

文章编号: 1007-4627(2009)03-0188-06

矢量介子的辐射衰变*

徐丽丽^{1, 2}, 陈建兴^{1, #}, 张婷婷¹, 邹爱玲¹

(1 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029;

2 苏州高博软件技术职业学院, 江苏 苏州 215163)

摘要: 介子的辐射衰变是低能强子物理研究的重要方向, 通过它能够揭示介子的结构和性质。从有效场论的观点来看, 介子衰变主要包含光子和强子之间的相互作用。使用 $SU(3)$ 对称性和 VMD 模型分别对矢量介子的辐射衰变进行了研究。通过对实验数据进行拟和, 给出了在两种情形下 $V \rightarrow P\gamma$ 的衰变宽度的理论值, 并得到赝标量混合角 θ_P 为 -6° 。

关键词: 矢量介子; 辐射衰变; 矢量介子主导模型

中图分类号: O572.25

文献标识码: A

1 引言

量子色动力学(QCD)是强相互作用的基本理论, 它在解释和预言高能区现象时取得了非常大的成功。然而, 在低能区由于微扰论失效, 研究强子的物理性质必须借助各种有效理论。光子和强子之间的相互作用^[1]是强子物理的一个重要组成部分。矢量介子主导(VMD)模型是描述光子和强子相互作用的一种简单而有效的理论。

该模型最初在 1960 年由 Sakurai^[2]提出。在此模型中, 强子的电磁相互作用通过光子和矢量介子的混合而引入。之后, Kroll, Lee 和 Zumino 继承了 Sakurai 的思想, 并且在场论基础之上重新给出了 VMD 模型^[3, 4]。

描述 VMD 模型的拉格朗日量为

$$L_{\text{VMD1}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}\rho_{\mu\nu}\rho^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho_\mu\rho^\mu - g_\rho\pi\pi\rho_\mu J^\mu - eA_\mu J^\mu - \frac{e}{2g_\rho}F_{\mu\nu}\rho^{\mu\nu}, \quad (1)$$

这个表达式通常被称为 VMD1^[3, 4]。Sakurai 还给出了 VMD 的另外一个表达式^[4]:

$$L_{\text{VMD2}} = -\frac{1}{4}(F'_{\mu\nu})^2 - \frac{1}{4}(\rho'_{\mu\nu})^2 +$$

$$\frac{1}{2}m_\rho^2(\rho'_\mu)^2 - g_{\rho\pi\pi}\rho'_\mu J^\mu - \frac{e'm_e}{g_\rho}\rho'_\mu A'^\mu + \frac{1}{2}\left(\frac{e'}{g_\rho}\right)^2 m_\rho^2 (A'_\mu)^2, \quad (2)$$

其中

$$\rho'_\mu = \rho_\mu + \frac{e}{g_\rho}A_\mu,$$

$$A'_\mu = A_\mu \sqrt{1 - \left(\frac{e}{g_\rho}\right)^2}, \quad e' = e \sqrt{1 - \left(\frac{e}{g_\rho}\right)^2}.$$

这个表达式不如第一个表达式优雅(例如, 拉氏量含有一个质量项)。但它也是描述 VMD 模型较为流行的一个表达式。在本文的计算中将采用第一个表达式。

2 矢量介子的辐射衰变

轻介子包括标量介子, 矢量介子和赝标量介子。30 多年来, 它们的辐射衰变一直都是低能强子物理中的一个重要课题。当夸克模型和 $SU(3)$ 对称性建立起来, 并当人们尝试去理解它们的对称性破缺机制时, 对轻介子辐射衰变的研究就显得尤为重要了。本文将研究矢量介子(V)向赝标量介子(P)的辐射衰变过程。

在夸克模型框架下, 赝标量介子和矢量介子是

* 收稿日期: 2008-10-20; 修改日期: 2008-11-24

* 基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目(2008T097)

作者简介: 徐丽丽(1981-), 女(满族), 辽宁桓仁人, 曾从事粒子物理与核物理研究工作, 现从事教学科研工作;

