

第六届强子谱和强子结构研讨会

**Effective-Lagrangian study of $\psi'(J/\psi) \rightarrow VP$ and
the insights into the $\rho\pi$ puzzle**



闫琳婉

河北师范大学

PHYSICAL REVIEW D 107, 034022 (2023)

in collaboration with Yun-Hua Chen, Chun-Gui Duan, and Zhi-Hui Guo

Outline:

1. 引言
2. 有效拉氏量的构造
3. 跃迁振幅的计算
4. 整体拟合和唯象学讨论
5. 总结

➤ 引言

$$\frac{B(\psi' \rightarrow h)}{B(J/\psi \rightarrow h)} = \frac{B(\psi' \rightarrow e^+e^-)}{B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)} = 13.3\% \quad [\text{PDG2022}]$$

$$\frac{B(\psi' \rightarrow K^{*0} \bar{K}^0 + c.c.)}{B(J/\psi \rightarrow K^{*0} \bar{K}^0 + c.c.)} = 2.6\% \quad \frac{B(\psi' \rightarrow K^{*-} K^+ + c.c.)}{B(J/\psi \rightarrow K^{*-} K^+ + c.c.)} = 0.5\%$$

SU(3)破缺
效应

$$\frac{B(\psi' \rightarrow \rho\pi)}{B(J/\psi \rightarrow \rho\pi)} = 0.2\%$$

为了解释 $\rho\pi$ 疑难，众多理论学家给出了不同的分析：

- ❑ 在 J/ψ 质量附近存在一个矢量胶球[M. Suzuki, PRD'01]
- ❑ 在粲偶素态中存在更高的福克成分(Fock components)[Y. Q. Chen and E. Braaten, PRL'98]
- ❑ 轻味矢量 ρ 中的内禀粲组分(intrinsic charm portions)[S. J. Brodsky and M. Karliner, PRL'97]
- ❑ 波函数中的节点[S. S. Pinsky, PLB'90]
- ❑ 介子混合机制[T. Feldmann and P. Kroll, PRD'00]
- ❑ 末态相互作用[X. Q. Li, D. V. Bugg, and B. S. Zou, PRD'97, Q. Zhao, PLB'11, Q. Wang, G. Li, and Q. Zhao, PRD'12, J. M. Gerard and A. Martini, PLB'14]
- ❑

►有效拉氏量的构造

我们首先引入矢量共振态的有效拉氏量。在RχT的内禀偶宇称区域中，矢量的最小相互作用算符(矢量和光子场间的耦合)可表示为

$$\mathcal{L}_V^{(2)} = \frac{F_V}{2\sqrt{2}} \langle V_{\mu\nu} f_+^{\mu\nu} \rangle$$

带有pNGB和外源场的基本手征张量定义为

$$U = u^2 = e^{i\frac{\sqrt{2}\Phi}{F}}, u_\mu = i[u^+(\partial_\mu - ir_\mu)u - u(\partial_\mu - ul_\mu)u^+], f_\pm^{\mu\nu} = uF_L^{\mu\nu}u^\pm \pm u^\pm F_R^{\mu\nu}u$$

九重态的矢量共振态和pNGB矩阵的味道形式分别为

$$V_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\rho^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\omega_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_0 & \rho^+ & K^{*+} \\ \rho^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\rho^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\omega_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_0 & K^{*0} \\ K^{*-} & \bar{K}^{*0} & -\frac{2}{\sqrt{6}}\omega_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\omega_0 \end{pmatrix}_{\mu\nu} \quad \Phi = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\eta_0 & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\pi^0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\eta_0 & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2}{\sqrt{6}}\eta_8 + \frac{1}{\sqrt{3}}\eta_0 \end{pmatrix}$$

$\eta - \eta'$ 混合

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \eta' \end{pmatrix} = \frac{1}{F} \begin{pmatrix} F_8 \cos \theta_8 & -F_0 \sin \theta_0 \\ F_8 \sin \theta_8 & F_0 \cos \theta_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_8 \\ \eta_0 \end{pmatrix}$$

夸克味基(quark-flavor basis)来描述双混合角:

$$\begin{pmatrix} \eta \\ \eta' \end{pmatrix} = \frac{1}{F} \begin{pmatrix} F_q \cos \theta_q & -F_s \sin \theta_s \\ F_q \sin \theta_q & F_s \cos \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_q \\ \eta_s \end{pmatrix}$$

