

# $\rho^0, \omega$ 介子正负电子对衰变中的 $\rho^0$ - $\omega$ 混合效应

刘良钢

(中山大学物理系, 广州, 510275)

## 摘 要

本文提出了  $\rho^0$ - $\omega$  介子混合的一个可能形式, 由  $(\rho^0, \omega) \rightarrow \pi^+\pi^-$  衰变定出其耦合常数, 并计算了它对  $\rho^0, \omega$  介子正负电子对衰变率的影响, 结果表明其混合效应对  $\rho^0 \rightarrow e^+e^-$  增加 9.4%, 而对  $\omega \rightarrow e^+e^-$  则减少 2.6%.

## 一、引 言

NN 相互作用中的电荷对称破缺(CSB)是传统核物理中的一个老问题<sup>[1]</sup>. NN 相互作用电荷对称, 对镜像核或 NN 散射而言, 意味着如将质子(中子)换成中子(质子), 并经扣除其库仑相互作用后, 其镜像核质量或 NN 散射长度应完全相等, 但实际情况并非如此. Nolen 和 Schiffer<sup>[2]</sup>发现两镜像核的质量差, 当扣除库仑相互作用和自旋轨道相互作用后, 仍有几百个 keV, 而且普遍存在于镜像核中, 如对<sup>3</sup>He-<sup>3</sup>H 系统是 80keV 左右, 这就是所谓的 Nolen-Schiffer 反常. 随后精确的计算也表明这个反常并不是由于我们对核结构知识的认识不够所致<sup>[3]</sup>, 而是表明了 NN 相互作用中 CSB 的存在. 在 NN 的低能 S 态散射中也存在类似的问题, 如实验发现 pp 的散射长度  $a_{pp}^N$  (库仑作用已扣除) 与 nn 的散射长度  $a_{nn}^N$  之差  $\Delta a$  是在 1.5fm 左右, 这同样也是 CSB 存在的证据; 在文献[4]中还收录了许多其它 CSB 的事例.

最近的 pn 散射实验证实了第四类 NN 的 CSB 力的存在<sup>[5]</sup>, 于是大家又重新开始了对这个问题的研究<sup>[4,6]</sup>. CSB 可由许多因素造成, 如 u 与 d 夸克, p 与 n 和  $\pi^+$  与  $\pi^0$  的质量差, OPEP, TPEP,  $\pi$ NN 耦合常数的辐射修正,  $\rho^0$ - $\omega$ ,  $\pi$ - $\eta$  ( $\eta'$ ),  $\gamma$ - $\pi^0$  混合等, 其中最为主要的一个因素是  $\rho^0$ - $\omega$  混合, 它在解释镜像核 A 从 11 到 41 的质量差和  $\Delta a$  时占有主要贡献[6]. 从  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  实验中, 也找到  $\rho^0$ - $\omega$  混合的直接证据<sup>[7]</sup>. (实际上,  $\rho^0$ - $\omega$  混合本身也是一个 CSB 的证据, 因为如果是完全电荷对称的话, 则  $\rho^0$  是同位旋  $I=1$  的第三分量, 而  $\omega$  则是  $I=0$  的一个单态, 不可能有混合; CSB 意味着物理的  $\rho^0, \omega$  介子将分别是裸  $\rho^0, \omega$  介子的混合态).  $\rho^0$ - $\omega$  混合的存在将提供第三和第四类 NN 作用 CSB 力, 所以它不论是对 pn

相互作用还是 pp 或 nn 相互作用都有不同的贡献, 并且它已受到了肯定的评价<sup>[4,6]</sup>.

$\rho^0-\omega$  混合的强弱在很大程度上取决于它的耦合形式, 一般都假设它为  $\langle \rho^0 | H | \omega \rangle = \rho^{0\mu} \omega_\mu$ , 其中  $\rho^{0\mu}, \omega_\mu$  分别是  $\rho^0, \omega$  场算符, 耦合常数  $\langle \rho^0 | H | \omega \rangle$  是有量纲的而且在不同的文献中有很大的出入, 在文献[6]中它是  $3850\text{MeV}^2$ , 文献[8]中是  $3400\text{MeV}^2$ , 而在文献[9]中却是  $-6000\text{MeV}^2$ ; 可以看出耦合形式和其耦合常数的大小是一个关键且仍有争议的问题. 在下一节里我们将提出一个不同于前者的耦合形式, 并在第三节里讨论它对  $\rho^0, \omega$  正负电子对衰变率的影响, 在最后一节里将对其结果和今后可能的工作作些讨论.

