



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



BESIII 上粲介子强子衰变绝对分支比的测量

报告人：葛潘婷

武汉大学
中国科学院高能物理研究所

2022年4月8日

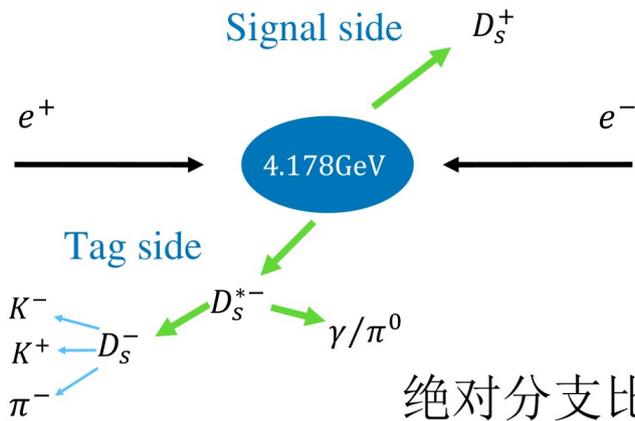
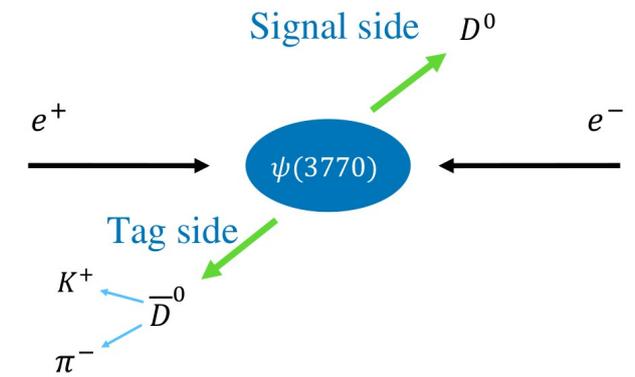
目录

- ✓ 粲介子强子衰变的简介
- ✓ 数据样本和分析方法
- ✓ 分支比测量
- ✓ 总结和展望

粲介子强子衰变

- ✓ 检验轻子普适性
- ✓ 研究非微扰 QCD 理论
- ✓ 寻找 CP 破缺
- ✓ 帮助测量 CKM 角 γ

数据样本和双标记法



Datasets:

$D^{+(0)}$: 2.93 fb^{-1} @ $E_{\text{cm}} = 3.773\text{ GeV}$

D_s^+ : 7.31 fb^{-1} @ $E_{\text{cm}} = 4.126\text{ GeV} - 4.226\text{ GeV}$

Double Tag (DT): 同时重建两侧的 $D_{(s)}$ 介子

非常低的本底水平，可以用以不同衰变的研究
来自标记侧的系统误差几乎可以忽略

绝对分支比计算:
$$\mathcal{B}_{sig} = \frac{N_{sig}^{DT}}{\sum_{\alpha} N_{\alpha}^{ST} \epsilon_{\alpha, sig}^{DT} / \epsilon_{\alpha}^{ST}}$$

$D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X$ 单举绝对分支比的测量

arXiv:2212.13072

- 首次测量
- 帮助检验 B 介子轻子普适性
- 独立检验 D_s^+ 到 $\pi^+ \pi^+ \pi^-$ 末态遍举衰变绝对分支比的测量

$M(\pi^+ \pi^+ \pi^-)$ interval	$\Delta \mathcal{B}_{3\pi X, i}$ (%)
1	$4.63 \pm 0.14 \pm 0.12$
2	$4.92 \pm 0.16 \pm 0.19$
3	$3.79 \pm 0.13 \pm 0.11$
4	$3.55 \pm 0.12 \pm 0.11$
5	$2.42 \pm 0.10 \pm 0.08$
6	$2.87 \pm 0.10 \pm 0.11$
7	$2.39 \pm 0.09 \pm 0.09$
8	$2.69 \pm 0.09 \pm 0.09$
9	$2.19 \pm 0.08 \pm 0.07$
10	$2.32 \pm 0.07 \pm 0.07$
11	$1.01 \pm 0.04 \pm 0.05$

