BESIII 上 D_s^+ 介子振幅分析

卢泽辉

山西大学

BESIII 粲强子物理研讨会

成都理工大学　2026 年 10 月

提纲

一、W 湮灭与 D_s^+ 的优势

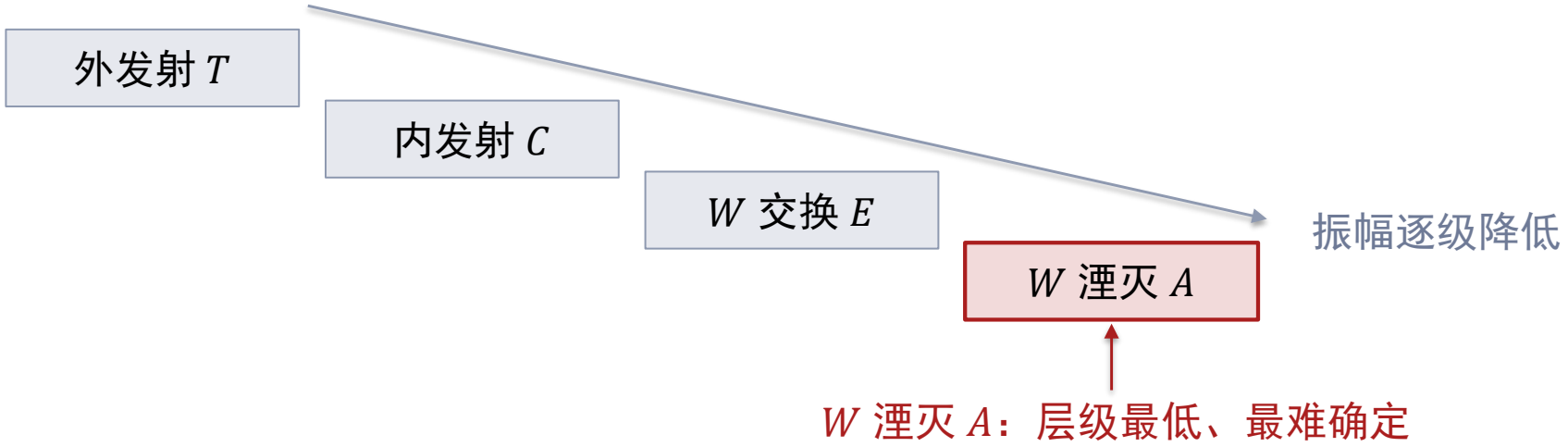
二、理论解释与争议

三、其他衰变道

四、总结

拓扑图振幅层级

在拓扑图振幅层级中，W 湮灭图 A 位于**最低端**：VP 末态 $|A_V/T_P| \approx 0.07$，比外发射低一个数量级以上。



由数据确定的振幅比

PRD 105, 033006；PRD 109, 073008

末态类型	$\|A/T\|$
PP	**0.18**
VP	**0.07**

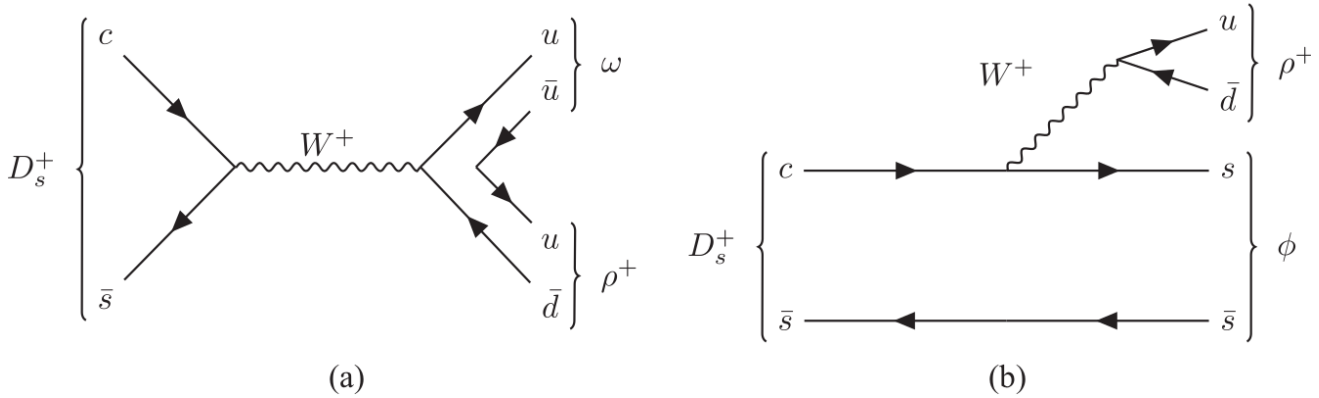
纯 W 湮灭道（VP）分支比

PDG

道	$\mathcal{B}$
$D_s^+ \to \omega\pi^+$	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$
$D_s^+ \to \rho^0\pi^+$	$(1.14 \pm 0.16) \times 10^{-4}$

为何选 D_s^+ 介子

W 湮灭图 A 的振幅在 D_s^+ 中最易测量。



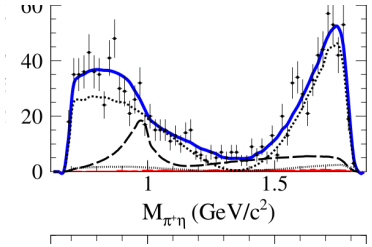
（a）W 湮灭（$D_s^+ \to \omega\rho^+$）；（b）外发射（$D_s^+ \to \varphi\rho^+$）

介子	拓扑图成分（PRD 109, 073008；PRD 104, 073003）	W 湮灭 A
