

快报

寻找 1^{-+} 奇特态再探*

郁宏¹⁾ 沈齐兴¹⁾

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

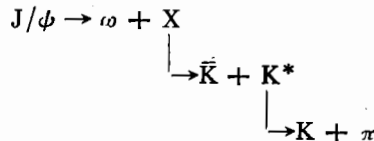
摘 要

为了便于 BES(北京谱仪)做数据分析, 本文给出了在 $J/\psi \rightarrow \omega X$, $\omega \rightarrow 2\pi$ 或 3π , $X \rightarrow K\bar{K}\pi$ 反应中寻找 1^{-+} 奇特态的一些新的关系式. 并且对于在三级二体衰变过程 $J/\psi \rightarrow \omega X$, $\omega \rightarrow 2\pi$ 或 3π , $X \rightarrow K^*\bar{K}$, $K^* \rightarrow K\pi$ 中如何寻找 1^{-+} 奇特态的问题作了讨论.

一、引 言

在文献[1]中, 我们讨论了对过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \omega + X$, $\omega \rightarrow 2\pi$ 或 3π , $X \rightarrow K\bar{K}\pi$, 如何用推广的矩分析法^[2]判断 X 是 1^{-+} 奇特态还是 1^{++} 普通介子的问题. 给出了过程的矩的矢量介子角分布 $H_J(\theta_V, LMlm)$ 以及矩 $M_J(LMlm)$ 的一些关系式(X 的自旋-宇称记为 J^P). 我们注意到, 这些关系式中包含了某些未知量, 例如衰变参数 $|R_\mu|^2$, 螺旋度振幅比 x_1, z_1 和 z'_1 . 又由于我们未对角分布 $W_J(\theta_V, \theta_1, \phi_1; \theta, \phi)$ 作归一化处理, 因而公有的归一化因子仍保留在内, 这样, 对于做数据分析就显得不太方便.

Mark III 的实验结果^[3]表明, J/ψ 强子衰变过程 $J/\psi \rightarrow \omega + X, X \rightarrow K\bar{K}\pi$ 很可能有相当大部份是通过如下三级二体衰变过程进行的:



本文将引进一个新的物理量——向前矩 $\bar{M}_J(LMlm)$, 并给出有利于做数据分析的新的关系式. 并且对在三级二体衰变过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \omega + X$, $\omega \rightarrow 2\pi$ 或 3π , $X \rightarrow \bar{K}K^*$, $K^* \rightarrow K\pi$ 中如何寻找 1^{-+} 奇特态的问题作了具体讨论, 并给出了一些相应的关系式.

本文于1991年8月8日收到.

* 国家自然科学基金会资助.

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究人员.

二、新关系式

在矩的矢量介子角分布 $H_J(\theta_V, LMlm)$ 的基础上,我们有矩

$$M_J(LMlm) = \int_0^\pi H_J(\theta_V, LMlm) \sin \theta_V d\theta_V,$$

并且定义向前矩如下:

$$\bar{M}_J(LMlm) = \int_0^{\pi/2} H_J(\theta_V, LMlm) \sin \theta_V d\theta_V, \quad (1)$$

其中 θ_V 是 J/ψ 静止系中, 矢量介子 V 与入射正电子束方向之间的夹角. 对于 $J=1$ 的情况, 我们有 17 个独立、非零、实的向前矩; 连同 11 个独立、非零、实的矩 $M_J(LMlm)$, 我们可以得到一些新的关系式, 它们是:

$$\begin{aligned} & [2M(0022) - 5M(2022)]/M(2022) \\ &= \begin{cases} 0 & J^P = 1^- \\ -15 & J^P = 1^+ \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & [2\bar{M}(2100) - 5\bar{M}(2120)]/\bar{M}(212-2) \\ &= \begin{cases} 5\sqrt{6}/2 & J^P = 1^- \\ -5\sqrt{6}/2 & J^P = 1^+ \end{cases} \quad (x_1 \neq 0), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & [-5/\sqrt{3}\bar{M}(2100) + 25/2\sqrt{3}\bar{M}(2120) + 25/2\sqrt{2}\bar{M}(212-2)]/ \\ & \bar{M}(2120) = \begin{cases} 0 & J^P = 1^- \\ 25\sqrt{3} & J^P = 1^+ \end{cases} \quad (x_1 \neq 0), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & [-5/\sqrt{3}\bar{M}(2100) + 25/2\sqrt{3}\bar{M}(2120) - 25/2\sqrt{2}\bar{M}(212-2)]/ \\ & \bar{M}(212-2) = \begin{cases} -25/\sqrt{2} & J^P = 1^- \\ 0 & J^P = 1^+ \end{cases} \quad (x_1 \neq 0), \end{aligned} \quad (5)$$

在这些关系式中, 未知量 $|R_\mu|^2, x_1, z_1, z'_1$ 以及归一化因子已全部消去, 因而用来判别 1^{-+} 奇特态和 1^{++} 寻常态既简洁、方便而且有效.

