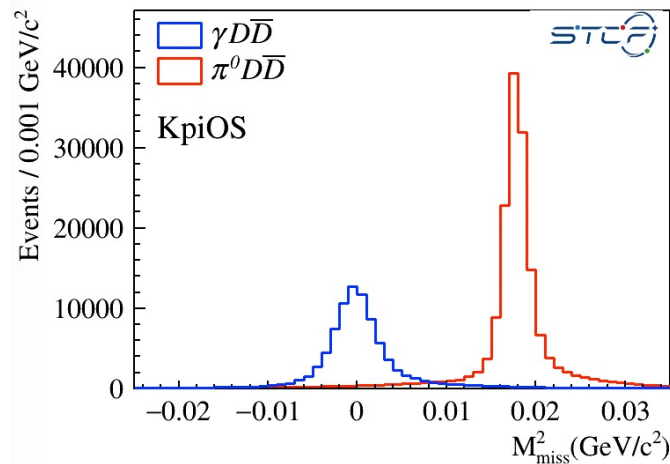
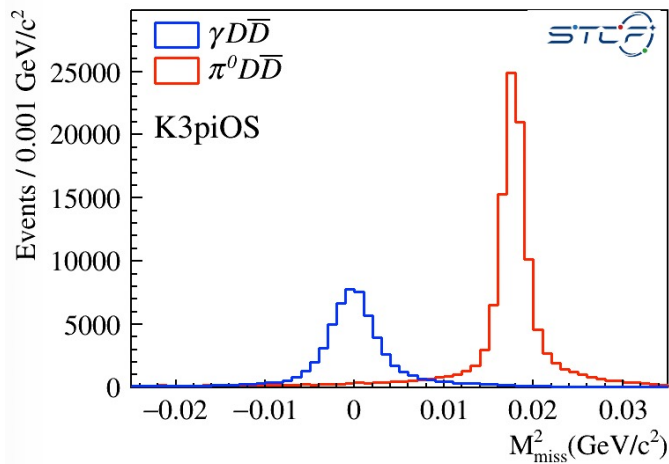


- 全重建方法：同时重建两个 D 介子
- 利用能动量守恒，计算“能量差”和“束流约束质量”

✓ 能量差: $\Delta E = E_{rec} - E_{beam}$

✓ 束流约束质量: $M_{BC} = \sqrt{E_{beam}^2 - \vec{p}_{rec}^2}$

高能量点量子关联 $D\bar{D}$ 过程:



部分重建方法:

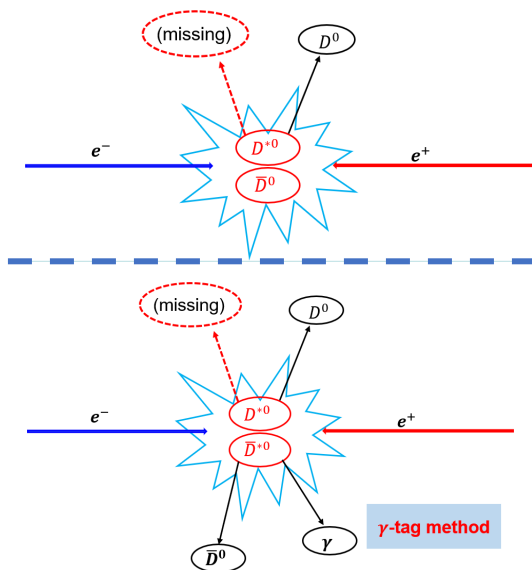
- $D^* \bar{D} \rightarrow \gamma / \pi^0 D \bar{D}$

