



Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

BESIII

BESIII上 D_s 介子多体强子衰变的 振幅分析

报告人：卢泽辉

2023.4.8

目录

- ✓ 引言
- ✓ 分析策略和数据集
- ✓ 振幅分析
- ✓ 总结

D_s 介子强子衰变振幅分析

✓ 检验非微扰QCD理论

- 测量两体衰变 PP, VP, VV, SP, AP 等分支比
- 研究 CP 破坏和SU(3)味道对称性破缺

✓ 理解强子谱

- 为深入探讨轻标量介子提供实验支持
- 与 D 介子相比有更大的相空间

✓ 为其他测量提供重要衰变模型

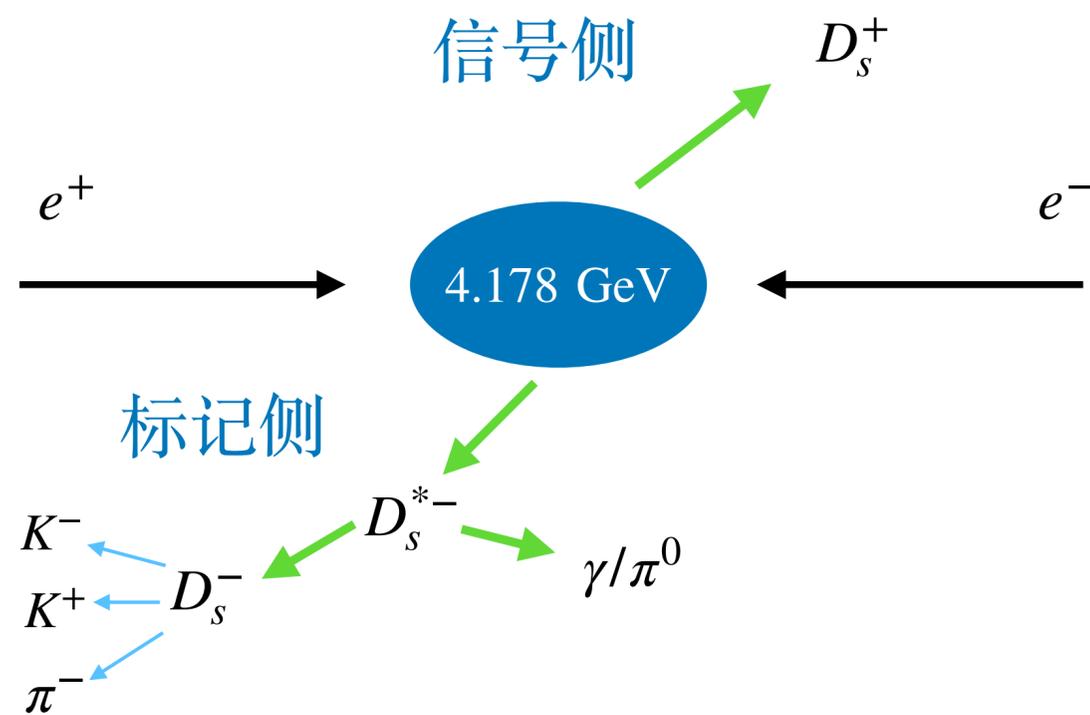
✓ BESIII上的 D_s 强子衰变振幅分析

- 成果丰富：15篇已发表，2篇待发表
- 覆盖面广：三、四与五体分析
- 意义重大
 - $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$
 - $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+$
 - $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$
 - ...

目录

- ✓ 引言
- ✓ 分析策略和数据集
- ✓ 振幅分析
- ✓ 总结

分析策略和数据集



数据集:

收集于2013-2017, 共 6.32 fb^{-1} @ $E_{\text{cm}} = 4.178 - 4.226 \text{ GeV}$ 。

单标记方法 (ST): 仅重建标记侧 D_s 介子

— 相对高的本底

— 更高的效率

振幅构造:

$$A(p_j) = F_{D_s}^L F_r^L P^L S^L$$

$F_{D_s, r}^L$: Blatt-Weisskopf barrier factors

P^L : Propagator

S^L : Spin-dependent angular term

双标记方法 (DT): 同时重建信号和标记侧 D_s 介子

— 低本底 以研究不同衰变过程

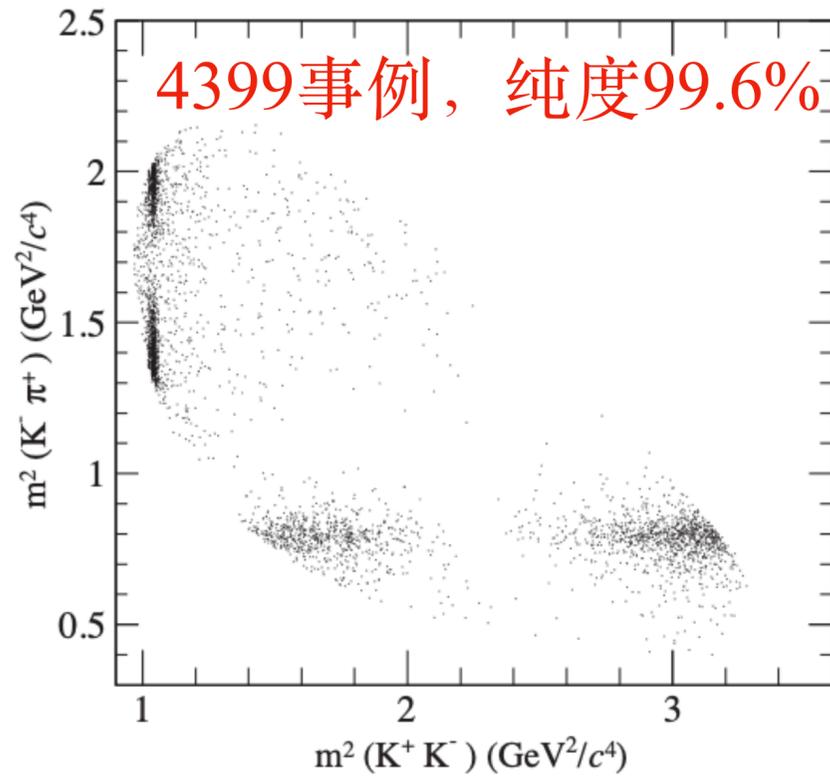
— 标记侧系统误差 几乎被抵消

目录

- ✓ 引言
- ✓ 分析策略和数据集
- ✓ 振幅分析
- ✓ 总结

Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$

Phys. Rev. D 104, 012016 (2021)



