University of Chinese Academy of Sciences
Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

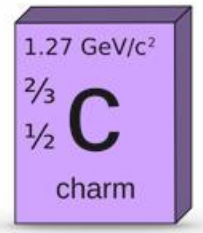
末态含 a_0 的粲介子衰变振幅分析

郁烨淳

中国科学院大学

2026-10-18

研究背景



$a_0(980)$ 内部结构饱受争议，需要实验测量

- 轻标量介子性质十分复杂，几个典型的问题：

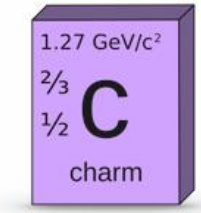
  $a_0(980)$、$f_0(980)$ 质量简并、"倒置谱"问题（$a_0(980)$不含 s 却比含 s 的 κ(700) 重）、σ/κ 为何远比 f_0/a_0宽...

- 普通两夸克态无法解释，催生出多种理论解释：(i) 紧致四夸克态；(ii) 双介子束缚态（强子分子态）；(iii) 混合态；

- 轻标量介子的本质是非微扰 QCD 的核心问题之一：

  它们对于理解低能区的手征对称性与禁闭物理非常重要。

目录



聚介子振幅分析—链接实验（多体）和理论（二体）的桥梁

线索1: $D \to SP$ 过程的研究

$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$, $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$, $D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$, $D^+ \to \pi^+\eta\eta$

↓

$D_s^+ \to KK\pi$

线索2: $D \to SV, SS$ 过程的研究

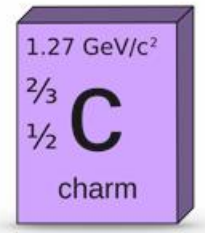
$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$ → $D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$

$D^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$

$D^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$

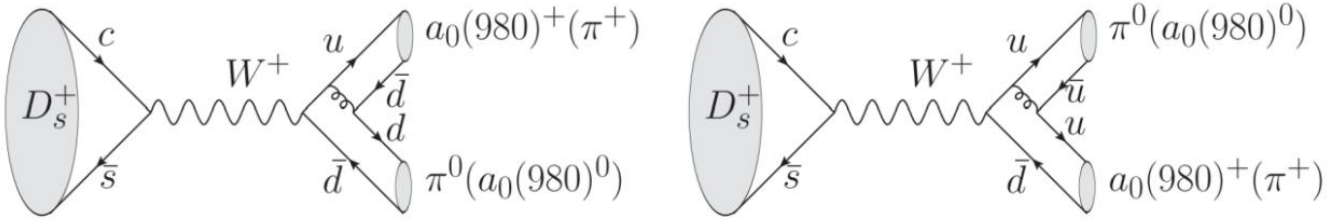
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$

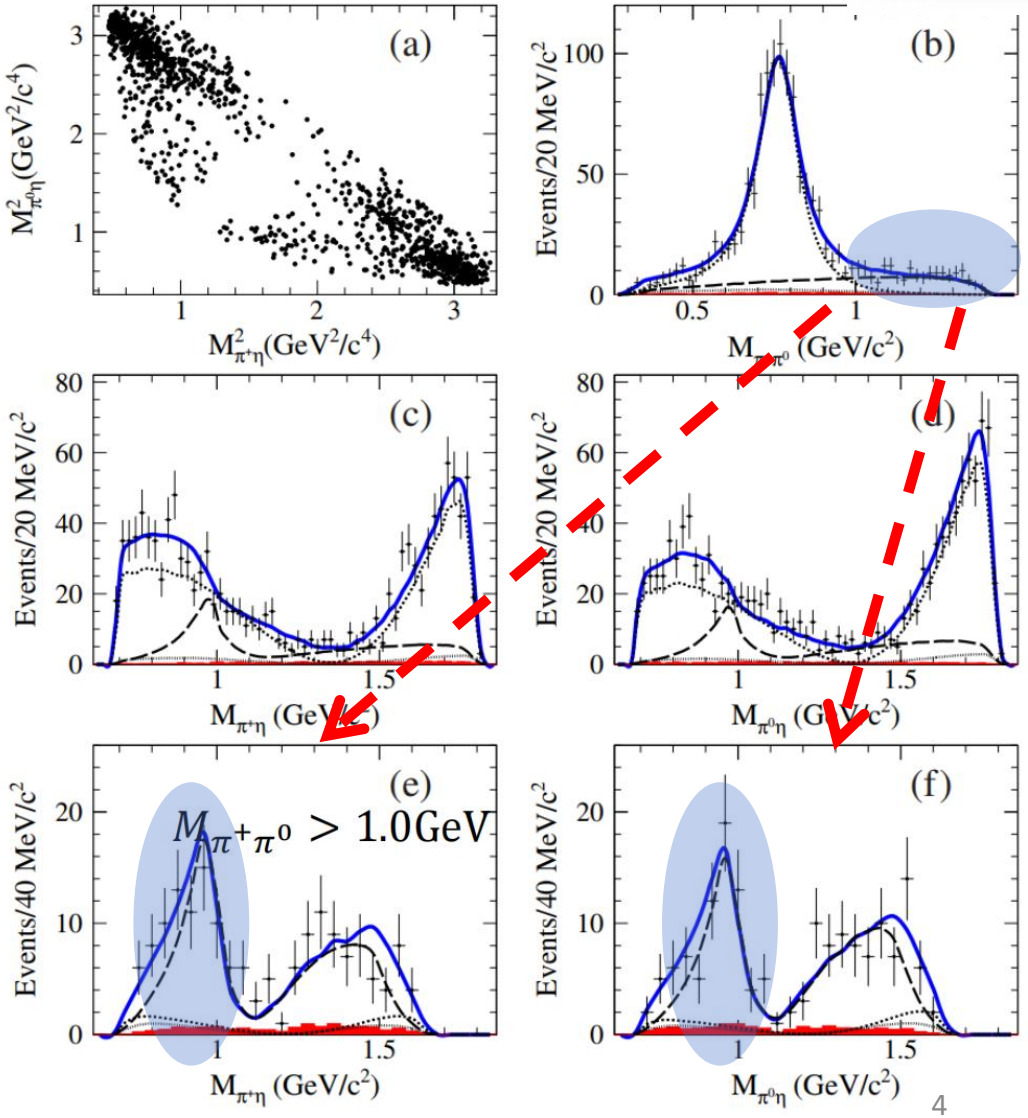
PRL 123, 112001 (2019)



