

# BESIII 实验上粲强子、QCD 及新物理研讨会

2022. 08. 21-2022. 08. 24

The newly observed  $a_0(1817)$  as scaling point to construct scalar meson family

郭丹  
兰州大学

Dan Guo, Wei Chen, Hua-Xing Chen, Xiang Liu, Shi-Lin Zhu  
Phys. Rev. D **105**, 114014 (2022)

# 概要

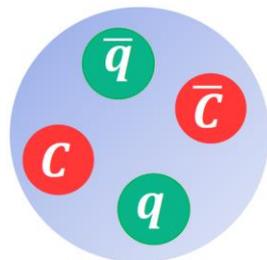
---

- I. 胶球和 $f_0(1710)$ 简介
- II. 以 $a_0(1817)$ 为基础构建标量介子家族
  - a) Regge轨迹分析质量谱
  - b) QPC计算衰变宽度
- III. 结论与展望

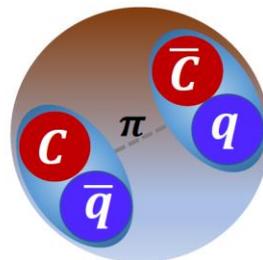
# 1. 胶球和 $f_0(1710)$ 简介

# 胶球和 $f_0(1710)$

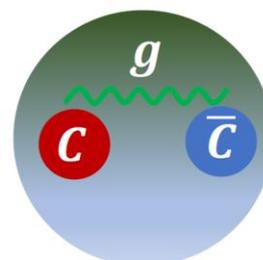
## 奇特强子态



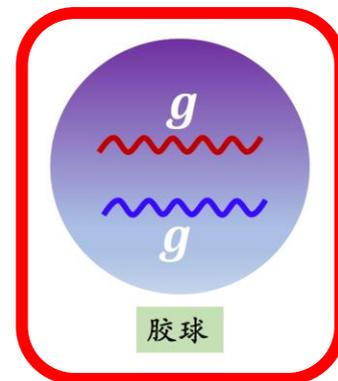
紧致四夸克态



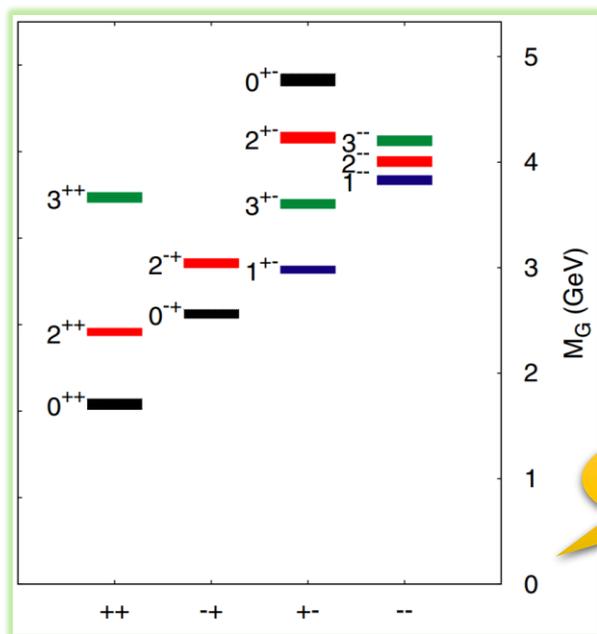
强子分子态



混杂态



胶球



**胶球**由胶子构成的复合粒子，电中性、无味，符合标准模型预言。

计算表明质量最低的胶球应在1.5~1.7 GeV,  $J^{PC} = 0^{++}$

B. Berg, Phys. Lett. B 97 (1980) 401-404

因此 $f_0(1710)$ 是否作为胶球引起大量讨论

Lattice QCD

Ying Chen *et al.*, Phys. Rev. D 73, 014516 (2006).

# $f_0(1710)$ 作为胶球的mass分析

长久以来，通常认为 $f_0(1710)$ 是glueball候选态，至少有较大glueball成分[1-5]

考虑标量胶球和介子间的混合，发现 $f_0(1710)$ 主要成分为胶球[1,5]

$$\begin{pmatrix} f_0(1370) \\ f_0(1500) \\ f_0(1710) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.78 & 0.51 & -0.36 \\ -0.54 & 0.84 & 0.03 \\ 0.32 & 0.18 & 0.93 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |N\rangle \\ |S\rangle \\ |G\rangle \end{pmatrix}.$$

格点QCD[2]和线性 $\sigma$ 模型[3]的结果同样支持 $f_0(1710)$ 主要成分为胶球

[1] Hai-Yang Cheng *et al.*, Scalar glueball, scalar quarkonia, and their mixing, Phys. Rev. D 74, 094005 (2006).

[2] Long-Cheng Gui *et al.*, Scalar Glueball in Radiative  $J/\psi$  Decay on the Lattice, Phys. Rev. Lett. 110, 021601 (2013).

[3] Stanislaus Janowski, F. Giacosa, D. H. Rischke, Is  $f_0(1710)$  a glueball?, Phys. Rev. D 90, 114005 (2014).