$a_0(980)$ 和 $f_0(980)$ 的混合

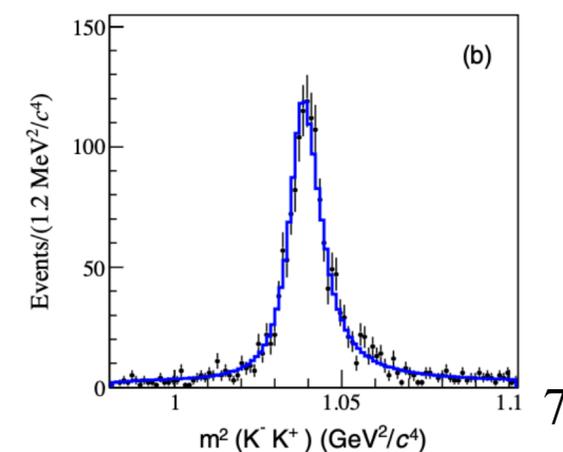
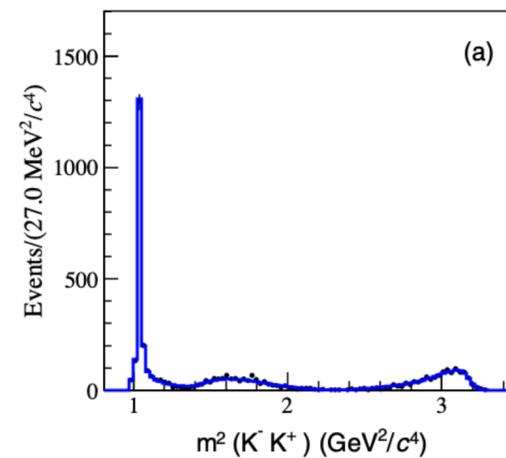
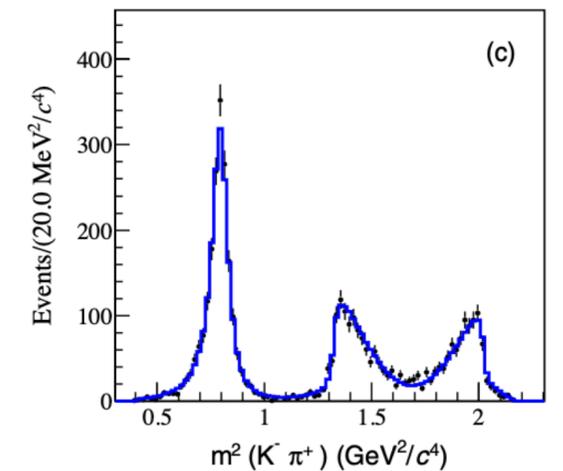
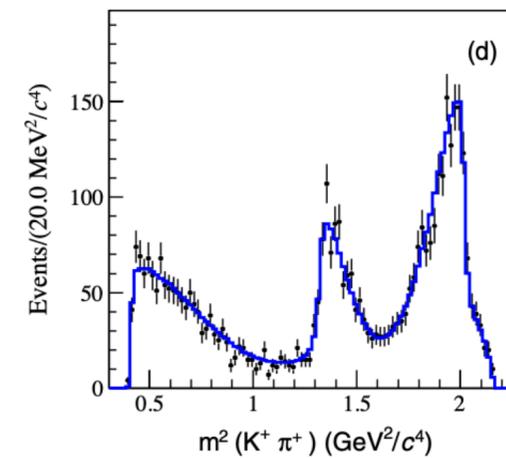
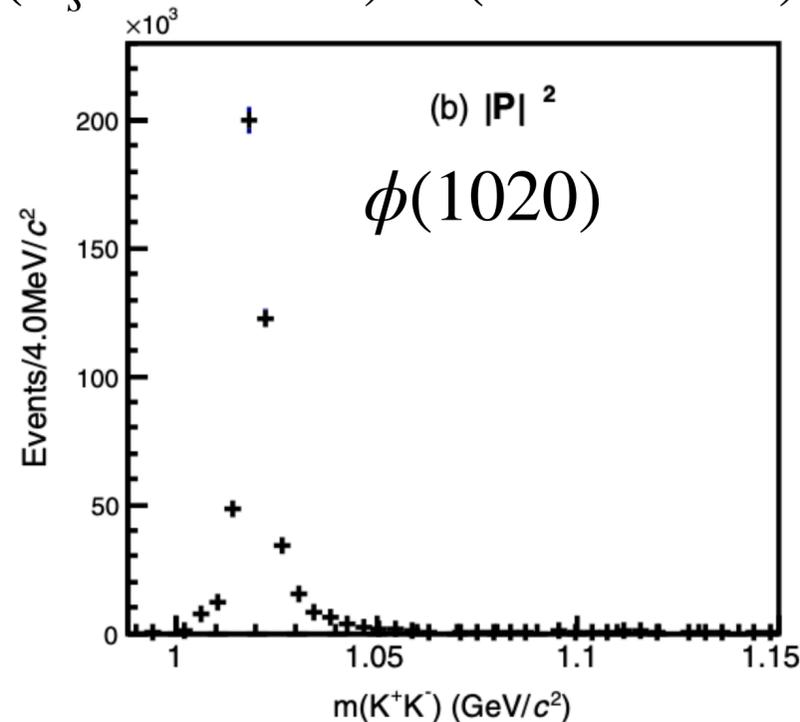
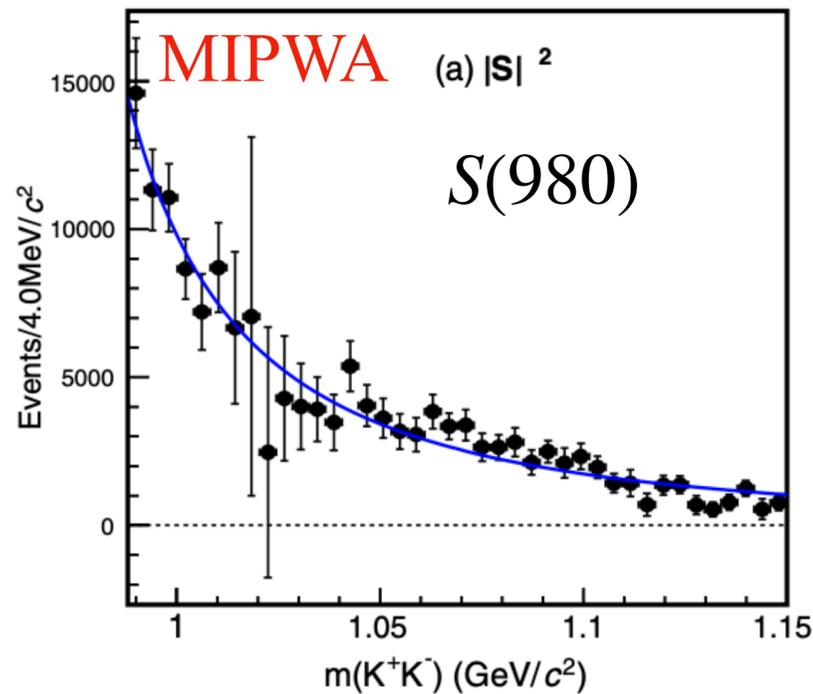
Process

- $D_s^+ \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 K^+, \bar{K}^*(892)^0 \rightarrow K^- \pi^+$
- $D_s^+ \rightarrow \phi(1020) \pi^+, \phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$
- $D_s^+ \rightarrow S(980) \pi^+, S(980) \rightarrow K^+ K^-$
- $D_s^+ \rightarrow \bar{K}_0^*(1430)^0 K^+, \bar{K}_0^*(1430)^0 \rightarrow K^- \pi^+$
- $D_s^+ \rightarrow f_0(1710) \pi^+, f_0(1710) \rightarrow K^+ K^-$
- $D_s^+ \rightarrow f_0(1370) \pi^+, f_0(1370) \rightarrow K^+ K^-$
- $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$ total BF

Process	BF (%)	
	BESIII (this analysis)	PDG
$D_s^+ \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 K^+, \bar{K}^*(892)^0 \rightarrow K^- \pi^+$	$2.64 \pm 0.06_{\text{stat}} \pm 0.07_{\text{sys}}$	2.58 ± 0.08
$D_s^+ \rightarrow \phi(1020) \pi^+, \phi(1020) \rightarrow K^+ K^-$	$2.21 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.07_{\text{sys}}$	2.24 ± 0.08
$D_s^+ \rightarrow S(980) \pi^+, S(980) \rightarrow K^+ K^-$	$1.05 \pm 0.04_{\text{stat}} \pm 0.06_{\text{sys}}$	1.14 ± 0.31
$D_s^+ \rightarrow \bar{K}_0^*(1430)^0 K^+, \bar{K}_0^*(1430)^0 \rightarrow K^- \pi^+$	$0.16 \pm 0.03_{\text{stat}} \pm 0.03_{\text{sys}}$	0.18 ± 0.04
$D_s^+ \rightarrow f_0(1710) \pi^+, f_0(1710) \rightarrow K^+ K^-$	$0.10 \pm 0.02_{\text{stat}} \pm 0.03_{\text{sys}}$	0.07 ± 0.03
$D_s^+ \rightarrow f_0(1370) \pi^+, f_0(1370) \rightarrow K^+ K^-$	$0.07 \pm 0.02_{\text{stat}} \pm 0.01_{\text{sys}}$	0.07 ± 0.05
$D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$ total BF	$5.47 \pm 0.08_{\text{stat}} \pm 0.13_{\text{sys}}$	5.39 ± 0.15

