

η 、 η' 和 ν 的夸克和胶子内容、双光子衰变和 J/ψ 辐射衰变产生*

郁 宏

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

本文引进 $q_i\bar{q}_i \rightleftharpoons q_i\bar{q}_i$ 以及 $q_i\bar{q}_i \rightleftharpoons (gg)$ 湮没项^[1], 并考虑了对湮没项的 $SU(3)$ 破坏效应^[2], 讨论了 η 、 η' 和 ν 的混合, 得到了它们的夸克和胶子内容. 与此同时, 引入 EPCAC (扩充的部分守恒赝矢流) 假设^[3], 考察了 η 、 η' 和 ν 的双光子衰变. 本文还计算了衰变宽度比 $R_1 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')/\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)$ 以及 $R_2 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')/\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\nu)$, 指出了实验结果对纯胶子球质量值的限制.

一、引 言

强相互作用的规范理论——量子色动力学 (QCD) 包含了夸克和胶子这两类构成强子的基本组分. 和量子电动力学 (QED) 相比, QCD 的一个明显特点是胶子带有色荷, 所以它们之间存在相互作用, 从而胶子可以组成束缚态——胶子球.

对于赝标胶子球, 迄今公认 ν —— $\eta(1440)$ 是最有可能的候选者. 与 ν 具有相同量子数的赝标介子基态是 η 和 η' . 一般地说, 由于颜色相互作用, 胶子束缚态和夸克-反夸克对 (夸克偶素) 之间能够互相湮没, 而夸克偶素之间也能通过交换胶子而互相跃迁 (见图 1). 所以, 我们必须考虑纯胶子球和具有相同量子数的夸克偶素之间的混合. 对于 0^{-+} 粒子, 即要考虑 ν 和 η 、 η' 的混合. 由于粲夸克偶素 η_c 的质量较大, 所以可以预期 η_c 与

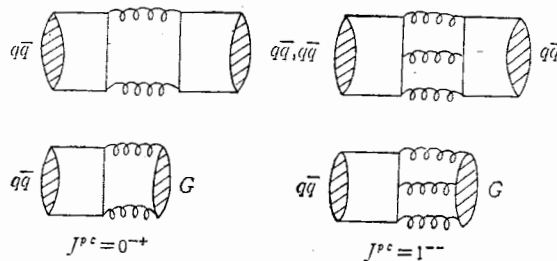


图 1 夸克偶素之间相互跃迁及夸克偶素和胶子球之间互相湮没

* 本工作得到国家基金会基金支持.
本文 1987 年 8 月 21 日收到.

η, η' 以及 ν 的混合是小的。为简单起见, 本文先略去 η, η', ν 和 η_c 的混合 (将另作讨论)。同时, 本文也不考虑径向激发态的混入。

二、 η, η' 和 ν 的夸克和胶子内容

取以下态矢量为基

$$|N\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|u\bar{u} + d\bar{d}\rangle, |S\rangle = |s\bar{s}\rangle, |G\rangle = |gg\rangle \quad (1)$$

物理态 $|i\rangle$ 为它们的线性组合

$$|i\rangle = x_i|N\rangle + y_i|S\rangle + z_i|G\rangle \quad (2)$$

$(i = \eta, \eta' \text{ 和 } \nu).$

归一化条件为

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = 1. \quad (3)$$

相应的质量平方矩阵为

$$\hat{M}^2 = \begin{pmatrix} m_N^2 + 2\alpha & \sqrt{2}\alpha Z & \sqrt{2}\beta \\ \sqrt{2}\alpha Z & m_S^2 + \alpha Z^2 & \beta Z \\ \sqrt{2}\beta & \beta Z & m_G^2 + \frac{\beta^2}{\alpha} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

这里的 m_N^2, m_S^2 和 m_G^2 是不考虑夸克-反夸克对和胶子相互作用时态 $|N\rangle, |S\rangle$ 和 $|G\rangle$ 的质量的平方; α 为夸克偶素 $q_i\bar{q}_i$ 和 $q_j\bar{q}_j$ 之间相互跃迁的振幅, β 为胶子球和夸克偶素之间相互湮没的振幅, 它们都和味道无关; 而 Z 因子的引入正是考虑了对上述跃迁振幅和湮没振幅的 $SU(3)$ 破坏效应。与文献[2, 4]不同的是这里出现的所有参数 ($m_N, m_S, m_G, \alpha, \beta$ 和 Z) 都有十分明确的物理意义, 便于作物理讨论。

