

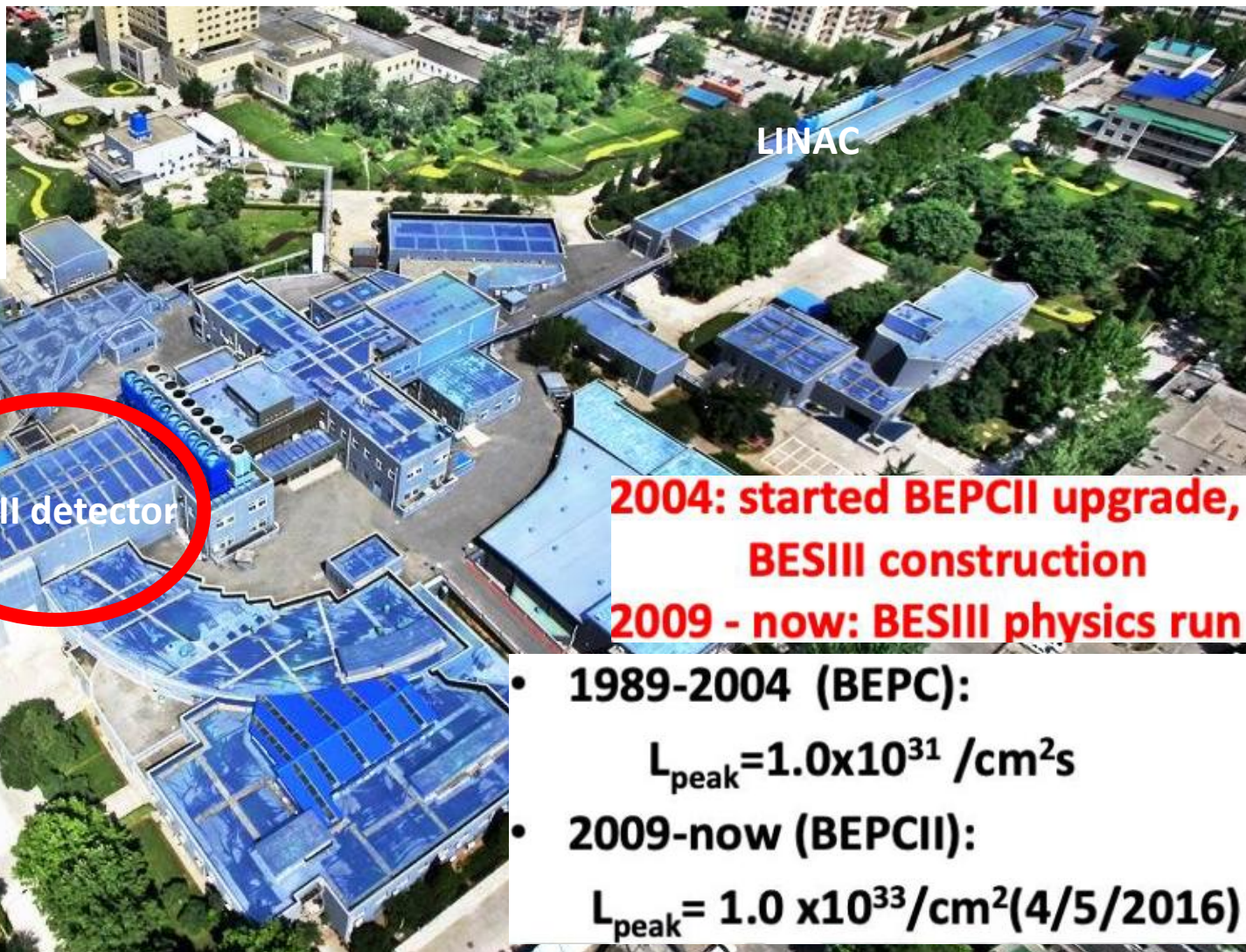
Hadronic charm hadron decays at BESIII

卢宇
中南大学物理学院
2025年8月

On behalf of BESIII Collaboration



BESIII



Analyses with amplitude analysis technique involved

D_s^+ 非轻衰变的实验研究

- $D_s^+ \rightarrow \omega \rho^+$ ([PhysRevLett.134.201902](#))
- $D_s^+ \rightarrow f_0(980) \rho^+$ 以及 $\mathcal{B}(\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) / \mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)$ 异常 ([PhysRevLett.134.011904](#))
- $\mathcal{B}(\phi \rightarrow K_S^0 K_L^0) / \mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)$ 异常以及 $K_S^0 - K_L^0$ 不对称性研究 ([arXiv:2503.11383](#))

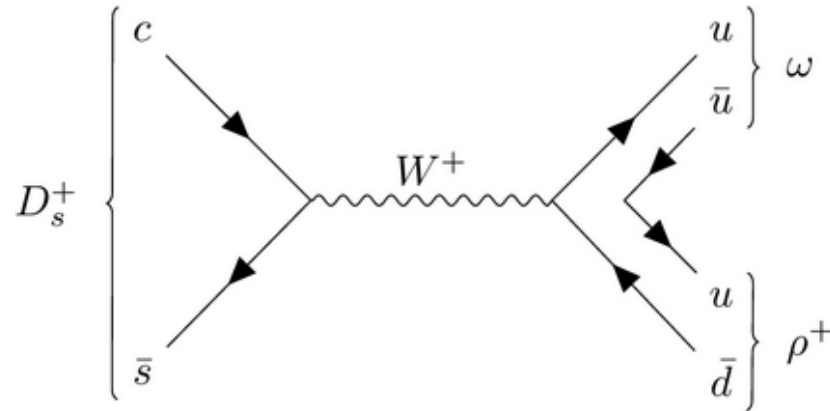
D^0 和 D^+ 非轻衰变的实验研究

- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$ 的振幅分析研究 ([JHEP05\(2025\)195](#))
- $a_0(980)^+$ 谱形异常 ([arXiv:2505.12086](#))