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \phi \pi^+) = (4.60 \pm 0.17) \%$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \bar{K}^{*0} K^+) = (3.94 \pm 0.12) \%$$

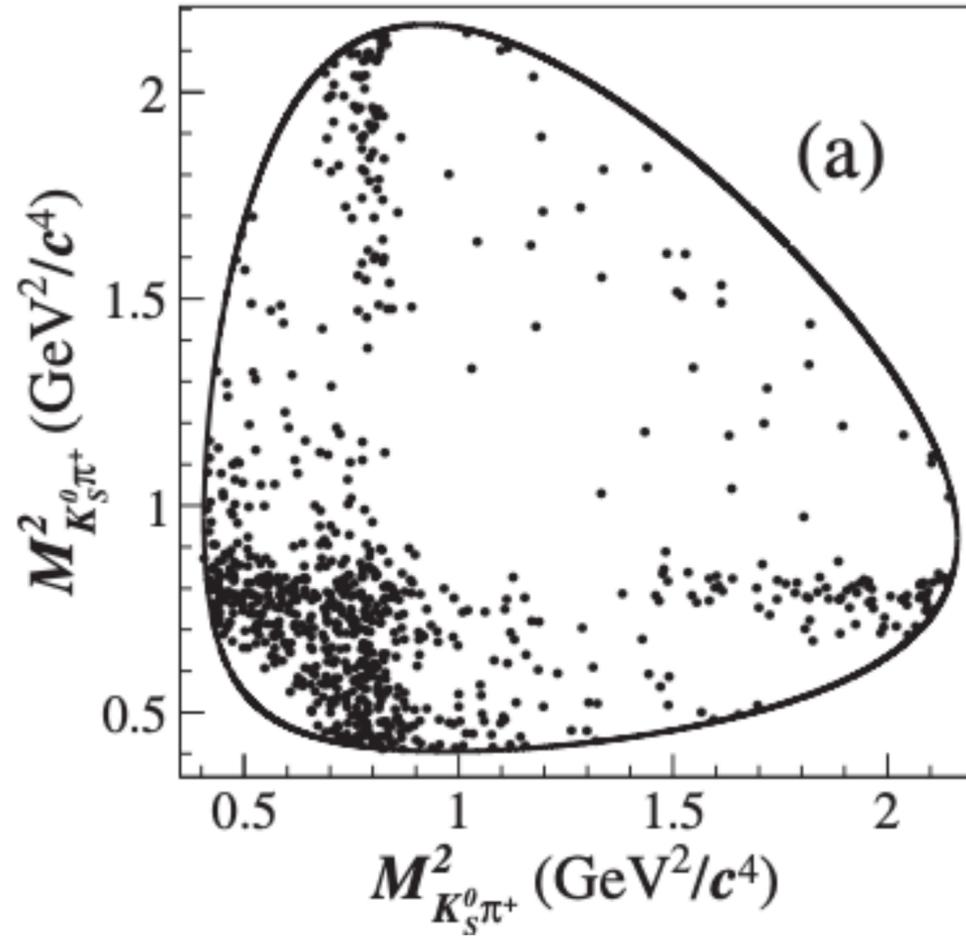


Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+$

Phys. Rev. D 105, L051103 (2022)

412 事例, 纯度97%

首次振幅分析



Amplitude

FF (%)

$D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^*(892)^+$

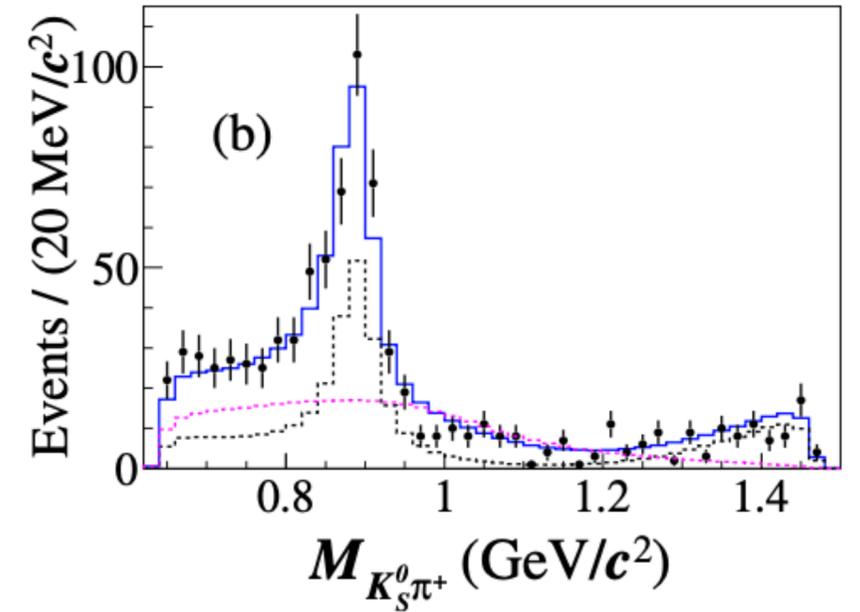
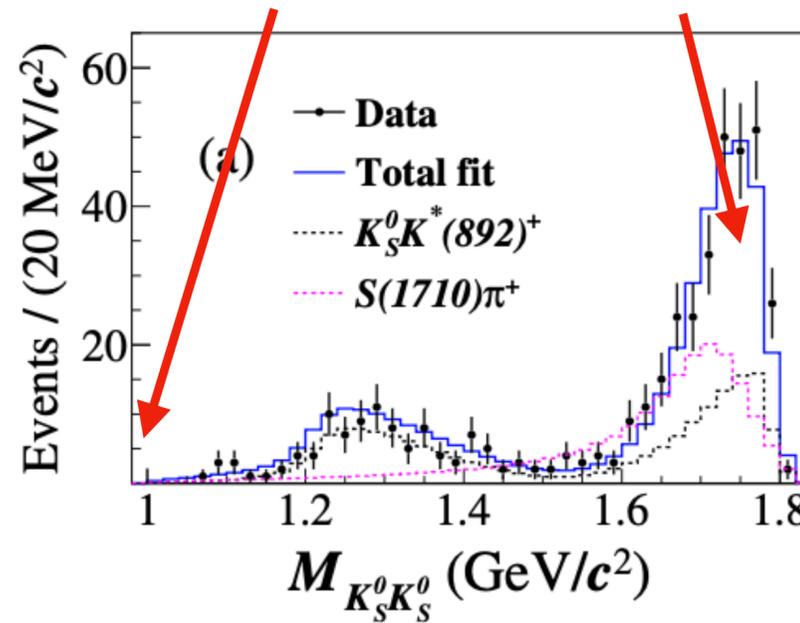
$43.5 \pm 3.9 \pm 0.5$

$D_s^+ \rightarrow S(1710)\pi^+$

$46.3 \pm 4.0 \pm 1.2$

S(980)

S(1710)



$S(1710)$: $f_0(1710)$ 和 $a_0(1710)$ 的混合:

- $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$: 相消干涉

PRD 104, 012016 (2021)