$\text{Br}(D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X)$

本分析 : $(32.81 \pm 0.35 \pm 0.82)\%$

PDG : 约 25%

$D^{0(+)} \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X$ 绝对分支比的测量

Phys. Rev. D 107, 032002 (2023)

- 首次测量
- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入
- 独立检验 $D^{(0)}$ 到 $\pi^+ \pi^+ \pi^-$ 末态遍举衰变绝对分支比的测量

$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X$ 衰变部分分支比

i	N_{prod}	$d\mathcal{B}_{\text{sig}}$	$d\mathcal{B}_{\text{sig}}^{\text{corr}} (\%)$
1	1541.3 ± 89.9	0.28 ± 0.02	0.28 ± 0.02
2	9349.1 ± 206.0	1.71 ± 0.04	1.70 ± 0.04
3	14235.8 ± 271.8	2.60 ± 0.05	2.66 ± 0.05
4	22130.5 ± 295.0	4.04 ± 0.05	4.08 ± 0.05
5	24638.2 ± 264.9	4.50 ± 0.05	4.51 ± 0.05
6	16850.4 ± 207.4	3.07 ± 0.04	3.14 ± 0.04
7	4228.6 ± 127.5	0.77 ± 0.02	0.80 ± 0.02
8	1730.9 ± 113.7	0.32 ± 0.02	0.31 ± 0.02
9	676.1 ± 69.6	0.12 ± 0.01	0.11 ± 0.01
Total	95381.0 ± 598.9	—	17.60 ± 0.11

$D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X$ 衰变部分分支比

i	N_{prod}	$d\mathcal{B}_{\text{sig}} (\%)$
1	1747.1 ± 111.1	0.22 ± 0.01
2	9683.3 ± 245.1	1.19 ± 0.03
3	17890.3 ± 349.6	2.20 ± 0.04
4	27671.6 ± 366.3	3.41 ± 0.05
5	33224.6 ± 340.2	4.09 ± 0.04
6	20383.9 ± 251.5	2.51 ± 0.03
7	5772.7 ± 155.4	0.71 ± 0.02
8	2661.8 ± 97.8	0.33 ± 0.01
9	2032.0 ± 81.1	0.25 ± 0.01
10	2803.0 ± 80.2	0.35 ± 0.01
Total	123870.2 ± 744.7	15.25 ± 0.09

$$\text{Br}(D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X) = (17.60 \pm 0.11 \pm 0.22)\%$$

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- X) = (15.25 \pm 0.09 \pm 0.18)\%$$

与已知衰变分支比的和一致

$D^{0(+)} \rightarrow \phi X$ 绝对分支比的测量

Phys. Rev. D 100, 072006(2019)

- 对于含 ϕ 的遍举衰变提供了独立的检查
- 精度提升
- 寻找 CP 破缺

	This work	CLEO [2]	BES [1]
$D^+ \rightarrow \phi X$	$1.135 \pm 0.034 \pm 0.031$	$1.03 \pm 0.10 \pm 0.07$	< 1.8 (90% C.L.)
$D^0 \rightarrow \phi X$	$1.091 \pm 0.027 \pm 0.035$	$1.05 \pm 0.08 \pm 0.07$	$1.71^{+0.76}_{-0.71} \pm 0.17$

与先前的结果一致，同时精度有明显地提升

$$A_{\text{CP}} = \frac{\mathcal{B}(D \rightarrow \phi X) - \mathcal{B}(\bar{D} \rightarrow \phi X)}{\mathcal{B}(D \rightarrow \phi X) + \mathcal{B}(\bar{D} \rightarrow \phi X)} \quad A_{\text{CP}}(D^+ \rightarrow \phi X): (-0.7 \pm 2.8 \pm 0.7)\%$$
$$A_{\text{CP}}(D^0 \rightarrow \phi X): (-0.4 \pm 2.5 \pm 0.7)\%$$