$D^0 = c\bar{u}$	T、C、E	**无**（$c\bar{u}$ 中性，不能湮灭为 $W^{\pm}$）
$D^+ = c\bar{d}$	T、C、A	有，含 V_{cd}（Cabibbo 压低）
$D_s^+ = c\bar{s}$	T、C、A	有，含 V_{cs}（**Cabibbo 允许**）

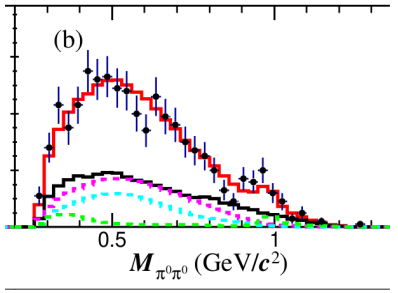
- D^+、D_s^+ 均**不含 W 交换 E**；$|V_{cs}/V_{cd}| \approx 4.3$ —— 同一 A 在 D_s^+ 中的振幅约为 D^+ 的 4 倍。

BESIII上的 W 湮灭过程的测量

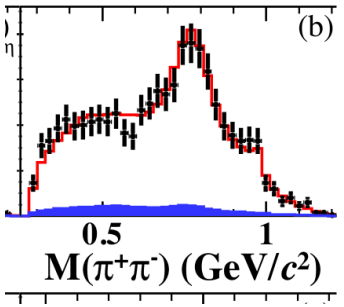
BESIII 已对六个 W 湮灭过程进行测量。



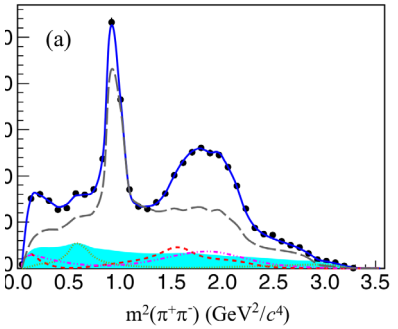
$D_s^+ \to a_0(980)\pi \to \pi^+\pi^0\eta$
1239 事例　　97.7%　　3.19fb^{-1}
PRL 123, 112001



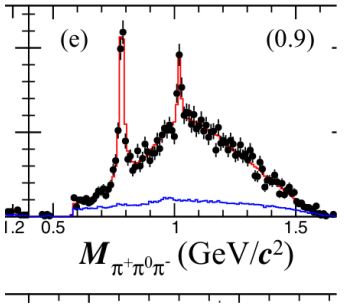
$D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500) \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$
821 事例　　58.3%　　7.33fb^{-1}
arXiv:2603.18521