E-mail: freshxulili@yahoo.com.cn

通讯联系人: 陈建兴, E-mail: theory01@163.com

简单的夸克-反夸克 s 波束缚态。SU(3)对称性的破缺导致单态和八重态之间的混合，对赝标量介子其混合形式是：

$$\begin{aligned} \eta &= \cos\theta_p \eta_8 - \sin\theta_p \eta_1, \\ \eta' &= \sin\theta_p \eta_8 + \cos\theta_p \eta_1; \end{aligned} \quad (3)$$

对于矢量介子其混合形式为

$$\begin{aligned} \omega &= \sin\theta_V \omega_8 + \cos\theta_V \omega_1, \\ \phi &= \cos\theta_V \omega_8 - \sin\theta_V \omega_1. \end{aligned} \quad (4)$$

这里将使用 SU(3)对称性及 VMD 模型分别描述 $V \rightarrow P\gamma$ 过程。

2.1 SU(3)对称性下矢量介子的辐射衰变

(1) 衰变振幅和有效拉格朗日量

辐射衰变 $V \rightarrow P\gamma$ 的衰变振幅可以写成：

$$M = g_{VP\gamma} k_1^\mu k_2^\nu \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}^{\nu} \epsilon_{\alpha\beta\gamma}^{\sigma} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}, \quad (5)$$

其中， k_1, k_2 是光子和矢量介子的动量， $g_{VP\gamma}$ 是矢量介子、赝标量介子和光子的耦合常数。由于末态含有光子，要求此振幅必须是规范不变的。这里的四维 Levi-Civita 张量使规范不变性自动满足。其衰变宽度为

$$\Gamma(V \rightarrow P\gamma) = \frac{\alpha}{24m_V} g_{VP\gamma}^2 \left(1 - \frac{m_P^2}{m_V^2}\right)^3, \quad (6)$$

其中 α 为精细耦合常数， m_V 和 m_P 分别为矢量介子和赝标量介子的质量。

赝标量介子和矢量介子的 SU(3)九重态定义如下：

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_1}{\sqrt{3}} & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{\pi^0}{\sqrt{2}} + \frac{\eta_8}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_1}{\sqrt{3}} & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\frac{2\eta_8}{\sqrt{6}} + \frac{\eta_1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$V = \begin{pmatrix} \frac{\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\omega_8}{\sqrt{6}} + \frac{\omega_1}{\sqrt{3}} & \rho^+ & K^{*+} \\ \rho^- & -\frac{\rho^0}{\sqrt{2}} + \frac{\omega_8}{\sqrt{6}} + \frac{\omega_1}{\sqrt{3}} & K^{*0} \\ K^{*-} & \bar{K}^{*0} & -\frac{2\omega_8}{\sqrt{6}} + \frac{\omega_1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

在这里，SU(3)八重态和 SU(3)单态统一写进一个矩阵。

假定光子只含有味八重态成分，即光子场在 SU(3)变换下按照电磁流的变换方式变换，则衰变过程的有效拉氏量可以写成：

$$L_{\text{eff}} = g \text{Tr} [P \{ \partial_\mu V_\nu, \partial_\rho V_\sigma \}] \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}. \quad (9)$$

(2) 耦合常数 $g_{VP\gamma}$

对于不同的衰变过程，其强度由耦合常数 $g_{VP\gamma}$ 描述。耦合常数实际上是衰变动量的函数，由于我们讨论轻介子的衰变，所以可以近似认为耦合常数是与衰变动量无关的常数。在假设 SU(3)对称性成立时，这些耦合常数并不是独立的，它们可以由少数几个参数表示出来。具体地说，耦合常数 $g_{VP\gamma}$ 可以用一个参数 g 表示出来。但是，如果耦合中含有 η_1 或 ω_1 介子， g 应该换成 g_1 或 g_2 ，因为 η_1 和 ω_1 介子属于单态，而 η_8 和 ω_8 属于八重态，单态与八重态的耦合方式是不一样的。