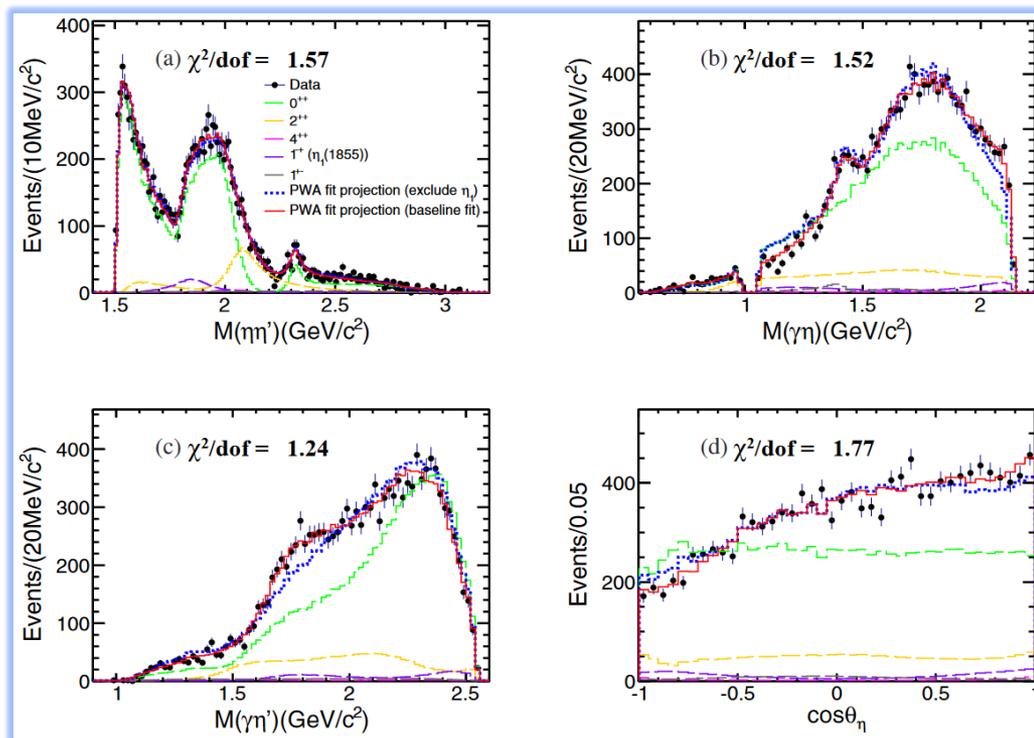
[4] Wolfgang Ochs, The Status of Glueballs, J. Phys. G 40, 043001 (2013).

[5] Hai-Yang Cheng, Chun-Khiang Chua, Keh-Fei Liu, Revisiting Scalar Glueballs, Phys. Rev. D 92, 094006 (2015).

# $f_0(1710)$ 的分支比信息

另外, BESIII测量 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 过程, 通过分波分析发现了 $\eta_1(1855)$ , 另外得到分支比  $\frac{B(f_0(1710) \rightarrow \eta\eta')}{B(f_0(1710) \rightarrow \pi\pi)}$  上限为  $1.61 \times 10^{-3}$ 。

因为gauge duality, 胶球衰变到 $\eta\eta'$ 是压低的。Phys. Rev. D 92, 121902 (2015).  
支持 $f_0(1710)$  glueball解释



Phys. Rev. D 105, 072002 (2022).

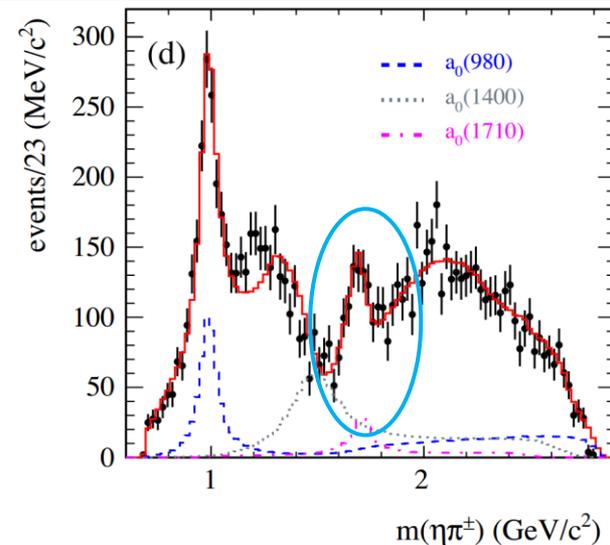
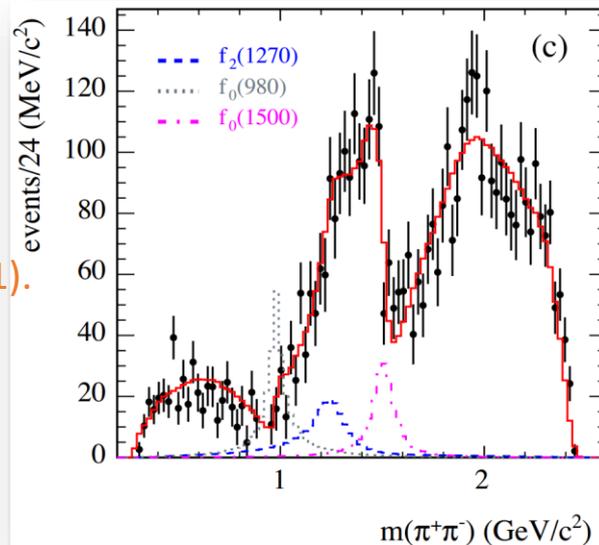
# 寻找 $a_0(1710)$

寻找 $f_0(1710)$ 的isovector partner也为判断 $f_0(1710)$ 是否为glueball提供判据。

BABAR在 $\eta_c \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$ 过程 $\eta_c\pi^\pm$ 质量谱上发现显著性 $8\sigma$ 的 $a_0(1710)$ 态  
 $m = 1704 \pm 5 \pm 2 \text{ MeV}, \Gamma = 110 \pm 15 \pm 11 \text{ MeV}$

**BABAR**

Phys. Rev. D 104, 072002 (2021).