➤ 有效拉氏量的构造

内禀奇宇称(odd-intrinsic-parity)部分中的共振态手征理论拉式量包括两个不同的类型，分别是VVP和VJP类型，J是外源场

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{VVP} = & d_1 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{V^{\mu\nu}, V^{\rho\alpha}\} \nabla_\alpha u^\sigma \right\rangle + id_2 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{V^{\mu\nu}, V^{\rho\sigma}\} \chi_- \right\rangle + d_3 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{\nabla_\alpha V^{\mu\nu}, V^{\rho\alpha}\} u^\sigma \right\rangle \\ & + d_4 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{\nabla^\sigma V^{\mu\nu}, V^{\rho\alpha}\} u_\alpha \right\rangle - id_5 M_V^2 \sqrt{\frac{2}{3}} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle V^{\mu\nu} V^{\rho\sigma} \right\rangle \ln(\det u)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{VJP} = & \frac{c_1}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{V^{\mu\nu}, f_+^{\rho\alpha}\} \nabla_\alpha u^\sigma \right\rangle + \frac{c_2}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{V^{\mu\alpha}, f_+^{\rho\sigma}\} \nabla_\alpha u^\nu \right\rangle + \frac{ic_3}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{V^{\mu\nu}, f_+^{\rho\sigma}\} \chi_- \right\rangle \\ & + \frac{ic_4}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle V^{\mu\nu} [f_-^{\rho\sigma}, \chi_+] \right\rangle + \frac{c_5}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{\nabla_\alpha V^{\mu\nu}, f_+^{\rho\alpha}\} u^\sigma \right\rangle + \frac{c_6}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{\nabla_\alpha V^{\mu\alpha}, f_+^{\rho\sigma}\} u^\nu \right\rangle \\ & + \frac{c_7}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle \{\nabla^\sigma V^{\mu\nu}, f_+^{\rho\alpha}\} u_\alpha \right\rangle - ic_8 M_V \sqrt{\frac{2}{3}} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left\langle V^{\mu\nu} \tilde{f}_+^{\rho\sigma} \right\rangle \ln(\det u)\end{aligned}$$

高能限制：

对耦合常数的高能限制，可以大大减少 $R\chi T$ 中自由参数的数量。该过程还使 $R\chi T$ 中计算的振幅与QCD中高能行为一致。通过将VVP格林函数的领头阶算符乘积展开式和 $R\chi T$ 下的计算结果对比，并且要求矢量形状因子在高能极限下趋于0，从而实现了共振态耦合常数的高能限制：

$$4c_3 + c_1 = 0, \quad c_1 - c_2 + c_5 = 0, \quad c_5 - c_6 = \frac{N_C}{64\pi^2} \frac{M_V}{\sqrt{2}F_V},$$
$$d_1 + 8d_2 - d_3 = \frac{F^2}{8F_V^2}, \quad d_3 = -\frac{N_C}{64\pi^2} \frac{M_V^2}{F_V^2}, \quad c_8 = -\frac{\sqrt{2}M_0^2}{\sqrt{3}M_V^2} c_1$$

➤ 有效拉氏量的构造

其次构造有效拉氏量来描述关于 $J/\psi(\psi')$ 粒子衰变的过程。我们用Proca矢量场来描述 $J/\psi(\psi')$ 是为了减少顶点的数量。首先考虑 $J/\psi(\psi')$ 衰变成一个轻矢量和一个pNGB的强相互作用顶点：

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\psi(\psi')VP} = & M_{\psi(\psi')} h_1^{(0)} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^{(0)\mu} \langle u^\nu V^{\rho\sigma} \rangle + \frac{1}{M_{\psi(\psi')}} h_2^{(0)} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^{(0)\mu} \langle \{u^\nu, V^{\rho\sigma}\} \chi_+ \rangle \\ & + M_{\psi(\psi')} h_3^{(0)} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^{(0)\mu} \langle u^\nu \rangle \langle V^{\rho\sigma} \rangle\end{aligned}$$

其中第一项与三胶子湮灭(单OZI压低)图相关，第二项表示由夸克质量引起的SU(3)味对称性的破缺，最后一项对应于双重OZI压低图。 $M_{\psi(\psi')}$ 因子的引入使得 $h_{i=1,2,3}$ 是无量纲的。电磁相互作用即 $h_{1,2,3} = 0$ 。

➤ 有效拉氏量的构造

对于 J/ψ 与pNGB和光子场的相互作用，可以写出相关算符，

$$\mathcal{L}_{\psi P\gamma} = g_1 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^\mu \langle u^\nu f_+^{\rho\sigma} \rangle + \frac{1}{M_\psi^2} g_2 \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^\mu \langle \{u^\nu, f_+^{\rho\sigma}\} \chi_+ \rangle$$