把公式(7)式和(8)式代入公式(9)，可以得到耦合常数 $g_{VP\gamma}$ 的表达式如下：

$$\begin{aligned} g_{\rho\pi\gamma} &= \frac{g}{3}, \quad g_{\rho^0\pi^0\gamma} = \frac{g}{3}, \\ g_{\rho^0\eta_1\gamma} &= \sqrt{\frac{2}{3}} g_1, \quad g_{\rho^0\eta_8\gamma} = \frac{g}{\sqrt{3}}, \\ g_{\omega_1\pi^0\gamma} &= \sqrt{\frac{2}{3}} g_2, \quad g_{\omega_1\eta_8\gamma} = \frac{\sqrt{2}g_2}{3}, \\ g_{\omega_8\pi^0\gamma} &= \frac{g}{\sqrt{3}}, \quad g_{\omega_8\eta_1\gamma} = \frac{\sqrt{2}g_1}{3}, \\ g_{\omega_8\eta_8\gamma} &= -\frac{g}{3}, \quad g_{K^*K\gamma} = \frac{g}{3}, \\ g_{(K^*)^0K^0\gamma} &= -\frac{2g}{3}. \end{aligned} \quad (10)$$

在式(5)中， $\rho \rightarrow \pi\gamma$ 指的是 $\rho^\pm \rightarrow \pi^\pm \gamma$ ， $K^* \rightarrow K\gamma$ 是 $K^{*\pm} \rightarrow K^\pm \gamma$ 。

考虑到(3)式及(4)式的混合之后， $g_{VP\gamma}$ 可以等价地写为

$$\begin{aligned} g_{\rho\pi\gamma} &= \frac{g}{3}, \quad g_{\rho^0\pi^0\gamma} = \frac{g}{3}, \\ g_{\rho^0\eta_1\gamma} &= \frac{g \cos\theta_p}{\sqrt{3}} - \sqrt{\frac{2}{3}} g_1 \sin\theta_p, \\ g_{\phi\pi^0\gamma} &= \frac{g \cos\theta_V}{\sqrt{3}} - \sqrt{\frac{2}{3}} g_2 \sin\theta_V, \\ g_{\phi\eta_1\gamma} &= -\frac{1}{3} g \cos\theta_p \cos\theta_V - \\ &\quad \frac{\sqrt{2}}{3} g_1 \sin\theta_p \cos\theta_V - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\sqrt{2}}{3} g_2 \cos\theta_P \sin\theta_V, & & \frac{1}{3} g \sin\theta_V \sin\theta_P + \\
 g_{\omega\pi^0\gamma} = & \sqrt{\frac{2}{3}} g_2 \cos\theta_V + \frac{g \sin\theta_V}{\sqrt{3}}, & & \frac{\sqrt{2}}{3} g_1 \cos\theta_P \sin\theta_V. \tag{11}
 \end{aligned}$$

(3) 拟合结果及讨论

通过理论与实验的拟合，确定模型中的参数。这里有两组参数，它们分别是耦合常数 g ， g_1 ， g_2 和混合角 θ_V ， θ_P 。考虑到 θ_V 的取值比较确定，取 $\theta_V = 41.9^\circ$ ，它们可由介子衰变为正负电子对的实验确定下来。其它 4 个参数作为自由参数。

拟合标准为

$$\chi = \sum_i \frac{|A_{\text{Theo}_i} - A_{\text{Exp}_i}|}{A_{\text{Exp}_i}}$$

最小或

$$\chi^2 = \sum_i \left[\frac{A_{\text{Theo}_i} - A_{\text{Exp}_i}}{E_{\text{Exp}_i}} \right]^2$$

最小，其中， A_{Theo_i} 为理论值， A_{Exp_i} 为实验值， E_{Exp_i} 为实验误差。由于我们的模型并不很精致，而实验值的精度较高，可以预期 χ^2 不会很小，相比之下 χ 的值更好些。使用 χ 拟合方案，拟合结果见表 1。