Λ_c^+ 非轻衰变的实验研究

- $\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma(1380) \eta$ ([PhysRevLett.134.021901](#))

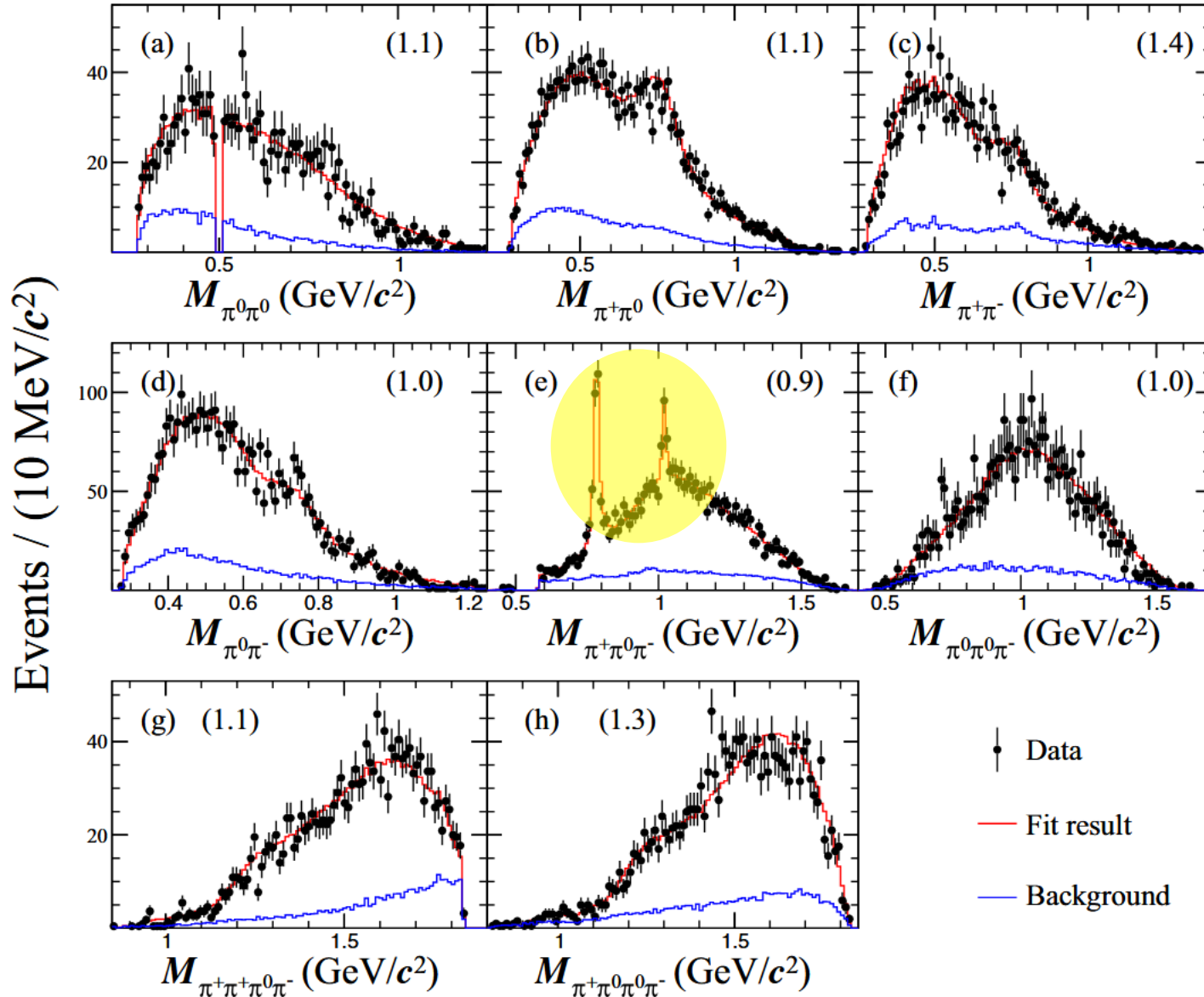
$D_s^+ \rightarrow \omega \rho^+$ ([PhysRevLett.134.201902](#))



