

关于 η_c' 粒子及其电磁衰变*

丁亦兵^{1,3,4} 秦旦华^{2,3} 赵光达^{2,3,4} 周 雷¹

1.(中国科学院研究生院物理部,北京 100039)

2.(北京大学物理系,北京 100871)

3.(中国科学院理论物理研究所,北京 100080)

4.(中国高等科学技术中心(世界实验室))

摘 要

本文在势模型的框架内,估算了 η_c' 粒子的质量、宽度及几种主要电磁衰变道的分支比。指出禁戒型磁跃迁 $\eta_c' \rightarrow J/\psi\gamma$ 的相对论修正结果比简单的非相对论估算有可能大一个量级。讨论了北京正负电子对撞机 (BEPC) 对级联电磁辐射过程 $\psi'(3686) \rightarrow \gamma\eta_c' \rightarrow \gamma\gamma^1P_1, \gamma\gamma J/\psi, 3\gamma$ 进行测量的可能性。

自从 1974 年 J/ψ 粒子发现以来,重夸克偶素势模型对粲偶素的研究取得了很大的成功^[1]。但遗憾的是,阈以下还有两个重要成员至今未能得到实验的证实,尽管它们的存在是无庸置疑的,它们的性质在理论上也有一些相当明确的预言^[2-3]。 η_c' 粒子就是其中之一。它是与 $c\bar{c}$ 的 2^3S_1 态 $\psi'(3686)$ 相伴的自旋单态粒子。对它的理论预言早已有许多讨论。1982 年 SLAC 的晶球实验组曾报告过^[4],根据 1.8×10^6 个 $\psi'(3686)$ 的单举光子谱的分析, η_c' 的初步实验结果为:

质 量: $M_{\eta_c'} = 3592 \pm 5 \text{ MeV}$

总宽度: $\Gamma_t(\eta_c') < 8 \text{ MeV}$

分支比: $B_t(\psi'(3686) \rightarrow \eta_c'\gamma) \sim (0.2-1.3)\%$

从那时至今将近八年,这个实验结果没有得到进一步肯定的证实。最近,由于 BEPC (北京正负电子对撞机) 的成功运行,人们对 η_c' 粒子重新产生了兴趣。本文利用我们在文[5]中采用的势模型,对 η_c' 的性质进行了一些讨论,估算了它的质量、宽度及一些主要电磁衰变道的分支比。我们发现如果 BEPC 能积累 10^7 个 $\psi'(3686)$ 的事例,则经由 $\psi' \rightarrow \eta_c'\gamma$ 而达到 $^1P_1 + 2\gamma$, $J/\psi + 2\gamma$ 和 3γ 的衰变道都可能达到可观测的水平。

1. η_c' 的质量

由于 $c\bar{c}$ 系统 $1S$ 态的三重态和单态的一对粒子 J/ψ 和 η_c 以及 $2S$ 态的矢量粒子 $\psi'(3686)$ 的质量在实验上都已经给出了测量结果,我们可以对 η_c' 的质量给出一个粗略的与模型无关的估计。由最低阶单胶子交换给出的自旋-自旋相互作用

本文 1990 年 11 月 15 日收到。

* 自然科学基金资助课题。

$$V_{ss}(\mathbf{r}) = \frac{32}{9} \pi \frac{\alpha_s}{m_Q^2} \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2 \delta(\mathbf{r}) \quad (1)$$

忽略掉不同态的 α_s 的差别, 则对相同的 S 态矢量与赝标粒子质量差应为

$$M_V - M_P = \frac{32}{9} \alpha_s \pi |\psi(0)|^2 / m_Q^2. \quad (2)$$

对 $c\bar{c}$ 的 $2S$ 态和 $1S$ 态, 我们可以得到

$$\frac{(M_V - M_P)_{2S}}{(M_V - M_P)_{1S}} = \frac{|\psi_{2S}(0)|^2}{|\psi_{1S}(0)|^2} = \frac{\Gamma(2S \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma(1S \rightarrow e^+e^-)} \cdot \frac{M_V^3(2S)}{M_V^3(1S)} \quad (3)$$