表 1 $V \rightarrow P\gamma$ 衰变宽度的理论值、实验值、 χ^2 以及 χ

过程	$\Gamma_{\text{Theo.}} / \text{MeV}$	$\Gamma_{\text{Exp.}} / \text{MeV}^{[5]}$	χ^2	χ
$\rho^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.096331	$0.10302_{-0.023755}^{0.023755}$	0.0674447	0.0649253
$\rho \rightarrow \pi \gamma$	0.095694	$0.068175_{-0.007575}^{0.007575}$	13.1982	0.403659
$\rho^0 \rightarrow \eta \gamma$	0.06246	$0.03636_{-0.013635}^{0.01212}$	4.63899	0.717944
$\eta' \rightarrow \rho^0 \gamma$	0.08193	$0.08456_{-0.00364}^{0.00364}$	0.521935	0.0310989
$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.79932	$0.71655_{-0.04215}^{0.04215}$	3.85645	0.115517
$\omega \rightarrow \eta \gamma$	0.0039312	$0.0054795_{-0.000843}^{0.000843}$	3.37341	0.282567
$\eta' \rightarrow \omega \gamma$	0.010273	$0.008428_{-0.00084}^{0.00084}$	4.82334	0.218891
$\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.005551	$0.0058033_{-0.0005759}^{0.0005759}$	0.191625	0.0434408
$\phi \rightarrow \eta \gamma$	0.058076	$0.055818_{-0.002658}^{0.002658}$	0.721589	0.0404507
$\phi \rightarrow \eta' \gamma$	0.00064257	$0.0005316_{-0.0002215}^{0.0003101}$	0.25097	0.208737
$K^* \rightarrow K \gamma$	0.030403	$0.049302_{-0.004482}^{0.004482}$	17.7795	0.383325
$(K^*)^0 \rightarrow K^0 \gamma$	0.12002	$0.11615_{-0.0101}^{0.0101}$	0.146603	0.0332946

我们得到 $\chi_{\text{total}} / \text{d. o. f.} = 0.318$ ， $\chi^2_{\text{total}} / \text{d. o. f.} = 6.201$ (其中 χ_{total} 为每个过程的 χ 之和；d. o. f 是拟合自由度，它是参与拟合的过程个数与自由参数之差)，参数取如下值：

$$g = 1.551 \text{ GeV}, g_1 = 3.05 \text{ GeV},$$

$$g_2 = 1.484 \text{ GeV}, \theta_P = -6^\circ. \tag{12}$$

从表 1 能够看出，对大多数过程，理论预言误差不超过 30 %。上述辐射衰变过程可以分为两组：

(a) 不含混合角的过程。即衰变过程 $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$ ， $\rho \rightarrow \pi \gamma$ ， $K^* \rightarrow K \gamma$ ， $(K^*)^0 \rightarrow K^0 \gamma$ 。

这样的过程可以很好地检验介子的 $SU(3)$ 对称性。众所周知, $SU(3)$ 对称性是一种近似对称性, 但同位旋对称性要比 $SU(3)$ 对称性精确得多。在同位旋对称性下, 衰变过程 $\rho \rightarrow \pi\gamma$ 和过程 $\rho^0 \rightarrow \pi^0\gamma$ 应该具有几乎相等的衰变宽度。这是理论预言的结果, 其中的微小差异源于带电和中性介子微小的质量差异。但实验上却不支持同位旋对称性假设。对于过程 $K^* \rightarrow K\gamma$ 和 $(K^*)^0 \rightarrow K^0\gamma$, 同位旋对称性符合得同样不是很好。

(b) 含有混合角的过程。除了衰变过程 $\rho^0 \rightarrow \eta\gamma$ 之外, 其他衰变过程的理论值与实验值符合得较好。当考虑到混合时, $SU(3)$ 对称性不再精确成立。而这种 $SU(3)$ 对称性的明显破缺仅仅由质量效应引起, 其他的可能引发 $SU(3)$ 破缺的动力学机制并未考虑在内, 所以理论和实验不可能完全一致。