没有发现明显的 CP 破缺

[1]Phys. Rev. D 62, 052001(2000)

[2]Phys. Rev. D 74, 112005(2006)

$D^{0(+)}$ 含多个 π 卡比伯压低衰变

Phys. Rev. D 106, 092005 (2022)

- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入
- 寻找 CP 破缺
- 间接精确测量 CKM 角 γ

20 个道

六个事例数较多的衰变道的 A_{CP}

下面是四个较大分支比：

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0) = (1.343 \pm 0.013 \pm 0.016)\%$$

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- 2\pi^0) = (1.002 \pm 0.019 \pm 0.024)\% \text{ 精度更高}$$

$$\text{Br}(D^+ \rightarrow 2\pi^+ \pi^- \pi^0) = (1.165 \pm 0.021 \pm 0.021)\%$$

$$\text{Br}(D^+ \rightarrow 2\pi^+ \pi^- 2\pi^0) = (1.074 \pm 0.040 \pm 0.030)\% \text{ 首次测量}$$

Decay	$\mathcal{B}_{\text{sig}}^+ (\times 10^{-4})$	$\mathcal{B}_{\text{sig}}^- (\times 10^{-4})$	$\mathcal{A}_{CP}^{\text{sig}} (\%)$
$\pi^+ \pi^- \pi^0$	134.8 ± 1.8	133.3 ± 1.8	$+0.6 \pm 0.9 \pm 0.4$
$\pi^+ \pi^- 2\pi^0$	97.6 ± 2.6	102.7 ± 2.7	$-2.5 \pm 1.9 \pm 0.7$
$2\pi^+ \pi^-$	33.1 ± 1.0	32.3 ± 1.0	$+1.2 \pm 2.2 \pm 0.6$
$\pi^+ 2\pi^0$	48.3 ± 1.8	43.2 ± 1.7	$+5.6 \pm 2.7 \pm 0.5$
$2\pi^+ \pi^- \pi^0$	116.7 ± 3.0	116.0 ± 3.0	$+0.3 \pm 1.8 \pm 0.8$
$2\pi^+ \pi^- 2\pi^0$	102.7 ± 5.6	111.6 ± 5.8	$-4.2 \pm 3.8 \pm 1.3$

没有发现明显的 CP 破缺

$D^{0(+)}$ → 含 η 介子的遍举衰变

Phys. Rev. Lett. 124. 241803(2020)

- 首次测量
- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入
- 寻找 CP 破缺

14 个道

$$\text{Br}_{\text{单举}}(D^0 \rightarrow \eta X) = (9.5 \pm 0.9)\%$$

0.9 σ 范围内一致

$$\text{Br}_{\text{本分析}}(D^0 \rightarrow \eta X) = (8.62 \pm 0.35)\%$$

$$\text{Br}_{\text{单举}}(D^+ \rightarrow \eta X) = (6.5 \pm 0.7)\%$$

2.5 σ 范围内一致

$$\text{Br}_{\text{本分析}}(D^+ \rightarrow \eta X) = (4.68 \pm 0.18)\%$$

六个事例数较多的衰变道的 A_{CP}

Decay	$\mathcal{B}_{\text{sig}}^+$ ($\times 10^{-4}$)	$\mathcal{B}_{\text{sig}}^-$ ($\times 10^{-4}$)	$\mathcal{A}_{\text{CP}}^{\text{sig}}$ (%)
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \eta$	182.1 ± 3.5	189.1 ± 3.6	$-1.9 \pm 1.3 \pm 1.0$
$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \eta$	98.4 ± 4.8	106.3 ± 5.1	$-3.9 \pm 3.2 \pm 0.8$
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0 \eta$	41.7 ± 2.7	48.8 ± 3.2	$-7.9 \pm 4.8 \pm 2.5$
$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \eta$	29.8 ± 2.2	33.3 ± 2.5	$-5.5 \pm 5.2 \pm 2.4$
$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \eta$	129.9 ± 5.3	132.3 ± 5.4	$-0.9 \pm 2.9 \pm 1.0$
$D^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \eta$	35.4 ± 2.4	33.7 ± 2.4	$+2.5 \pm 5.0 \pm 1.6$