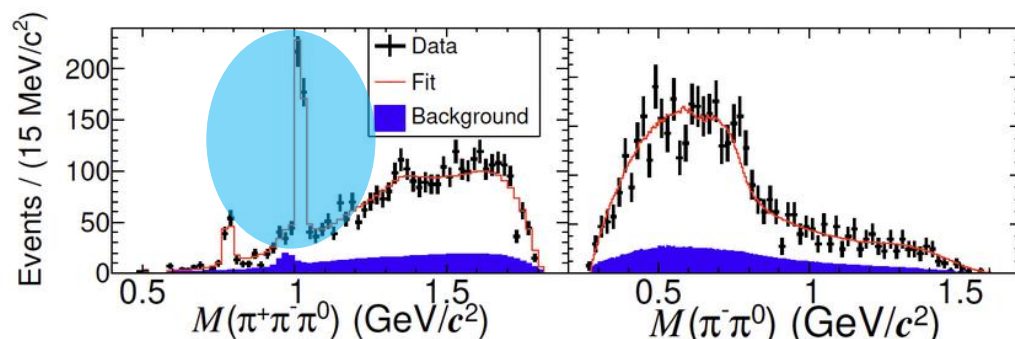
Amplitude	Phase ϕ (rad)	FF (%)	BF (%)	Significance
$D_s^+[S] \rightarrow \omega \rho^+$	0.0 (fixed)	$6.12 \pm 1.34^{+0.44}_{-0.52}$	$0.30 \pm 0.07^{+0.02}_{-0.03}$	$> 10\sigma$
$D_s^+[P] \rightarrow \omega \rho^+$	$2.92 \pm 0.13^{+0.05}_{-0.07}$	$5.05 \pm 0.86^{+0.83}_{-0.79}$	$0.25 \pm 0.04^{+0.04}_{-0.04}$	6.1σ
$D_s^+[D] \rightarrow \omega \rho^+$	$4.91 \pm 0.09^{+0.04}_{-0.09}$	$10.36 \pm 1.26^{+0.70}_{-1.45}$	$0.52 \pm 0.07^{+0.04}_{-0.07}$	$> 10\sigma$
$D_s^+ \rightarrow \omega \rho^+$	...	$19.98 \pm 1.40^{+0.92}_{-1.20}$	$0.99 \pm 0.08^{+0.05}_{-0.07}$	...

- 一个典型的由末态相互作用主导的过程。
- 为研究粲强子非轻衰变提供关于QCD非微扰效应的关键性实验输入。

$$D_s^+ \rightarrow \omega \rho^+ \quad (\text{PhysRevLett.134.201902})$$

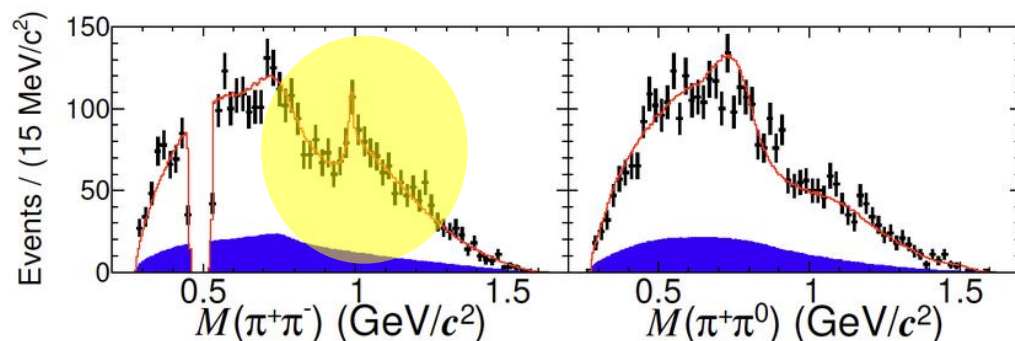


$D_s^+ \rightarrow f_0(980)\rho^+$ 以及 $\mathcal{B}(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)/\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+K^-)$ 异常 ([PhysRevLett.134.011904](#))

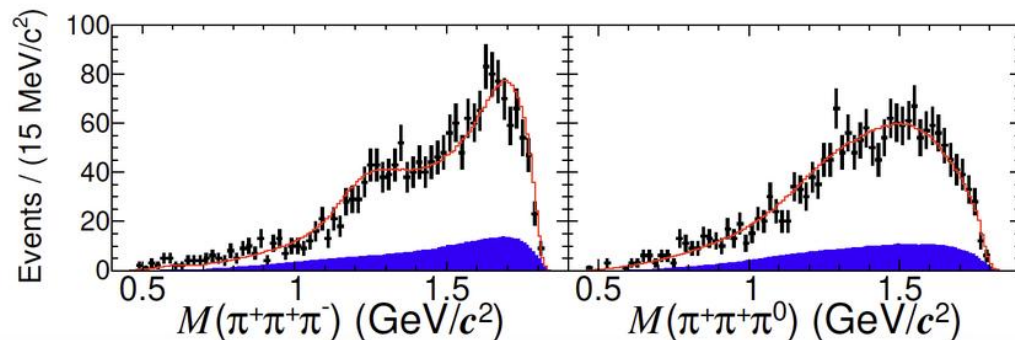


- $\mathcal{B}(\phi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)/\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+K^-)$