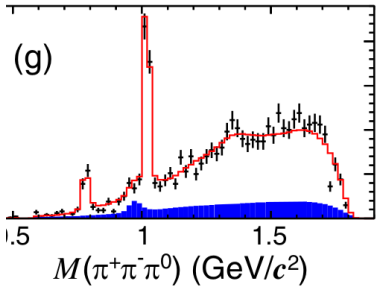
$D_s^+ \to a_0(980)^+\rho^0 \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$
2139 事例　　$>85\%$　　6.32fb^{-1}
PRD 104, L071101



$D_s^+ \to \rho^0\pi^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$
13797 事例　　$\sim 80\%$　　3.19fb^{-1}
PRD 106, 112006



$D_s^+ \to \omega\rho^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
1888 事例　　79.3%　　7.33fb^{-1}
PRL 134, 201902



$D_s^+ \to \omega\pi^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$
1552 事例　　$\sim 87\%$　　7.33fb^{-1}
PRL 134, 011904

振幅分析方法

所有测量均使用 isobar 振幅模型，以不分 bin 方式进行极大似然拟合。

总振幅为各中间过程的相干叠加：

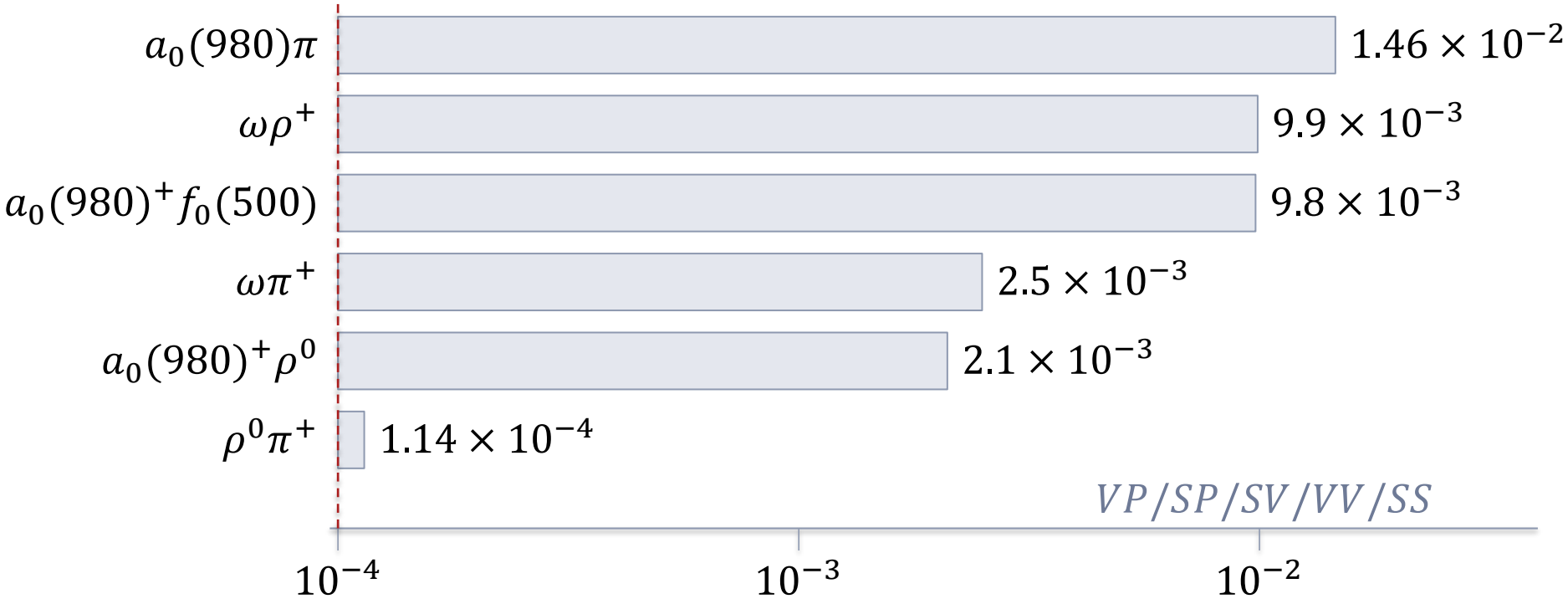
$$M = \sum_n \rho_n e^{i\varphi_n} A_n, \qquad A_n = P_{1n} P_{2n} S_n X_{1n} X_{2n} X_n^D$$