其中第二项表示 $J/\psi P\gamma$ 顶点中由夸克质量引起的SU(3)味的对称性破缺，其中 $P = \pi, \eta, \eta'$ 。

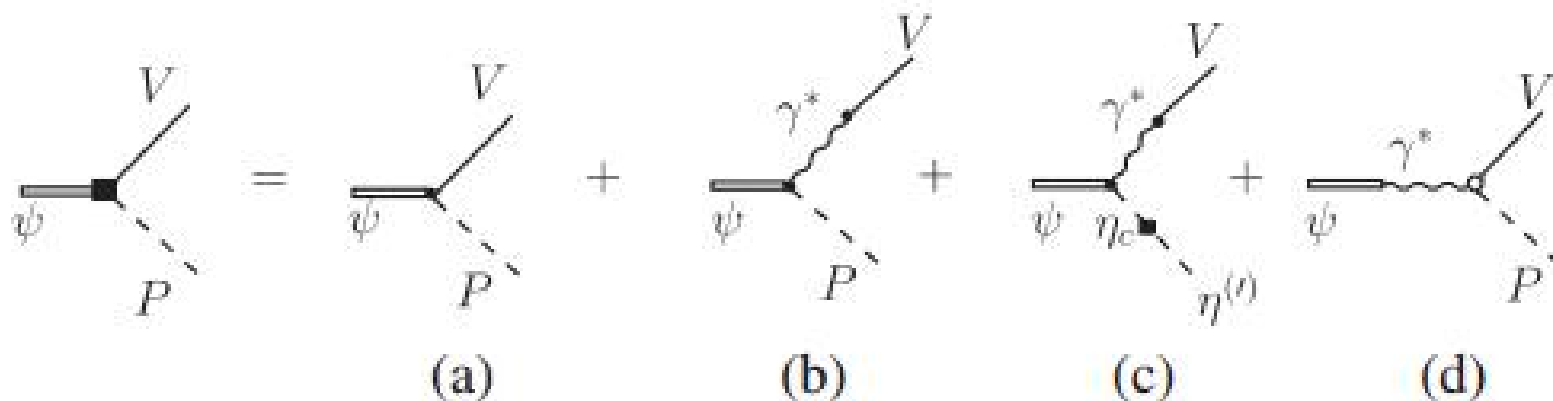
J/ψ 和光子场之间的耦合可以表示为，

$$\mathcal{L}_{\psi\gamma} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{f_\psi}{M_\psi} \langle \hat{\psi}_{\mu\nu} f_+^{\mu\nu} \rangle$$

其中 $\hat{\psi}_{\mu\nu} = \partial_\mu \psi^\nu - \partial_\nu \psi^\mu$ 。 f_ψ 表示耦合强度， $f_\psi = \left(\frac{27 M_\psi \Gamma_{\psi \rightarrow e^+ e^-}}{32 \pi \alpha^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ ，

它由 $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$ 的衰变宽度决定， $\alpha = e^2/4\pi$ 是精细结构常数。

➤ 跃迁振幅的计算

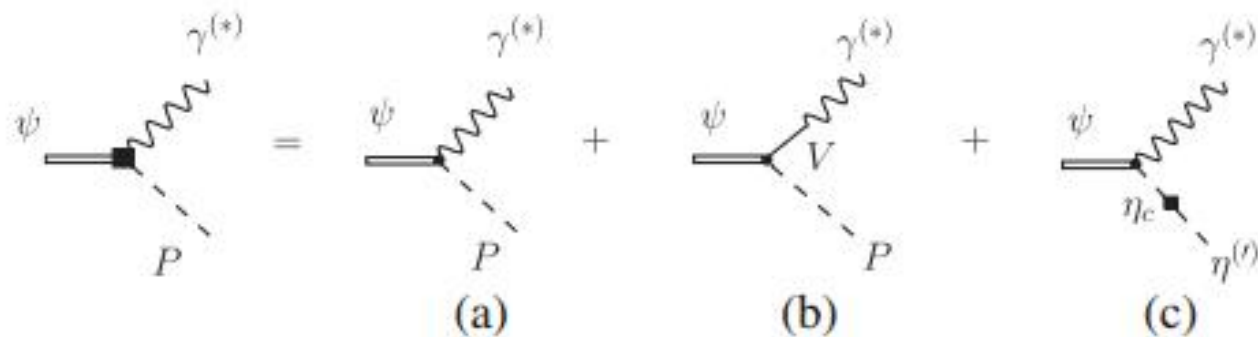


$\psi'(q) \rightarrow V(k)P(q-k)$ 衰变振幅可以写成

$$\mathcal{M}_{\psi' \rightarrow VP} = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon_{\psi'}^{\mu} \epsilon_V^{\nu} q^{\rho} k^{\sigma} G_{\psi' \rightarrow VP}$$

其中 q 和 k 分别代表 ψ' 和 V 的四动量； $s = k^2$ ； $\epsilon_{\psi'}$ 和 ϵ_V 是极化矢量。

➤ 跃迁振幅的计算



辐射衰变 $J/\psi \rightarrow \eta^{(*)} \gamma^*$ 的一般振幅采用如下形式表示

$$\mathcal{M}_{\psi \rightarrow \eta^{(*)} \gamma^*} = e \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon_\psi^\mu \epsilon_{\gamma^*}^\nu q^\rho k^\sigma \lambda_{\eta_c \eta^{(*)}} g_{\psi \eta_c \gamma^*}(s) e^{i\delta_{\eta^{(*)}}}$$