## 二、 $\rho^0-\omega$ 混合

类比于矢量为模型(VDM)<sup>[10]</sup>, 假设  $\rho^0-\omega$  的耦合为如下形式:

$$\mathcal{L}_{\rho^0\omega} = -\frac{1}{2} g_{\rho^0\omega} G^{(\omega)\mu\nu} G_{\mu\nu}^{(\rho^0)}, \quad (1)$$

式中  $G^{(\rho^0, \omega)\mu\nu}$  分别是  $\rho^0, \omega$  介子的场张量算符,  $G^{(\rho^0)\mu\nu} = \mathcal{J}^{\rho^{0\nu}} - \mathcal{J}^{\rho^{0\mu}}, G^{(\omega)\mu\nu} = \mathcal{J}^{\omega^\nu} - \mathcal{J}^{\omega^\mu}$ . 它所对应的 Feynman 规则如图 1 所示.  $g_{\rho^0\omega}$  是无量纲的耦合常数, 它将由  $(\rho^0, \omega) \rightarrow \pi^+ \pi^-$  定出, 他们的衰变图由图 2 所示, 计算表明,  $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  的衰变率为  $\Gamma_{\rho^0 \rightarrow 2\pi}$ ,

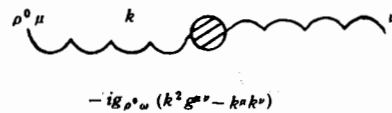


图 1

$$\Gamma_{\rho^0 \rightarrow 2\pi} = \alpha_{\rho^0 \pi^+ \pi^-} \frac{m_\rho}{12} \left(1 - \frac{4m_\pi^2}{m_\rho^2}\right)^{3/2}, \quad (2)$$

其中  $\alpha_{\rho^0 \pi^+ \pi^-} \equiv \frac{g_{\rho\pi\pi}^2}{4\pi}$ ,  $g_{\rho\pi\pi}$  为  $\rho\pi\pi$  相互作用耦合常数,

$$\mathcal{L}_{\rho\pi\pi} = -g_{\rho\pi\pi} \pi \times \partial_\mu \pi \rho^{0\mu}, \quad (3)$$

$\Gamma_{\rho^0 \rightarrow 2\pi}$  的实验值是  $153\text{MeV}^{[11]}$ , 取  $m_\rho = 770\text{MeV}, m_\pi = 140\text{MeV}$ , 代入(2)式可定出  $g_{\rho\pi\pi} = 6.09$ .

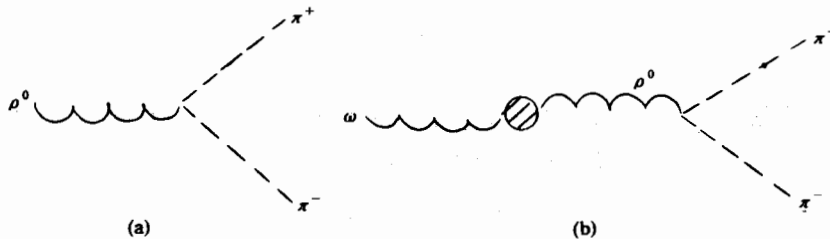


图 2

$\omega \rightarrow \pi^+ \pi^-$  衰变只能通过图 2(b) 所示的模式进行, 按照图 1 和图 2(a), 可以算出它的衰变率  $\Gamma_{\omega \rightarrow 2\pi}$  为:

$$\Gamma_{\omega \rightarrow 2\pi} = \left| \frac{g_{\rho^0\omega} m_\omega^2}{m_\omega^2 - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_{\rho^0}} \right|^2 \Gamma_{\rho^0 \rightarrow 2\pi}(m_\rho \rightarrow m_\omega), \quad (4)$$

式中  $\Gamma_\rho^*$  是  $\rho^0$  的总衰变率(这里我们已将  $\rho^0$  看成是一个有自然宽度的粒子),它约等于  $\Gamma_{\rho^0 \rightarrow 2\pi}^{[11]}$ ,  $\Gamma_{\omega \rightarrow 2\pi}$  的实验值是  $0.017 \times \Gamma_\omega^* (=8.45 \text{ MeV}) = 0.144 \text{ MeV}$ ,  $\Gamma_\omega^*$  是  $\omega$  的总衰变率. 取  $m_\omega = 783 \text{ MeV}$ , 并将其它数值代入上式可定出  $g_{\rho^0 \omega} = 5.90 \times 10^{-3}$ , 或者说  $g_{\rho^0 \omega} m_\omega^2 = 3618 \text{ MeV}^2$ , 这个值在文献[6]与[8]之间. 由  $g_{\rho^0 \omega}$  可以看出,  $\rho^0$ - $\omega$  混合是很弱的.