- ✓ 利用两个 D 介子的“缺失质量平方”区分

- $D^* \bar{D}^{*0} \rightarrow \gamma\gamma / \gamma\pi^0 D \bar{D}$

- ✓ 重建其中一个 D^* 衰变出的光子

- ✓ 利用两个 D 介子和光子的“缺失质量平方”区分

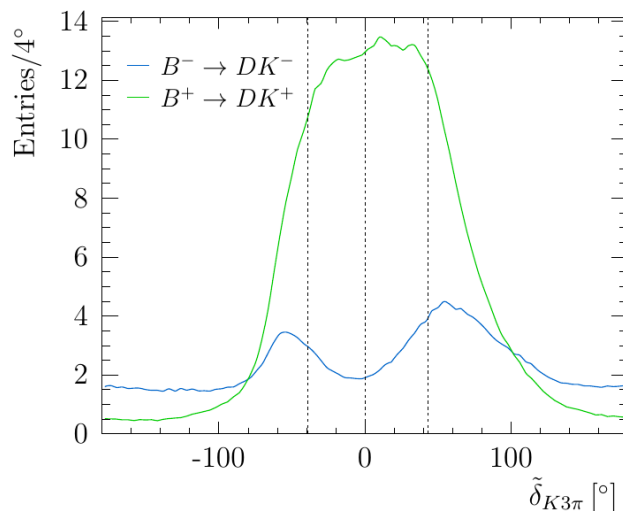
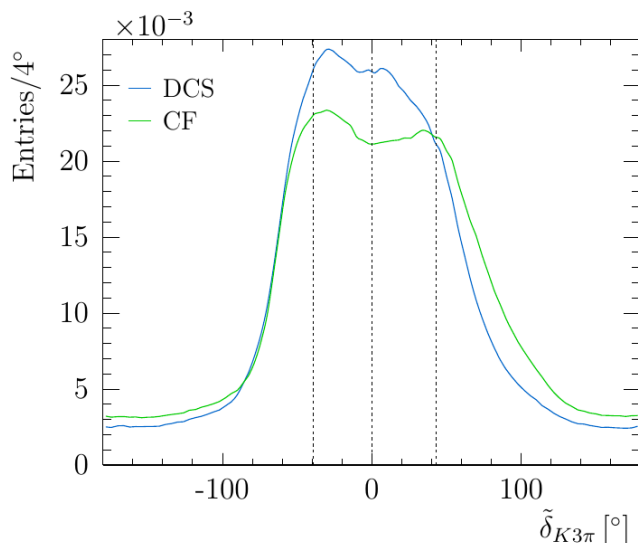


$D \rightarrow K\pi\pi\pi$ 衰变的分bin方案:

- 根据局域强相位将衰变相空间划分为4个区间, 使各区间内Cabibbo允许衰变的事例数近似相等

Phys. Lett. B 802 (2020) 135188

$$\tilde{\delta}_D^{K3\pi} = \arg[A_{\bar{D}^0 \rightarrow K+3\pi}(\mathbf{x})A_{D^0 \rightarrow K+3\pi}^*(\mathbf{x})] - \arg\left[\int A_{\bar{D}^0 \rightarrow K+3\pi}(\mathbf{x}')A_{D^0 \rightarrow K+3\pi}^*(\mathbf{x}')d\mathbf{x}'\right]$$



- 各区间内的相干因子 $R_{K3\pi,i}$ 和平均强相位差 $\delta_D^{K3\pi,i}$ 已由实验测量, 相应的振幅比 $r_D^{K3\pi,i}$ 可表示为

$$r_D^{K3\pi,i} = \sqrt{\frac{\bar{K}_i}{K_i}} r_D^{K3\pi}.$$

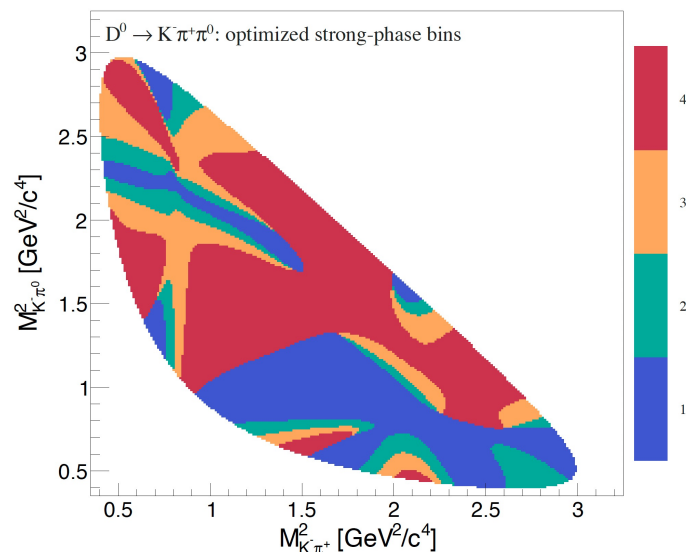
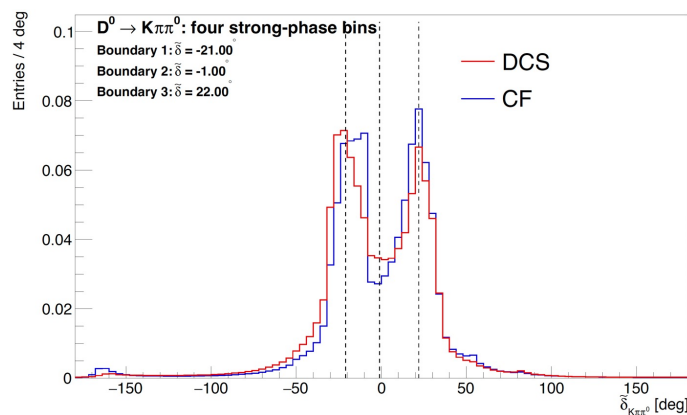
$D \rightarrow K\pi\pi^0$ 衰变的分bin方案:

- 依据振幅模型给出的 Cabibbo 允许与双 Cabibbo 压低衰变振幅之间的强相位差，将 D 介子衰变相空间划分为若干互不重叠的区域。

$$\Delta\delta_{K\pi\pi^0} = \arg[A_{\bar{D}^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^0} A_{D^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^0}^*]$$

- 参考 $D \rightarrow K3\pi$ 衰变的分箱方案，将 $D \rightarrow K\pi\pi^0$ 衰变相空间划分为4个区间

Bin	Range
1	$-180^\circ < \Delta\delta_{K\pi\pi^0} < -21^\circ$
2	$-21^\circ < \Delta\delta_{K\pi\pi^0} < -1^\circ$
3	$1^\circ < \Delta\delta_{K\pi\pi^0} < 22^\circ$
4	$22^\circ < \Delta\delta_{K\pi\pi^0} < 180^\circ$



✓ 提高 D 介子混合参数的测量敏感度

联合 χ^2 拟合:

- 构造联合 χ^2 : $\chi_{tot}^2 = \chi_{+/-}^2 + \chi_{\psi(3770)}^2$
- 针对每一项 χ^2 :

$$\chi^2 = \Delta_{FL} V_{FL}^{-1} \Delta_{FL}^T + \Delta_{CP} V_{CP}^{-1} \Delta_{CP}^T + \Delta_{K_S \pi \pi} V_{K_S \pi \pi}^{-1} \Delta_{K_S \pi \pi}^T$$

- 当前的协方差矩阵仅包含统计误差 $V_{ij} = \sigma_{stat.,ij}^2$
- 强相位差参数参与联合拟合, 其精度主要由 $\sqrt{s} = 3.773$ GeV量子关联样本决定

输入参数	数值	参考文献
$\mathcal{B}(D^{*0} \rightarrow \gamma D^0) [\%]$	35.3 ± 0.9	PDG
$\mathcal{B}(D^{*0} \rightarrow \pi^0 D^0) [\%]$	64.7 ± 0.9	PDG
$\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) [\%]$	98.823 ± 0.034	PDG
$F_+^{\pi^+ \pi^- \pi^0}$	0.9406 ± 0.0042	Phys. Rev. D 111 , 012007 (2025)
c_i, s_i, K_i, K_{-i}	—	JHEP 06 (2025) 086

强子参数敏感度研究:

- 与当前实验结果相比，STCF预计可显著提高多体 D 介子衰变相干因子和强相位差参数的测量精度
- $r_D^{K\pi}$ 已受到现有时间相关测量的较强约束，而STCF预计可以高精度测量 $\delta_D^{K\pi}$ 。
- 高精度的强子参数输入有助于提高中性 D 介子混合参数和CKM相角 γ 的测量精度