不考虑夸克-反夸克对和胶子的相互作用, 但计及 S 夸克和 u, d 夸克的质量差, 我们有

$$\begin{aligned} m_N^2 &= m_\pi^2, \\ m_S^2 &= 2m_K^2 - m_\pi^2. \end{aligned} \quad (5)$$

把纯胶子球质量 m_G 作为参数, 输入物理粒子质量 $m_\eta, m_{\eta'}$ 和 m_ν , 用标准的质量矩阵对角化的方法, 可以得到对应不同 m_G 值的 α, β 和 Z 因子 (见表 1)。随着 m_G 的增加, 跃迁和湮没振幅变小, 而 $SU(3)$ 破坏效应变大。

表 1 对应不同 m_G 值的 α, β 和 Z 因子

$m_G(\text{GeV})$	$\alpha(\text{GeV}^2)$	$\beta(\text{GeV}^2)$	Z
1.20	0.4076	0.3338	0.8224
1.25	0.3753	0.3041	0.8077
1.30	0.3466	0.2644	0.7954
1.35	0.3212	0.2133	0.7849
1.40	0.2984	0.1423	0.7759

解本征值方程

$$\hat{M}^2|i\rangle = m_i^2|i\rangle, \quad (6)$$

再用归一化条件(3),可以得到对应不同 m_G 值的 η 、 η' 和 ι 中夸克及胶子内容(见表2)。

表2 对应不同 m_G 值的 x_i 、 y_i 及 z_i ($i = \eta, \eta'$ 和 ι)

$m_G(\text{GeV})$	x_η	y_η	z_η	$x_{\eta'}$	$y_{\eta'}$	$z_{\eta'}$	x_ι	y_ι	z_ι
1.20	0.7095	-0.6973	-0.1016	0.5474	0.6362	-0.5437	0.4438	0.3302	0.8331
1.25	0.7165	-0.6916	-0.09169	0.5834	0.6661	-0.4647	0.3824	0.2794	0.8807
1.30	0.7225	-0.6868	-0.07907	0.6136	0.6898	-0.3842	0.3184	0.2291	0.9198
1.35	0.7279	-0.6827	-0.06330	0.6393	0.7091	-0.2975	0.2480	0.1761	0.9526
1.40	0.7327	-0.6793	-0.04197	0.6613	0.7251	-0.1919	0.1608	0.1128	0.9805

随着 m_G 的增加, η 介子中非奇异夸克含量略微增多,而奇异夸克含量略微减少,胶子含量变得更少了; η' 介子中,夸克含量增多而胶子含量大幅度减少; ι 介子中,夸克含量急剧减少,而胶子含量大大增加。

如果用通常的混合角 θ 和 ϕ 表示,物理的 η 、 η' 和 ι 波函数可以写为

$$\begin{aligned} |\eta\rangle &= \left(\sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta + \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta \cos \phi \right) |N\rangle \\ &\quad + \left(\sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta \cos \phi - \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta \right) |S\rangle + \sin \theta \sin \phi |G\rangle, \\ |\eta'\rangle &= \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta \cos \phi - \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \theta \right) |N\rangle \\ &\quad + \left(\sqrt{\frac{1}{3}} \cos \theta \cos \phi + \sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta \right) |S\rangle + \cos \theta \sin \phi |G\rangle, \\ |\iota\rangle &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \phi |N\rangle - \sqrt{\frac{1}{3}} \sin \phi |S\rangle + \cos \phi |G\rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

表3 对应不同 m_G 值的混合角 θ 和 ϕ

$m_G(\text{GeV})$	θ ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)
1.20	10.6	-33.6
1.25	11.2	-28.3
1.30	11.6	-23.1
1.35	12.1	-18.1
1.40	12.4	-11.3

对应不同的 m_G 值,可以算出相应的混合角 θ 和 ϕ (见表3)。可以清楚地看到,随着 m_G 的增加,混合角 ϕ 很快变小,以致 η 和 η' 中胶子含量大幅度减少,而 ι 中胶子含量急剧增加;而 θ 角的变化不大,只略有增加。

文献[5、6]指出,要和目前的实验值符合,在 η - η' 混合方案中,混合角必须增大一倍。而文献[3]认为,只要考虑扩充的部分守恒赝矢流(EPCAC)假设,不必引入 η - η' 的