矛盾

若认为 $a_0(1710)$ 和 $f_0(1710)$ 是同一个nonet中的伙伴态，类似 $\rho, \omega$

$f_0(1710)$ 的glueball解释变得不明确，需交叉检验BABAR的结果

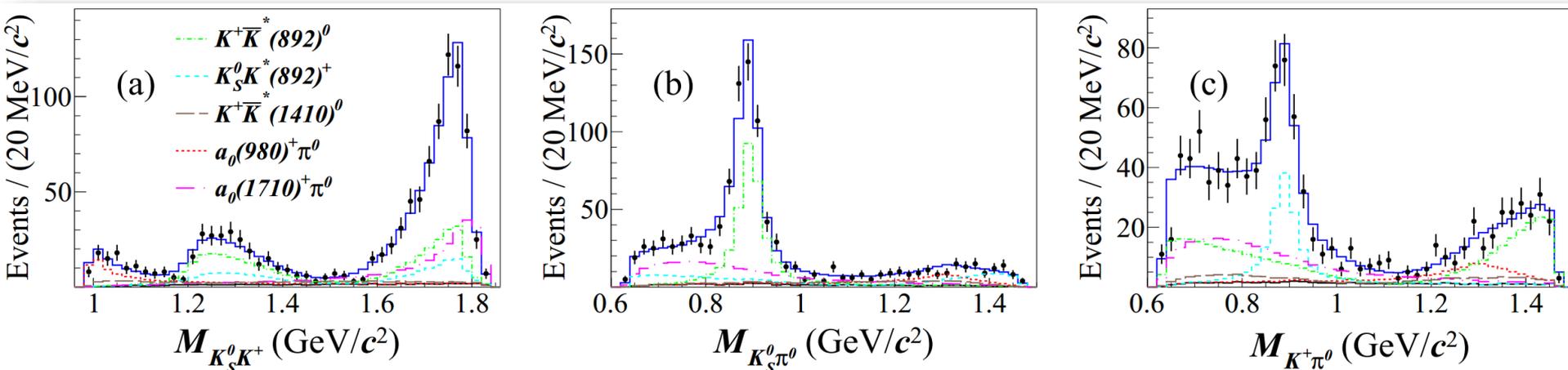
# 最新观测的 $a_0(1817)$

因此，最近BESIII在 $D_s^+ \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^0$ 过程的 $K_S^0 K^+$ 质量谱上宣称发现了显著性 $10\sigma$ 的 $a_0(1710)$ 信号(arXiv: 2204.09614):

BESIII

$$m = 1817 \pm 8 \pm 20 \text{ MeV}, \Gamma = 97 \pm 22 \pm 15 \text{ MeV}$$

Barbar:  $a_0(1710)$   $m = 1704 \pm 5 \pm 2 \text{ MeV}, \Gamma = 110 \pm 15 \pm 11 \text{ MeV}$

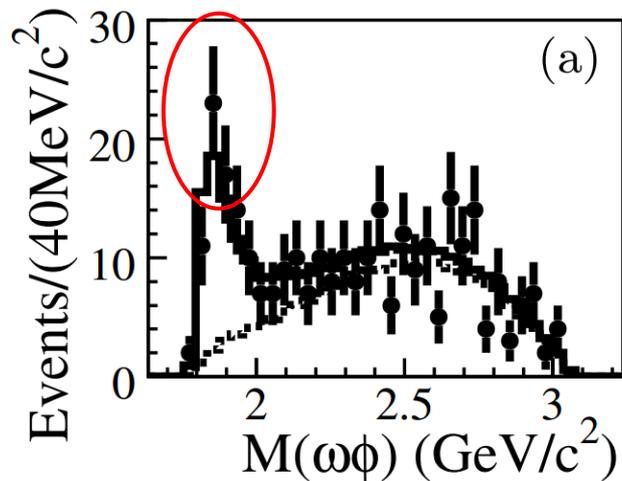


BABAR和BESIII质量测量结果差异明显，并不能cross-validation。称为 $a_0(1817)$ 更合适

# isoscalar scalar state $X(1812)$

另外，BESIII在2006年 $J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$ 过程中发现了一个isoscalar scalar态， $X(1812)$  (Phys. Rev. Lett. 96, 162002):

BESIII



$$m = 1812_{-26}^{+19} \pm 18 \text{ MeV}, \Gamma = 105 \pm 20 \pm 28 \text{ MeV}$$

$a_0(1817)$  更应该是  $X(1812)$  的nonet partner。

而 $f_0(1710)$ 作为胶球的可能，也不能因 $a_0(1817)$ 的观测信号而排除

## 2. 以 $a_0(1817)$ 为基础构建标量介子家族

- 1) Regge轨迹分析质量谱
- 2) QPC计算衰变宽度

# 标量flavorless轻介子

Regge轨迹:  $M^2 = M_0^2 + (N - 1)\mu^2$

isovector包括

$a_0(980)$ ,  $a_0(1450)$  established states in *Summary Table*;  
 $a_0(1817)$ ;  
 $a_0(1950)$  omitted from *Summary Table*.

