

中性赝标介子双光子湮灭和 它们可能的混合*

张 肇 西

(中国科学院高能物理研究所)

自从新粒子 $J(3.1)$, $\psi'(3.7)$ 和 $\psi''(4.15)$ 发现以来^[1], 已有很多理论试图解释这些新粒子. 其中有好几种理论在解释这些矢量介子时都具有以下特点: 预言有新的赝标介子存在, 而且与原有赝标介子进行混合. $SU(4)$ 分类就是这类理论的代表. 一般而言, 赝标介子的双光子湮灭宽度与混合直接有关. 因此, 本文试图通过计算 $SU(4)$ 分类的几种已有的混合方案给出的各种中性赝标介子双光子湮灭宽度, 以及仅是 $SU(3)$ 分类的 η - X^0 混合给出的 η 和 X^0 的双光子湮灭宽度, 并将计算结果与已有的实验进行比较, 从而对这些赝标介子的可能的混合进行一些讨论.

本文的做法是从有 Adler 反常的 PCAC 的弱形式出发, 通过低能定理导出双光子湮灭宽度公式. 讨论 $SU(4)$ 分类时层子取带颜色的四种“夸克”. 讨论 $SU(3)$ 分类时层子取带颜色的三种“夸克”. 本文选用 Adler 反常这一计算方法出于以下三点考虑: 1) 用这一计算方法计算 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 宽度的结果与实验非常符合, 说明这一方法经过实验检验. 2) 这一方法从理论上讲是严格的. 从基本粒子结构的观点出发, 赝标介子是层子的束缚态. 因此在现在的情况下, 可以在赝标介子和光子间插入由裸层子构成的完备态集

$$\sum_n |S_n\rangle\langle S_n| = 1,$$

其中 $\sum_n$ 表示对所有可能裸层子态求和. 对于每一项 $|S_i\rangle\langle S_i|$ 都有确定的费曼图与之对应. 与 Adler 完全相同的讨论^[2], 所有费曼图中只有三角图对反常有贡献. 这样通过计算三角图补上 PCAC 的反常项的做法是严格的. 顺便指出, 还有一种可能的做法, 即插入另一套同样是完备的由物理态(包括束缚态、散射态等等)构成的态集 $\sum_n |n\rangle\langle n| = 1$. 1966 年层子模型计算 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 的宽度就是按这一精神做的^[3], 也得到与实验相符合的结果. 这说明两种不同做法是等价的. 对于这两套完备态集的问题和插入 $\sum_n |S_n\rangle\langle S_n| = 1$ 时的一些规则在文献 [4] 中有详细的讨论. 3) 在插入裸层子构成的完备集时, 最后导出 $\Gamma_{p \rightarrow 2\gamma}$ 的公式[见公式(3)]中, 只有反常项中的 S_p 依赖赝标介子的混合. 由于层子电荷是给定的, 所以 S_p 与混合的依赖关系很明确. 因此对于本文要讨论的问题而言, 用 Adler 反常的方法也比较合适.

* 1975 年 8 月 4 日收到.

在计算 $\Gamma_{p \rightarrow 2\gamma}$ 时还需要已知相应赝标介子的 PCAC 公式中的常数 f_p . 这一常数与赝标介子的 B-S 波函数零点值有直接关系. 所以我们假定同一径向激发多重态中, 质量相同的束缚态的 B-S 波函数的零点值相同(从结构观点这一假设是容易接受的). 因此在属于同一径向激发多重态中选择质量相近的粒子的有关实验, 从实验定出这粒子的 B-S 波函数零点值, 这就有了所需要的 f_p 值.