- ρ_n、φ_n：第 n 个中间过程的**模**与**相对强相位**（自由参数）。
- P：中间共振态传播子；S_n：自旋因子（协变张量构造）；X：Blatt–Weisskopf 势垒因子。
- **双标记**挑选方法；**不分 bin 极大似然**拟合；只保留显著性超过阈值（3σ 或 5σ）的分量；取一个分量作**参考振幅**（模 1、相位 0）。

B. S. Zou, D. V. Bugg, Eur. Phys. J. A 16 (2003) 537；PRD 104, 032011

D_s^+ 的 W 湮灭道分支比

同为 W 湮灭：VP 末态分支比为 10^{-3}–10^{-4}，而 SP、SV、VV、SS 末态达 10^{-2}，相差 1–2 个数量级。



最高的 SP 道约为最低纯 W 湮灭道的 128 倍。

以 $D_s^+ \to a_0(980)\pi$ 为例

W 湮灭振幅强度可由上述道的测量**得到**；其在 $D \to SP$ 衰变中的值远大于 PP、VP。

- 由 $D_s^+ \to a_0(980)\pi$ 的测量，可拟合出 $D \to SP$ 衰变的 W 湮灭振幅。
- 短程 W 湮灭不足以解释$D \to SP$过程出现的巨大 W 湮灭振幅。
- 考虑长程相互作用贡献的 W 湮灭振幅。

拟合得到的 $D \to SP$ W 湮灭振幅
（PRD 105, 033006）

$$|A| = (0.91 \pm 0.12) \times 10^{-6}\ \text{GeV}$$

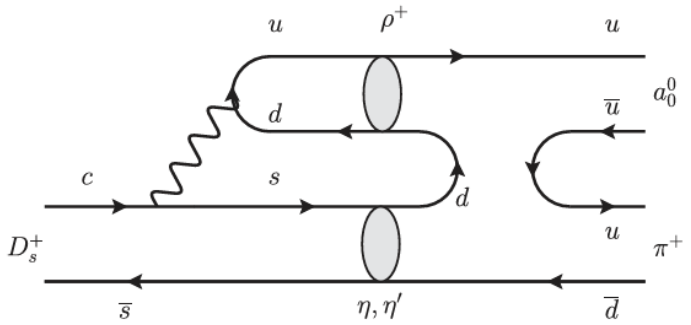


FIG. 1. Long-distance contributions to the W-annihilation amplitude of $D_s^+ \to a_0^0\pi^+$ through final-state rescattering of $\rho\eta^{(\prime)} \to a_0\pi$.

与树图振幅之比

末态	$\lvert A/T\rvert$
SP	$\sim 1/2$
PP	0.18
VP	0.07

理论解释与争议

这些道可由多种机制描述，理论计算与实验结果的对照如下。

机制（文献）	理论计算	实验结果
重散射 / 末态相互作用（PLB 803 (2020) 135279；EPJC 86 (2026) 89）	$B(D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)) = (1.0 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	$(0.98 \pm 0.16 \pm 0.22)\%$
三角圈图（PRD 103, 116016）	$B(D_s^+ \to a_0(980)\pi)$=1.45%	$(1.46 \pm 0.15 \pm 0.23)\%$
四夸克态（PRD 110, 094052）	$B(D_s^+ \to a_0(980)\pi) \sim (1.6 - 3.0) \times 10^2$	$(1.46 \pm 0.15 \pm 0.23)\%$
$a_0(1710)$ 分子态（PRD 111, 094047）	$R_B = B(\omega\rho^+)/B(\varphi\rho^+) \in$ [3.5,6]	$R_B \approx 4$

轻标量介子

D_s 到 $\pi\pi$ / $K\bar{K}$ 的 S 波。

衰变过程	主要成分
$D_s^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$	$\pi\pi$ 的 S 波主导，用 $(\pi^+\pi^-)_S$ 描述
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0$	$f_0(980)\pi^+$
$D_s^+ \to K^+K^-\pi^+$	$S(980)\pi^+$
$D_s^+ \to K_S^0K_S^0\pi^+$	$S_0(1710)\pi^+$
$D_s^+ \to K^+\pi^+\pi^-$	$f_0(500)K^+$、$f_0(980)K^+$、$f_0(1370)K^+$（首次观测）