$a_0(980)$ ,  $a_0(1450)$ ,  $a_0(1817)$  可以构成合理的Regge轨迹, 并  
依此预言  $m(a_0(4P)) = 2115 \text{ MeV}$

isoscalar包括

$f_0(980)$ ,  $f_0(1370)$ ,  $f_0(1500)$  established states in *Summary Table*;  
 $X(1812)$ ;  
 $f_0(500)$  or  $\sigma$  一般认为四夸克态;  
 $f_0(2020)$ ,  $f_0(2100)$ ,  $f_0(2200)$  omitted from *Summary Table*.

过多  $f_0$ ,  
存在胶球

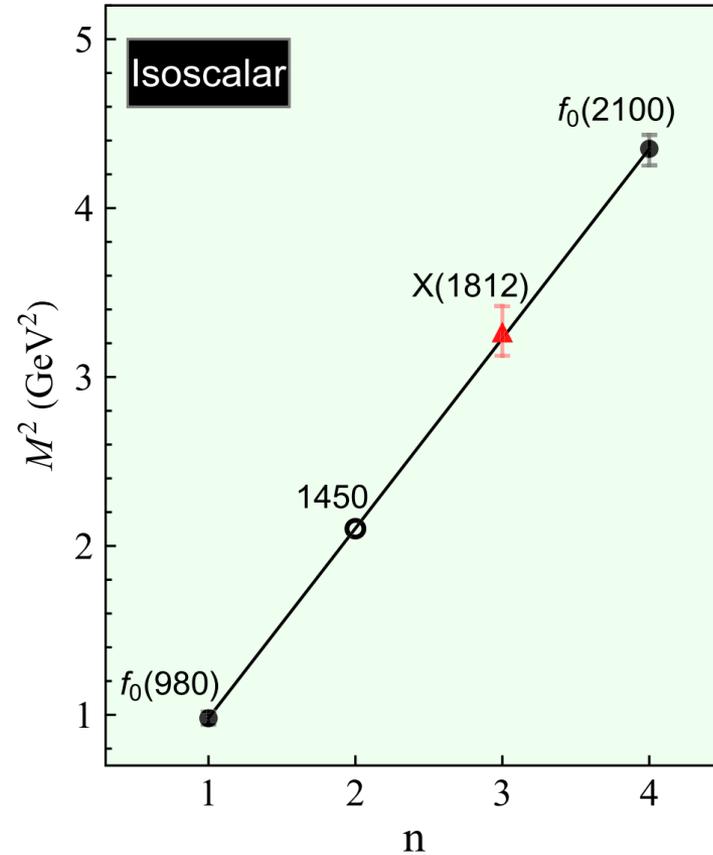
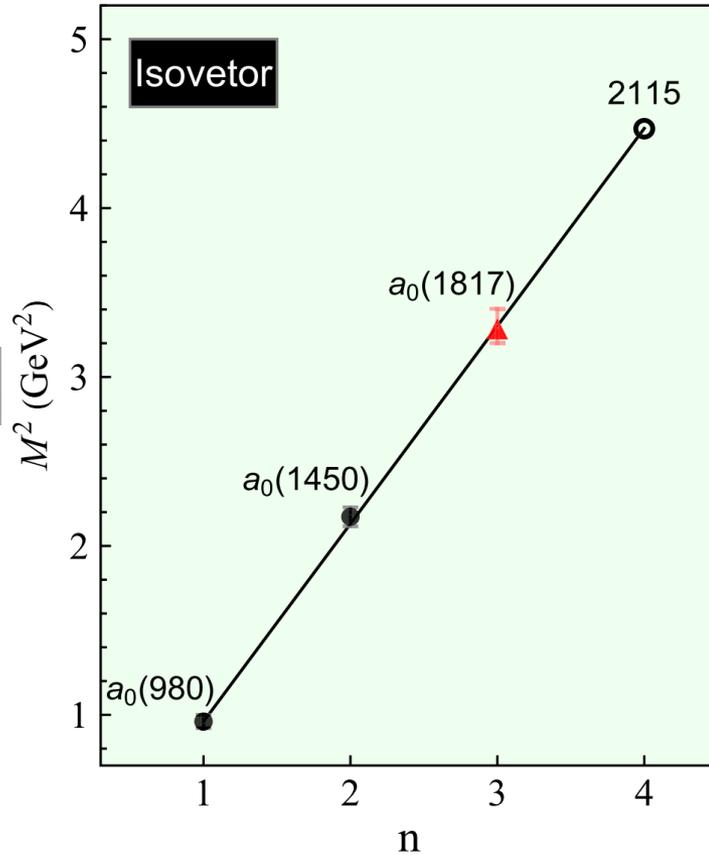
$f_0(980)$ ,  $X(1812)$ ,  $f_0(2100)$  可以构成合理的Regge轨迹, 并  
依此预言  $m(f_0(2P)) = 1450 \text{ MeV}$