混合就可以得到与实验符合的 η 介子的双光子衰变结果。但是文献 [5, 6] 引用的实验结果是 $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (0.56 \pm 0.04) \text{ keV}$, 这是直接测双光子所得到的值。文献 [3] 用的实验值为 $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (0.324 \pm 0.046) \text{ keV}$, 这是应用 Primakoff 效应得到的结果。而现在普遍采用的平均值为 $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (0.408 \pm 0.059) \text{ keV}^{[7]}$ 。

大家知道, 赝标介子的双光子衰变部分宽度和它们的夸克含量关系甚密, 而对于 η, η' 及 ι 仍用 PCAC 假设显然是不妥的; 赝标介子的 J/ψ 辐射衰变产生率则主要由其胶子含量所决定^[8]。对于本文讨论的 η, η' 和 ι 混合方案, 采用 EPCAC 假设, 情况将会怎样? 下面将分别讨论它们的双光子衰变过程和 J/ψ 的辐射衰变产生。

三、 η, η' 和 ι 的双光子衰变

对于 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 过程, 我们知道^[3]

$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{m_\pi^3}{64\pi} E_\pi^2 F_\pi^2(0), \quad (8)$$

其中 $E_\pi = F_\pi(m_\pi^2)/F_\pi(0)$ 表示从 $m_\pi = 0$ 外推到 m_π 所引起的修正。在强 PCAC 假设下, $E_\pi \approx 1$ 。 $F_\pi(q^2)$ 是衰变振幅, 由低能定理^[9]有 $F_\pi(0) = -\frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{1}{f_\pi}$, 其中 $f_\pi \approx 93 \text{ MeV}$ 是 π 介子衰变常数。EPCAC 假设给出 $E_\pi = 1/(1 - \Delta_\pi)$, $\Delta_\pi = \Delta_{\pi N} = 0.06 \pm 0.02^{[3]}$, 它反映了对 Goldberger-Treiman 关系的修正, 是手征对称性破缺的测度。 Δ_π 很小, 反映了对 π^0 介子, 强 PCAC 近似是好的。

对于 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 过程, 同样的考虑给出

$$\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{m_\eta^3}{64\pi} E_\eta^2 F_\eta^2(0), \quad (9)$$

外推因子 $E_\eta = 1/(1 - \Delta_\eta)$, 相应的低能定理为 $F_\eta(0) = -\alpha/(\sqrt{3}\pi f_\eta)$ 。其中 f_η 和 Δ_η 均为未知量。考虑到 η 介子和 K 介子质量相近, 可近似地取 $f_\eta \approx f_K = 116 \text{ MeV}$ (而不是如文献 [3] 取 $f_\eta = f_\pi$), $\Delta_\eta \approx \Delta_K = 0.30 \pm 0.15^{[3]}$ 。于是可以求出 η 和 π^0 的双光子衰变宽度比 $\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)/\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) = 23.0 \pm 12.2$ 。而目前直接测双光子的实验值为 $74.2 \pm 8.2^{[7]}$, 理论值比实验值小二倍多。即使取平均实验值 54.0 ± 10.0 , 理论值也要比实验值小差不多一倍。因此, 还是有必要引进混合。由 $SU(3)$ 计算, 可以得到

4 对应于不同 m_G 值的 η 和 π^0 的双光子衰变宽度比值。下标 (Mix) 表示仅考虑混合, 下标 (Mix + EPCAC) 表示同时考虑混合和 EPCAC

$m_G(\text{GeV})$	$\frac{\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}_{(\text{Mix})}$	$\frac{\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}_{(\text{Mix+EPCAC})}$
1.20	49.0	57.3 ± 27.1
1.25	50.7	59.3 ± 28.0
1.30	52.1	61.0 ± 28.8
1.35	53.4	62.5 ± 29.5
1.40	54.6	63.8 ± 30.1

$$\frac{\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)} = \left(\frac{m_\eta}{m_\pi}\right)^3 \frac{1}{9} (5x_\eta + \sqrt{2}y_\eta)^2, \quad (10)$$

这里没有考虑 EPCAC 效应. 如果考虑 EPCAC, 则(10)式应修改为

$$\frac{\Gamma(\eta \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)} = \left(\frac{m_\eta}{m_\pi}\right)^3 \frac{1}{9} (5x_\eta + \sqrt{2}y_\eta)^2 \frac{E_\eta^2 f_\pi^2}{E_\pi^2 f_\eta^2}. \quad (11)$$

由(10)和(11)式, 以及考虑 η 、 η' 和 ι 混合而得到的 η 中的夸克含量(见表 2), 对不同的 m_G 值, 本文计算了两种情况下的 η 和 π^0 介子双光子衰变宽度比(见表 4). 显然, 在考虑了 η 、 η' 和 ι 的混合之后, 理论结果和平均实验值相比是符合的, 不必如[5, 6]指出的要改动混合角. 即使与[5, 6]所采用的实验值相比, 本文的结果也有所改善. 如果把 EPCAC 导致的修正考虑进来, 则在误差范围内, 理论结果和两种实验值都可以符合. 在同时考虑的两种效应中, 混合效应是主要的. 以上是本文的第一个结论.