没有发现明显的 CP 破缺

$D^{0(+)} \rightarrow KK\pi\pi$ 绝对分支比的测量

Phys. Rev. D 102, 052006 (2020)

- 首次测量: $D^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$, $D^0 \rightarrow K_S^0K^-\pi^+\pi^0$, $D^0 \rightarrow K_S^0K^+\pi^-\pi^0$, $D^0 \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^+\pi^0$, $D^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^0$
- 提升测量精度: $D^0 \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^+\pi^-$, $D^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^0$, $D^+ \rightarrow K_S^0K^-\pi^+\pi^+$, $D^+ \rightarrow K_S^0K^+\pi^+\pi^-$

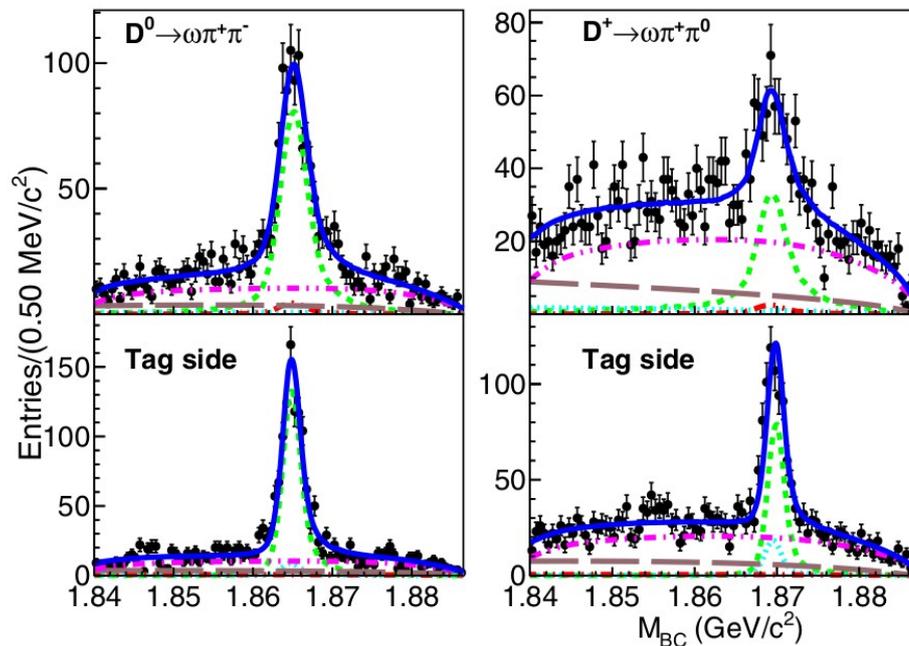
Signal mode	ΔE_{sig}	$N_{\text{DT}}^{\text{fit}}$	$N_{K_S^0}^{\text{sid}}$	$N_{\text{DT}}^{\text{net}}$	$\epsilon_{\text{sig}} (\%)$	$\mathcal{B}_{\text{sig}} (\times 10^{-3})$	$\mathcal{B}_{\text{PDG}} (\times 10^{-3})$	
$D^0 \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$	(-59, 40)	132.1 ± 13.9	...	132.1 ± 13.9	8.20 ± 0.07	$0.69 \pm 0.07 \pm 0.04$...	
$D^0 \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^+\pi^-$	(-22, 22)	82.1 ± 9.7	37.8 ± 7.5	63.2 ± 10.4	5.14 ± 0.04	$0.53 \pm 0.09 \pm 0.03$	1.22 ± 0.23	2.3 σ 范围内一致
$D^0 \rightarrow K_S^0K^-\pi^+\pi^0$	(-43, 32)	278.8 ± 18.8	166.1 ± 15.1	195.8 ± 20.3	6.38 ± 0.06	$1.32 \pm 0.14 \pm 0.07$...	
$D^0 \rightarrow K_S^0K^+\pi^-\pi^0$	(-44, 33)	124.0 ± 12.8	$9.5_{-3.1}^{+3.7}$	119.3 ± 12.9	7.94 ± 0.06	$0.65 \pm 0.07 \pm 0.02$...	
$D^+ \rightarrow K^+K^-\pi^+\pi^0$	(-39, 30)	1311.7 ± 40.4	...	1311.7 ± 40.4	12.72 ± 0.08	$6.62 \pm 0.20 \pm 0.25$	26_{-8}^{+9}	2.8 σ 范围内一致
$D^+ \rightarrow K_S^0K^+\pi^0\pi^0$	(-61, 44)	35.9 ± 7.1	$3.8_{-2.0}^{+2.8}$	34.0 ± 7.2	3.77 ± 0.02	$0.58 \pm 0.12 \pm 0.04$...	
$D^+ \rightarrow K_S^0K^-\pi^+\pi^+$	(-22, 21)	505.0 ± 24.5	74.2 ± 10.3	467.9 ± 25.0	13.24 ± 0.08	$2.27 \pm 0.12 \pm 0.06$	2.38 ± 0.17	1.0 σ 范围内一致
$D^+ \rightarrow K_S^0K^+\pi^+\pi^-$	(-21, 20)	284.6 ± 18.0	$15.3_{-4.2}^{+4.9}$	277.0 ± 18.2	9.39 ± 0.06	$1.89 \pm 0.12 \pm 0.05$	1.74 ± 0.18	
$D^+ \rightarrow K_S^0K_S^0\pi^+\pi^0$	(-46, 37)	101.1 ± 11.3	42.0 ± 8.1	80.1 ± 12.0	3.84 ± 0.03	$1.34 \pm 0.20 \pm 0.06$...	