其中 $M_V(2S)$ 为 $\psi'(3686)$ 的质量, 而 $M_V(1S)$ 为 J/ψ 的质量. 把实验的宽度值和质量值代入, 则粗略地估计给出

$$M_{\eta'_c} = (3611 \pm 39) \text{MeV} \quad (4)$$

利用我们在[5]中采用的势

$$V_V(r) = \frac{8\pi}{33 - n_f} \cdot \frac{1}{\ln \Lambda r} \frac{1 - \Lambda r}{1 + \Lambda r} \quad (5)$$

$$V_S(r) = kr + c \quad (6)$$

选参数为

$$\begin{aligned} \Lambda &= 440 \text{MeV}, \quad k = 0.23 (\text{GeV})^2 \\ m_c &= 1600 \text{MeV} \quad c = -0.50 \text{GeV} \end{aligned} \quad (7)$$

按照与文[5]相同的计算方法, 保留到 $\frac{v^2}{c^2}$ 级近似, 在其它质量与实验值基本符合的情况下, 可以求得

$$m_{\eta'_c} = 3600 \text{MeV} \quad (8)$$

它与粗略的估计值(4)以及晶球的初步实验结果是一致的. 其它作者也给出了相近的结果^[2,3].

2. η'_c 的总宽度 Γ_t

η'_c 的 J^{PC} 应为 0^{-+} , 所以它的主要衰变道为 $\eta'_c \rightarrow 2g$. 利用实验上测得的 η_c 粒子的宽度可以粗略地估算出 η'_c 粒子的宽度.

因为

$$\Gamma(^1S_0 \rightarrow gg) = \frac{8\alpha_s^2}{3M^2} |R(0)|^2 \quad (9)$$

其中 M 为 1S_0 态粒子的质量, $R(0)$ 为相应的径向波函数零点值, 所以

$$\begin{aligned} \frac{\Gamma_t(\eta'_c)}{\Gamma_t(\eta_c)} &\approx \frac{\Gamma(\eta'_c \rightarrow gg)}{\Gamma(\eta_c \rightarrow gg)} = \left(\frac{|R(0)|^2}{M^2} \right)_{\eta'_c} / \left(\frac{|R(0)|^2}{M^2} \right)_{\eta_c} \\ &\approx \frac{\Gamma(\psi' \rightarrow e^+e^-)}{\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-)} \end{aligned} \quad (10)$$

代入 $\psi'(3686)$ 和 J/ψ 粒子衰变宽度的实验值^[6]及

$$\Gamma_t(\eta_c) = \left(10.3 \begin{matrix} +3.8 \\ -3.4 \end{matrix} \right) \text{MeV} \quad (11)$$

可以导出

$$\Gamma(\eta'_c) \approx 4.5 \text{ MeV} \quad (12)$$

晶球实验组给出的实验上限值为

$$\Gamma(\eta'_c) < 8 \text{ MeV} \quad (13)$$

与我们的估计是不矛盾的.

3. η'_c 到 1P_1 态电偶极跃迁宽度

1P_1 态是 $c\bar{c}$ 家族中阈以下至今尚未找到的另一个重要的粒子. 理论分析认为 $\psi' \rightarrow ^1P_1 + \pi^0$ 是最容易发现 1P_1 态的衰变道^[7]. 但如果能有足够多的 η'_c 事例, 则通过 η'_c 的允许型 E1 电跃迁 $\eta'_c \rightarrow ^1P_1\gamma$, 也可以提供寻找 1P_1 的一条可能的途径.

由电偶极跃迁理论可知, $\eta'_c \rightarrow ^1P_1\gamma$ 的衰变宽度为:

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow ^1P_1\gamma) = \frac{4}{3} e_c^2 \alpha |\langle f | r | i \rangle|^2 k^3 \quad (14)$$

其中 $e_c = \frac{2}{3}$ 为 c 夸克的电荷, α 为精细结构常数, k 为辐射光子的动量, $\langle f | r | i \rangle$ 为半径 r 的矩阵元, 我们采用非相对论矩阵元做一个初步的理论估计. 取

$$M_{\eta'_c} \approx 3600 \text{ MeV} \quad (15)$$

$$M_{^1P_1} \approx (M_{^3P_1})_{c.o.g} = \frac{1}{9} (M_{^3P_0} + 3M_{^3P_1} + 5M_{^3P_2}) = 3520 \text{ MeV} \quad (16)$$

由我们的模型得到的计算结果为

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow ^1P_1\gamma) = 11 \text{ keV} \quad (17)$$

利用前面粗略估算的 η'_c 的理论宽度值, 可以求得

$$Br(\eta'_c \rightarrow ^1P_1\gamma) \approx 2.5 \times 10^{-3} \quad (18)$$

4. $\psi'(3686) \rightarrow \eta'_c\gamma$ 的宽度和分支比

$\psi' \rightarrow \eta'_c\gamma$ 是允许型 M1 跃迁. M1 磁跃迁宽度的普遍计算公式为^[9]

$$\Gamma(S_i \rightarrow \gamma S_f) = \frac{16}{9} \frac{1}{2s_i + 1} \frac{\alpha}{m_c^2} \cdot k^3 |I|^2 \frac{M_i^2 + M_f^2}{2M_i^2} \quad (19)$$

其中 s_i 为初态自旋, m_c 为 c 夸克质量, M_i 和 M_f 分别为初态介子和末态介子的质量, α 为精细结构常数, k 为辐射光子的动量. I 是磁偶极跃迁算符在初态和末态之间的矩阵元.