1. 计算所用的公式

由 PCAC 的 Adler 反常公式:

$$\partial_\mu A_\mu^p = f_p \varphi_p + S_p \frac{\alpha}{4\pi} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma}, \quad (1)$$

其中 f_p 与 B-S 波函数零点值 $\phi_p(0)$ 的关系为

$$f_p = 2m_p^{3/2} \phi_p(0), \quad (2)$$

由低能定理, 给出中性赝标介子 $p \rightarrow 2\gamma$ 的宽度公式:

$$\Gamma_{p \rightarrow 2\gamma} = \frac{\alpha^2}{64\pi^3} |S_p|^2 m_p^4 |\phi_p(0)|^{-2}, \quad (3)$$

其中 m_p 为相应赝标介子的质量, S_p 的定义为

$$S_p = 3 \text{ Sp } QQP. \quad (4)$$

(4) 式中的因子 3 表示三种颜色, Q 为电荷算符:

$$\text{对于 } SU(4) \quad Q = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & 2 \end{pmatrix};$$

$$\text{对于 } SU(3) \quad Q = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & & \\ & -1 & \\ & & -1 \end{pmatrix}.$$

(4) 式中的 P 是相应中性赝标介子的么旋波函数. 三种代表性的 $SU(4)$ 混合方案和 $SU(3)$ 混合方案相应的么旋波函数如下:

1) 吴济民、黄涛方案^[5]: 特点是 η , X^0 , η_c 三者混合. η , X^0 质量取实验质量. η_c 质量要求较重, 使 $J \rightarrow \eta_c + \gamma$ 的宽度小, 具体取 $m_{\eta_c} = 2.98 \text{ GeV}$:

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.5051 \\ 0.5051 \\ -0.7018 \\ 0.0349 \end{pmatrix}, \quad X^0 = \begin{pmatrix} 0.4774 \\ 0.4774 \\ 0.6966 \\ 0.2427 \end{pmatrix}, \quad \eta_c = \begin{pmatrix} -0.1376 \\ -0.1376 \\ -0.1491 \\ 0.9695 \end{pmatrix}.$$

2) M. K. Gaillard *et al.* 方案 I^[6]: 特点是 η , X^0 , η_c 三者混合, 要求 η_c 只有 $c\bar{c}$, 允许 η , X^0 与实验质量有较大偏离 ($m_\eta = 505 \text{ MeV}$, $m_{X^0} = 969 \text{ MeV}$, $m_{\eta_c} = 3122 \text{ MeV}$):

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.565 \\ 0.565 \\ -0.60 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad X^0 = \begin{pmatrix} 0.424 \\ 0.424 \\ 0.8 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \eta_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

3) M. K. Gaillard *et al.* 方案 II^[6]: 特点是 η , $E(1420)$, η_c 三者混合, η_c 只有 $c\bar{c}$, 但

η , E 与实验质量差别不太大 ($m_\eta = 551$ MeV, $m_E = 1398$ MeV, $m_{\eta_c} = 3066$ MeV):

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.468 \\ 0.468 \\ -0.747 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad E = \begin{pmatrix} 0.528 \\ 0.528 \\ 0.662 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \eta_c = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

4) $SU(3)$ 质量平方关系给出混合角 $\theta = 10^\circ$ 的 η - X^0 混合:

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.502 \\ 0.502 \\ -0.704 \end{pmatrix}, \quad X^0 = \begin{pmatrix} 0.498 \\ 0.498 \\ 0.710 \end{pmatrix}.$$

关于 $\phi_p(0)$ 的假设的具体应用是令 $\phi_k(0) = \phi_\eta(0)$, $\phi_\phi(0) = \phi_{X^0, E}(0)$ 和 $\phi_J(0) = \phi_{\eta_c}(0)$. $\phi_k(0)$ 由 $\Gamma_{k \rightarrow \mu\nu}$ 定出, 其中 Cabibbo 角取 $\theta_c = 0.24$ 与重子一致起来. $\phi_\phi(0)$ 和 $\phi_J(0)$ 分别由 $\phi \rightarrow e^+e^-$ 和 $J \rightarrow e^+e^-$ 实验定出来.

2. 计算结果¹⁾

混 合	$\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma}$	$\Gamma_{X^0, E \rightarrow 2\gamma}$	$\Gamma_{\eta_c \rightarrow 2\gamma}$
1)	0.376 keV	3.08 keV	18.8 keV
2)	0.354 keV	1.68 keV	39.1 keV
3)	0.257 keV	9.28 keV	36.4 keV
4)	0.320 keV	1.91 keV	—

应指出上表中 2) 和 3) 在计算时 m_η 和 $m_{X^0, E}$ 都取给出混合的值. 如果取实验值, 对于方案 2): $\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma} = 0.495$ keV, $\Gamma_{X^0 \rightarrow 2\gamma} = 1.60$ keV; 对于方案 3): $\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma} = 0.253$ keV, $\Gamma_{E \rightarrow 2\gamma} = 9.88$ keV.