$D^{0(+)} \rightarrow \omega \pi^+ \pi^{-(0)}$ 绝对分支比的测量

Phys. Rev. D 105, 032009 (2022)

- 首次测量: $D^+ \rightarrow \omega \pi^+ \pi^0$; 提升测量精度: $D^0 \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-$
- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入
- 精确测量 CKM 角 γ

单卡比伯压低



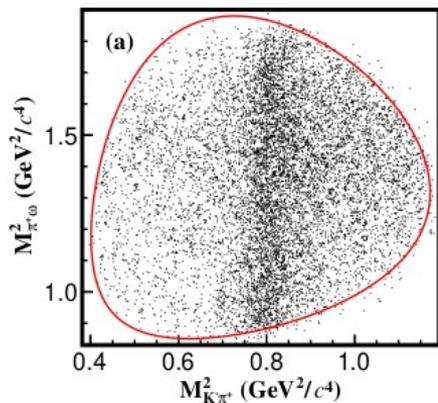
$\text{Br}(D^0 \rightarrow \omega \pi^+ \pi^-) = (1.33 \pm 0.16 \pm 0.12) \times 10^{-3}$ 精度更高 统计显著性: 12.9σ

$\text{Br}(D^+ \rightarrow \omega \pi^+ \pi^0) = (3.87 \pm 0.83 \pm 0.25) \times 10^{-3}$ 首次测量 统计显著性: 7.7σ

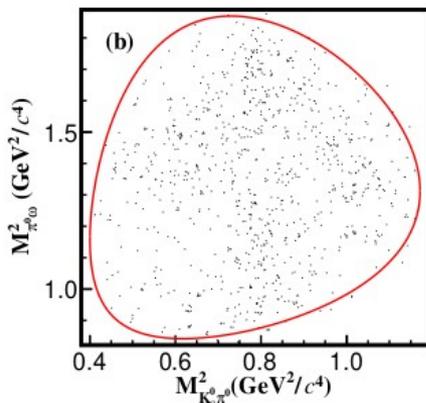
$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \omega$ 和 $D^{0(+)} \rightarrow K_S^0 \pi^{0(+)} \omega$ 绝对分支比的测量