故需讨论  $f_0(1370)$  和  $f_0(1500)$  作为  $f_0(2P)$  的可能。

# Regge轨迹质量分布

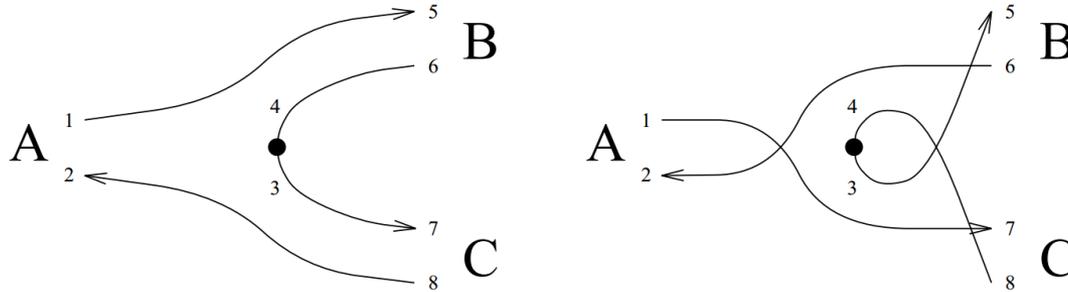
标量flavorless轻介子

$$M^2 = M_0^2 + (N - 1)\mu^2$$



# QPC 模型

OZI允许两体强衰变  $A \rightarrow B + C$ :



跃迁算符: 
$$T = -3\gamma \sum_m \langle 1m \ 1-m | 00 \rangle \int d^3\vec{p}_3 \ d^3\vec{p}_4 \delta^3(\vec{p}_3 + \vec{p}_4) \mathcal{Y}_1^m\left(\frac{\vec{p}_3 - \vec{p}_4}{2}\right) \chi_{1-m}^{34} \phi_0^{34} \omega_0^{34} b_3^\dagger(p_3) d_4^\dagger(p_4).$$

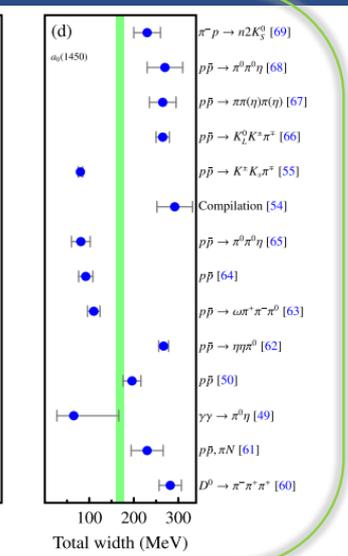
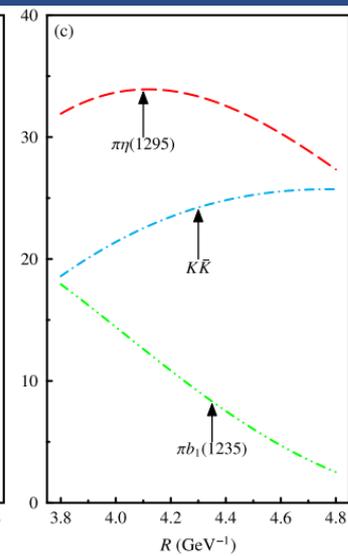
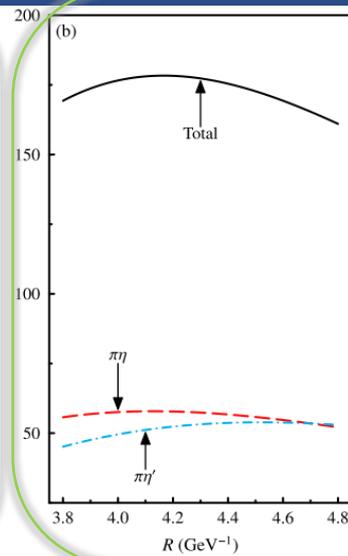
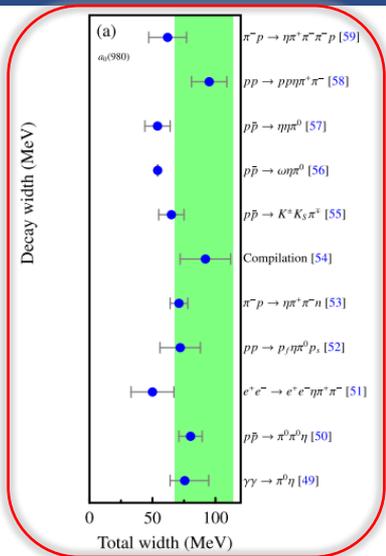
分波振幅: 
$$M^{SL}(P) = \frac{\sqrt{4\pi(2L+1)}}{2J_A+1} \sum_{M_{J_B}, M_{J_C}} \langle L0S(M_{J_B}+M_{J_C}) | J_A(M_{J_B}+M_{J_C}) \rangle \times \langle J_B M_{J_B} J_C M_{J_C} | S(M_{J_B}+M_{J_C}) \rangle M^{(M_{J_A}=M_{J_B}+M_{J_C})M_{J_B}M_{J_C}}(P\hat{z})$$