- 首次观测到以湮灭（A）拓扑为主导的衰变过程;
- $D_s^+ \to \pi^{+/0} a_0(980)^{0/+}$ 分支比比其他已测量的纯 W 湮灭衰变道$D_s^+ \to \pi^+\omega$，$D_s^+ \to \pi^+\rho$大一个数量级；

  $D \to SP$的A图比$D \to VP$的大
- 理论家开始从该实验结果论证标量介子a_0存在四夸克成份的可能性
- 如果a_0存在四夸克成份，则$D_s^+ \to \pi^{+/0} a_0(980)^{0/+}$并不是纯湮灭过程，其包含了类似T图的拓扑结构。





线索1: $D \to SP$ 过程的研究

$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$, $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$, $D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$, $D^+ \to \pi^+\eta\eta$

↓

$D_s^+ \to KK\pi$

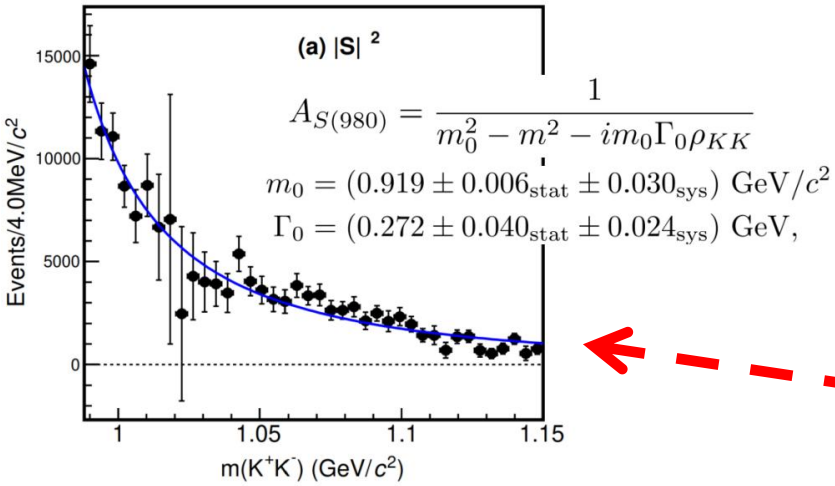
$D_s^+ \to KK\pi$

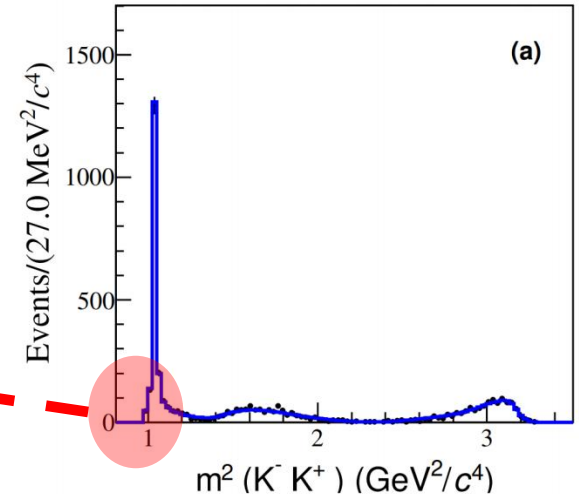
- 采用无模型依赖方法提取KK质量谱低质量端的 S 波线形。
- 衰变到K^+K^-末态时：

  $a_0(980)$与$f_0(980)$相长干涉。

$D_s^+ \to K^+K^-\pi^+$

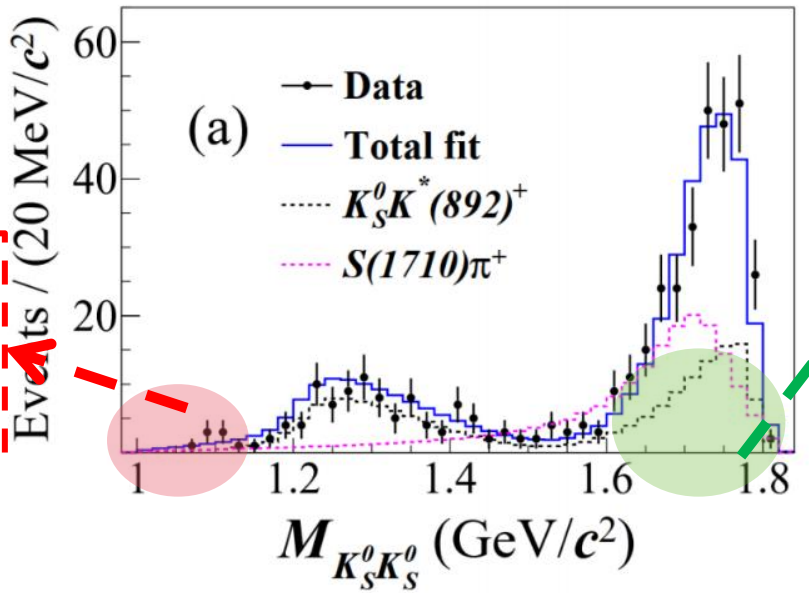
PRD 104, 012016 (2021)