对于 $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $\iota \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变过程, 如果粗略地作同样的 EPCAC 假设, 取 $\Delta_{\eta'} \approx \Delta_\iota \approx \Delta_\eta (\approx \Delta_K)$, $f_{\eta'} \approx f_\iota \approx f_\eta (\approx f_K)$. 计算结果见表 5.

实验值为^[7]

$$\frac{\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)} = 596 \pm 73, \quad \frac{\Gamma(\iota \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)} < 282. \quad (12)$$

表5 对应于不同 m_G 值的 η' 、 ι 和 π^0 介子双光子衰变宽度比值. 下标意义同表 4

$m_G(\text{GeV})$	$\left[\frac{\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}\right]_{(\text{Mix})}$	$\left[\frac{\Gamma(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}\right]_{(\text{Mix+EPCAC})}$	$\left[\frac{\Gamma(\iota \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}\right]_{(\text{Mix})}$	$\left[\frac{\Gamma(\iota \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)}\right]_{(\text{Mix+EPCAC})}$
1.20	525	608 ± 287	973	1128 ± 532
1.25	591	685 ± 323	718	832 ± 393
1.30	648	752 ± 355	495	574 ± 271
1.35	699	810 ± 382	299	347 ± 164
1.40	744	862 ± 407	125	145 ± 68

对于 $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ 过程, 只要 $m_G \lesssim 1.30 \text{ GeV}$, 仅考虑混合机制已经能够符合实验, 若同时作 EPCAC 假设, 则在误差范围之内, 计算结果和实验值不矛盾. 至于 $\iota \rightarrow \gamma\gamma$ 过程, 由于胶子不带电, 所以纯胶子球不能衰变为双光子, 必须考虑 ι 和 η 、 η' 的混合, 而且只有当 $m_G > 1.30 \text{ GeV}$ 时, 计算结果才不至于和实验上限矛盾. 由于实验值只有上限, 所以我们期待着更进一步的实验检验.

四、 η 、 η' 和 ι 的 J/ψ 辐射衰变产生

由微扰 QCD 的考虑, J/ψ 的辐射衰变过程为

$$J/\psi \rightarrow \gamma + (gg),$$

其中 (gg) 可以是胶子球, 也可以继续产生由一对正反夸克组成的 $SU(3)$ 单态介子 $(q\bar{q})$, 如图 2 所示. 我们在[8]中已经指出, $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 、 $\gamma\eta'$ 和 $\gamma\iota$ 过程几率的主要贡献来自 η 、 η' 和 ι 中的胶子球分量, 并且给出了如下衰变宽度公式

$$\Gamma(m_i) = \frac{2^{11}}{81} \pi^2 \alpha \cdot \alpha_s^2 \phi_j^2(0) f_c^2(0) \frac{(m_j^2 - m_i^2)^3}{m_j^2 m_c^2 (m_j^2 - 2m_i^2 + 4m_c^2)^2}$$

$$\cdot \left\{ 2m_J^2 - 3m_i^2 \left(1 + \frac{2m_c}{m_J} \right) - \frac{16m_c^3}{m_J} \right\}^2. \quad (13)$$

由(2)式可以得到

$$\begin{aligned} \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta) &= z_\eta^2 \Gamma(m_\eta), \\ \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') &= z_{\eta'}^2 \Gamma(m_{\eta'}), \\ \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\iota) &= z_\iota^2 \Gamma(m_\iota). \end{aligned} \quad (14)$$

仍取 $m_c = 1.30 \text{ GeV}$, 则对不同的 m_G 值可以得到以下结果(见表6)。而实验结果为^[7,10]

$$R_1^{\text{ex}} = 4.9 \pm 0.6,$$

$$0.093 < R_2^{\text{ex}} \leq 0.86.$$

(15)

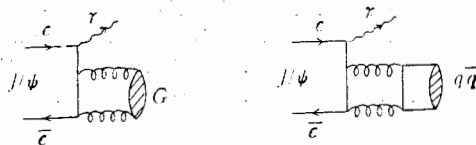


图2 过程 $J/\psi \rightarrow \gamma +$ 胶子球及 $J/\psi \rightarrow \gamma + (q\bar{q})$ 介子的费曼图, 图中螺旋线表示胶子