分波宽度: 
$$\Gamma^{SL} = \frac{\pi}{4} \frac{PS}{M_A^2} |M^{SL}|^2.$$

# $a_0(n = 1 \sim 4)$ 衰变信息

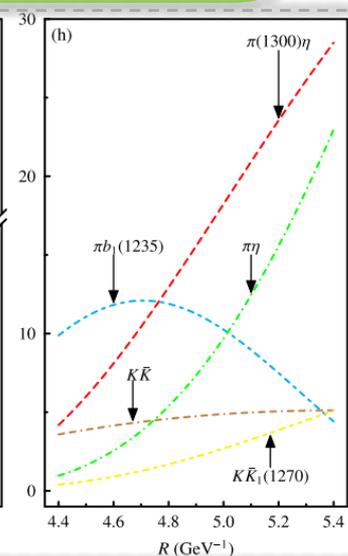
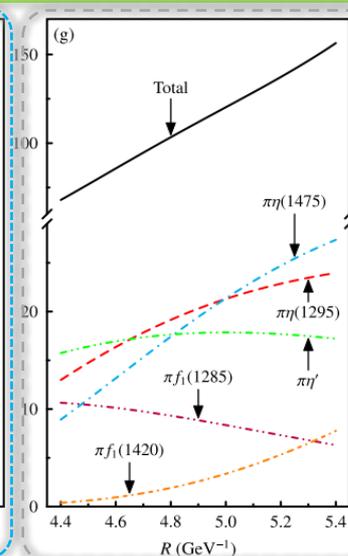
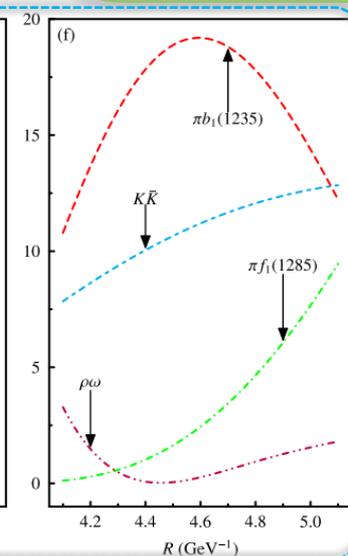
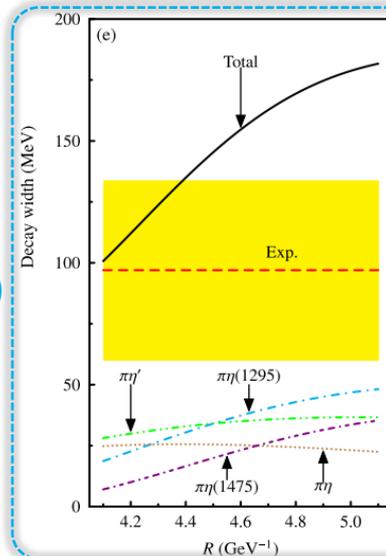
$I = 1$

$a_0(980)$



$a_0(1450)$

$a_0(1817)$



$a_0(2115)$

# $a_0(n = 1\sim 4)$ 衰变信息

$a_0(980)$ : 主要衰变道 $\pi\eta$ , 宽度50~100 MeV当 $R=3.3\sim 4.3$ , 基本与实验吻合

$a_0(1450)$ : 总宽度161~178 MeV 当 $R=3.8\sim 4.8$ , 主要衰变道 $\pi\eta$ ,  $\pi\eta'$ ,  $\pi\eta(1295)$  以及 $K\bar{K}$ 。其中 $K\bar{K}$ 道计算分支比(11.0~16.0)%与实验值(8.2±2.8)%吻合。

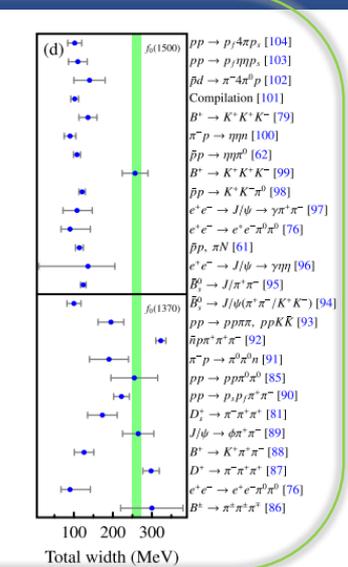
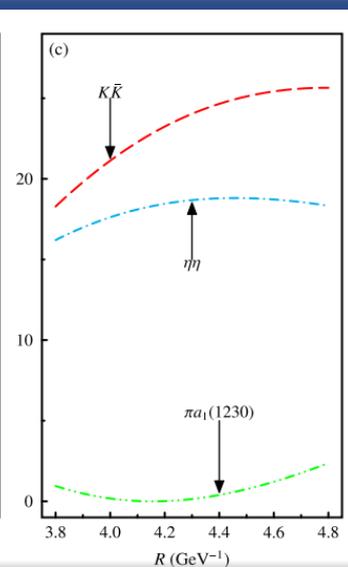
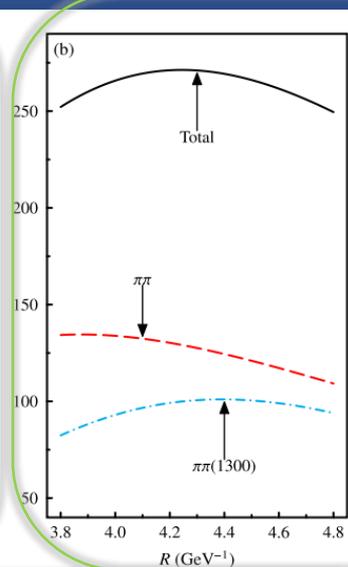
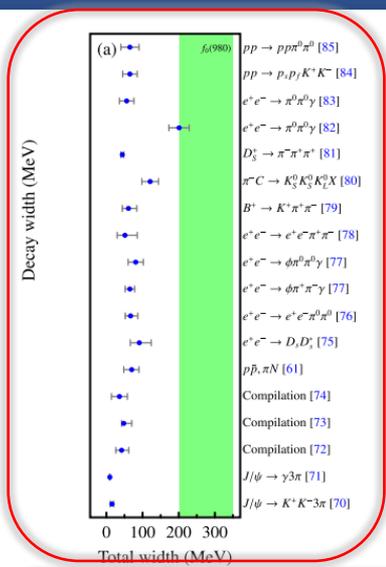
$a_0(1817)$ :总宽度101~182 MeV 当 $R=4.1\sim 5.1$ , 主要衰变道 $\pi\eta(1295)$ ,  $\pi\eta'$ ,  $\pi\eta$ ,  $\pi\eta(1475)$ ,  $\pi b_1(1235)$ , 且 $K\bar{K}$ 贡献较大