其中 $\lambda_{\eta_c \eta} = -4.6 \times 10^3$, $\lambda_{\eta_c \eta'} = -1.2 \times 10^{-2}$, $g_{\psi \eta_c \gamma^*}(s) = g_{\psi \eta_c \gamma^*}(0) e^{\frac{s}{16\beta^2}}$ 。

辐射衰变 $J/\psi(q) \rightarrow P(q-k) \gamma^*(k)$ 的一般振幅采用如下形式表示

$$\mathcal{M}_{\psi \rightarrow P \gamma^*} = e \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \epsilon_\psi^\mu \epsilon_{\gamma^*}^\nu q^\rho k^\sigma G_{\psi \rightarrow P \gamma^*}(s)$$

► 跃迁振幅的计算——衰变宽度

$\psi' \rightarrow VP$ 的衰变宽度为

$$\Gamma(\psi' \rightarrow VP) = \frac{1}{96\pi M_{\psi'}^3} \{ [M_{\psi'}^2 - (M_V - m_P)^2] [M_{\psi'}^2 - (M_V + m_P)^2] \}^{\frac{3}{2}} |G_{\psi' \rightarrow VP}|^2$$

$J/\psi \rightarrow P\gamma$ 的衰变宽度是

$$\Gamma(\psi \rightarrow P\gamma) = \frac{1}{3} \alpha \left(\frac{M_{\psi}^2 - M_P^2}{2M_{\psi}} \right)^3 |G_{\psi \rightarrow P\gamma^*}(0)|^2$$

$J/\psi \rightarrow P\gamma^* \rightarrow Pl^+l^-$ 的衰变宽度为

$$\Gamma(\psi \rightarrow Pl^+l^-) = \int_{4m_l^2}^{(M_{\psi}-m_P)^2} \frac{\alpha^2 (2m_l^2 + s)}{72\pi M_{\psi}^3 s^3} \sqrt{s(s-4m_l^2)} [\lambda(s, M_{\psi}, m_P)]^3 |G_{\psi \rightarrow P\gamma^*}(s)|^2 ds$$

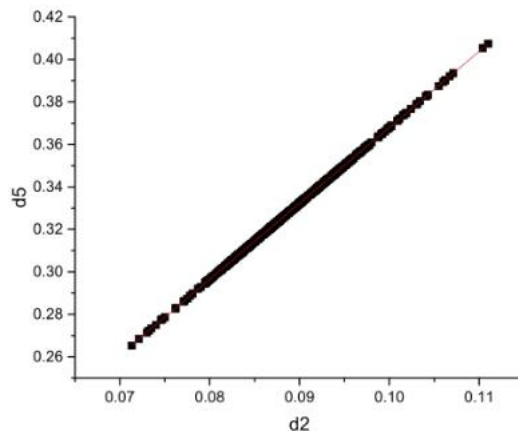
其中

$$\lambda(s, M_{\psi}, m_P) = \sqrt{[s - (M_{\psi} - m_P)^2][s - (M_{\psi} + m_P)^2]}$$

➤ 整体拟合

F_8	$(1.41 \pm 0.02)F_\pi$	F_0	$(1.36 \pm 0.03)F_\pi$
θ_8	$(-24.3 \pm 0.4)^\circ$	θ_0	$(-12.8 \pm 0.5)^\circ$
F_V	139.04 ± 1.72	c_3	0.0046 ± 0.0003
c_4	-0.0014 ± 0.0001	d_2	0.100 ± 0.008
h_1	$(-2.35 \pm 0.06) \times 10^{-5}$	h_2	$(-3.08 \pm 0.60) \times 10^{-5}$
h_3	$(3.39 \pm 0.22) \times 10^{-6}$	g_1	$(-2.40 \pm 0.06) \times 10^{-5}$
g_2	$(-2.23 \pm 0.48) \times 10^{-4}$	r_1	0.40 ± 0.04
h'_1	$(0.33 \pm 0.23) \times 10^{-6}$	h'_2	$(-4.01 \pm 0.32) \times 10^{-5}$
h'_3	$(0.85 \pm 0.47) \times 10^{-6}$	g'_1	$(-1.70 \pm 0.47) \times 10^{-4}$
g'_2	$(0.18 \pm 0.95) \times 10^{-3}$	δ_η	$(117.12 \pm 3.81)^\circ$
$\delta_{\eta'}$	$(50.03 \pm 16.01)^\circ$	β	$512.86 \pm 7.36 \text{ MeV}$
β'	$112.97 \pm 0.98 \text{ MeV}$	$F_q^{(*)}$	$(1.24 \pm 0.02)F_\pi$
$F_s^{(*)}$	$(1.52 \pm 0.02)F_\pi$	$\theta_q^{(*)}$	$(37.3 \pm 0.7)^\circ$
$\theta_s^{(*)}$	$(35.1 \pm 0.4)^\circ$	$\chi^2/\text{d.o.f}$	$157.25/(135 - 23) = 1.40$