- $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+$: 相加干涉

观测到了新的同位旋为1的粒子 $a_0(1710)$

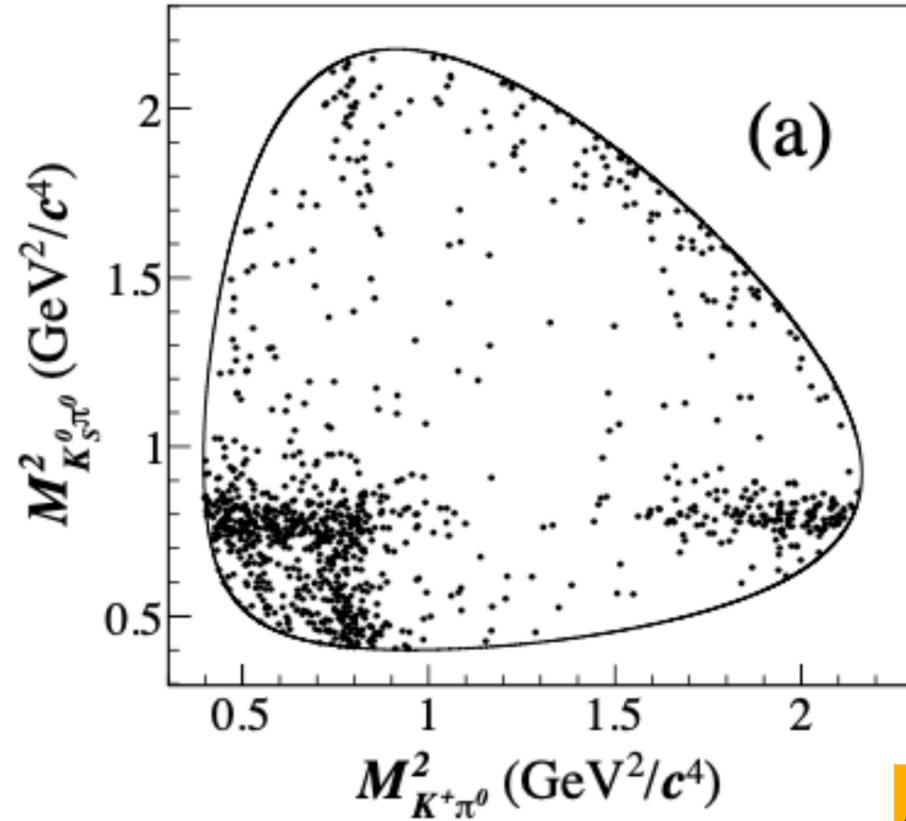
➡ $f_0(1710)$ 是 $K^* \bar{K}^*$ 分子态假设的证据

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+) = (0.68 \pm 0.04_{\text{stat.}} \pm 0.01_{\text{syst.}}) \%$$

Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$

Phys. Rev. Lett. 129, 182001 (2022)

首次振幅分析



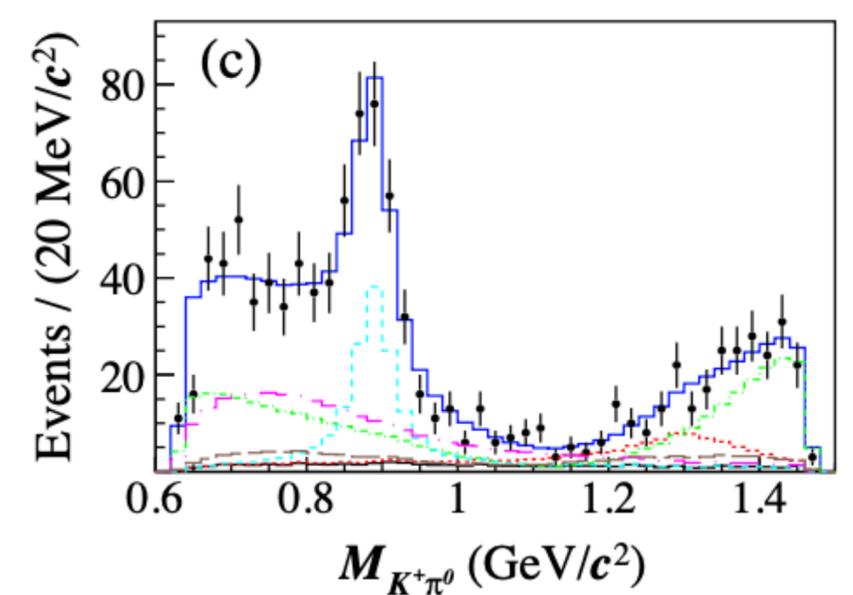
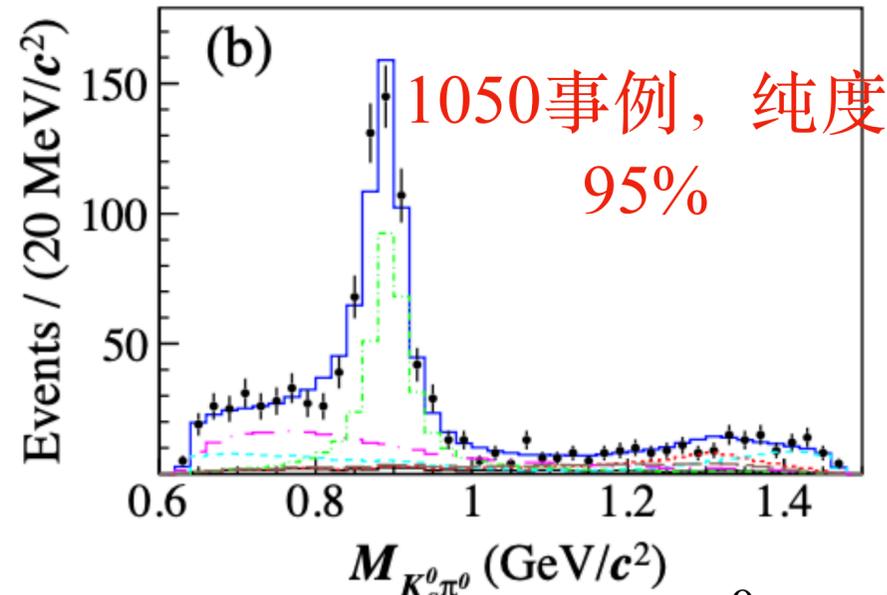
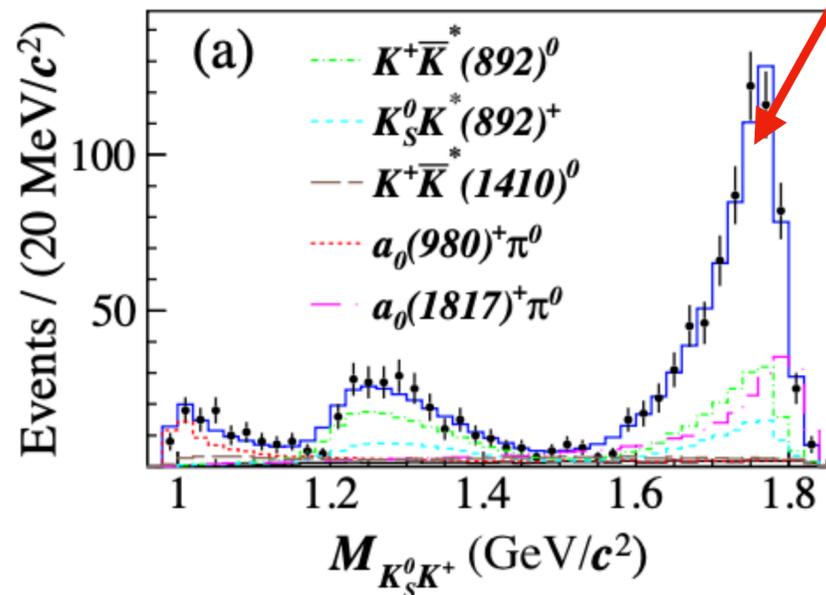
Amplitude	FF (%)	BF (10^{-3})	σ
$D_s^+ \rightarrow \bar{K}^*(892)^0 K^+$	$32.7 \pm 2.2 \pm 1.9$	$4.77 \pm 0.38 \pm 0.32$	> 10
$D_s^+ \rightarrow K^*(892)^+ K_S^0$	$13.9 \pm 1.7 \pm 1.3$	$2.03 \pm 0.26 \pm 0.20$	> 10
$D_s^+ \rightarrow a_0(980)^+ \pi^0$	$7.7 \pm 1.7 \pm 1.8$	$1.12 \pm 0.25 \pm 0.27$	6.7
$D_s^+ \rightarrow \bar{K}^*(1410)^0 K^+$	$6.0 \pm 1.4 \pm 1.3$	$0.88 \pm 0.21 \pm 0.19$	7.6
$D_s^+ \rightarrow a_0(1817)^+ \pi^0$	$23.6 \pm 3.4 \pm 2.0$	$3.44 \pm 0.52 \pm 0.32$	> 10