### 三、 $\rho^0$ - $\omega$ 混合对 $\rho^0, \omega$ 轻子对衰变率的影响

上面我们已经定出了  $\rho^0$ - $\omega$  耦合常数  $g_{\rho^0 \omega}$ , 下面将来考查它对其轻子对衰变率的影响. 实验已测出<sup>[11]</sup>:

$$\Gamma_{\rho^0 \rightarrow e^+e^-} = 6.77 \times 10^{-3} \text{ MeV}, \quad (5a)$$

$$\Gamma_{\omega \rightarrow e^+e^-} = 0.5957 \times 10^{-3} \text{ MeV}, \quad (5b)$$

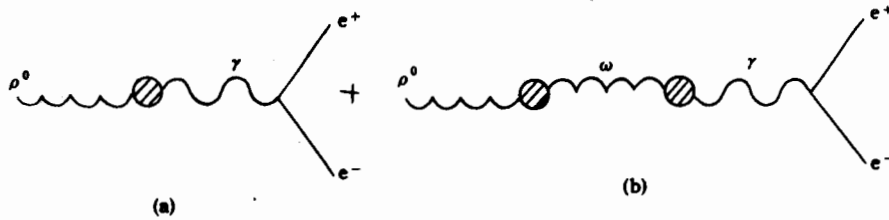


图3

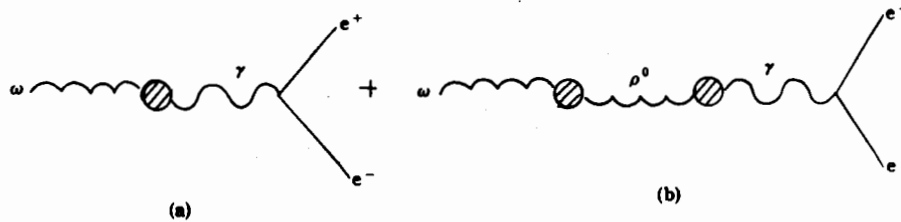


图4

它们主要是分别通过图(3,4)来实现的,也就是矢量为主机制来实现(图(3,4)的a图). 借助于VDM,电磁场与  $\rho^0$  或  $\omega$  介子的耦合为  $\mathcal{L}_{\gamma,V}^{[10]}$ :

$$\mathcal{L}_{\gamma,V} = -\frac{1}{2} \frac{e}{g_V} F_{\mu\nu} G^{(V)\mu\nu}, \quad (6)$$

这里“V”可以分别是  $\rho^0$  和  $\omega$ ,  $F_{\mu\nu}$  是电磁场张量算符率,  $g_V$  为一个新的耦合常数,我们可以通过图(3,4)的a图来近似估计其大小. 其对应的衰变率  $\Gamma_{V \rightarrow e^+e^-}$  为:

$$\Gamma_{V \rightarrow e^+e^-} = \frac{1}{3} \frac{\alpha^2}{\alpha_V} \frac{1}{m_V^2} (m_V^2 - 4m_e^2)^{\frac{1}{2}} (m_V^2 - 2m_e^2), \quad (7)$$

式中  $\alpha$  是电磁场精细结构常数,  $\alpha_V^2 = \frac{g_V^2}{4\pi}$ . (7)式对  $V \rightarrow \mu^+ \mu^-$  也同样成立. 用(5a, b)式的实验值可定出  $g_{\rho^0} = 5.04$ ,  $g_\omega = 17.12$ .

当考虑图(3,4)中的 b 图的  $\rho^0-\omega$  混合效应时,

$$M_{\rho^0 \rightarrow e^+e^-}^{(a+b)} = M_{\rho^0 \rightarrow e^+e^-}^{(a)} \left( 1 + \frac{g_{\rho^0} g_{\rho^0 \omega} m_\omega^2}{g_\omega g_{\rho^0 \omega} m_\omega^2} \frac{m_\rho^2}{m_\omega^2 - m_\rho^2 + im_\omega \Gamma_\omega} \right), \quad (8a)$$

$$M_{\omega \rightarrow e^+e^-}^{(a+b)} = M_{\omega \rightarrow e^+e^-}^{(a)} \left( 1 - \frac{g_\omega}{g_{\rho^0} g_{\rho^0 \omega} m_\omega^2} \frac{1}{m_\omega^2 - m_\rho^2 + im_\rho \Gamma_\rho} \right), \quad (8b)$$

上式中  $M_{\rho^0(\omega) \rightarrow e^+e^-}^{(a+b)}$  是分别对应于图 3(图 4)的不变跃迁振幅,  $M_{\rho^0(\omega) \rightarrow e^+e^-}^{(a)}$  则只是对应于图 3(图 4)中 a 部分的不变跃迁振幅. 用前面的数据代入到上式, 可算出:

$$|M_{\rho^0 \rightarrow e^+e^-}^{(a+b)}|^2 = 1.094 |M_{\rho^0 \rightarrow e^+e^-}^{(a)}|^2, \quad (9a)$$

$$|M_{\omega \rightarrow e^+e^-}^{(a+b)}|^2 = 0.974 |M_{\omega \rightarrow e^+e^-}^{(a)}|^2, \quad (9b)$$

由此可以看出,  $\rho^0-\omega$  混合对  $\rho^0 \rightarrow e^+e^-$  过程增加 9.4%, 而对  $\omega \rightarrow e^+e^-$  过程则减少 2.6%, 总的混合效应还是很小的.