参数间的相关性：
 $d_5 = 3.57d_2 + 0.01$



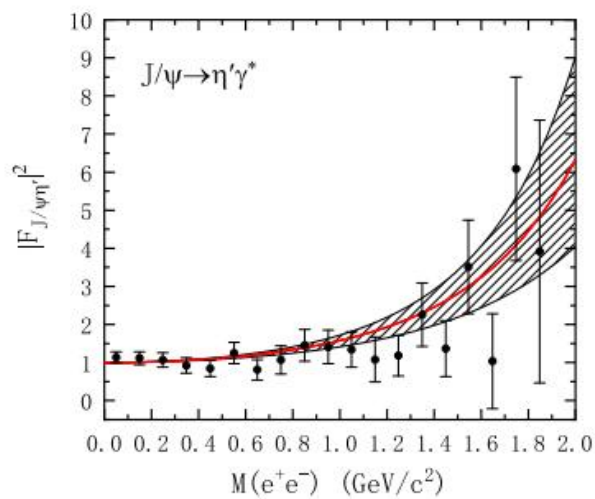
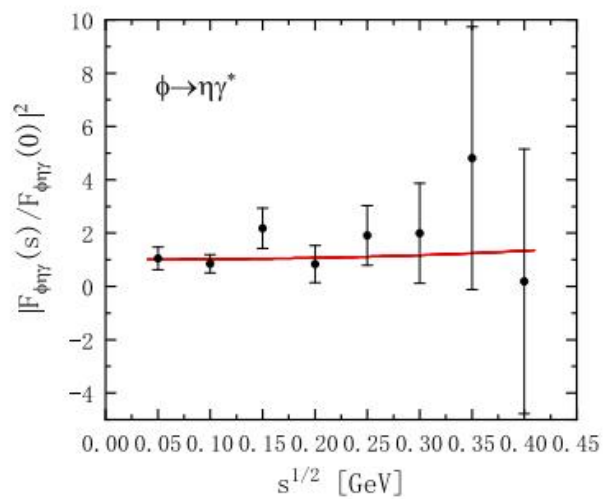
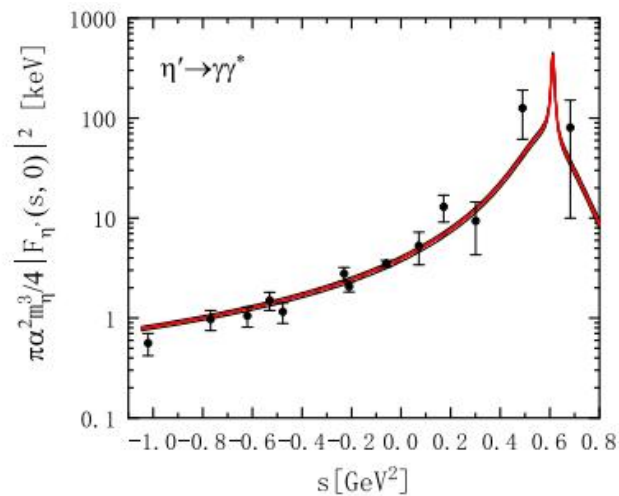
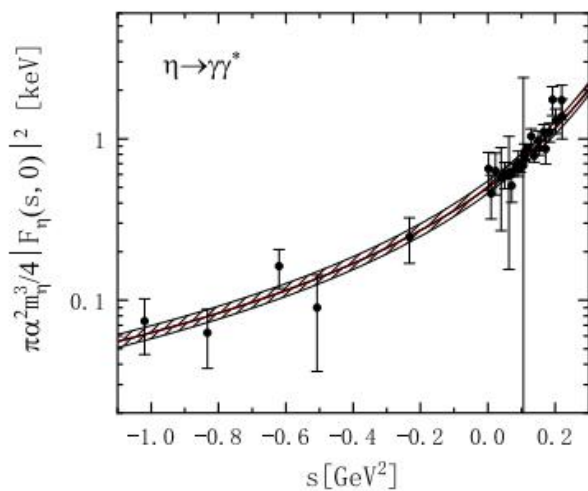
➤ 唯象学讨论——宽度及分支比