表6 对应不同 m_G 值的 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta, \eta'$ 和 ι 的辐射衰变宽度比

$m_G(\text{GeV})$	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40
$R_1 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)$	5.5	5.0	4.6	4.3	4.0
$R_2 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\iota)$	0.27	0.18	0.11	0.062	0.025

要使 R_1 与实验符合, m_G 必须 $\leq 1.35 \text{ GeV}$ 。而当 $m_G > 1.30 \text{ GeV}$ 时, R_2 值太小, 与实验矛盾。即实验结果对 m_G 的取值相当敏感, 特别是比值 R_2 。这是本文要强调的第二点结论。

纵观上节和本节的全部结果, 取 $m_G = 1.30 \text{ GeV}$ 为最宜, 这是和 MIT 口袋模型^[11]的估计一致的。

五、小 结

本文考虑夸克-反夸克对和胶子的相互作用, 引进了两种湮没振幅 α 和 β , 并且把湮没项的 $SU(3)$ 破缺通过 Z 因子反映出来, 以纯胶子球态质量 m_G (可以由口袋模型, 格点规范理论等进行计算) 作为参数, 讨论了 η, η' 和 ι 的混合机制, 得到了 η, η' 和 ι 中的夸克和胶子内容, 并与通常的混合角 θ 和 ϕ 相联系。通过对 π^0, η, η' 和 ι 介子的双光子衰变过程的研究, 同时考察了混合机制和 EPCAC 假设, 指出仅考虑 EPCAC 假设是不够的, 必须考虑混合效应。而且指出了同时考虑两种因素, 不必改动混合角就可以得到与实验相符合的结果。本文还给出了 J/ψ 辐射衰变产生 η, η' 和 ι 的宽度比 R_1 和 R_2 。发现实验结果对 m_G 的取值有强的限制。当取 $m_G = 1.30 \text{ GeV}$ 时, 可以同时使 R_1 和 R_2 与实验符合, 并且也适合 η, η' 和 ι 双光子衰变的要求, 而这也是和 MIT 口袋模型对纯胶子球质量的估计一致的。

参 考 文 献

- [1] T. N. Pham, *Phys. Lett.*, **87B**(1979), 267.
- [2] J. L. Rosner, *Phys. Rev.*, **D27**(1983), 1101; H. Suura and M. Kuroda, *Prog. Theor. Phys.*, **54**(1975), 1513.
- [3] C. A. Dominguez, *Phys. Rev.*, **D15**(1977), 1350.
- [4] Sh. S. Eremyan and A. E. Nazaryan, *EφN-802*(29)-85.

- [5] F. J. Gilman and R. Kauffman, SLAC-PUB-4301.
 [6] J. F. Donoghue, B. R. Holstein and Y.-C. R. Lin, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 2766.
 [7] Particle Data Group, *Phys. Lett.*, **170B**(1986), 1.
 [8] 郁宏、李炳安、沈齐兴和张美曼, *高能物理与核物理*, **8**(1984), 285.
 [9] J. S. Bell and R. Jackiw, *Nuovo. Cimento.*, **60A**(1969), 47; S. L. Adler, *Phys. Rev.*, **177**(1969), 2426.
 [10] M. Chanowitz, 在北京“聚物理讲习班”上的讲演。
 [11] K. F. Donoghue, K. Johnson and B. A. Li, *Phys. Lett.*, **99B**(1981), 416.

QUARK AND GLUON CONTENT OF η , η' AND ι (1440), THEIR DECAYS IN TWO PHOTONS AND PRODUCTIONS IN J/ψ RADIATIVE DECAY

YU HONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinicas, Beijing)

ABSTRACT

In this paper we introduce the annihilation terms describing transitions $q_i\bar{q}_i \rightleftharpoons q_j\bar{q}_j$ and $q_i\bar{q}_i \rightleftharpoons (gg)$ and consider the $SU(3)$ breaking effect for these terms. We discuss the mixing mechanism of η , η' and ι and obtain the quark and gluon content of η , η' and ι . At the same-time we introduce EPCAC (Extended Partially Conserved Axial-vector Current) hypothesis and examine η , η' and ι decays in two photons. We calculate yet the ratio $R_1 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)$ and $R_2 = \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\iota)$ and point out the experimental restriction for the pure glueball mass.