Phys. Rev. D 105, 032009 (2022)

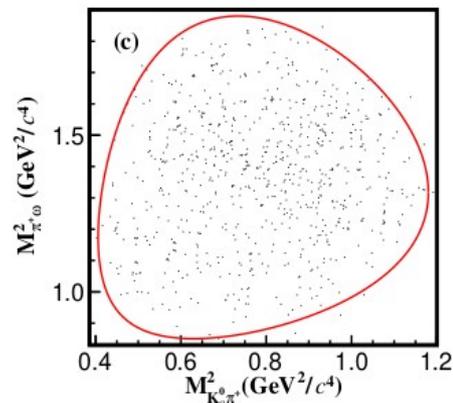
- 首次观测: $D^{0(+)} \rightarrow K_S^0 \pi^{0(+)} \omega$; 提升测量精度: $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \omega$
- 理论上通过统计同位旋模型暗示 $D^{0(+)} \rightarrow K_S^0 \pi^{0(+)} \omega$ 具有大的分支比
- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入



$D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \omega$



$D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \omega$



$D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \omega$

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \omega) = (3.392 \pm 0.044 \pm 0.085)\%$$

$$\text{Br}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \omega) = (0.848 \pm 0.046 \pm 0.031)\%$$

$$\text{Br}(D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \omega) = (0.707 \pm 0.041 \pm 0.029)\%$$

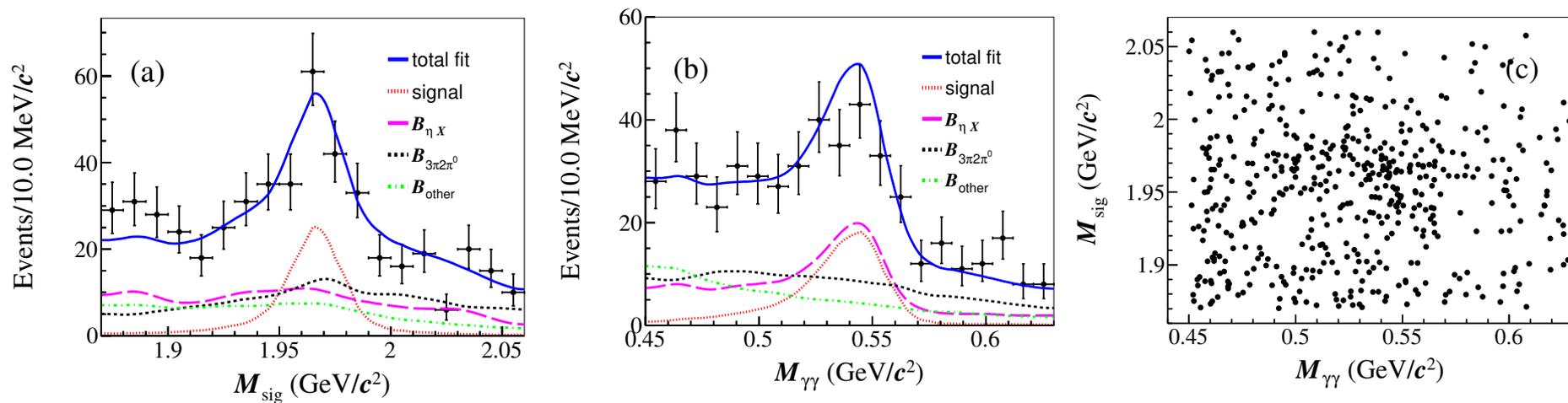
与先前的结果一致但是精度更高

首次测量

$D_s^+ \rightarrow \omega \pi^+ \eta$ 衰变

arXiv: 2302.04670

- 首次观测 $D_s^+ \rightarrow \omega \pi^+ \eta$
- 检验 B 介子轻子普适性的重要的本底输入
- 寻找可能的中间态 $a_0(980)^+$ 和 $b_1(1235)^+$



$$\text{Br}(D_s^+ \rightarrow \omega \pi^+ \eta) = (0.54 \pm 0.12 \pm 0.04)\%$$

统计显著性: 7.6σ

可能存在的中间过程: $D_s^+ \rightarrow b_1(1235)^+ \eta$ 和 $D_s^+ \rightarrow \omega a_0(980)^+$