	Experiment	Fit
$\Gamma_{\omega \rightarrow \pi\gamma}$	724.78 ± 34.64	705.65 ± 17.40
$\Gamma_{\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma}$	70.08 ± 12.37	73.23 ± 1.81
$\Gamma_{K^{*0} \rightarrow K^0\gamma}$	116.36 ± 11.27	108.95 ± 2.69
$\Gamma_{\omega \rightarrow \pi e^- e^+}$	6.68 ± 0.63	6.40 ± 0.16
$\Gamma_{\omega \rightarrow \pi \mu^- \mu^+}$	1.16 ± 0.18	0.63 ± 0.02
$\Gamma_{\omega \rightarrow \eta\gamma}$	3.91 ± 0.41	5.30 ± 0.11
$\Gamma_{\rho^0 \rightarrow \eta\gamma}$	44.73 ± 3.39	43.93 ± 0.96
$\Gamma_{\phi \rightarrow \eta\gamma}$	55.28 ± 1.23	55.01 ± 1.00
$\Gamma_{\phi \rightarrow \eta'\gamma}$	0.26 ± 0.01	0.26 ± 0.01
$\Gamma_{\eta' \rightarrow \omega\gamma}$	4.74 ± 0.29	5.05 ± 0.18
$\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma\gamma}$	0.52 ± 0.02	0.50 ± 0.01
$\Gamma_{\eta' \rightarrow \gamma\gamma}$	4.34 ± 0.20	3.92 ± 0.11
$\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma e^- e^+}$	$(9.04 \pm 0.89) \times 10^{-3}$	$(8.32 \pm 0.23) \times 10^{-3}$
$\Gamma_{\eta \rightarrow \gamma \mu^- \mu^+}$	$(0.41 \pm 0.07) \times 10^{-3}$	$(0.39 \pm 0.01) \times 10^{-3}$
$\Gamma_{\eta' \rightarrow \gamma \mu^- \mu^+}$	$(2.12 \pm 0.61) \times 10^{-2}$	$(1.47 \pm 0.04) \times 10^{-2}$
$\Gamma_{\phi \rightarrow \eta e^- e^+}$	0.459 ± 0.018	0.460 ± 0.008

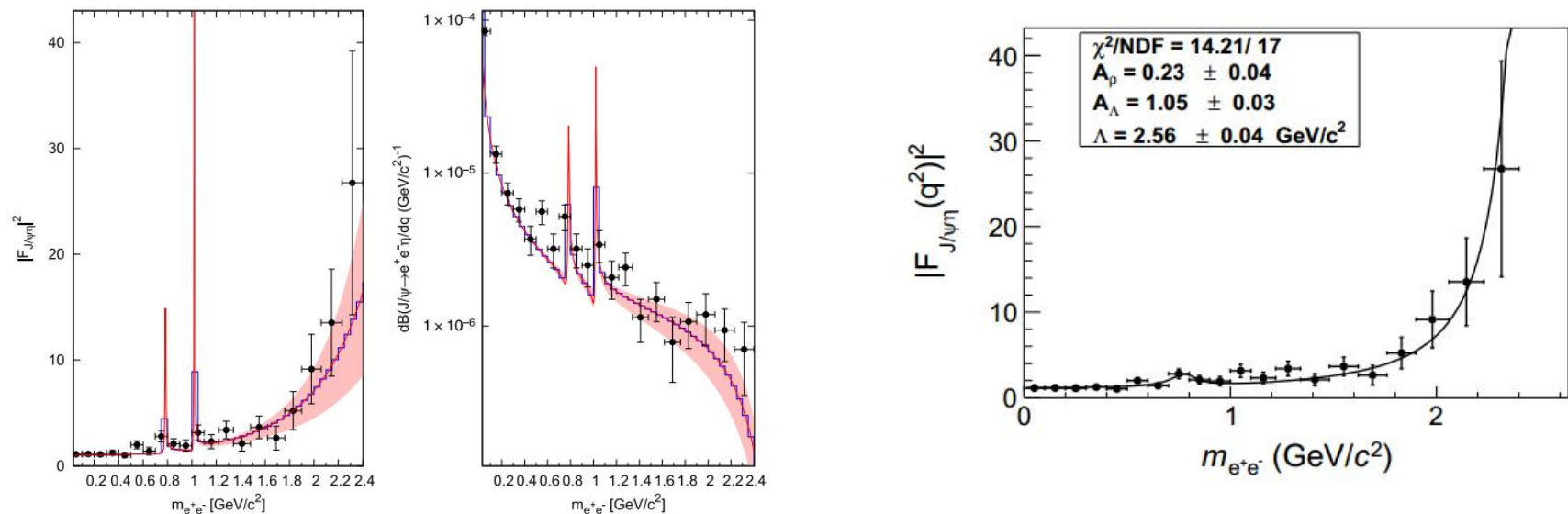
	Experiment	Fit
$\psi' \rightarrow \rho\pi$	0.032 ± 0.012	0.037 ± 0.010
$\psi' \rightarrow \rho^0\eta$	0.022 ± 0.006	0.021 ± 0.005
$\psi' \rightarrow \rho^0\eta'$	0.019 ± 0.017	0.028 ± 0.008
$\psi' \rightarrow \omega\pi^0$	0.021 ± 0.006	0.021 ± 0.004
$\psi' \rightarrow \omega\eta$	...	0.005 ± 0.003
$\psi' \rightarrow \omega\eta'$	0.032 ± 0.025	0.033 ± 0.019
$\psi' \rightarrow \phi\eta$	0.031 ± 0.003	0.032 ± 0.003
$\psi' \rightarrow \phi\eta'$	0.0154 ± 0.0020	0.016 ± 0.002
$\psi' \rightarrow K^{*+}K^- + \text{c.c.}$	0.029 ± 0.004	0.029 ± 0.004
$\psi' \rightarrow K^{*0}\bar{K}^0 + \text{c.c.}$	0.109 ± 0.020	0.080 ± 0.011