$$M(a_0(1817)^+) = (1.817 \pm 0.008_{\text{stat.}} \pm 0.020_{\text{syst.}}) \text{ GeV}/c^2$$

$$\Gamma(a_0(1817)^+) = (0.097 \pm 0.022_{\text{stat.}} \pm 0.015_{\text{syst.}}) \text{ GeV}/c^2$$

$a_0(1817)^+$

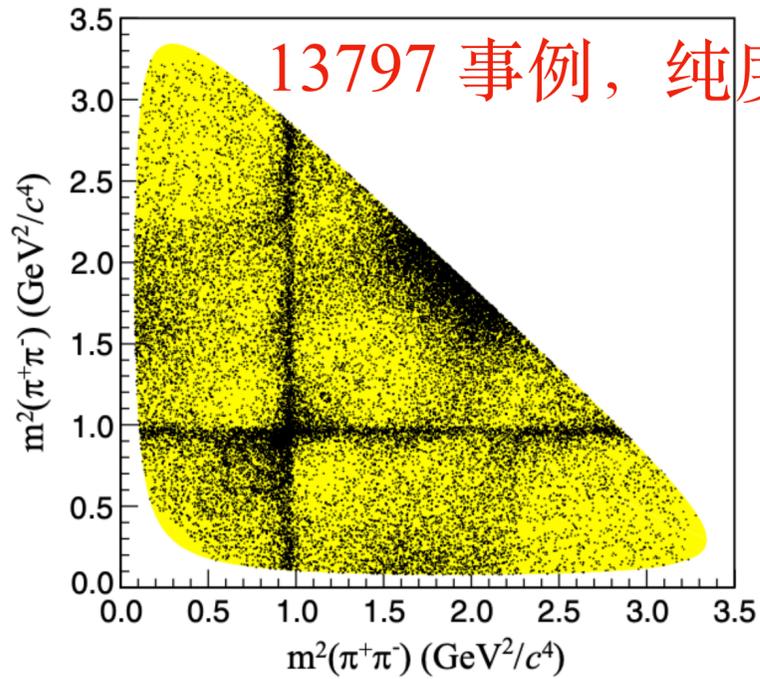
X(1812)的同位旋伙伴?



$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0) = (1.46 \pm 0.06_{\text{stat.}} \pm 0.05_{\text{syst.}}) \% \quad 9$$

Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$

Phys. Rev. D 106, 112006 (2022)

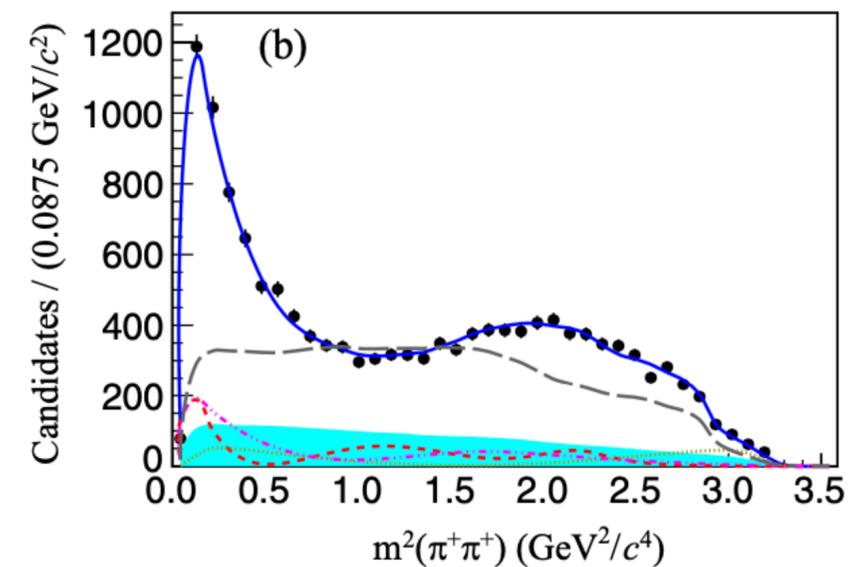
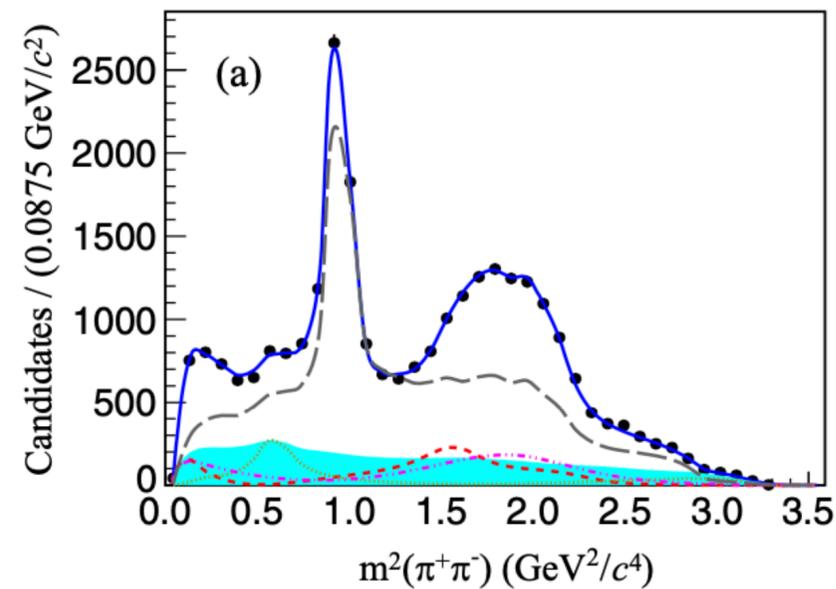
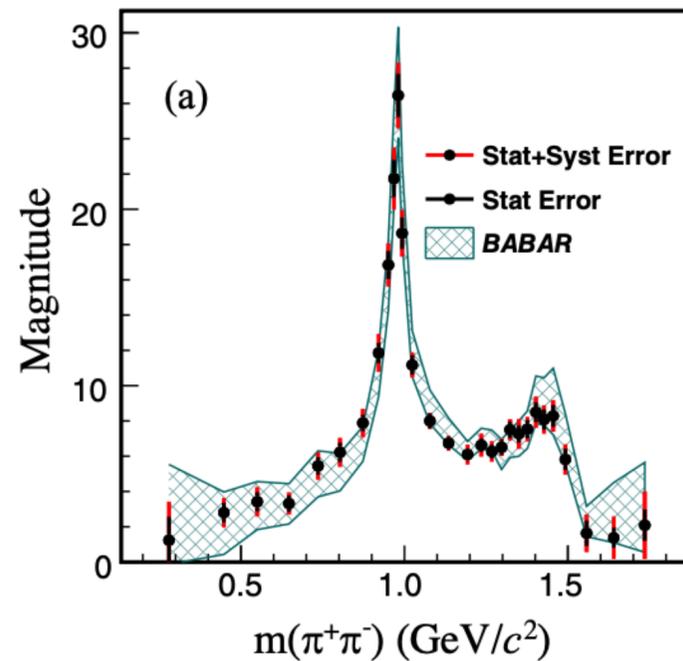
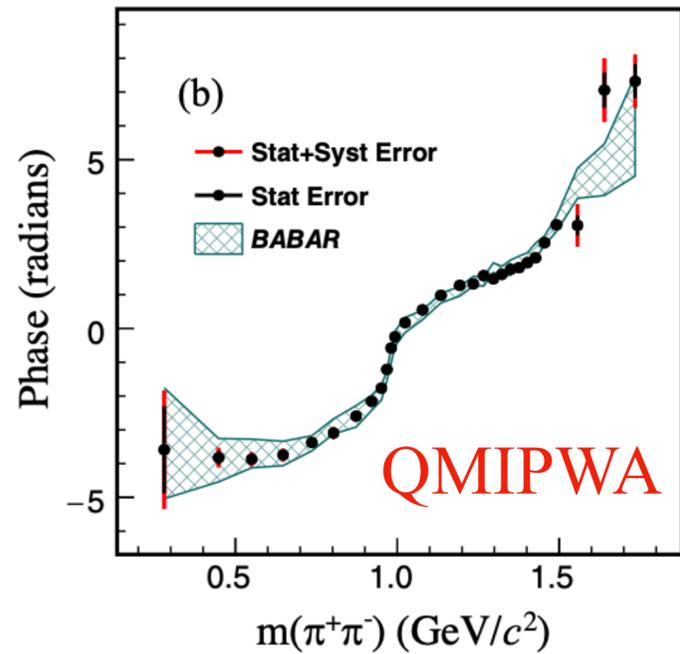