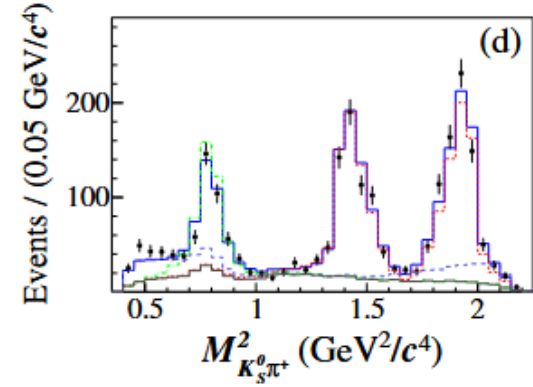
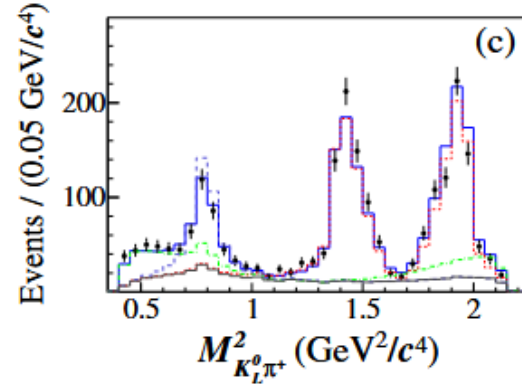
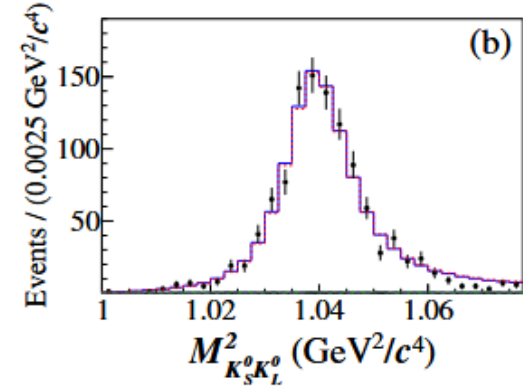
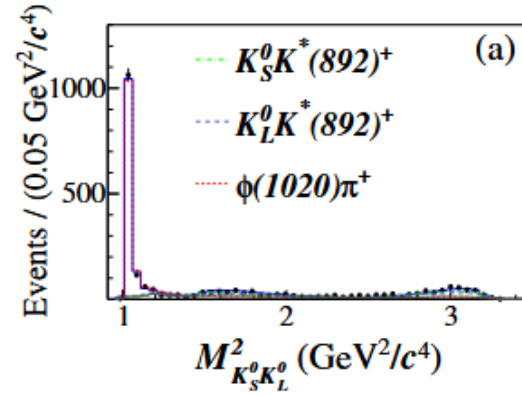
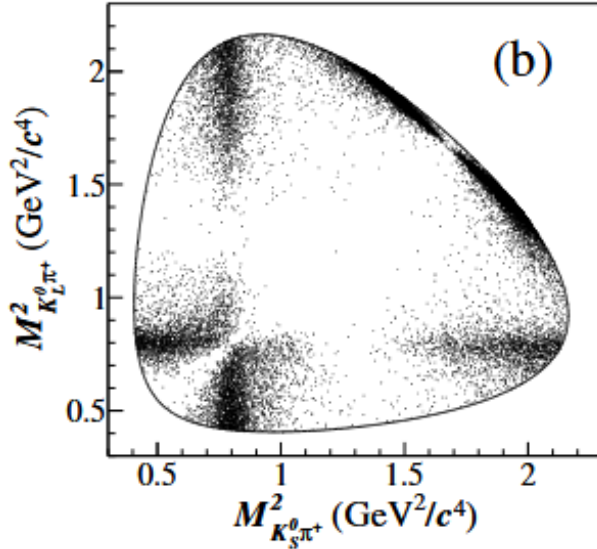
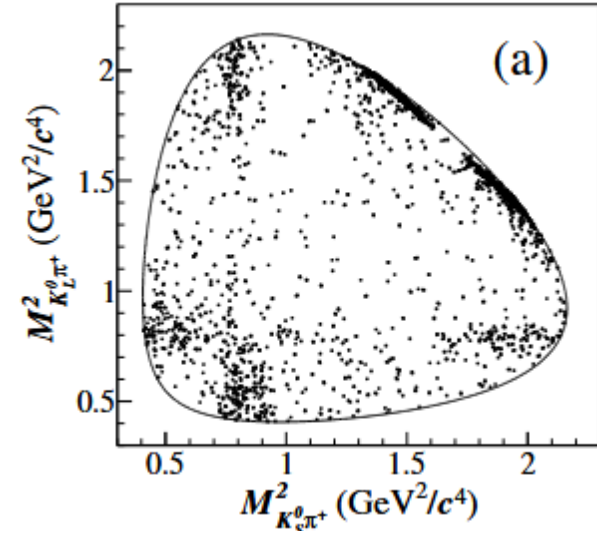
异常的问题实际上在之前的粲强子多体衰变的研究中已经被发现。但是未被注意到。