#### 四、总结和讨论

类比于 VDM, 我们提出了一个  $\rho^0-\omega$  混合的可能形式, 并通过  $(\rho^0, \omega) \rightarrow \pi^+\pi^-$  过程来定出其耦合常数, 结果发现  $g_{\rho^0 \omega} m_\omega^2$  与其它模型所定出的数值在同一个数值范围, 但我们的模型基础是 VDM, 因而耦合常数是无量纲的. 我们的最终目的是用这个混合形式, 用通常的方法找出对应的第三、四类 CSB 力, 去计算镜像核质量差及  $\Delta a$ , 这将是我们的下一步的工作.

在第三节里, 我们用  $\rho^0-\omega$  混合研究了它对  $(\rho^0, \omega) \rightarrow e^+e^-$  衰变率的影响, 经近似的数值计算后, 发现其效应很小, 也就是对  $\rho^0 \rightarrow e^+e^-$  过程增加 9.4%, 而对  $\omega \rightarrow e^+e^-$  则减少 2.6%, 这一结论并不完全局限于我们模型, 用  $\langle \rho^0 | H | \omega \rangle \rho^0 \omega_\mu$  耦合形式也可以得到类似的结果, 所以用衰变问题并不能完全将两种模型区别开. 另一个强有力的检验  $\rho^0-\omega$  混合效应的途径是计算  $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-$  散射过程的微分截面, 它将比计算衰变过程得到更多有关耦合形式的信息.

本文的部分工作是作者在北京高能物理研究所做博士后期间完成的, 作者非常感谢同李清润老师就有关 CSB 问题的讨论.

#### 参 考 文 献

- [1] E. M. Henley, G. A. Brown, in *Meson in Nuclei*, eds. M. Rho and D. H. Wilkinson (North-Holland, Amsterdam, 1979)p. 407
- [2] J. A. Nolen Jr. and J. P. Schiffer, *Annu. Rev. Nucl. Sci.*, **19**(1969), 414.
- [3] J. W. Negele, *Nucl. Phys.*, **A165**(1971), 305.  
H. Sato, *Nucl. Phys.*, **A296**(1976), 378.
- [4] G. A. Miller, B. M. K. Nefkens, I. Slaus, *Phys. Rep.*, **194**(1990), 1.
- [5] R. Abegg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 2571.  
A. G. Williams, A. W. Thomas, G. A. Miller, *Phys. Rev.*, **C36**(1987), 1956.
- [6] P. G. Blunden, M. J. Iqbal, *Phys. Lett.*, **B198**(1987), 14.
- [7] A. Quenzer et al., *Phys. Lett.*, **B76**(1978), 512.  
L. M. Barkov et al., *Nucl. Phys.*, **B256**(1985), 365.

- [8] P. C. McNamee, M. D. Scadron, S. A. Coon, *Nucl. Phys.*, **A249**(1075),483.  
[9] J. L. Friar, B. F. Gibson, *Phys. Rev.*, **C17**(1978),1752.  
[10] N. Kroll, T. D. Lee, B. Zumino, *Phys. Rev.*, **157**(1967),1376.  
J. J. Sakurai, *Current and Mesons* (Univ. of Chicago Press, Chicago, 1969)  
[11] Review of Particle Properties, *Phys. Lett.*, **B204**(1988)

## $\rho^0$ - $\omega$ Mixing Effect in the $(\rho^0, \omega) \rightarrow e^+e^-$ Pair Decay

LIU LIANGGANG

(Physics Department, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

### ABSTRACT

A possible form of  $\rho^0$ - $\omega$  mixing is proposed. The mixing coupling constant is determined by  $(\rho^0, \omega) \rightarrow \pi^+\pi^-$  decay rates. The  $(\rho^0, \omega)$  positron-electron pair decay rates are calculated and it is found that the mixing effect contributes 9.4% enhancement to  $\rho^0 \rightarrow e^+e^-$  and 2.6% reduction to  $\omega \rightarrow e^+e^-$  decay processes.