参数	STCF预期精度	当前实验结果	参考文献
$r_D^{K\pi^0}$ (%)	0.013	4.41 ± 0.08	arXiv:2602.13002
$R_{K\pi\pi^0}$	0.0021	0.75 ± 0.03	
$\delta_D^{K\pi\pi^0}$ (°)	0.41	209^{+7}_{-8}	
$r_D^{K3\pi}$ (%)	0.011	5.51 ± 0.05	
$R_{K3\pi}^{(1)}$	0.0083	0.72 ± 0.14	LHCb-CONF-2024-004
$R_{K3\pi}^{(2)}$	0.0043	$0.65^{+0.08}_{-0.07}$	
$R_{K3\pi}^{(3)}$	0.0032	$0.80^{+0.07}_{-0.06}$	
$R_{K3\pi}^{(4)}$	0.0098	$0.54^{+0.18}_{-0.19}$	
$\delta_D^{K3\pi,(1)}$ (°)	0.50	124^{+10}_{-8}	
$\delta_D^{K3\pi,(2)}$ (°)	0.99	170^{+14}_{-12}	
$\delta_D^{K3\pi,(3)}$ (°)	0.79	179 ± 11	
$\delta_D^{K3\pi,(4)}$ (°)	0.48	260^{+10}_{-13}	
$r_D^{K\pi}$ (%)	0.015	$5.855^{+0.009}_{-0.010}$	
$\delta_D^{K\pi}$ (°)	0.36	191.4 ± 2.4	

混合参数与间接CPV参数灵敏度研究:

- $D \rightarrow K\pi\pi^0$ 相空间进行分 bin 后，混合参数和间接 CP破坏参数的预期精度均得到改善
- STCF有望测量中性 D 介子混合及间接CP破坏参数，并利用阈值量子关联样本提供独立约束，与时间相关测量形成互补。

参数	STCF预期精度 $K\pi\pi^0$ 不分 bin	STCF预期精度 $K\pi\pi^0$ 分 bin	HFLAV 2025
$x (10^{-3})$	0.405	0.293	4.05 ± 0.43
$y (10^{-3})$	0.221	0.195	6.36 ± 0.24
$ q/p $	0.0227	0.0210	$0.983^{+0.015}_{-0.014}$
$\phi (^\circ)$	1.55	1.44	$-1.51^{+1.03}_{-1.06}$

总结:

量子关联的 $D\bar{D}$ 系统是当前与未来粲物理领域研究的重要平台

- BESIII实验正在基于 $\sqrt{s} = 3.773\text{GeV}$ 以及更高能量点($4.130\text{GeV} \sim 4.230\text{ GeV}$)数据开展相关研究
 - ✓ 强相差参数
 - ✓ 混合参数
- 未来超级陶粲工厂上的相关研究
 - ✓ 强相差参数、混合参数以及间接CP破坏参数的精确测量
 - ✓ 与LHCb(Upgrade)、Belle II等实验在粲介子混合和CP破坏方面形成互补

谢谢大家！

附录

效率对比:

$D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ signal mode

	STCF 3773	BESIII 3773
K3piOS	19.33	12.7
K3piLS	18.37	11.6
KpiOS	30.97	25.2
KpiLS	30.17	19.4
pipipi0	19.21	15.3
pipi	32.09	27.9
KK	29.37	26.5
Kspi0pi0	9.47	6.6
Kspi0	16.55	16.0
Kseta	16.94	13.3
Ksimg	8.19	5.7
Ksetap	11.63	7.8
Kspipi	18.36	14.2

$D \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$ signal mode

	STCF 3773	BESIII 3773
K3piOS	20.48	12.4
K3piLS	19.81	11.2
Kpipi0OS	16.95	11.6
Kpipi0LS	16.50	10.7
KpiOS	28.03	23.8
KpiLS	27.89	18.3
pipipi0	18.01	15.2
pipi	29.44	27.3
KK	27.49	25.1
Kspi0pi0	8.90	6.3
Kspi0	16.26	15.0
Kseta	14.95	12.5
Ksimg	8.04	5.5
Ksetap	11.14	7.6
Kspipi	17.56	12.9

$D \rightarrow K^- \pi^+$ signal mode

	STCF 3773	BESIII 3773
KpiOS	48.51	-
KpiLS	48.71	-
pipipi0	30.47	28.6
pipi	49.65	48.1
KK	46.63	44.5
Kspi0pi0	15.65	12.8
Kspi0	27.67	29.0
Kseta	28.18	24.8
Ksimg	13.74	10.8
Ksetap	19.50	14.3
Kspipi	30.62	-