	Experiment	Fit
$J/\psi \rightarrow \rho^0\pi^0$	5.6 ± 0.7	5.5 ± 0.3
$J/\psi \rightarrow \rho\pi$	16.9 ± 1.5	16.2 ± 1.0
$J/\psi \rightarrow \rho^0\eta$	0.193 ± 0.023	0.185 ± 0.021
$J/\psi \rightarrow \rho^0\eta'$	0.081 ± 0.008	0.080 ± 0.007
$J/\psi \rightarrow \omega\pi^0$	0.45 ± 0.05	0.45 ± 0.04
$J/\psi \rightarrow \omega\eta$	1.74 ± 0.20	1.65 ± 0.09
$J/\psi \rightarrow \omega\eta'$	0.189 ± 0.018	0.189 ± 0.018
$J/\psi \rightarrow \phi\eta$	0.74 ± 0.08	0.76 ± 0.06
$J/\psi \rightarrow \phi\eta'$	0.46 ± 0.05	0.45 ± 0.05
$J/\psi \rightarrow K^{*+}K^- + \text{c.c.}$	6.0 ± 1.0	6.6 ± 0.3
$J/\psi \rightarrow K^{*0}\bar{K}^0 + \text{c.c.}$	4.2 ± 0.4	3.8 ± 0.2
$J/\psi \rightarrow \pi^0\gamma$	0.0356 ± 0.0017	0.0341 ± 0.0016
$J/\psi \rightarrow \eta\gamma$	1.085 ± 0.018	1.085 ± 0.013
$J/\psi \rightarrow \eta'\gamma$	5.25 ± 0.07	5.35 ± 0.04
$J/\psi \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$	$(0.076 \pm 0.014) \times 10^{-2}$	$(0.129 \pm 0.004) \times 10^{-2}$
$J/\psi \rightarrow \eta e^+ e^-$	$(1.42 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	$(1.35 \pm 0.02) \times 10^{-2}$
$J/\psi \rightarrow \eta' e^+ e^-$	$(6.59 \pm 0.18) \times 10^{-2}$	$(6.08 \pm 0.05) \times 10^{-2}$

► 唯象学讨论—— $\eta \rightarrow \gamma\gamma^*$, $\eta' \rightarrow \gamma\gamma^*$, $\phi \rightarrow \eta\gamma^*$, $J/\psi \rightarrow \eta'\gamma^*$ 形状因子的图



► 唯象学讨论—— $J/\psi \rightarrow \eta\gamma^*$ 形状因子



- ✓ bin宽度减小时，轻矢量共振态信号明显加强。
- ✓ 最近，BESIII实验组给出了 $J/\psi \rightarrow \eta e^+ e^-$ 形状因子的相关数据[M. Ablikim et al., PRD'19,21]，其中实验分析除了QED的贡献外，只包含 $e^+ e^-$ 谱中的 ρ 共振态的贡献。然而， ρ 的贡献应该来自一个同位旋破缺的中间过程 $J/\psi \rightarrow \eta\rho \rightarrow \eta e^+ e^-$ 。相比之下， ω 和 ϕ 的贡献可能更重要。是因为它们通过同位旋守恒的中间过程 $J/\psi \rightarrow \rho\omega$ 和 $J/\psi \rightarrow \eta\phi$ 进入，它们的分支比分别比 $J/\psi \rightarrow \eta\rho$ 的分支比大约大8倍和4倍。