Decay mode	Fit fraction (%)	Magnitude	Phase (radians)
$f_2(1270)\pi^+$	$10.5 \pm 0.8 \pm 1.1$	1. (Fixed)	0. (Fixed)
$\rho(770)\pi^+$	$0.9 \pm 0.4 \pm 0.5$	$0.13 \pm 0.03 \pm 0.04$	$5.44 \pm 0.25 \pm 0.60$
$\rho(1450)\pi^+$	$1.3 \pm 0.4 \pm 0.5$	$0.91 \pm 0.16 \pm 0.21$	$1.03 \pm 0.32 \pm 0.32$
S wave	$84.2 \pm 0.8 \pm 1.2$	Table III	Table III
$\sum_i \mathcal{F}_i$	$96.8 \pm 2.4 \pm 3.3$		

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \rho^0 \pi^+) = (0.009 \pm 0.007) \%$$

与 Phys. Rev. D 89, 054006 (2014) 预测结果一致

与 Phys. Rev. D 79 (2009) 032003 结果一致



Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta'$

JHEP04(2022)058

Decay		$\mathcal{B}(\%)$		
Theory	$D_s^+ \rightarrow \rho^+ \eta'$	3.0 ± 0.5 [1]	1.7 [2]	1.6 [2]
Experiment	$D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta'$	$5.6 \pm 0.5 \pm 0.6$	CLEO	
	$D_s^+ \rightarrow \rho^+ \eta'$	$5.8 \pm 1.4 \pm 0.4$	BESIII	
	$D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta'$ (nonresonant)	< 5.1 (90% confidence level)		

理论预期值与实验测量值存在偏差

[1] [Phys. Rev. D 84 \(2011\) 074019](#)

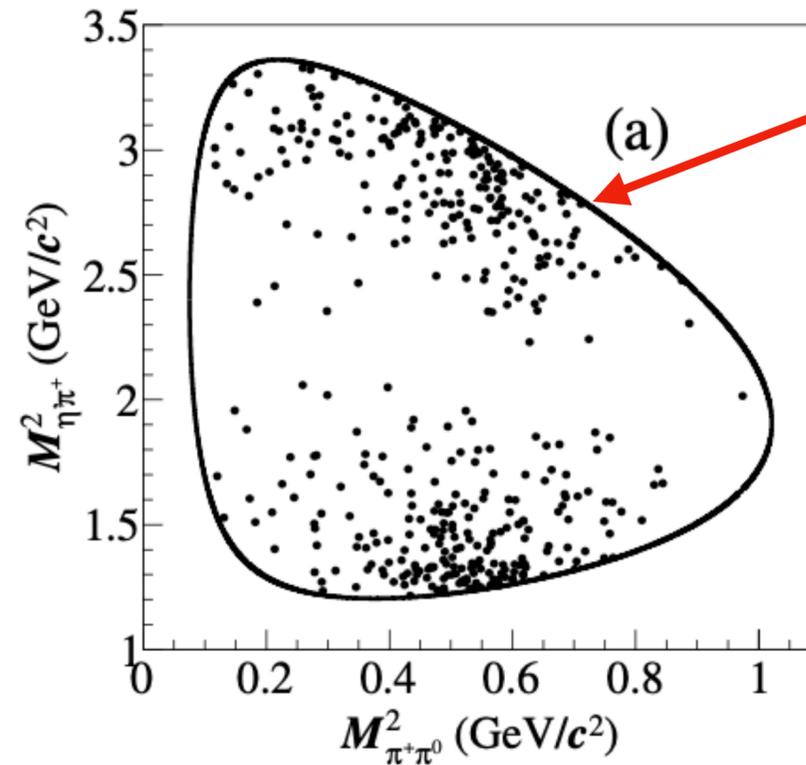
[2] [Phys. Rev. D 89 \(2014\) 054006](#)

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow (\pi^+ \pi^0)_S \eta') < 0.1 \% @ 90\% \text{ CL}$$

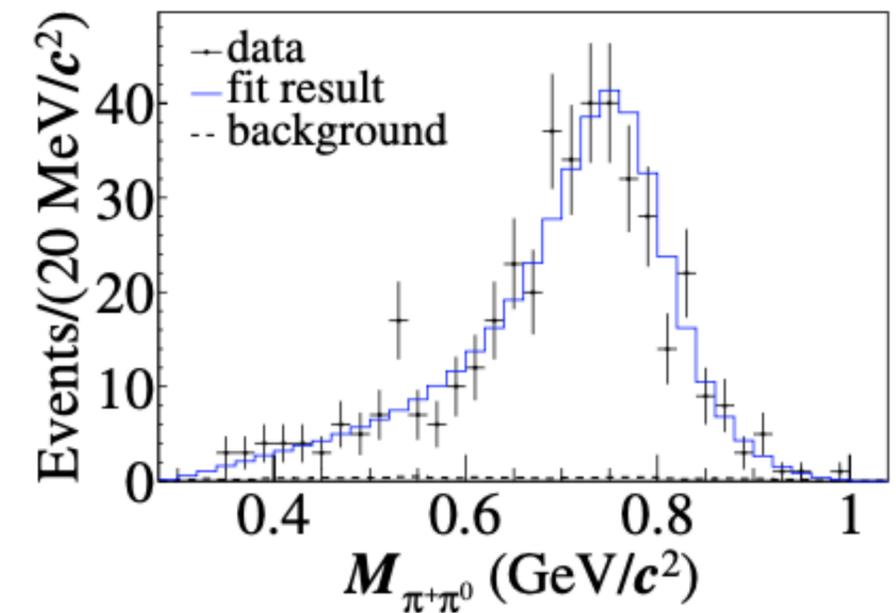
$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow (\pi^+ \pi^0)_P \eta') < 0.74 \% @ 90\% \text{ CL}$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta') = (6.15 \pm 0.25_{\text{stat.}} \pm 0.18_{\text{syst.}}) \%$$