对于允许型 M1 跃迁, 在完全非相对论近似下, I 就是初态与末态波函数的重迭积分. 由于这时初、末态波函数完全相同, $I = 1$, 我们可以求得:

$$\frac{\Gamma(\psi' \rightarrow \eta'_c\gamma)}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma)} \approx \left(\frac{k'}{k}\right)^3 \quad (20)$$

代入这两个衰变过程中辐射光子的动量值

$$k' = 85 \text{ MeV}, k = 115 \text{ MeV} \quad (21)$$

可以粗略地估计

$$\Gamma(\psi'(3686) \rightarrow \eta'_c\gamma) \approx 0.36 \text{ keV} \quad (22)$$

实际上,对于 $c\bar{c}$ 系统,推迟效应、相对论修正以及终态反冲等对 $M1$ 磁跃迁宽度都有重要的影响,在保留到 v^2/c^2 级近似下^[9],

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_{Gs} \quad (23)$$

其中, I_1 为考虑了介子的有限大小而产生的推迟效应项,

$$I_1 = \left\langle f \left| \left(-j_0 \left(\frac{\mathbf{k}r}{2} \right) \right) \right| i \right\rangle. \quad (24)$$

对于允许型磁跃迁,这一项的贡献是最重要的。 I_2 和 I_3 为保留到 $\frac{v^2}{c^2}$ 级跃迁算符的相对论修正项,

$$I_2 = \left\langle f \left| \frac{2}{3} \frac{\mathbf{p}^2}{m^2} \right| i \right\rangle, \quad (25)$$

$$I_3 = \left\langle f \left| \frac{1}{m_c} V_s(r) j_0 \left(\frac{\mathbf{k}r}{2} \right) \right| i \right\rangle. \quad (26)$$

I_{Gs} 为终态反冲带来的修正项,

$$I_{Gs} = \left\langle f \left| \frac{\mathbf{p}^2}{6m_c^2} \right| i \right\rangle. \quad (27)$$

(23)式中没有超精细分裂的修正项,因为在我们的波函数中已经包括了这一项的贡献.考虑了这些修正项,利用我们的模型求得的宽度值为

$$\Gamma(\phi' \rightarrow \eta_c' \gamma) \approx (0.31-1.2)\text{keV} \quad (28)$$

其中上限值是只考虑推迟效应求得的结果。 相对论效应和反冲效应使它压低为 0.31 keV. 这个结果与文献[8,9]的结果是相近的,也与(22)式的粗略估计值一致。 晶球实验给出的数值范围为^[4]

$$Br(\phi' \rightarrow \eta_c' \gamma) = (0.2-1.3)\% \quad (29)$$

和我们的计算值是不矛盾的。 利用(28)和(18)可以求得如下的势模型理论预言值

$$Br(\phi' \rightarrow \eta_c' \gamma) Br(\eta_c' \rightarrow {}^1P_1 \gamma) \approx (0.28-1.5) \times 10^{-5} \quad (30)$$

而利用(29)和(18)则得到

$$Br(\phi' \rightarrow \eta_c' \gamma) Br(\eta_c' \rightarrow {}^1P_1 \gamma) \simeq (0.5-3.3) \times 10^{-5} \quad (31)$$

它们与文献[10]用标度(Scaling)方法得到的估计值

$$Br(\phi' \rightarrow \eta_c' \gamma) Br(\eta_c' \rightarrow {}^1P_1 \gamma) = (1-6) \times 10^{-5} \left[\frac{1\text{MeV}}{\Gamma_i(\eta_c')} \right] \quad (32)$$