➤ 唯象学讨论—— $J/\psi(\psi') \rightarrow PV$ 形状因子的模

Isospin conserved cases	Experiment	Strong interaction	EM interaction
$ G_{J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0} $	2.537 ± 0.154	2.899 ± 0.075	0.385 ± 0.006
$ G_{J/\psi \rightarrow \rho \pi} $	4.408 ± 0.191	5.022 ± 0.129	0.709 ± 0.009
$ G_{J/\psi \rightarrow \omega \eta} $	1.497 ± 0.084	1.586 ± 0.037	0.132 ± 0.009
$ G_{J/\psi \rightarrow \omega \eta'} $	0.562 ± 0.026	0.647 ± 0.028	0.119 ± 0.008
$ G_{J/\psi \rightarrow \phi \eta} $	1.060 ± 0.056	1.270 ± 0.045	0.198 ± 0.031
$ G_{J/\psi \rightarrow \phi \eta'} $	0.974 ± 0.052	1.074 ± 0.049	2.031 ± 0.044
$ G_{J/\psi \rightarrow K^{*+} K^-} $	2.011 ± 0.161	2.313 ± 0.048	0.216 ± 0.036
$ G_{J/\psi \rightarrow K^{*0} \bar{K}^0} $	1.686 ± 0.078	2.308 ± 0.048	0.715 ± 0.009
Isospin violated cases	Experiment	EM interaction	Strong interaction
$ G_{J/\psi \rightarrow \rho^0 \eta} $	0.498 ± 0.029	0.487 ± 0.028	...
$ G_{J/\psi \rightarrow \rho^0 \eta'} $	0.367 ± 0.018	0.365 ± 0.017	...
$ G_{J/\psi \rightarrow \omega \pi^0} $	0.721 ± 0.039	0.720 ± 0.035	...
Isospin conserved cases	Experiment	Strong interaction	EM interaction
$ G_{\psi' \rightarrow \rho \pi} $	0.255 ± 0.044	0.029 ± 0.036	0.255 ± 0.016
$ G_{\psi' \rightarrow \omega \eta} $	...	0.103 ± 0.038	0.036 ± 0.003
$ G_{\psi' \rightarrow \omega \eta'} $	0.288 ± 0.096	0.212 ± 0.079	0.079 ± 0.013
$ G_{\psi' \rightarrow \phi \eta} $	0.275 ± 0.013	0.285 ± 0.030	0.565 ± 0.029
$ G_{\psi' \rightarrow \phi \eta'} $	0.213 ± 0.013	0.197 ± 0.068	0.412 ± 0.067
$ G_{\psi' \rightarrow K^{*+} K^-} $	0.181 ± 0.012	0.263 ± 0.021	0.093 ± 0.021
$ G_{\psi' \rightarrow K^{*0} \bar{K}^0} $	0.352 ± 0.031	0.267 ± 0.021	0.568 ± 0.007
Isospin violated cases	Experiment	EM interaction	Strong interaction
$ G_{\psi' \rightarrow \rho^0 \eta} $	0.219 ± 0.028	0.216 ± 0.026	...
$ G_{\psi' \rightarrow \rho^0 \eta'} $	0.222 ± 0.083	0.271 ± 0.040	...
$ G_{\psi' \rightarrow \omega \pi^0} $	0.207 ± 0.028	0.208 ± 0.019	...

- ✓ $\psi' \rightarrow \rho \pi$ 电磁相互作用是主导, $J/\psi \rightarrow \rho \pi$ 强相互作用是主导。
- ✓ 我们发现 $J/\psi \rightarrow K^* \bar{K} + c.c.$ 过程中 SU(3) 破缺效应在带电和中性振幅中的贡献是类似的, 然而 $\psi' \rightarrow K^* \bar{K} + c.c.$ 中 SU(3) 对称破缺效应在带电和中性过程中是不同的。

$$\frac{1}{M_{\psi(\psi')}} h_2^{(0)} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \psi^{(0)\mu} \langle \{u^\nu, V^{\rho\sigma}\} \chi_+ \rangle \quad \frac{ic_4}{M_V} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \langle V^{\mu\nu} [f_-^{\rho\sigma}, \chi_+] \rangle$$

➤ 总结

- ✓ 我们采用构造有效拉氏量的方法来同时研究 $J/\psi(\psi') \rightarrow VP, J/\psi \rightarrow PY, J/\psi \rightarrow Pl^+l^-$ 衰变过程和轻味强子的辐射衰变。
- ✓ 我们特别注意了 $J/\psi(\psi') \rightarrow VP$ 过程中强相互作用和电磁相互作用的相对量级，强相互作用的影响在 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 衰变过程中占主导地位，电磁相互作用则在 $\psi' \rightarrow \rho\pi$ 过程中最重要，这为 $\rho\pi$ 疑难提供了一个解释。
- ✓ 我们发现 $J/\psi \rightarrow K^*\bar{K} + c.c.$ 过程的强相互作用是主导作用，SU(3) 破缺效应在带电和中性振幅中的贡献是类似的，然而 $\psi' \rightarrow K^*\bar{K} + c.c.$ 过程的强相互作用和电磁相互作用量级大小类似，但SU(3) 对称破缺效应在带电和中性过程中是不同的。这为中性 $B(\psi' \rightarrow K^{*0}\bar{K}^0 + c.c.)/B(J/\psi \rightarrow K^{*0}\bar{K}^0 + c.c.)$ 和带电 $B(\psi' \rightarrow K^{*+}K^- + c.c.)/B(J/\psi \rightarrow K^{*+}K^- + c.c.)$ 过程出现不同的分支比提供了合理解释。

感谢各位专家的聆听，
请批评指正！