$D_s^+ \to K_S^0 K_S^0 \pi^+$

Phys.Rev.D 105 (2022) L051103

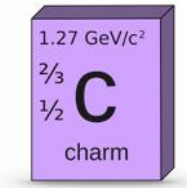


- 低端几乎没有信号!
- 衰变到$K_S^0K_S^0$末态时：

  $a_0(980)$与$f_0(980)$相消干涉。

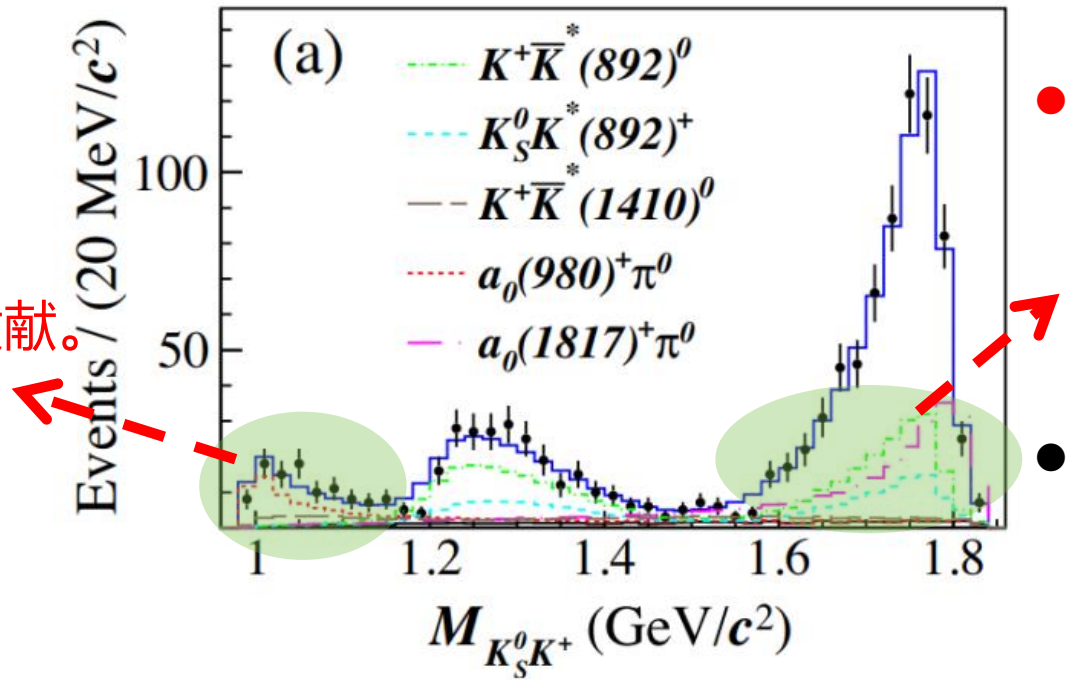
- $K_S^0K_S^0$不变质量谱高端：观测到$f_0(1710)$同位旋为 1的 伙伴粒子：**中性类a_0态 。**
- $f_0(1710)$与中性类a_0态的振幅在$K_S^0K_S^0$末态发生相长干涉，K^+K^-末态发生相消干涉；

$D_s^+ \to K K \pi$



$D_s^+ \to K_S^0 K^+ \pi^0$ PRL 129, 182001 (2022)

- $K_S^0 K^+$没有$f_0(980)$的干扰，低端看到显著的$a_0(980)$贡献。



$$m(a_0) = (1.817 \pm 0.008 \pm 0.020)\ \mathrm{GeV}/c^2$$
$$\Gamma(a_0) = (0.097 \pm 0.022 \pm 0.015)\ \mathrm{GeV}/c^2$$

$$\mathcal{B}(D_s^+ \to a_0(1817)^+\pi^0, a_0(1817)^+ \to K_S^0 K^+) = (3.44 \pm 0.52 \pm 0.32) \times 10^{-4}$$

- 高端：首次观测到一个新的**带电类a_0态**：$a_0(1817)$，其质量为1.817 GeV。
- 理论上，给出了不同解释：$f_0(1710)$介子的同位旋 1 伙伴；也可以是$X(1812)$；

  Phys.Rev. D 105, 114014 (2022)

线索1: $D \to SP$ 过程的研究

纯W玻色子湮灭，分支比远高于预期；
理论重新审视湮灭图贡献

$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$, $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$, $D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$

$D^+ \to \pi^+\eta\eta$

$D_s^+ \to KK\pi$

首次发现类a_0态$a_0(1817)$；

在KK阈值上看到了$a_0(980)$.

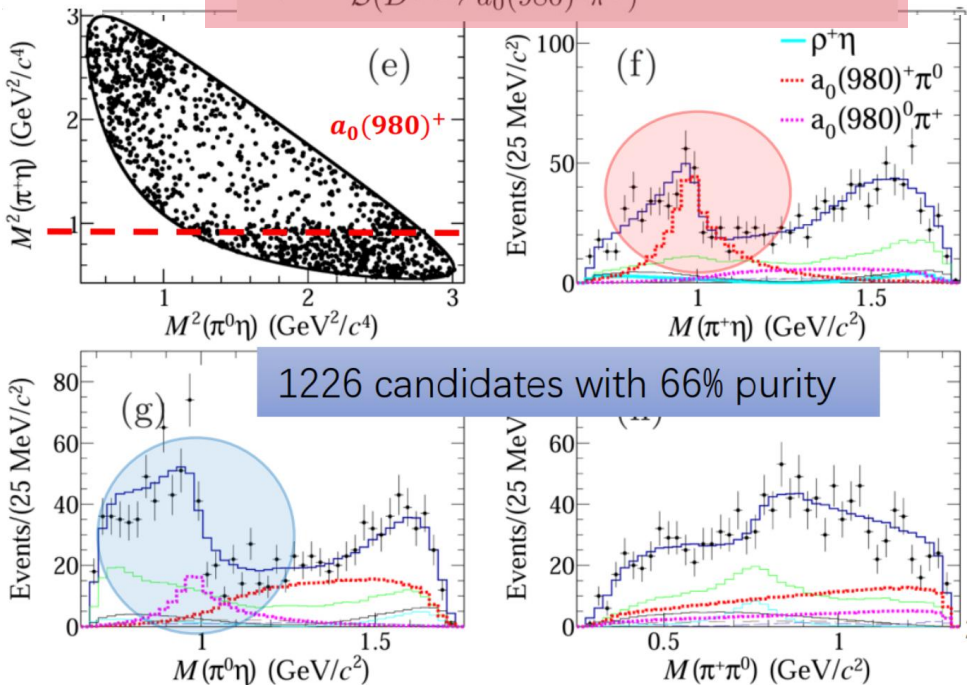
$D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$ & $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$



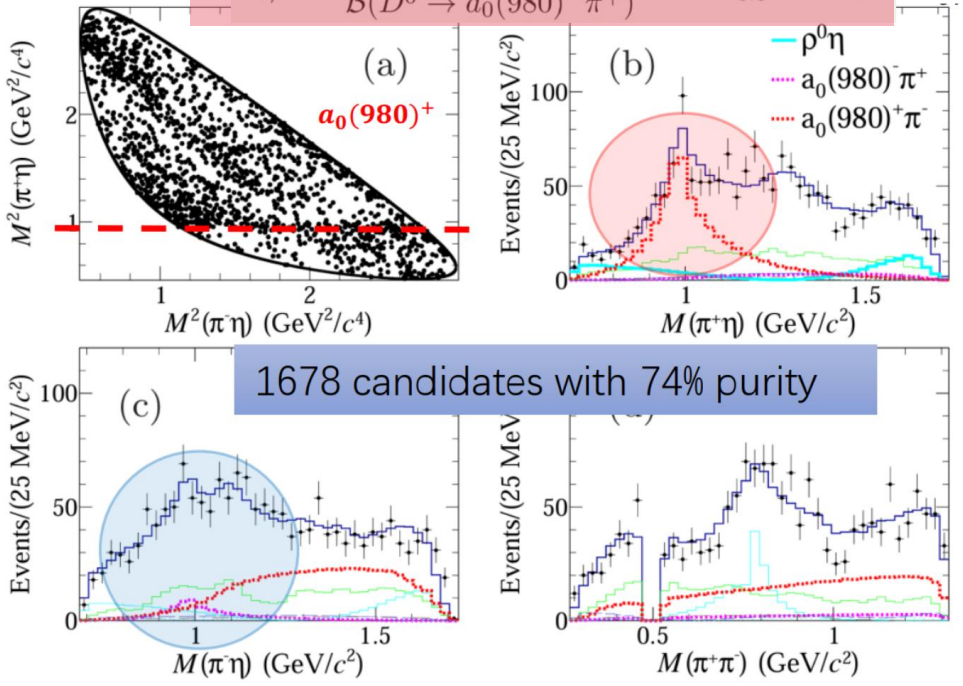
Phys. Rev. D 110, L111102 (2024)