总结与展望

- ✓ 有效控制 $R(D^*)$ 的系统误差
- ✓ 没有发现明显的 CP 破缺
- ✓ 首次测量多个衰变道
- ✓ 显著提高多个衰变道测量精度

基于 BESIII 正在 3.773 GeV 处采集的 20 fb^{-1} 的世界最大的粲介子数据样本，计划开展更多的粲物理研究。

谢谢聆听!

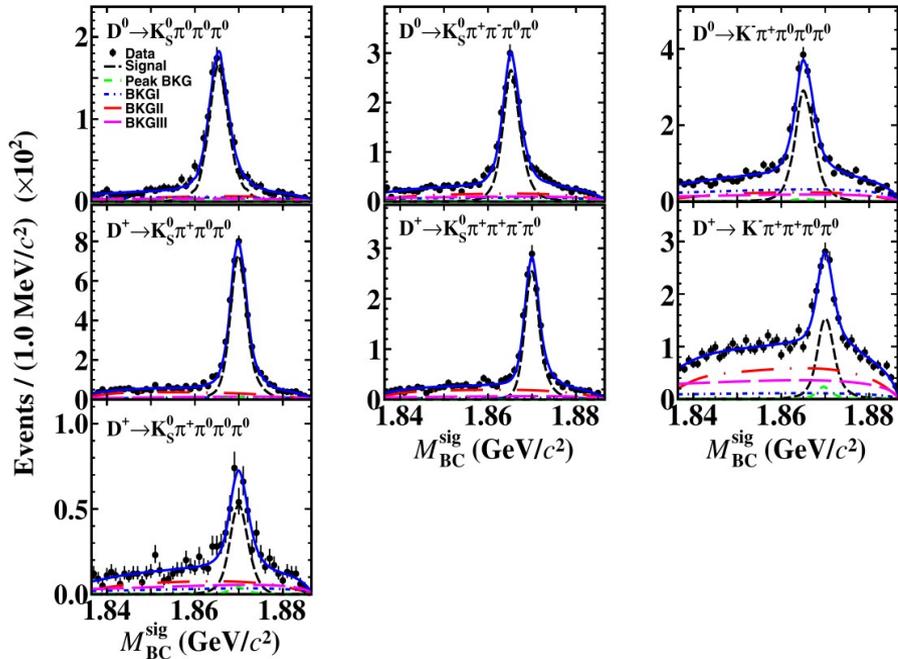
backup

D⁰⁽⁺⁾ 到同时含 K 介子和 π 介子衰变

Phys. Rev. D 106, 032002 (2022)

- 首次测量
- 寻找 CP 破缺
- 间接精确测量 CKM 角 γ

7 个道



$$\begin{aligned} \text{Br}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \pi^0 \pi^0) &= (7.64 \pm 0.30 \pm 0.29) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0 \pi^0 \pi^0) &= (9.54 \pm 0.30 \pm 0.31) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^0 \pi^0) &= (29.04 \pm 0.62 \pm 0.87) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0) &= (15.28 \pm 0.57 \pm 0.60) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^0 \pi^0 \pi^0) &= (5.54 \pm 0.44 \pm 0.32) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0 \pi^0) &= (4.95 \pm 0.26 \pm 0.19) \times 10^{-3} \\ \text{Br}(D^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^0) &< 1.57 \times 10^{-4} \text{ 在 } 90\% \text{ 的置信度下} \end{aligned}$$