精度显著提升

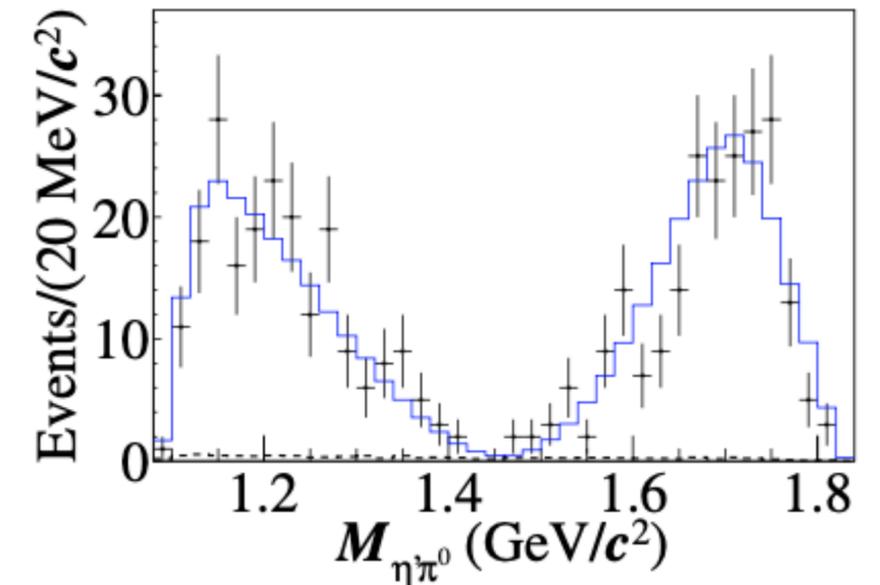
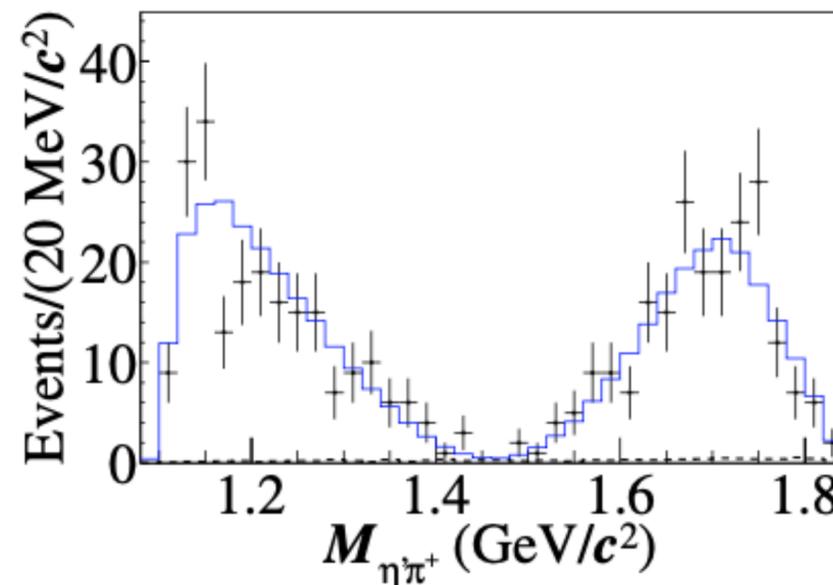