基本上是一致的。

5. $\eta_c' \rightarrow J/\psi \gamma$ 的宽度和分支比

$\eta_c' \rightarrow J/\psi \gamma$ 是一个禁戒的磁偶极跃迁过程,在完全非相对论近似下,衰变是不可能发生的。 它的宽度完全由前面提到的各种效应所决定。 按照(19)式给出的衰变宽度普遍公式,在只考虑推迟效应的非相对论近似下, $\eta_c' \rightarrow J/\psi \gamma$ 和 $\phi' \rightarrow \eta_c \gamma$ 两个过程的跃迁矩阵元 I 可以认为近似相等,因而可以得到

$$\frac{\Gamma(\eta_c' \rightarrow J/\psi \gamma)}{\Gamma(\phi' \rightarrow \eta_c \gamma)} \approx 3 \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^3 \quad (33)$$

其中, $k_1 = 468\text{MeV}$, $k_2 = 639\text{MeV}$ 分别为衰变 $\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma$ 和 $\phi' \rightarrow \eta_c\gamma$ 中辐射光子的动量. 由上式及 $\Gamma(\phi' \rightarrow \eta_c\gamma)$ 的实验值^[6]可以求得 $\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma$ 衰变宽度的估计值

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) = 0.8\text{keV} \quad (34)$$

用我们的模型,若只考虑推迟效应,则可以求得与(34)相近的结果,即

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) = 0.5\text{keV} \quad (35)$$

利用这个值可以求得

$$Br(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) \sim 1.1 \times 10^{-4}, \quad (36)$$

$$Br(\phi' \rightarrow \eta'_c\gamma)Br(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) \approx (0.22-1.4) \times 10^{-6} \quad (37)$$

其中用到(29)式. 这些分支比的值显然是太小了, 实验上很难测量. 但我们发现, 如果进一步考虑算符的相对论修正和反冲效应, 即把(23)式中各项的贡献全部考虑在内, 利用我们的势, 可以求得

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) \sim 5\text{keV}, \quad (38)$$

它比只考虑推迟效应要大一个量级. 那时相应的分支比将达到

$$Br(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) \sim 1.1 \times 10^{-3} \quad (39)$$

$$Br(\phi' \rightarrow \eta'_c\gamma)Br(\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma) \approx (0.22-1.4) \times 10^{-5} \quad (40)$$

从而增强了实验上观测的可能性. 应当指出, 对于磁跃迁的相对论修正, 在理论上还有一些不确定的因素, 通常给出的 $\phi' \rightarrow \eta_c\gamma$ 的宽度比实验值要大几倍^[11]. 此外, 对于禁戒型磁跃迁, 耦合道效应也应当予以考虑. 因此, 对 $\eta'_c \rightarrow J/\psi\gamma$ 的精确实验测量, 对于检验有关的理论模型将是很有意义的.

6. $\eta'_c \rightarrow 2\gamma$ 的宽度和分支比

$^1S_0 \rightarrow 2\gamma$ 的宽度计算公式为

$$\Gamma(^1S_0 \rightarrow 2\gamma) = 12\pi e_Q^4 \alpha^2 |\phi(0)|^2 / m_Q^2 \quad (41)$$

其中 e_Q 为夸克的电荷, α 为精细结构常数, m_Q 为夸克质量, $\phi(0)$ 为 1S_0 态的零点波函数 ($|\phi(0)|^2 = \frac{1}{4\pi} |R(0)|^2$). 在非相对论近似下, 1S_0 态与 3S_1 态的零点波函数是相同的, 而 $c\bar{c}$ 系统 3S_1 态的 $\phi(0)$ 可以由轻子衰变宽度的实验值定出, 相应的 $^1S_0 \rightarrow 2\gamma$ 的宽度值即可粗略地确定. 例如由(41)式可以得到

$$\Gamma(\eta_c \rightarrow 2\gamma) \sim \frac{4}{3} \Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-) = 6.3\text{keV} \quad (42)$$

与实验值

$$\Gamma(\eta_c \rightarrow 2\gamma) = \left(\begin{matrix} 6.2 & +10.4 \\ & -5.5 \end{matrix} \right) \text{keV} \quad (43)$$

是一致的. 利用同样的公式(41), 可以得到

$$\frac{\Gamma(\eta'_c \rightarrow 2\gamma)}{\Gamma(\eta_c \rightarrow 2\gamma)} = \frac{|\phi_{2s}(0)|^2}{|\phi_{1s}(0)|^2} \quad (44)$$