- 同时测得：$D^0 \to \pi^{+/-}a_0(980)^{-/+}$；$D^+ \to \pi^{+/0}a_0(980)^{0/+}$以及分支比的比值：$r_{+/-}$ 和 $r_{+/0}$；
- 理论预期$r_{+/-}$ 应小于 0.05，然而实验测得的该比值与理论预测相差好几个数量级，这表明末态相互作用有重要贡献。

$$r_{+/0} \equiv \frac{\mathcal{B}(D^+ \to a_0(980)^+\pi^0)}{\mathcal{B}(D^+ \to a_0(980)^0\pi^+)} = 2.6 \pm 0.6 \pm 0.3\ .$$



$$r_{+/-} \equiv \frac{\mathcal{B}(D^0 \to a_0(980)^+\pi^-)}{\mathcal{B}(D^0 \to a_0(980)^-\pi^+)} = 7.5^{+2.5}_{-0.8} \pm 1.7\ ,$$

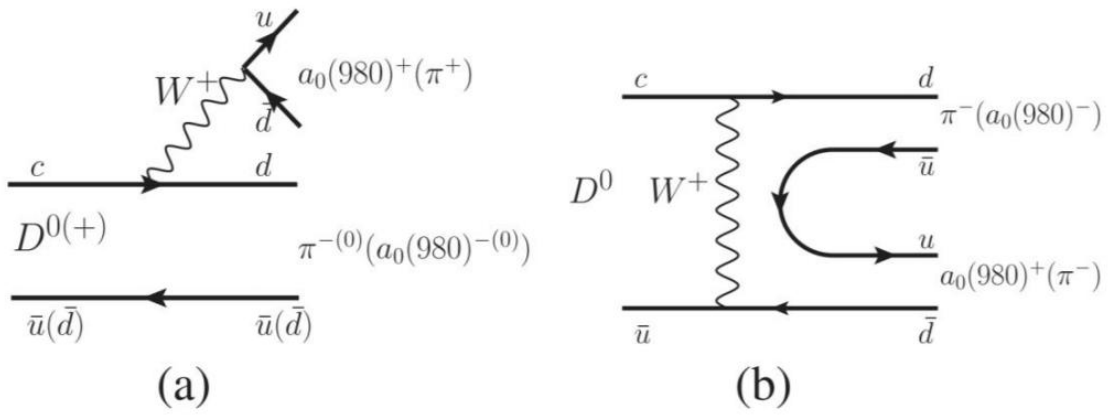


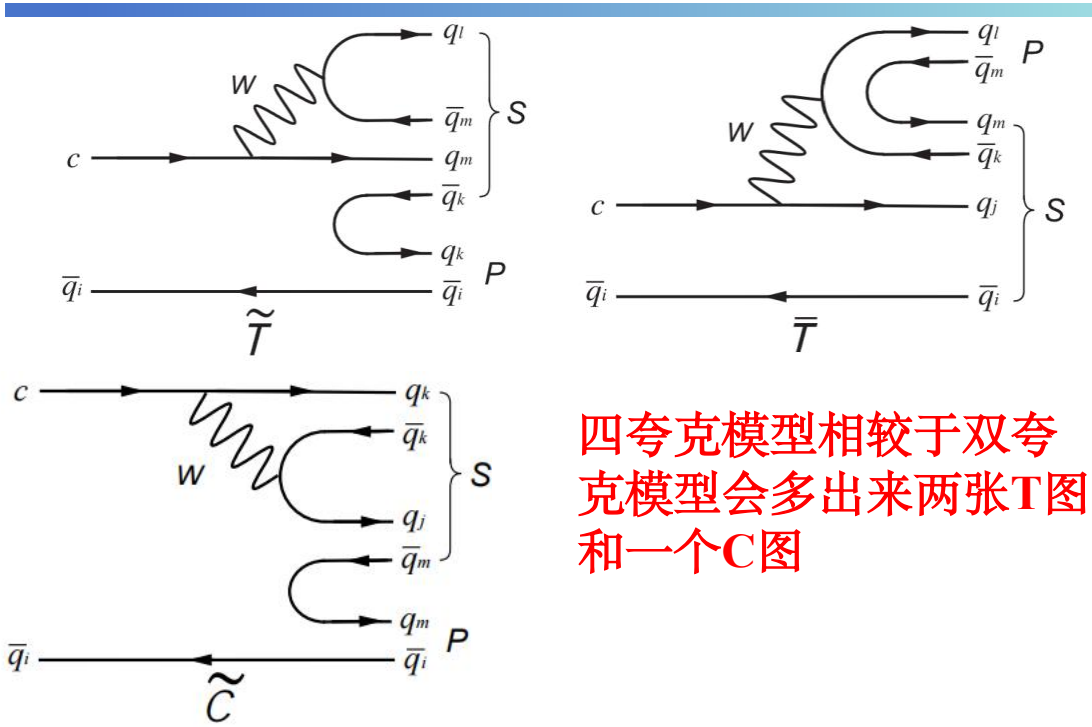
$D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$ & $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$



- 双夸克模型：末态相互作用（FSI）会显著增强弱交换费曼图。该模型预言：弱交换图的幅度可以超过 T 图[1]。
- 四夸克模型：会额外存在一个类 T 图贡献，其幅度远大于普通 T 图。在这种图像下，比值 $r_{+/-}$ 可以得到大幅增强，而不需要像双夸克模型那样引入精细调节的弱交换贡献[1]。
- 还有理论学家通过三角圈长程重散射解释该现象，并预言 $D \to \pi a_0(980)$ 的直接 CP 不对称达 ~10^{-3} 量级[2]。

Phys. Rev. D 110, L111102 (2024)





四夸克模型相较于双夸克模型会多出来两张T图和一个C图

[1]Phys. Rev. D 110, 094052 (2024)
[2]arXiv:2604.25875

线索1: $D \to SP$ 过程的研究

纯W玻色子湮灭，分支比远高于预期；
理论重新审视湮灭图贡献

$\frac{a_0(980)^+\pi^-}{a_0(980)^-\pi^+}$比理论大两个数量级；
理论引入额外的四夸克图；
长程重散射效应等；

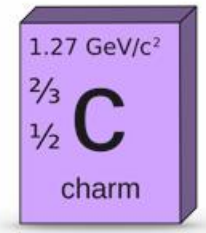
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$, $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$, $D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$, $D^+ \to \pi^+\eta\eta$

$D_s^+ \to KK\pi$

首次发现类a_0态$a_0(1817)$；

在KK阈值上看到了$a_0(980)$.