只有 $D_s^+ \rightarrow \rho^+ \eta'$ 的贡献



411事例，纯度96%

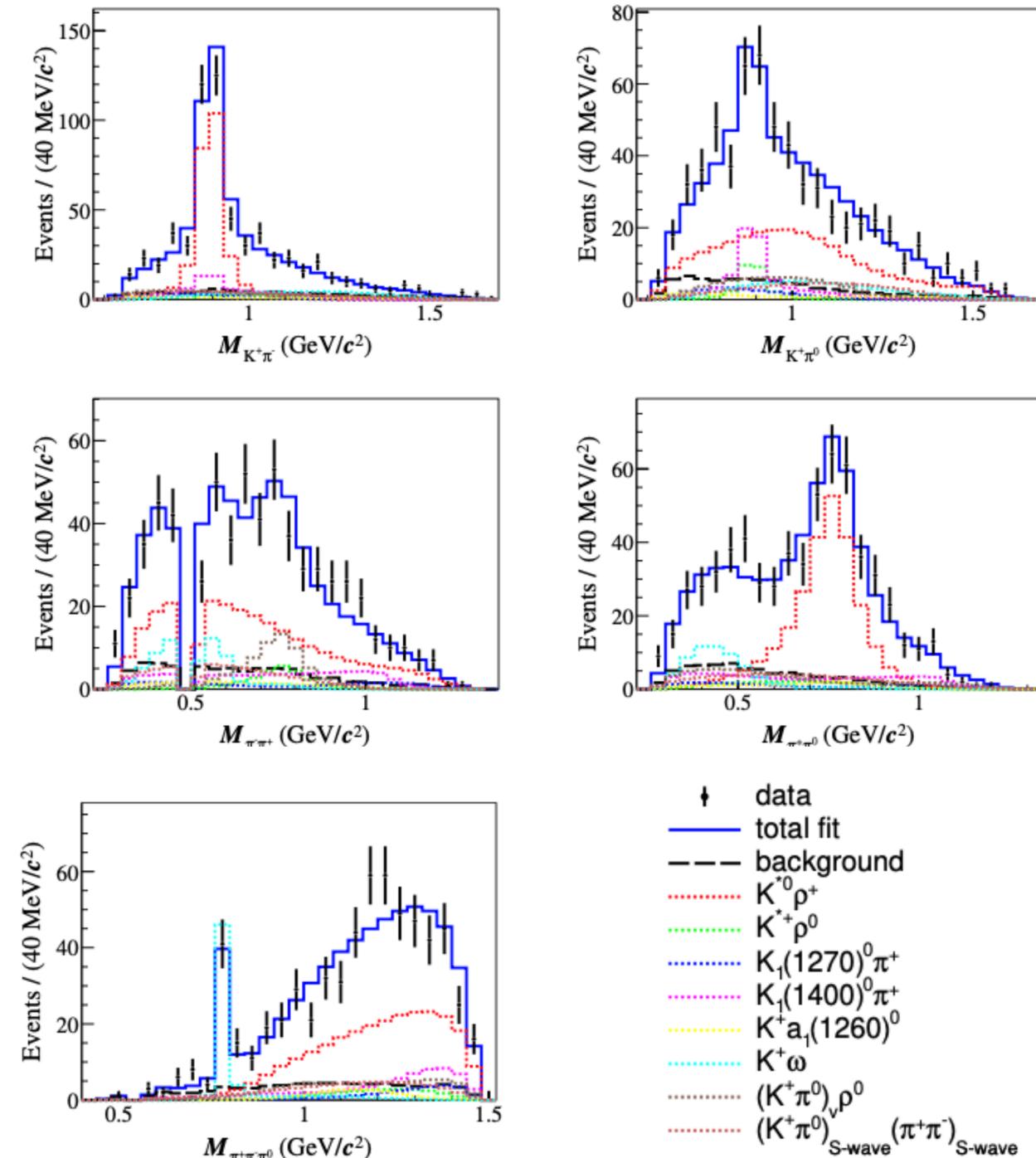
首次振幅分析



Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

JHEP09(2022)242

首次振幅分析, 630 事例, 纯度87%



Intermediate process	BF (10^{-3})
$D_s^+[S] \rightarrow K^*(892)^0\rho^+$	$1.41 \pm 0.23 \pm 0.07$
$D_s^+[P] \rightarrow K^*(892)^0\rho^+$	$2.53 \pm 0.28 \pm 0.12$
$D_s^+ \rightarrow K^*(892)^0\rho^+$	$3.95 \pm 0.35 \pm 0.17$
$D_s^+[P] \rightarrow K^*(892)^+\rho^0$	$0.42 \pm 0.16 \pm 0.06$
$D_s^+ \rightarrow K^+\omega$	$0.95 \pm 0.12 \pm 0.06$
$D_s^+ \rightarrow K_1(1270)^0\pi^+, K_1(1270)^0[S] \rightarrow K^+\rho^-$	$0.39 \pm 0.12 \pm 0.06$
$D_s^+ \rightarrow K_1(1400)^0\pi^+, K_1(1400)^0[S] \rightarrow K^*(892)^+\pi^-$	$0.55 \pm 0.09 \pm 0.03$
$D_s^+ \rightarrow K_1(1400)^0\pi^+, K_1(1400)^0[S] \rightarrow K^*(892)^0\pi^0$	$0.59 \pm 0.09 \pm 0.02$
$D_s^+ \rightarrow K_1(1400)^0\pi^+, K_1(1400)^0[S] \rightarrow K^*(892)\pi$	$1.10 \pm 0.19 \pm 0.04$
$D_s^+ \rightarrow a_1(1260)^0K^+, a_1(1260)^0[S] \rightarrow \rho^+\pi^-$	$0.19 \pm 0.07 \pm 0.09$
$D_s^+ \rightarrow a_1(1260)^0K^+, a_1(1260)^0[S] \rightarrow \rho^-\pi^+$	$0.19 \pm 0.07 \pm 0.09$
$D_s^+ \rightarrow a_1(1260)^0K^+, a_1(1260)^0[S] \rightarrow \rho\pi$	$0.32 \pm 0.12 \pm 0.15$
$D_s^+[S] \rightarrow (K^+\pi^0)_V\rho^0$	$1.01 \pm 0.20 \pm 0.06$
$D_s^+ \rightarrow (K^+\pi^0)_{S\text{-wave}}(\pi^+\pi^-)_{S\text{-wave}}$	$0.93 \pm 0.22 \pm 0.09$

• 主要过程:

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K^*(892)^+\rho^0) = (3.95 \pm 0.20_{\text{stat.}} \pm 0.17_{\text{syst.}}) \times 10^{-3}$$

$$A_{CP} = \frac{\mathcal{B}(D_s^+) - \mathcal{B}(D_s^-)}{\mathcal{B}(D_s^+) + \mathcal{B}(D_s^-)} = (6.5 \pm 5.4_{\text{stat.}} \pm 0.7_{\text{syst.}}) \%$$

没有明显的CP 破坏

• $\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K^+\omega) = (0.95 \pm 0.12_{\text{stat.}} \pm 0.06_{\text{syst.}}) \times 10^{-3}$

理论预期: $2.12 \times 10^{-3} \rightarrow 0.99 \times 10^{-3}$

帮助理解SU(3)_F味道对称性破缺效应

$$\mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K^+\pi^+\pi^-\pi^0) = (9.75 \pm 0.54_{\text{stat.}} \pm 0.17_{\text{syst.}}) \times 10^{-3}$$

Phys. Rev. D 100 (2019) 093002
 Phys. Rev. D 104 (2021) 073003

Amplitude analysis of $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-$

JHEP07(2022)051

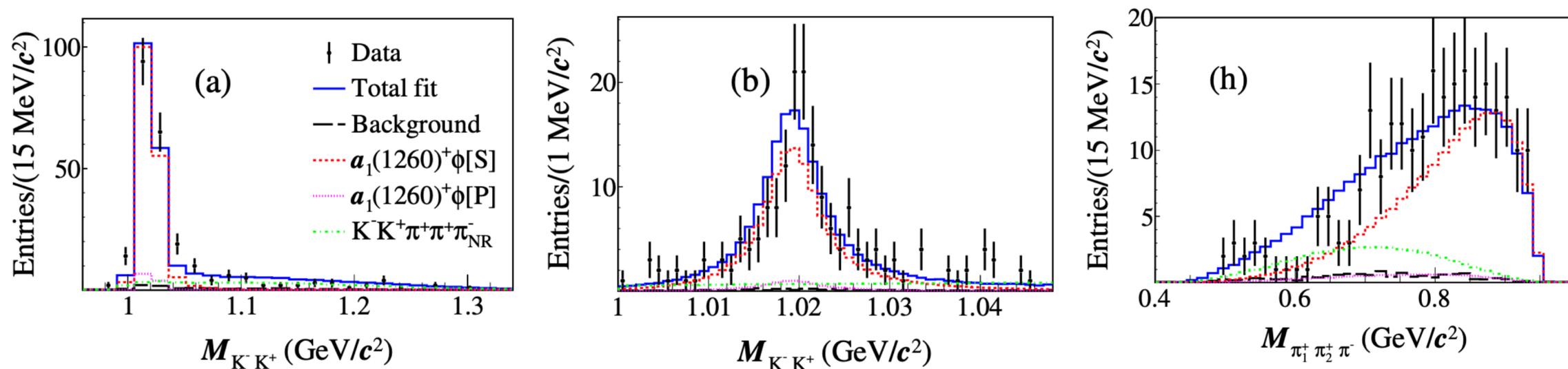
首次振幅分析，243事例，纯度96%

Amplitude	Phase	FF (%)	Significance (σ)
$D_s^+[S] \rightarrow a_1(1260)^+\phi$	0 (fixed)	$73.1 \pm 3.1 \pm 1.5$	> 10
$D_s^+[P] \rightarrow a_1(1260)^+\phi$	$1.47 \pm 0.19 \pm 0.03$	$5.0 \pm 1.7 \pm 0.7$	5.5
$D_s^+ \rightarrow a_1(1260)^+\phi$...	$78.1 \pm 2.9 \pm 1.6$...
$D_s^+ \rightarrow (K^- K^+ \pi^+ \pi^+ \pi^-)_{NR}$	$1.99 \pm 0.12 \pm 0.17$	$21.8 \pm 2.9 \pm 0.8$	> 10

- 主要过程

$$\begin{aligned} \mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow a_1(1260)^+\phi) \\ = (5.15 \pm 0.41_{\text{stat.}} \pm 0.32_{\text{syst.}}) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

$D_s^+ \rightarrow AP$ 过程的信息十分有限，
帮助理解该类过程



$$\begin{aligned} \mathcal{B}(D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^+ \pi^-) \\ = (6.60 \pm 0.47_{\text{stat.}} \pm 0.38_{\text{syst.}}) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

其他 D_s 介子多体衰变振幅分析测量

✓ $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \eta$: **Phys. Rev. Lett. 123, 112001(2019)**

✓ $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$: **JHEP01(2022)052**

✓ $D_s^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^0$: **JHEP06(2021)181**

✓ $D_s^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$: **JHEP08 (2022) 196**

✓ $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \eta$: **Phys. Rev. D 104, L071101 (2021)**

✓ $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^- \pi^+ \pi^+$: **Phys. Rev. D 103, 092006 (2021)**

✓ $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^0$: **Phys. Rev. D 104, 032011 (2021)**

✓ $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$: 待发表

✓ $D_s^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$: 待发表

.....

目录

- ✓ 引言
- ✓ 分析策略和数据集
- ✓ 振幅分析
- ✓ 总结

总结

✓ BESIII上 D_s 介子的振幅分析研究成果丰富

- 三、四与五体振幅分析的成功研究
- $D \rightarrow VP, SP, AP, VV\dots$ 等中间过程的精确测量
- 新的同位旋为1的粒子 — $a_0(1817)$ 的发现

✓ 未来会有更多的重要结果

- 四体、五体多 π 末态的振幅分析研究
- 与 D 介子振幅分析对比研究

谢谢各位老师、同学的聆听！