其中 $\phi_{2s}(0)$ 取为 $\phi'(3686)$ 的零点波函数值, $\phi_{1s}(0)$ 取为 J/ψ 的零点波函数值, 考虑到 $\eta_c \rightarrow 2\gamma$ 的实验宽度值(43)式, 则可以求得

$$\Gamma(\eta'_c \rightarrow 2\gamma) \approx 4\text{keV} \quad (45)$$

它的分支比估计为

$$Br(\eta'_c \rightarrow 2\gamma) \approx 0.9 \times 10^{-3} \quad (46)$$

而

$$Br(\psi' \rightarrow \eta'_c \gamma) Br(\eta'_c \rightarrow 2\gamma) \approx (0.18-1.2) \times 10^{-5} \quad (47)$$

(18),(31)和(39),(40)以及(46),(47)诸式的结果告诉我们, η'_c 的三个主要的电磁衰变道分支比是相近的, 都在 10^{-3} 量级。而 $\psi' \rightarrow \eta'_c \gamma$ 的衰变分支比有可能达到 10^{-2} 量级。考虑到 BEPC 在 $\psi'(3686)$ 能区可以有较高的亮度, 如能积累 10^7 个 $\psi'(3686)$ 事例, 则 η'_c 将能达到相当的数量, 使上述三个衰变道都能在实验上观测到。表 1 列出了三个级联衰变可能的事例数。由该表可见, 这些实验是有希望实现的。

表 1 10^7 个 $\psi'(3686)$ 事例对应的几种级联电磁衰变的事例数

衰 变 道	事 例 数
$\psi' \rightarrow \eta'_c \gamma$ \downarrow $\rightarrow P_1 \gamma$	$\sim 50-330$
$\psi' \rightarrow \eta'_c \gamma$ \downarrow $\rightarrow J/\psi \gamma$	$\sim 22-140$
$\psi' \rightarrow \eta'_c \gamma$ \downarrow $\rightarrow \gamma \gamma$	$\sim 18-120$

作者感谢邝宇平教授赠给我们文献[10]的复印件和有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] For a recent review see W. Kwong, J. L. Rosner and C. Quigg, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **37**(1987), 325; See also E. Eichten et al., *Phys. Rev.*, **D21**(1987), 203.
- [2] E. Eichten and F. Feinberg, *Phys. Rev.*, **D23**(1981), 2724.
- [3] M. McClary and N. Byers, *Phys. Rev.*, **D28**(1983), 1692.
- [4] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48**(1982), 70.
- [5] Y. B. Ding, J. He, S. O. Cai, D. H. Qin and K. T. Chao, in Proc. of the Int. Sym. On Particle and Nuclear Phys., Seijing, Sept. 2-7, 1985. (World Scientific, Singapore) p. 88.
- [6] Particle Data Group, M. Aguilar-Benitez et al., *Phys. Lett.*, **239B**(1990), 1.
- [7] Y. P. Kuang, in Proc. of Heavy Flavor Phys. Sym, BIMP and Peking Univ., 11-20 Aug. 1988. (World Scientific, Singapore, 1989) p. 395; Y. P. Kuang, S. F. Tuan and T. M. Yan, *Phys. Rev.*, **D37**(1988), 1210.
- [8] H. Grotch, D. A. Owen, and K. J. Sebastien, *Phys. Rev.*, **D30**(1984), 1924.
- [9] V. Zambetakis and N. Byers, *Phys. Rev.*, **D28**(1983), 2908.
- [10] F. C. Potter, in Proc. Second Morsond Workshop on New Flavours at Les Ares, France, On Jun. 24-30, 1982. (ed. J. Tran, Thanh Van and L. Montanet, Editions Frontieres, Gif-Sur-Yvette, 1982)
- [11] Y. B. Ding et al., To be published.

On the η'_c Particle and Its Electromagnetic Decays

DING YIBING^{1,3,4} QIN DANHUA^{2,3}

ZHAO GUANGDA^{2,3,4} ZHOU LEI¹

1. (Department of Physics, Graduate School, Academia Sinica, Beijing 100039)

2. (Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

3. (Theoretical Physics Institute, Academia Sinica, Beijing 100080)

4. (CCAST (World Laboratory))

ABSTRACT

The mass, width and branching ratios of the η'_c meson are estimated in the framework of a potential model. It is shown that it is possible for the width of the forbidden $M1$ transition $\eta'_c \rightarrow \gamma J/\psi$ to raise one order of magnitude after considering relativistic corrections in comparison with the non-relativistic result. The possibilities to measure the cascade electromagnetic radiation processes $\phi'(3686) \rightarrow \gamma \eta'_c \rightarrow \gamma \gamma^1 P_1, \gamma \gamma J/\psi, 3\gamma$ with BEPC are discussed.