耦合常数 g 的取值为几个 GeV, 由于这里的电磁作用实际上是包含强相互作用的有效相互作用 (即包含强相互作用的“修正”), 因此这样的取值应该是合理的。

2.2 VMD 模型下矢量介子的辐射衰变

(1) 耦合常数 $g_{VP\gamma}$

VMD 模型下, $V \rightarrow P\gamma$ 的费曼图如图 1 所示。

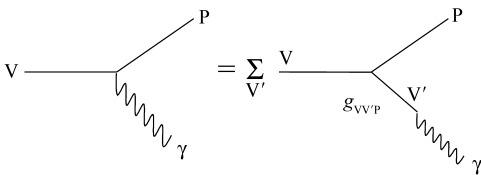


图 1 VMD 模型下 $V \rightarrow P\gamma$ 的费曼图

在这里, V' 为 ρ^0, ω, ϕ 介子, 费曼振幅和衰变宽度分别为(5)式和(6)式。

由图 1 可以得到:

$$g_{VP\gamma} = \sum_{V'} g_{VV'P} f_{V'}, \quad (13)$$

这里定义:

$$f_{\rho'} = \frac{1}{2g_{\rho}}, f_{\omega'} = \frac{\sin\theta_V}{2\sqrt{3}g_Y}, f_{\phi'} = \frac{\cos\theta_V}{2\sqrt{3}g_Y}。 \quad (14)$$

在 $SU(3)$ 对称性下, $g_{\rho} = g_Y$ 。

在 VMD 模型下计算 $\rho \rightarrow e^+e^-, \omega \rightarrow e^+e^-, \phi \rightarrow e^+e^-$ 的衰变宽度^[5], 能够得到

$$\theta_V = 41.9^\circ, g_{\rho} = 2.5243, g_Y = 0.9244。 \quad (15)$$

对于衰变 $V \rightarrow PV'$, 有效拉氏量可以写作

$$L_{\text{eff}} = f_1 \text{Tr} [P \{ \partial_{\mu} V_{\nu}, \partial_{\rho} V_{\sigma} \}] \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}, \quad (16)$$

其中, f_1 是普适的耦合常数。这样, 耦合常数 $g_{VPV'}$ 可以用一个参数 f_1 表示出来。但是, 如果耦合中含有 η_1 或 ω_1 介子, f_1 应该换成 f_2 或 f_3 , 而如果同时含有 η_1 和 ω_1 介子, f_1 则应该换成 f_4 。