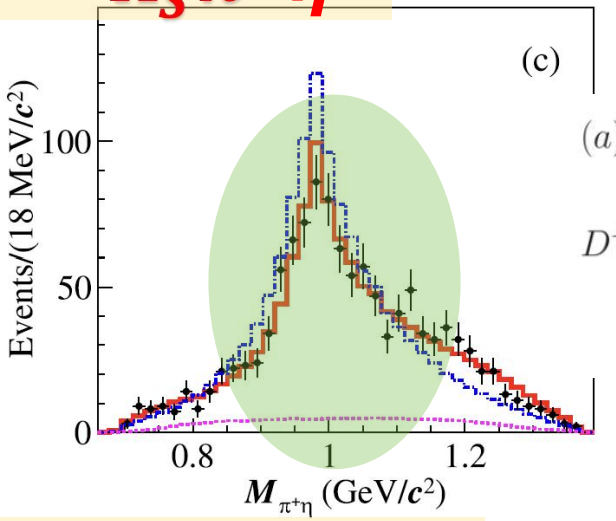
$D^+ \to K^0_S\pi^+\eta$ & $D^0 \to K^0_S\pi^0\eta$

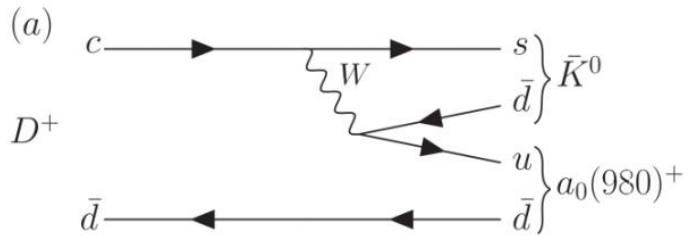


- $D^+ \to K^0_S a_0(980)^+$;
- 唯一不含弱湮灭图贡献的$D \to a_0(980)P$过程
- 在拓扑图方法中：仅有内发射图的贡献；测量其分支比即可约束该图的贡献。

$D^+ \to K^0_S\pi^+\eta$

PRL 132, 131903 (2024)

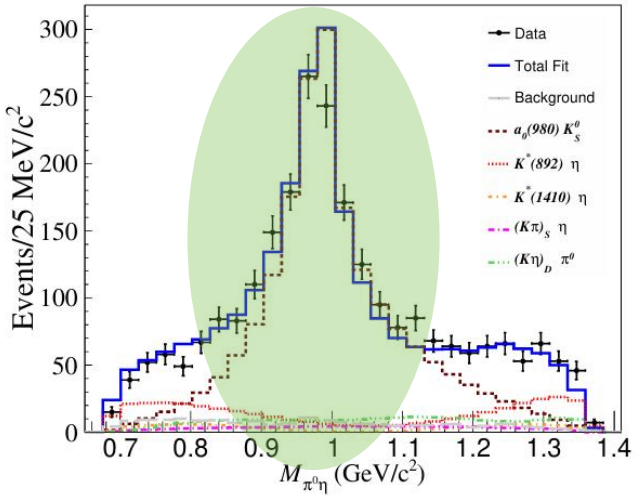


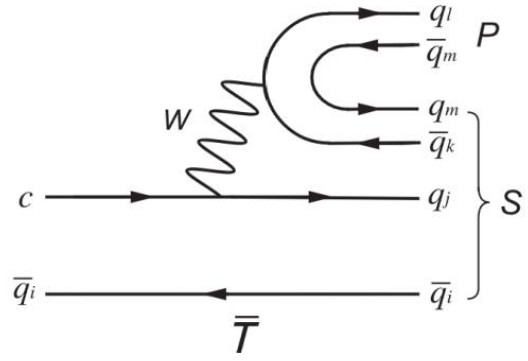


- $D^0 \to K^0_S a_0(980)^0$;
- 四夸克态下显著的T图贡献，两夸克态和四夸克态预言相差一个量级。

$D^0 \to K^0_S\pi^0\eta$

arXiv:2512.23389



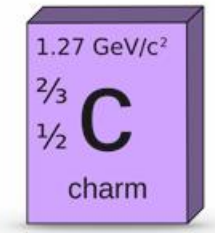


两个过程都支持四夸克态的预言

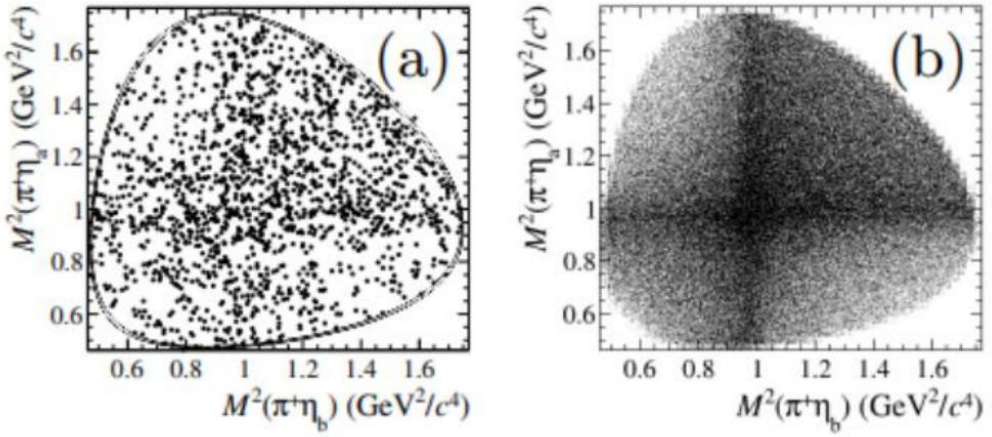
Source	Branching Fraction ($\times 10^{-3}$)	
	D^0channel	D^+channel
BESIII	$9.47 \pm 0.36 \pm 0.40$	$13.3 \pm 0.5 \pm 0.4$ [36]
$q\bar{q}$ model	0.55 [2]	6.5 [2]
Tetraquark	9.5-15.0 [2]	13.5 [2]