$a_0(2115)$ :总宽度68~156 MeV 当 $R=4.4\sim 5.4$ , 主要衰变道 $\pi\eta(1475)$ ,  $\pi\eta(1295)$ ,  $\pi\eta'$

# $f_0(n = 1 \sim 4)$ 衰变信息

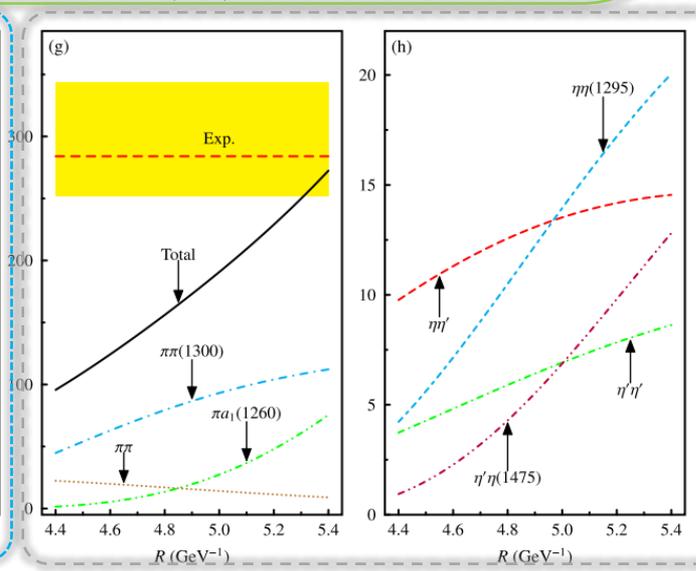
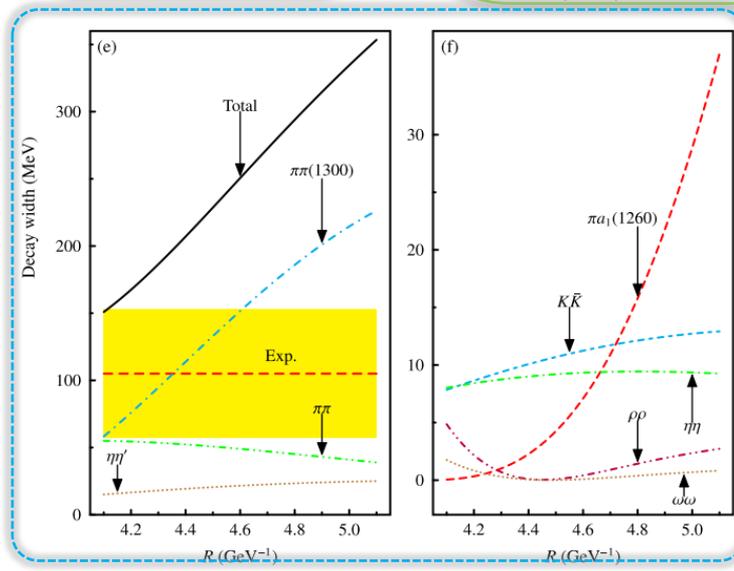
$I = 0$