- 因此这也是该异常的首次报道。

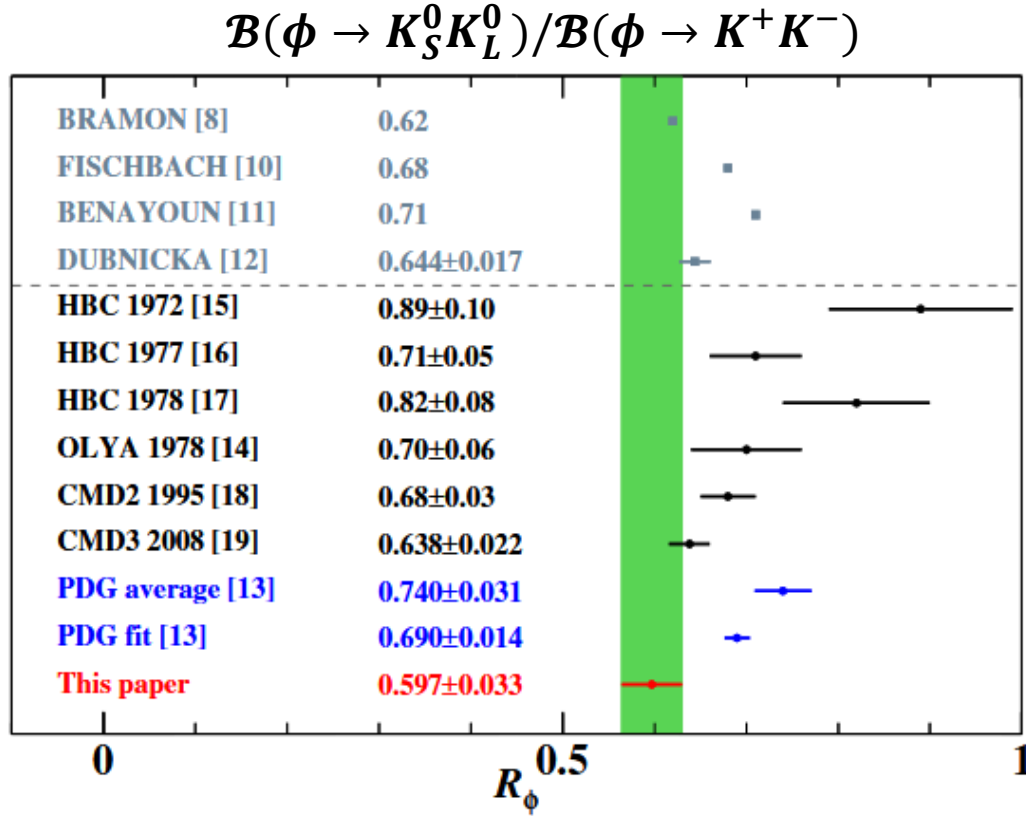


$\mathcal{B}(\phi \rightarrow K_S^0 K_L^0)/\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)$ 异常以及 $K_S^0 - K_L^0$ 不对称性研究 ([arXiv:2503.11383](https://arxiv.org/abs/2503.11383))



Amplitude	Phase (rad)	FF (%)	BF (%)	σ
$D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+$	0.0(fixed)	$70.9 \pm 1.3 \pm 1.5$	$1.32 \pm 0.05 \pm 0.04$	>10
$D_s^+ \rightarrow K_L^0 K^*(892)^+$	$0.68 \pm 0.17 \pm 0.21$	$22.8 \pm 1.3 \pm 1.5$	$0.42 \pm 0.03 \pm 0.03$	>10
$D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^*(892)^+$	$-2.40 \pm 0.18 \pm 0.31$	$17.4 \pm 1.2 \pm 0.9$	$0.31 \pm 0.02 \pm 0.02$	>10

$\mathcal{B}(\phi \rightarrow K_S^0 K_L^0)/\mathcal{B}(\phi \rightarrow K^+ K^-)$ 异常以及 $K_S^0 - K_L^0$ 不对称性研究 [arXiv:2503.11383](https://arxiv.org/abs/2503.11383)



$$\frac{\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^*(892)^+) - \mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_L^0 K^*(892)^+)}{\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^*(892)^+) + \mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_L^0 K^*(892)^+)}$$

$$(-13.4 \pm 5.0_{\text{stat.}} \pm 3.4_{\text{syst.}})\%$$

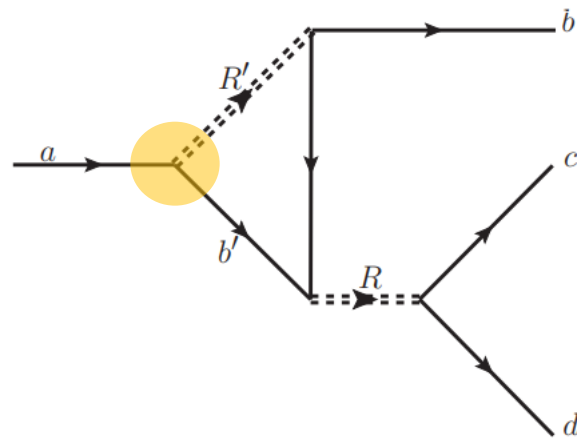
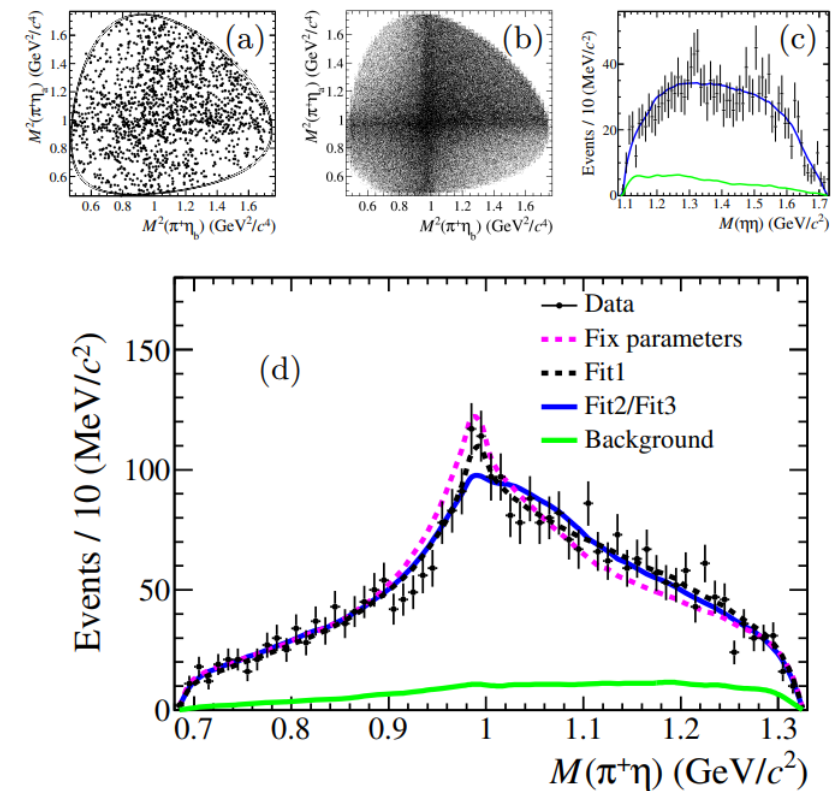
$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$ 的振幅分析研究([JHEP05\(2025\)195](#))