$D^+ \to \pi^+\eta\eta$

arXiv:2505.12086

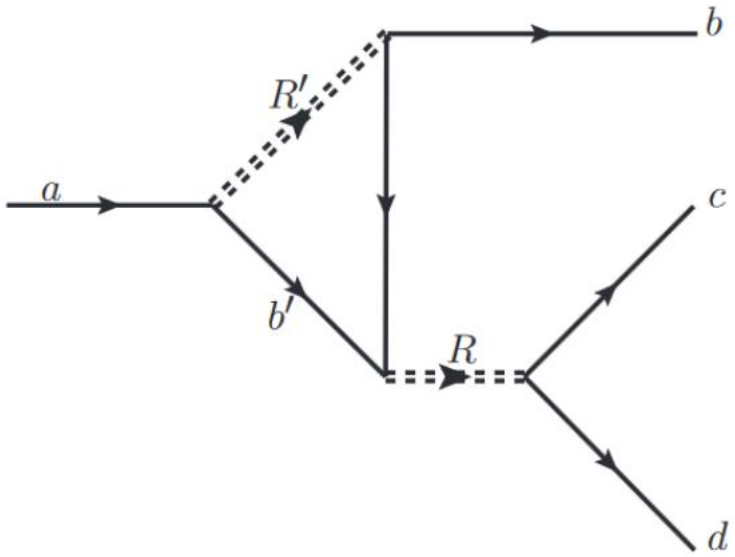


- $D^+ \to \eta a_0(980)^+$是唯一共振态成分；
- 发现$a_0(980)$的线形发生显著畸变；
- 该线形差异来源于三角圈重散射效应。
  实验上首次观测到该效应。

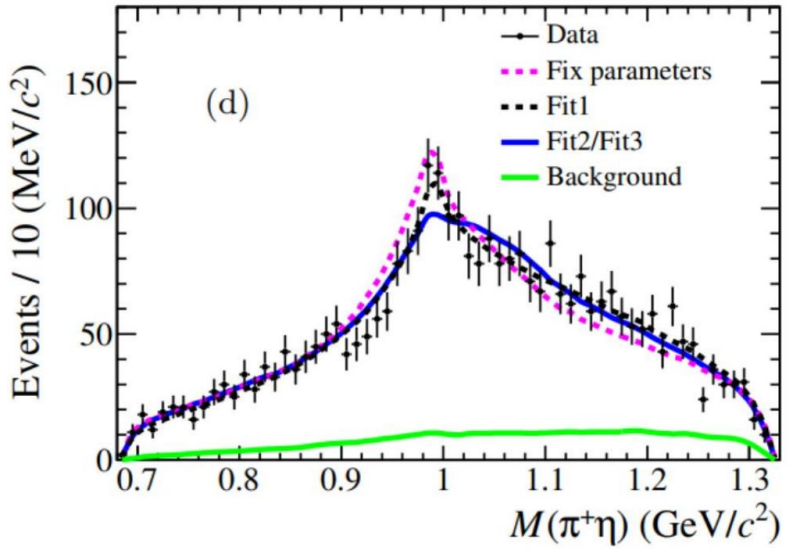


纳入三角圈重散射费曼图：

$$D^+ \to \overline{K}_0^*(1430)^0 K^+ \to \eta a_0(980)^+$$



振幅构造为：$A_\alpha = (1 + C A_{\text{loop}}) P_\alpha$



线索1: $D \to SP$ 过程的研究

纯W玻色子湮灭，分支比远高于预期；
理论重新审视湮灭图贡献

$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$

$D_s^+ \to KK\pi$

首次发现类a_0态$a_0(1817)$；

在KK阈值上看到了$a_0(980)$.

$\frac{a_0(980)^+\pi^-}{a_0(980)^-\pi^+}$比理论大两个数量级；
理论引入额外的四夸克图；
长程重散射效应等；

$D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$
$D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$

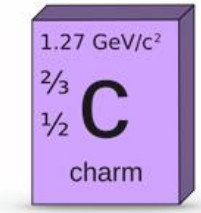
支持拓扑图模型下四夸克态预言

$D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$
$D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$

谱形畸变；
观测到三角圈重散射效应

$D^+ \to \pi^+\eta\eta$

目录



聚介子振幅分析—链接实验（多体）和理论（二体）的桥梁

线索1: $D \to SP$ 过程的研究

$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^0 \to \pi^+\pi^-\eta$, $D^+ \to \pi^+\pi^0\eta$ → $D^+ \to K_S^0\pi^+\eta$, $D^0 \to K_S^0\pi^0\eta$, $D^+ \to \pi^+\eta\eta$

↓

$D_s^+ \to KK\pi$

线索2: $D \to SV, SS$ 过程的研究

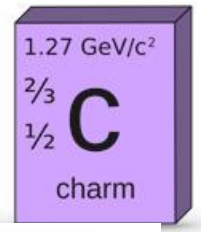
$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$ → $D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$

$D^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$

$D^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$

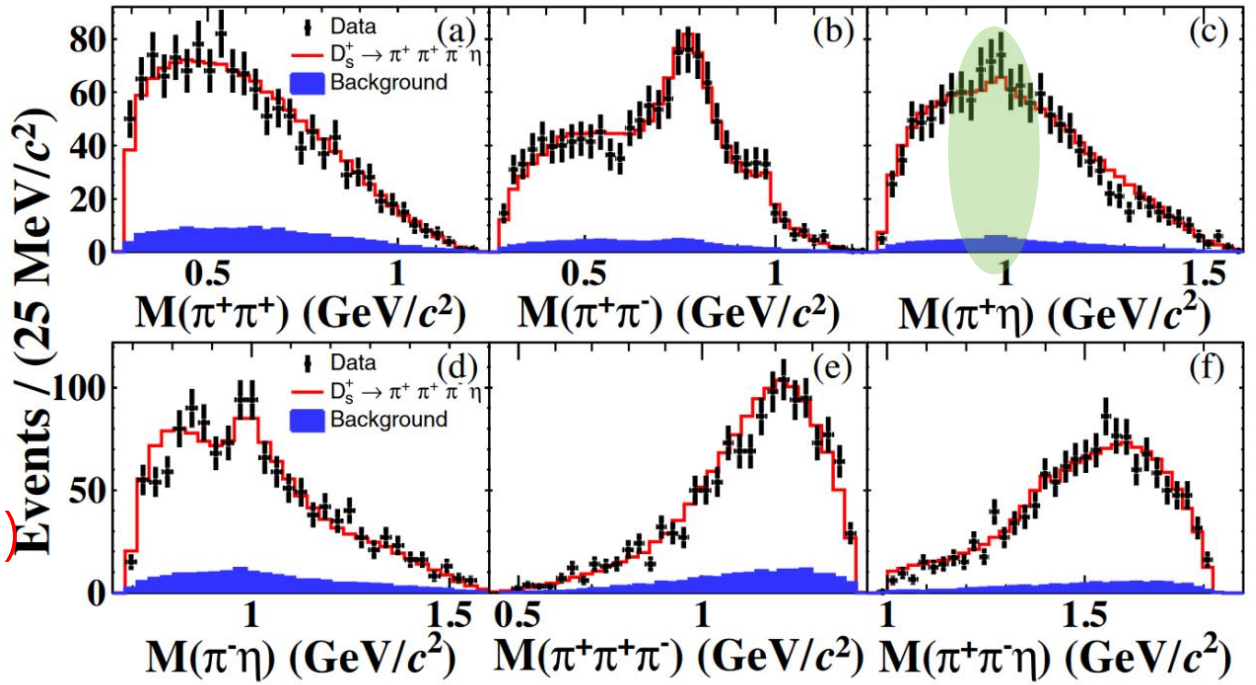
$D_s^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$