3. 讨论

实验给出 $\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma} = 0.324 \pm 0.046$ keV^[7]. 可见 4) 与实验符合非常好. 如上指出方案 2) 的 m_η 值与实验值差很多, 在计算宽度时, 如用实验 m_η 值, 则 $\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma}$ 就与实验有明显的偏离. 方案 3) 与实验偏离也很明显. 方案 1) 相比之下与实验偏离较小, 由于这一方案与 $SU(3)$ 混合最接近, 它偏离较小可以理解. 因此可得结论是, 如果本文所做的假定正确, 从目前实验给出的 $\Gamma_{\eta \rightarrow 2\gamma}$ 值来看, 赝标介子只需要 $SU(3)$ 的混合, 不允许再有多少改动. 联系到新粒子质量与原有粒子质量差得很大的事实, 以及在解释 J, ϕ' 的辐射衰变不大时所迁到的困难^[8], 可以设想很可能 e^+e^- 对撞实验所发现的新粒子是完全新的一族粒子, 而不是像 $SU(4)$ 分类那样和原有的粒子紧密地联系在一起.

本文的结果对赝标介子 $SU(3)$ 质量平方关系是一支持, 对 $SU(3)$ 质量线性关系是一否定.

最后指出 $\Gamma_{X^0 \rightarrow 2\gamma}$ 的实验和 η_c 是否存在的实验对本文的结论和计算中用的假设是重要的检验. 不过应注意由于 ϕ 介子和 X^0 介子; J 粒子和 η_c 介子自旋不同, $\phi_\phi(0) = \phi_{X^0}(0)$

1) 表中结果是所用的 $\phi(0)$ 都是在层子没有反常磁矩的情况下定出的. 根据层子模型的观点认为, 除了有这种情况, 还可能层子有反常磁矩的情况. 那么根据层子模型在有反常磁矩时反常磁矩的取值 $1.79/2m_N$, 对于表中 $\Gamma_{X^0, E \rightarrow 2\gamma}$ 和 $\Gamma_{\eta_c \rightarrow 2\gamma}$ 的结果分别应再乘 3.9 倍和 14 倍.

和 $\phi_1(0) = \phi_{\eta_c}(0)$ 的假设不如 $\phi_K(0) = \phi_\eta(0)$ 的假设好。另外由于 X^0 , η_c 的质量比 η 大得多, 应用低能定理时也不如 η 介子时好。

参 考 文 献

- [1] J. J. Aubert *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 1404;
J. E. Augustin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 1406;
C. Bacci *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 1408;
G. S. Abrams *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33** (1974), 1453;
J. E. Augustin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **34** (1975), 764.
- [2] S. Adler, *Phys. Rev.*, **177** (1969), 2426;
J. S. Bell and R. Jackiw, *Nuovo Cim.*, **60A** (1969), 47;
S. Adler, *Lectures on Elementary Particles and Quantum Field Theory* (1970), Brandeis University Summer Institute in Theoretical Physics, Vol. 1.
- [3] 中国科学院原子能所基本粒子理论组, 原子能, **3** (1966), 137; 1966年北京暑期物理讨论会上北京基本粒子理论组的论文。
- [4] 何祚麻、张肇西、黄涛, 关于复合场论微扰展开式, 待发表。
- [5] 吴济民、黄涛, 科学通报, **20** (1975), 184.
- [6] M. K. Gaillard, B. W. Lee and J. L. Rosner, Preprint FERMILAB-Pub-75/14-THY (1975).
- [7] A. Browman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32** (1974), 1067.
- [8] 东方晓、杜东生、吴济民, 物理学报, **24** (1975), 461.

TWO PHOTON ANNIHILATION OF NEUTRAL PSEUDOSCALAR MESONS AND THEIR POSSIBLE MIXTURE

ZHANG ZHAO-XI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)