重建 D^+ 的黄金衰变道之一

Amplitude	Phase (rad)	FFs (%)	Significance (σ)
$D^+[S] \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 \rho(770)^+$	0.0(fixed)	$66.5 \pm 1.1 \pm 3.0$	$> 10\sigma$
$D^+[P] \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 \rho(770)^+$	$1.45 \pm 0.04 \pm 0.08$	$1.9 \pm 0.2 \pm 0.2$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 \rho(770)^+$	—	$68.4 \pm 1.1 \pm 2.6$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}_1(1270)^0 [S] \pi^+,$ $\bar{K}_1(1270)^0 \rightarrow K^- \rho(770)^+$	$-0.09 \pm 0.03 \pm 0.03$	$3.8 \pm 0.3 \pm 0.3$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}_1(1400)^0 [S] \pi^+$	$0.40 \pm 0.02 \pm 0.04$	$7.5 \pm 0.2 \pm 0.3$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}_1(1400)^0 [D] \pi^+$	$-2.42 \pm 0.04 \pm 0.04$	$0.5 \pm 0.1 \pm 0.1$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}_1(1400)^0 \pi^+,$ $\bar{K}_1(1400)^0 \rightarrow \bar{K}^*(892) \pi$	—	$7.3 \pm 0.2 \pm 0.3$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}(1460)^0 \pi^+,$ $\bar{K}(1460)^0 \rightarrow \bar{K}^*(892) \pi$	$0.41 \pm 0.04 \pm 0.07$	$5.1 \pm 0.2 \pm 0.3$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}^*(1680)^0 \pi^+,$ $\bar{K}^*(1680)^0 \rightarrow \bar{K}^*(892) \pi$	$1.13 \pm 0.04 \pm 0.09$	$3.8 \pm 0.4 \pm 0.8$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow (K^- \pi^+)_{S\text{-wave}} \rho(770)^+$	$2.90 \pm 0.02 \pm 0.04$	$18.3 \pm 0.7 \pm 0.7$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}(1460)^0 \pi^+,$ $\bar{K}(1460)^0 \rightarrow K^- [\pi^+ \pi^0]^{L=1} \pi$	$-1.29 \pm 0.08 \pm 0.06$	$8.6 \pm 0.8 \pm 0.5$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow \bar{K}(1460)^0 \pi^+,$ $\bar{K}(1460)^0 \rightarrow [K^- \pi]^{L=1} \pi$	$-2.31 \pm 0.07 \pm 0.06$	$3.4 \pm 0.5 \pm 0.3$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow [K^- \rho(770)^+]^{L=1} \pi^+$	$-1.27 \pm 0.04 \pm 0.03$	$1.8 \pm 0.1 \pm 0.1$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow [\bar{K}^*(892) \pi]^{L=1} \pi^+$	$-2.63 \pm 0.05 \pm 0.06$	$0.8 \pm 0.1 \pm 0.1$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow [\bar{K}^*(892)^0 \pi^+]^{L=1} \pi^0$	$-1.97 \pm 0.05 \pm 0.04$	$0.8 \pm 0.2 \pm 0.4$	$> 10\sigma$
$D^+ \rightarrow [K^- [\pi^+ \pi^0]^{L=1}]^{L=0} \pi^+$	$-1.12 \pm 0.08 \pm 0.13$	$0.8 \pm 0.2 \pm 0.2$	$> 10\sigma$
$D^+[S] \rightarrow [K^- \pi^+]^{L=1} \rho(770)^+$	$-1.87 \pm 0.12 \pm 0.11$	$0.5 \pm 0.1 \pm 0.1$	9.3σ

- 能极大改善BESIII实验分析所采用的MC数据,使之更接近真实数据的分布。在诸多相关衰变中的本底分析将更容易。
- 与 D^0 道不同, 对于 $D \rightarrow K^*(892) \rho$, S波占绝对主导位置。

$a_0(980)^+$ 谱形异常 ([arXiv:2505.12086](https://arxiv.org/abs/2505.12086))



粉色虚线：正常的 $a_0(980)^+$ 谱形

黑色虚线：放开 $a_0(980)^+$ 参数后的谱形，能和实验对上，但是pole的实部来到了大约 **1.10 GeV/c²**.