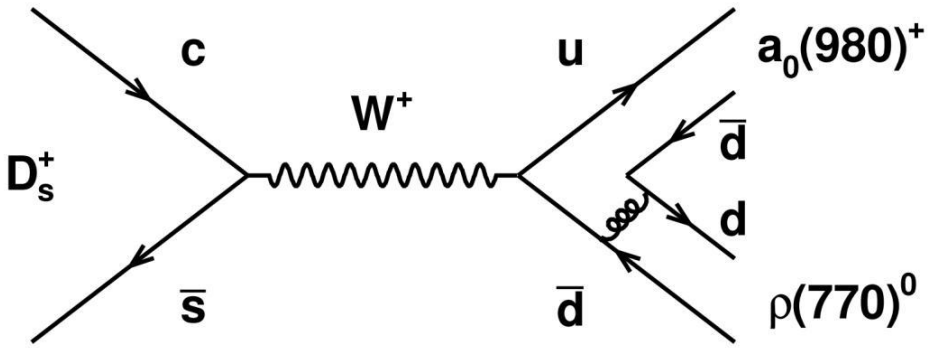
PhysRevD.104.L071101 (2021)



- 观测到$D \to a_0(980)V$模式
- $D_s^+ \to a_0(980)^+\rho^0$的衰变分之比相较于$D_s^+ \to \rho^0\pi^+$这类纯湮灭过程大一个量级

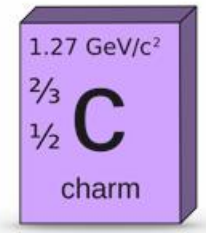
  $D \to SV$的A图比$D \to VP$的大
- 长程弱湮灭（long-distance weak annihilation）可能起到关键作用；
- 为研究弱湮灭过程中的末态重散射（final-state rescattering）提供了良好的实验平台。



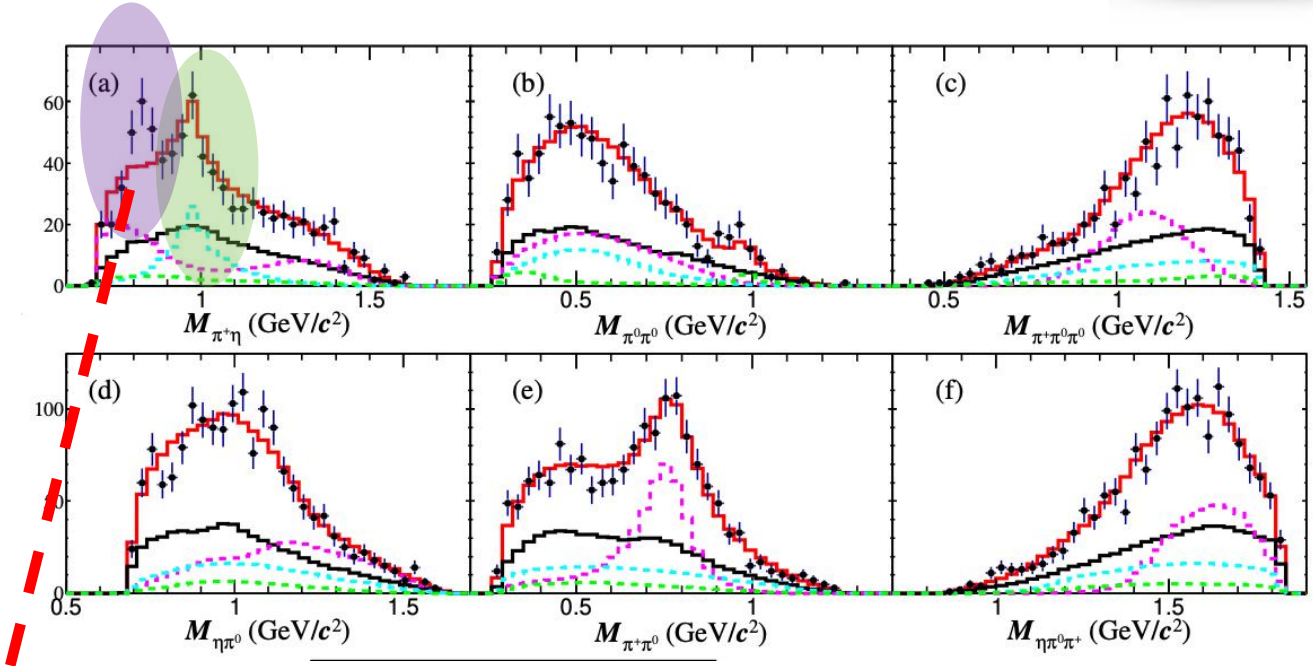


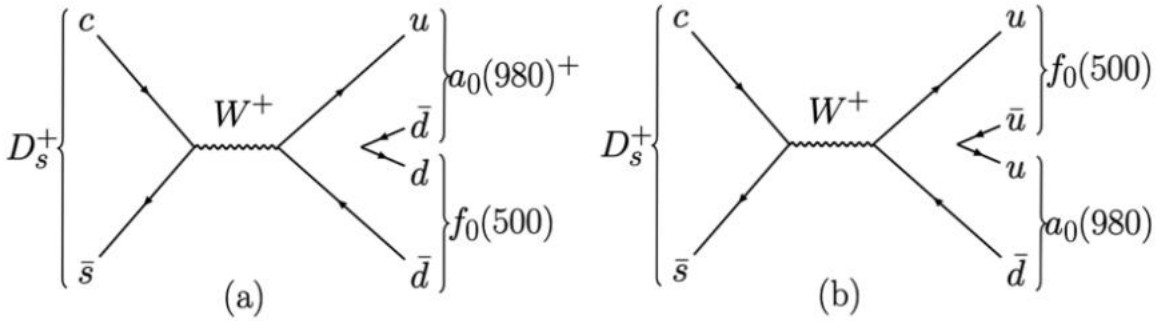
$D_s^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$