$f_0(980)$



$f_0(2P)$

$X(1812)$



$f_0(2100)$

# $f_0(n = 1\sim 4)$ 衰变信息

$f_0(980)$ : 主要衰变道 $\pi\pi$ , 计算宽度203~351 MeV当 $R=3.3\sim 4.3$ , 仅与个别实验数据吻合

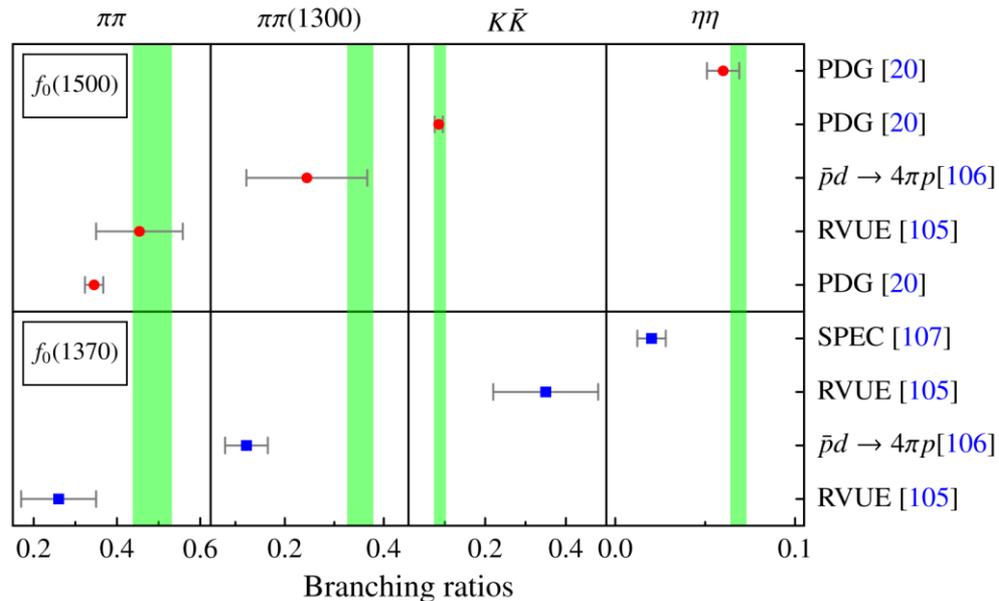
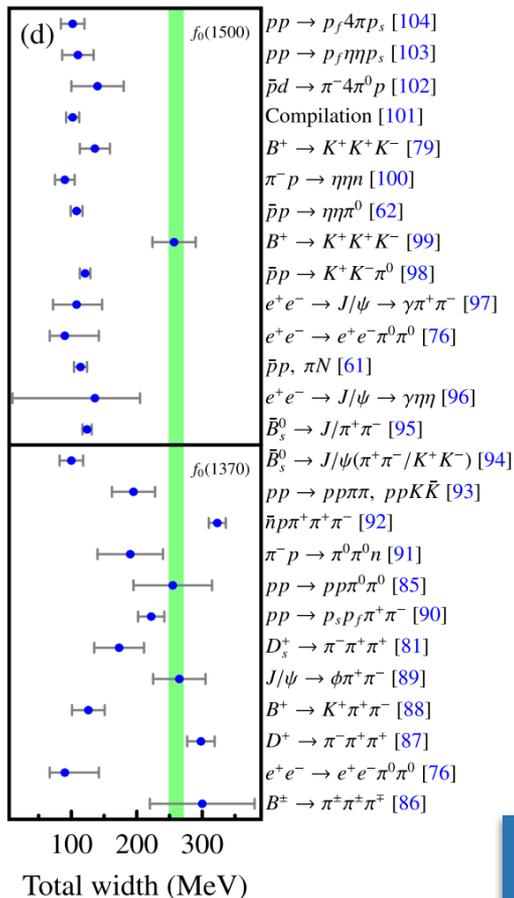
$f_0(2P)$ : 当 $m=1450$  MeV, 总宽度249~271 MeV with  $R=3.8\sim 4.8$ , 主要衰变道  
分支比:  $\pi\pi$  (43.8~53.2)%,  $\pi\pi(1300)$  (32.6~37.9)%,  $K\bar{K}$  (7.3~10.3)%,  $\eta\eta$  (6.4~7.3)%

$X(1812)$ :总宽度151~353 MeV 当 $R=4.1\sim 5.1$ , 主要衰变道 $\pi\pi(1300)$ ,  $\pi\pi$ ,  $\eta\eta'$ ,  
 $\pi a_1(1260)$ ,  $K\bar{K}$

$f_0(2100)$ :总宽度96~272 MeV 当 $R=4.4\sim 5.4$ , 主要衰变道 $\pi\pi(1300)$ ,  $\pi a_1(1260)$ ,  
 $\pi\pi$ ,

# $f_0(1370)$ 和 $f_0(1500)$ 作为 $f_0(2P)$ 的可能

## $f_0(2P)$ 计算结果与 $f_0(1370)$ 和 $f_0(1500)$ 实验数据比较



- $f_0(2P)$ 计算总宽度与 $f_0(1370)$ 更相符，但 $f_0(1370)$ 测量误差太大
- $f_0(2P)$ 计算分支比与 $f_0(1500)$ 更相符

$f_0(1370)$ 和 $f_0(1500)$ 作为 $f_0(2P)$ 的可能性并不能排除。与胶球能区重叠，期待更多测量

# 3. 结论与展望

## 总结

(1). 实验在  $D_s^+ \rightarrow K_s^0 K^+ \pi^0$  过程发现的  $a_0(1817)$  作为定标点, 构建标量轻介子家族:  $a_0(980)$ ,  $a_0(1450)$ ,  $a_0(1817)$  可以构成isovector的Regge轨迹, 并预言了  $a_0(2115)$ , 计算了OZI允许的衰变宽度, 与实验宽度符合较好。

类似的Regge轨迹斜率应存在于isoscalar态中,  $f_0(980)$ ,  $X(1812)$ ,  $f_0(2100)$  可以构成合理的Regge轨迹, 计算OZI允许的衰变宽度, 与实验宽度大致符合。

另外从质量和衰变宽度方面分析,  $f_0(1370)$ 和 $f_0(1500)$ 作为 $f_0(2P)$ 的可能需要更多数据区分。

(2).  $a_0(1817)$  应作为 $X(1812)$ 的nonet伙伴态, 故 $f_0(1710)$ 做为glueball的可能并不能排除。

## 展望

同时在 $X(2600)$ 衰变中观察到的 $f_0(1500)$ 和 $f_2'(1525)$ 支持 $f_0(1500)$ 作为传统介子。期待更多 $f_0(1370)$ 和 $f_0(1500)$ 数据。

$$\begin{aligned} & \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma X(2600)) \times \mathcal{B}(X(2600) \rightarrow f_0(1500)\eta') \\ & \times \mathcal{B}(f_0(1500) \rightarrow \pi^+ \pi^-) = (3.39 \pm 0.18_{-0.66}^{+0.91}) \times 10^{-5}, \\ & \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma X(2600)) \times \mathcal{B}(X(2600) \rightarrow f_2'(1525)\eta') \\ & \times \mathcal{B}(f_2'(1525) \rightarrow \pi^+ \pi^-) = (2.43 \pm 0.13_{-1.11}^{+0.31}) \times 10^{-5}. \end{aligned}$$



**感谢各位  
老师同学!**