蓝色实线：加三角圈图之后的结果。

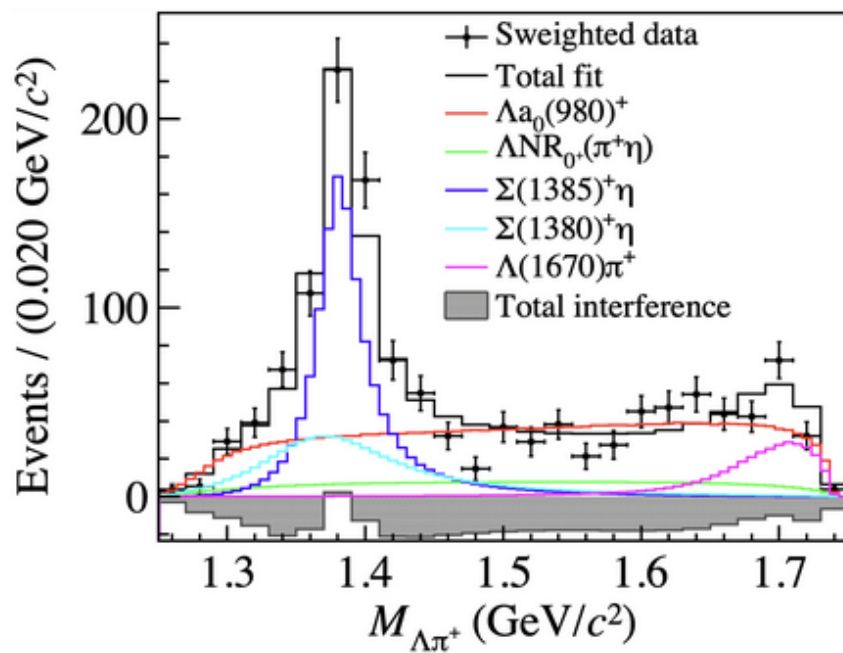
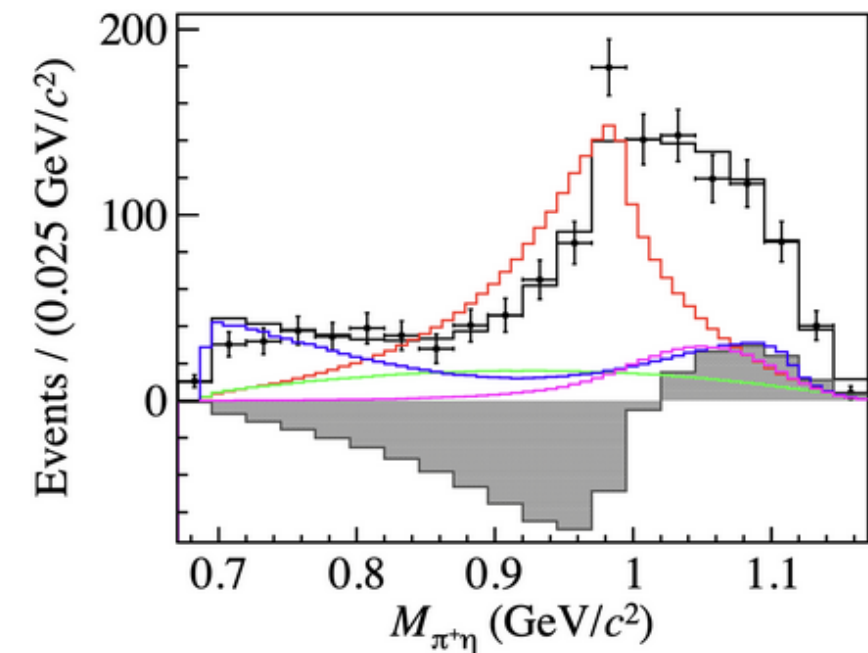
参数来源： [PhysRevD.95.032002](https://arxiv.org/abs/2505.12086)

$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow a_0(980)^+ \eta, a_0(980)^+ \rightarrow \pi^+ \eta) = (3.67 \pm 0.12 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \bar{K}_0^*(1430) K^+, \bar{K}_0^*(1430) \rightarrow K^- \pi^+) = (1.82 \pm 0.35) \times 10^{-3}$$

当圈图的第一个顶点的耦合常数要比树图大很多时，即便没有三角奇异性，三角圈图的影响也可以很大，对共振态参数的测量造成很大影响。

$\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+$ 和 $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma(1380)\eta$ (PhysRevLett.134.021901)



- $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda a_0(980)^+)$ 的实验测量结果要比基于 $a_0(980)^+$ 四夸克态短程相互作用产生或者末态相互作用产生的理论预期大一到两个量级。
- 五夸克态候选 $\Sigma(1380)$ 通过衰变 $\Sigma(1380) \rightarrow \Lambda\pi$ 看到的统计显著性大于 3σ 。

Analysis without amplitude analysis technique involved

[arXiv:2506.15533](https://arxiv.org/abs/2506.15533)

$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0)$	$(1.45 \pm 0.06 \pm 0.06) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \eta)$	$(1.17 \pm 0.10 \pm 0.03) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \eta')$	$(1.88 \pm 0.15 \pm 0.06) \times 10^{-4}$

[arXiv:2506.02969](https://arxiv.org/abs/2506.02969)

$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Lambda K_S^0 K^+)$	$(3.12 \pm 0.46 \pm 0.15) \times 10^{-3}$
$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 K_S^0 K^+)$	$(0.80^{+0.28}_{-0.24} \pm 0.16) \times 10^{-3}$
$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Xi^0 K_S^0 K^+)$	$(3.70 \pm 0.60 \pm 0.21) \times 10^{-3}$

[arXiv:2505.18004](https://arxiv.org/abs/2505.18004)

BF ratio
$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \eta) / \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \pi^0)$
$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \eta') / \mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \omega)$
This work
$0.305 \pm 0.046 \pm 0.007$
$0.336 \pm 0.094 \pm 0.037$

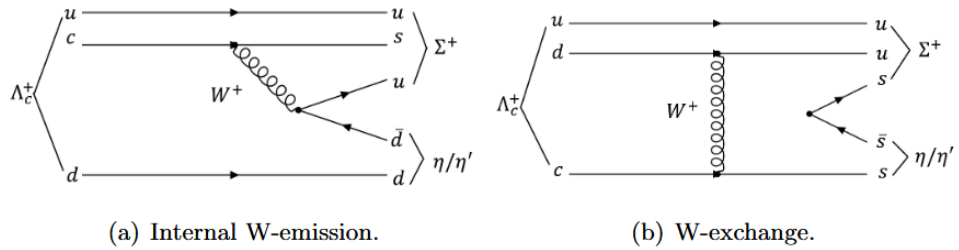


Figure 1. Feynman diagrams of the $\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^+ \eta/\eta'$ decay.