arXiv:2603.18521

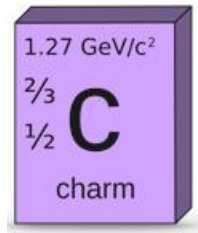


- 观测到$D \to SS$模式
  $D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$
- 若$a_0(980)$是传统两夸克态介子，则$D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$衰变预期由纯弱湮灭过程主导。该研究可以唯一确定非微扰弱湮灭振幅。
- 对$D_s^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$的研究，能够为$a_0(980)$的四夸克结构或者末态相互作用效应提供关键实验信息。
- 在$\pi^+\eta$谱，800 MeV附近有明显的峰状结构，目前的统计量无法确认其成分。





$D^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0\eta$ & $D^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-\eta$

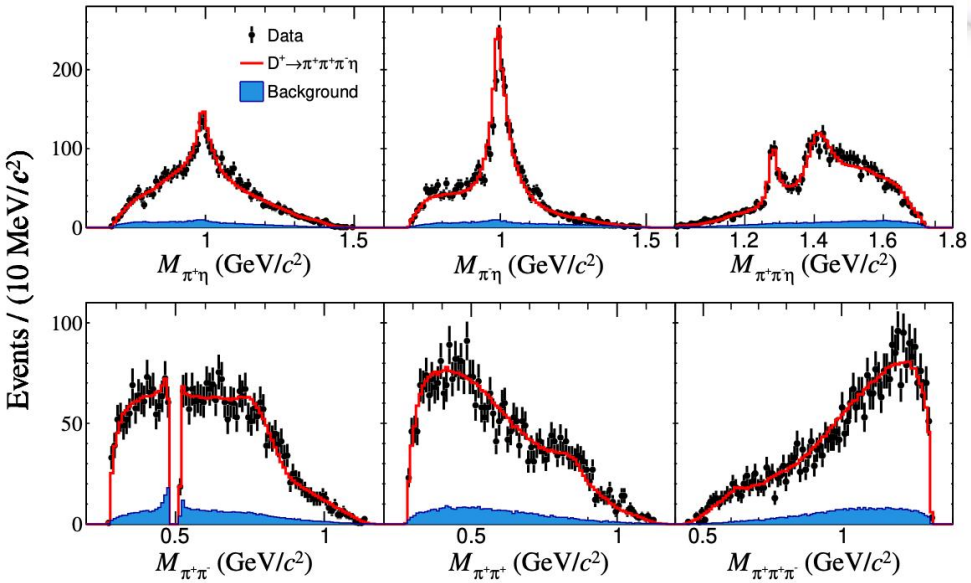


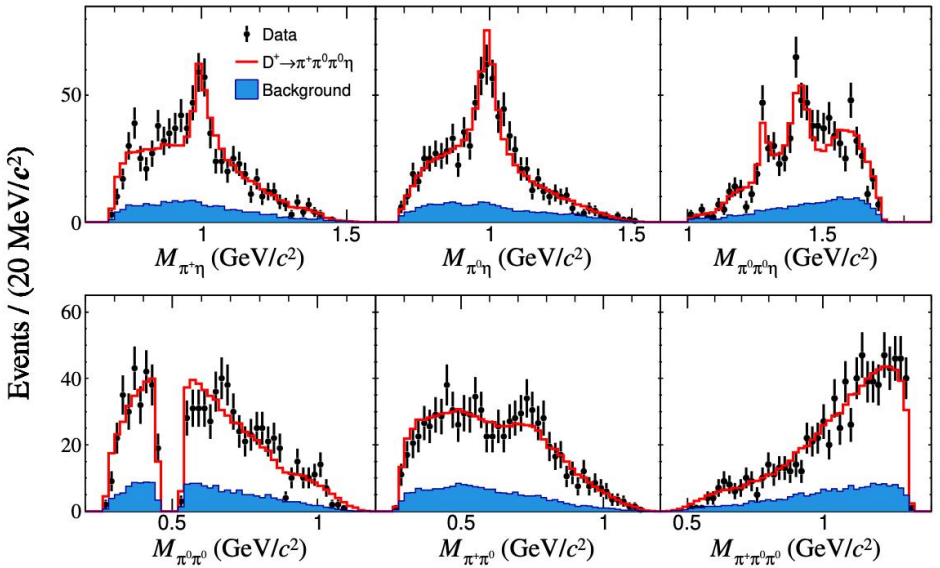
- 观测到$D \to SS$模式
  $D^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$

- 若假设$a_0(980)$是传统两夸克态介子，则$D_s{}^+ D^+ \to a_0(980)^+ f_0(500)$由W 发射主导，但分支比远大于该预言；

- 首次测量 $D \to SV$模式的 $r_{+/0}$：

$$\frac{\mathcal{B}(D^+ \to a_0(980)^+ \rho(770)^0)}{\mathcal{B}(D^+ \to a_0(980)^0 \rho(770)^+)} = 0.55 \pm 0.08 \pm 0.05$$





总结与展望



- 开展了大量的粲介子含a_0末态的振幅分析工作；
- 实验结果强烈暗示$a_0(980)$具有非夸克－反夸克的奇特结构，对传统夸克模型的预期构成挑战。

线索1: $D \to SP$ 过程的研究

- $D^+ \to K_L^0 \pi^+ \eta$
- $D^0 \to K^- \pi^+ \eta$
- $D^+ \to K_S^0 K_S^0 K^+$
- $D^0 \to K_S^0 K^+ K^-$ & $D^0 \to K_L^0 K^+ K^-$
- $D^+ \to K^+ \pi^0 \eta$

.....

线索2: $D \to SV, SS$ 过程的研究

- $D \to \pi\pi\pi\eta$
- $D \to K\pi\pi\eta$
- $D \to KK\pi\pi$

.....

- 三角圈重散射效应发现；期待更多的理论实验验证；
- $D \to SV, SS$过程期待更多的理论关注；
- 双卡压低的$a_0(980)$可以为检验多种理论模型提供新的视角；
- 更多实验成果将不断涌现！