利用公式(16)及公式(3)和(4), 耦合常数 $g_{VPV'}$ 可以表示为

$$\begin{aligned} g_{\eta\rho^0\rho^0} &= \frac{\cos\theta_P f_1}{\sqrt{3}} - \sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \sin\theta_P, \\ g_{\pi\rho^0\phi} &= \frac{2\cos\theta_V f_1}{\sqrt{3}} - 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_V, \\ g_{\pi^0\rho^0\phi} &= \frac{2\cos\theta_V f_1}{\sqrt{3}} - 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_V, \\ g_{\eta\phi\phi} &= -\sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \sin\theta_P \cos^2\theta_V - \frac{\cos\theta_P f_1 \cos^2\theta_V}{\sqrt{3}} - \\ &\quad 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_P \sin\theta_V \cos\theta_V - \\ &\quad \sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \sin\theta_P \sin^2\theta_V, \\ g_{\pi\rho^0\omega} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_V + \frac{2\sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \\ g_{\pi^0\rho^0\omega} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_V + \frac{2\sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \\ g_{\eta\phi\omega} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_P \cos^2\theta_V - \\ &\quad 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \cos\theta_V \sin\theta_P \sin\theta_V + \\ &\quad 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \cos\theta_V \sin\theta_P \sin\theta_V - \\ &\quad 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_P \sin^2\theta_V - \\ &\quad \frac{2\cos\theta_P \cos\theta_V \sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \\ g_{\eta\omega\omega} &= -\sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \sin\theta_P \cos^2\theta_V + \\ &\quad 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_P \sin\theta_V \cos\theta_V - \\ &\quad \sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \sin\theta_P \sin^2\theta_V - \frac{\cos\theta_P \sin^2\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \\ g_{K\rho^0K^*} &= f_1, g_{K\phi K^*} = -2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_V - \frac{\cos\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g_{K^0 \omega K^*} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_V - \frac{\sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, & 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \cos\theta_P \cos\theta_V \sin\theta_V - \\
 g_{K^0 \rho^0 \langle K^* \rangle^0} &= -f_1, & 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_P \sin^2\theta_V - \\
 g_{K^0 \phi \langle K^* \rangle^0} &= -2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_V - \frac{\cos\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, & \frac{2\cos\theta_V \sin\theta_P \sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, \\
 g_{K^0 \omega \langle K^* \rangle^0} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \cos\theta_V - \frac{\sin\theta_V f_1}{\sqrt{3}}, & g_{\omega \omega \eta'} = \sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \cos\theta_P \cos^2\theta_V + \\
 g_{\rho^0 \rho^0 \eta'} &= \sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \cos\theta_P + \frac{\sin\theta_P f_1}{\sqrt{3}}, & 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_P \cos\theta_V \sin\theta_V + \\
 g_{\phi \phi \eta'} &= \sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \cos\theta_P \cos^2\theta_V - \frac{\sin\theta_P f_1 \cos^2\theta_V}{\sqrt{3}} - & \sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \cos\theta_P \sin^2\theta_V - \\
 & 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_P \sin\theta_V \cos\theta_V + & \frac{f_1 \sin\theta_P \sin^2\theta_V}{\sqrt{3}}. \tag{17} \\
 & \sqrt{\frac{2}{3}} f_4 \cos\theta_P \sin^2\theta_V, & \\
 g_{\phi \omega \eta'} &= 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_3 \sin\theta_P \cos^2\theta_V + & \\
 & 2\sqrt{\frac{2}{3}} f_2 \sin\theta_V \cos\theta_V \cos\theta_P - &
 \end{aligned}$$

(2) 拟合结果及讨论

这里取耦合常数 f_1, f_2, f_3, f_4 及混合角 θ_P 作为自由参数。要求 χ 为最小，我们得到 VMD 模型下 $V \rightarrow P\gamma$ 的衰变宽度(见表 2)。

表 2 VMD 模型下 $V \rightarrow P\gamma$ 衰变宽度的理论值、实验值、 χ^2 以及 χ

过程	$\Gamma_{\text{Theo.}} / \text{MeV}$	$\Gamma_{\text{Exp.}} / \text{MeV}^{[5]}$	χ^2	χ
$\rho^0 \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.094845	$0.10302^{0.025755}_{-0.025755}$	0.100751	0.0793533
$\rho \rightarrow \pi \gamma$	0.0942179	$0.068175^{0.007575}_{-0.007575}$	11.8199	0.382001
$\rho^0 \rightarrow \eta \gamma$	0.0276328	$0.03636^{0.01212}_{-0.013635}$	0.518497	0.240022
$\eta' \rightarrow \rho^0 \gamma$	0.080291	$0.08456^{0.00364}_{-0.00364}$	1.37547	0.050485
$\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.681773	$0.71655^{0.04215}_{-0.04215}$	0.680749	0.0485338
$\omega \rightarrow \eta \gamma$	0.0000138941	$0.0054795^{0.000843}_{-0.000843}$	42.036	0.997464
$\eta' \rightarrow \omega \gamma$	0.00845106	$0.008428^{0.00084}_{-0.00084}$	0.000753317	0.00273554
$\phi \rightarrow \pi^0 \gamma$	0.00570986	$0.0058033^{0.0005759}_{-0.0005759}$	0.0263267	0.0161016
$\phi \rightarrow \eta \gamma$	0.0106326	$0.055818^{0.002658}_{-0.002658}$	288.992	0.809513
$\phi \rightarrow \eta' \gamma$	0.000457247	$0.0005316^{0.0003101}_{-0.0002215}$	0.112682	0.139867
$K^* \rightarrow K \gamma$	0.0458576	$0.049302^{0.004482}_{-0.004482}$	0.590603	0.0698643
$\langle K^* \rangle^0 \rightarrow K^0 \gamma$	0.147925	$0.11615^{0.0101}_{-0.0101}$	9.89739	0.273566