Analysis without amplitude analysis technique involved

[Phys. Rev. D 112, 012001](#)

$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^- 3\pi^+ 2\pi^-)$	$(1.35 \pm 0.23 \pm 0.08) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(D^0 \rightarrow K^- 2\pi^+ \pi^- 2\pi^0)$	$(19.0 \pm 1.1 \pm 1.5) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^- 3\pi^+ \pi^- \pi^0)$	$(6.57 \pm 0.69 \pm 0.33) \times 10^{-4}$

[JHEP06\(2025\)220](#)

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	—	—	—
$D^+ \rightarrow K^+ \eta \eta$	$0.59 \pm 0.23 \pm 0.02$	—	—	—	—

Analyses without amplitude analysis technique involved

Phys. Rev. D 111, 092005 (2025)

Signal decay	N_{DT}	$\epsilon_{\text{sig}}(\%)$	$\mathcal{B}_{\text{sig}}(10^{-4})$	$\mathcal{B}_{\text{weight}}(10^{-4})$	$\mathcal{B}_{\text{PDG}}(10^{-4})$
$D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^-$	61.8 ± 10.5	8.53 ± 0.08	$0.66 \pm 0.11 \pm 0.03$	...	2.3 ± 1.2
$D^+ \rightarrow \phi \pi^+ \pi^+ \pi^-$	17.8 ± 6.3	6.09 ± 0.07	$0.54 \pm 0.19 \pm 0.02$	...	...
$D^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	77.5 ± 10.5	4.05 ± 0.06	$2.51 \pm 0.34 \pm 0.14$	...	...
$D^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \eta_{\gamma\gamma}$	101.5 ± 11.2	15.55 ± 0.11	$2.17 \pm 0.24 \pm 0.08$	$2.27 \pm 0.22 \pm 0.05$	1.8 ± 0.5
$D^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \eta_{\pi^+ \pi^-} \pi^0$	31.4 ± 6.3	6.17 ± 0.07	$2.90 \pm 0.59 \pm 0.15$		
$D^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \omega$	40.4 ± 7.0	2.93 ± 0.05	$2.02 \pm 0.35 \pm 0.10$	...	...

arXiv:2502.11047

$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 K^+ \pi^0) < 5.0 \times 10^{-4},$
 $\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow \Sigma^0 K^+ \pi^+ \pi^-) < 6.5 \times 10^{-4}.$

Phys. Rev. D 111, L051101 (2025)

$\mathcal{B}(\Lambda_c^+ \rightarrow p \pi^0) = (1.79 \pm 0.39 \pm 0.11 \pm 0.08) \times 10^{-4}$

Phys. Rev. D 111, 012014 (2025)

TABLE VI. The comparison of the measured BFs (in 10^{-3}) with the PDG average and theoretical calculations.

Decay mode		This work	PDG [6]
$\Lambda K_S^0 K^+$		$3.04 \pm 0.30 \pm 0.16$	2.85 ± 0.55
$\Lambda K_S^0 \pi^+$	Λ_c^+ 衰变	$1.73 \pm 0.26 \pm 0.10$	...
ΛK^{*+}	(No interference)	$2.40 \pm 0.58 \pm 0.11$	假设 K^{*+} 和非共振态之间有个干涉
	$(\theta_0 = 109^\circ)$	$5.21 \pm 0.71 \pm 0.25$	
	$(\theta_0 = 221^\circ)$	$1.29 \pm 0.44 \pm 0.06$	

Analyses focusing on $D^0 - \bar{D}^0$ mixing and strong phase measurement

- 使用 $CP +$ 和 $CP -$ 的量子关联 $D^0 \bar{D}^0$ 对测量 $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ 道的强相位。 [arxiv:2506.07907](https://arxiv.org/abs/2506.07907)

Production mechanism [C]

$D \bar{D}$	[−1]
$D^* \bar{D} \rightarrow \gamma D \bar{D}$	[+1]
$D^* \bar{D} \rightarrow \pi^0 D \bar{D}$	[−1]
$D^* \bar{D}^* \rightarrow \gamma \pi^0 D \bar{D}$	[+1]
$D^* \bar{D}^* \rightarrow \gamma \gamma / \pi^0 \pi^0 D \bar{D}$	[−1]

详见闫文昊/张宇的报告

- $D^0 \rightarrow K_{S/L}^0 \pi^+ \pi^-$ 中 c_i, s_i 的测量更新 [JHEP06\(2025\)086](https://arxiv.org/abs/2502.12873)
- $D^0 \rightarrow K^- K^+ \pi^+ \pi^-$ 分bin的强相位结果测量。 [arXiv:2502.12873](https://arxiv.org/abs/2502.12873)

谢谢！



Back Up

$D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$ 的振幅分析研究(JHEP05(2025)195)