- **同位旋**：$f_0 \to \pi^+\pi^-$ 与 $\pi^0\pi^0$ 的分支比之比应为 2；测量结果与其一致。
- f_0的四夸克态与末态相互作用等贡献

ϕ 与 K_1 衰变道

ϕ、K_1 相关的结果与比较。

$\phi \to K_S^0 K_L^0$ / $\phi \to K^+K^-$ = $0.593 \pm 0.023 \pm 0.014 \pm 0.016$
（PDG 0.740 ± 0.031，$> 3\sigma$）

$\phi \to \pi^+\pi^-\pi^0$ / $\phi \to K^+K^-$ = $0.230 \pm 0.014 \pm 0.010$
（PDG 0.313 ± 0.010，$> 4\sigma$）

观测量	测量结果	对比	偏差
$K_1(1270)$：$\mathcal{B}(K^*\pi)/\mathcal{B}(K\rho)$	$0.99 \pm 0.15 \pm 0.18$（强子道）	$0.203 \pm 0.021 \pm 0.087$（半轻子道）	$\approx 3\sigma$（PRD 104, 032011；PRL 135, 091801）
K_S^0–K_L^0 不对称性	$(-14.5 \pm 5.1 \pm 1.8)\%$	TDA -16.4 ± 3.2 / FAT -7.0 ± 3.2	$\approx 2.7\sigma$（PRL 135, 161902）

D_s^+ 振幅分析汇总

17个强子末态衰变过程。

衰变过程	DOI
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$	PRL 123, 112001 (2019)
$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$	PRD 104, L071101 (2021)
$D_s^+ \to 5\pi$	PRL 134, 201902 (2025)
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$	arXiv:2603.18521 (2026)
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta'$	JHEP 04 (2022) 058
$D_s^+ \to \pi^+\pi^-\pi^+$	PRD 106, 112006 (2022)
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0$	JHEP 01 (2022) 052
$D_s^+ \to K^+\pi^+\pi^-$	JHEP 08 (2022) 196
$D_s^+ \to K^+\pi^+\pi^-\pi^0$	JHEP 09 (2022) 242
$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\pi^0$	PRL 134, 011904 (2025)
$D_s^+ \to K_S^0K_L^0\pi^+$	PRL 135, 161902 (2025)
$D_s^+ \to K^+K^-\pi^+\pi^0$	PRD 104, 032011 (2021)
$D_s^+ \to K_S^0K^-\pi^+\pi^+$	PRD 103, 092006 (2021)
$D_s^+ \to K_S^0K_S^0\pi^+$	PRD 105, L051103 (2022)
$D_s^+ \to K_S^0\pi^+\pi^0$	JHEP 06 (2021) 181
$D_s^+ \to K^-K^+\pi^+\pi^+\pi^-$	JHEP 07 (2022) 051
$D_s^+ \to K_S^0K^+\pi^0$	PRL 129, 182001 (2022)

- 4个含π末态
- 5个含K_S^0末态
- 1个含K_L^0末态
- 4个含$K\bar{K}$末态

总结

- **基于 BESIII 的 D_s^+ 振幅分析**：首次观测纯 W 湮灭过程 $D_s^+ \to \omega\rho^+$，以及 SS 末态 $D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$；并给出 $a_0(980)\pi$、$a_0(980)^+\rho^0$ 等 W 湮灭过程的测量结果。
- **现象**：SP、SV、VV、SS 末态的分支比比 VP 高 1–2 个数量级；$D_s^+ \to \omega\rho^+$ 中 D 波主导，$D_s^+ \to \varphi\rho^+$ 中 S 波主导。
- **一些解释**：末态相互作用 / 重散射；轻标量介子的四夸克或分子态性质。
- **展望**：目前D_s^+介子振幅分析已由增量市场转为存量市场，从首次测量转变为高精度需求（采用新的方法/技术）。

感谢各位老师垂听！