我们得到 $\chi_{\text{total}}/\text{d. o. f.} = 0.446$, $\chi^2_{\text{total}}/\text{d. o. f.} = 50.86$ 参数取如下值:

$$\begin{aligned}
 f_1 &= 4.5 \text{ GeV}, f_2 = 15 \text{ GeV}, \\
 f_3 &= 2.9 \text{ GeV}, f_4 = 13.7 \text{ GeV}, \\
 \theta_P &= -6^\circ. \tag{18}
 \end{aligned}$$

我们发现对于含有混合角的衰变过程,除 $\omega \rightarrow \eta \gamma, \phi \rightarrow \eta \gamma$ 之外,理论值与实验值符合得较好。特

别是,赝标量介子混合角与 2.1 节的结果相同,这表明理论的自洽性。

VMD 模型作为介子辐射衰变的一种描述方式,在只考虑“最低阶”的费曼图情况下并不完全与 2.1 节的有效描述等价。这是因为介子 ρ, ω, ϕ 可以作为中间传播子出现,比树图更复杂的圈图也应该包括其中。因此,我们并不预期这里的两种描述

能够给出完全一致的结果。

3 结论及展望

从上面的拟合分析可以得到以下几个结论:

(1) 利用 $SU(3)$ 对称性及 VMD 模型能够半定量地给出与实验符合的结果。而且此模型非常简单; (2) $SU(3)$ 对称性破缺必须加以考虑, 而且仅考虑由质量导致的 $SU(3)$ 对称性破缺是不够的, 必须同时考虑其他动力学机制; (3) 轻介子的有效理论 (而不是借助于夸克模型) 对解决轻介子结构问题仍然非常重要, 同时很有效。

本文确定的赝标量介子混合角为 $\theta_p = -6^\circ$ 。到目前为止, 赝标量介子混合角作为 $SU(3)$ 对称性发生明显破坏的重要标志, 它的产生机制及具体数值

仍然不清楚。混合角的问题实质上是 $SU(3)$ 对称性破缺的机制问题。因此, 解决轻介子的衰变问题我们又一次不得不考虑非微扰动力学。本文并没有给出 $SU(3)$ 对称性破缺的动力学机制, 我们期望在给出合适的破缺机制后, 能够得到更为精确的结果。

参考文献 (References):

- [1] Weise W. Phys Rep, 1974, 13: 53.
- [2] Sakurai J J. Annals Phys, 1960, 11: 1.
- [3] Kroll N M, Lee T D, Zumino B. Phys Rev, 1967, 157: 1376.
- [4] O'Connell H B, Pearce B C, Thomas A W. Nucl Phys, 1997, 3(39): 201.
- [5] Yao W-M, Amsler C, Asner D. J Phys, 2006, G33: 1.

Radiative Decay of Vector Mesons^{*}

XU Li-li^{1, 2}, CHEN Jian-xing^{1, #}, ZHANG Ting-ting¹, ZOU Ai-ling¹

(1 *Physics Department of Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;*

2 *Global Institute of Software Technology, Suzhou 215163, Jiangsu China*)

Abstract: Radiative decay of mesons is an important aspect in low-energy hadronic physics, through which structures and properties of mesons can be revealed. In view of effective field theories, the radiative decay of mesons involves mainly interactions between photons and hadrons. In this paper, we investigate the decay of vector mesons by using $SU(3)$ symmetry and the vector meson dominance model respectively. By fitting with experiments, we give the theoretic widths for $V \rightarrow P\gamma$ in both cases and the mixing angle of pseudoscalars θ_p is -6° .

Key words: vector meson; radiative decay; vector meson dominance model

* Received date: 20 Oct. 2008; Revised date: 24 Nov. 2008

* Foundation item: Science and Technology Research Project of Education Department of Liaoning Province(2008T097)

Corresponding author: Chen Jian-xing, E-mail: theory01@163.com