我们还可以利用矩及向前矩直接给出过程的螺旋度振幅之比 (其定义同文献[1]).

对于 $J^{PC} = 1^{-+}$ 情况, 我们有

$$\begin{aligned} x_1 &= 2\sqrt{2}\bar{M}(212-2)/[\sqrt{3}M(2022)], \\ z_1 &= [-2\bar{M}(0021) - 10\bar{M}(2021)]/[3M(0022)], \\ z'_1 &= 5M(2121)/[\sqrt{6}M(0022)]. \end{aligned} \quad (6)$$

对于 $J^{PC} = 1^{++}$ 情况, 我们有

$$\begin{aligned} x_1 &= 4\bar{M}(2100)/M(0022), \\ z'_1 &= 10M(2121)/[\sqrt{6}M(0022)]. \end{aligned} \quad (7)$$

由于螺旋度振幅直接和过程 $J/\psi \rightarrow \omega + X$ 的动力学机制以及 X 粒子的性质有关, 所以振幅比——极化参数的精确测量是相当重要的. 关系式(6)和(7)给精确测量极化参数提

供了方便.

三、如何在 J/ψ 三级二体强子衰变过程中寻找 1^{++} 奇特态

对于 J/ψ 辐射衰变过程 $J/\psi \rightarrow \gamma + X, X \rightarrow K\bar{K}\pi$, DM2^[4]和 Mark III^[5]的分析都表明,它们主要通过如下的三级二体衰变过程进行:

$$\begin{aligned}
 & J/\psi \rightarrow \gamma + X(J^{PC} = 0^{-+}), m_X = 1416 \begin{matrix} + 8 & + 7 \\ - 8 & - 5 \end{matrix} \text{MeV} \\
 & \quad \downarrow \\
 & \quad \rightarrow \pi + a_0(980) \\
 & \quad \quad \downarrow \\
 & \quad \quad \rightarrow K\bar{K}, \\
 & J/\psi \rightarrow \gamma + X(J^{PC} = 0^{-+}), m_X = 1490 \begin{matrix} + 14 & + 3 \\ - 8 & - 16 \end{matrix} \text{MeV} \\
 & \quad \downarrow \\
 & \quad \rightarrow \bar{K} + K^* \\
 & \quad \quad \downarrow \\
 & \quad \quad \rightarrow K\pi, \\
 & J/\psi \rightarrow \gamma + X(J^{PC} = 1^{++}), m_X = 1443 \begin{matrix} + 7 & + 3 \\ - 6 & - 2 \end{matrix} \text{MeV} \\
 & \quad \downarrow \\
 & \quad \rightarrow \bar{K} + K^* \\
 & \quad \quad \downarrow \\
 & \quad \quad \rightarrow K\pi.
 \end{aligned}$$

而对于 J/ψ 强子衰变过程 $J/\psi \rightarrow \omega + X, X \rightarrow K\bar{K}\pi$, MarkIII 的实验结果表明它也很可能有相当大部份是通过如下三级二体衰变过程进行的:

$$\begin{aligned}
 & J/\psi \rightarrow \omega + X \\
 & \quad \downarrow \\
 & \quad \rightarrow \bar{K} + K^* \\
 & \quad \quad \downarrow \\
 & \quad \quad \rightarrow K + \pi.
 \end{aligned}$$

对于过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow V_1 + X, V_1 \rightarrow P_1P_2$ (或 $+P_3$)和 $X \rightarrow P_4 + V_2, V_2 \rightarrow P_5P_6$ (P_i 为赝标介子, V_i 表示矢量介子), 其角分布的螺旋度形式为

$$\begin{aligned}
 W_J(\theta_{V_1}; \theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \theta_3, \phi_3) & \approx \sum_{\substack{\lambda_1, \lambda'_1, \lambda_2, \\ \lambda'_2, \lambda_X, \lambda'_X}} I_{\lambda_1, \lambda'_1}(\theta_{V_1}) \\
 & A_{\lambda_1, \lambda_X} A_{\lambda'_1, \lambda'_X}^* \cdot B_{0, \lambda_2} B_{0, \lambda'_2}^* D_{\lambda_1, 0}^{1*}(\phi_1, \theta_1, 0) \\
 & D_{\lambda'_1, 0}^1(\phi_1, \theta_1, 0) D_{-\lambda_2, -\lambda_2}^{J*}(\phi_2, \theta_2, 0) D_{-\lambda'_2, -\lambda'_2}^J(\phi_2, \theta_2, 0) \\
 & D_{\lambda_2, 0}^{1*}(\phi_3, \theta_3, 0) D_{\lambda'_2, 0}^{1*}(\phi_3, \theta_3, 0). \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中 $I_{\lambda_1, \lambda'_1}(\theta_{V_1}) = \frac{1}{4} \sum_{\lambda''} \langle \phi_{\lambda_1} | T | e^+e^- \rangle \langle \phi_{\lambda'_1} | T | e^+e^- \rangle^*$; θ_{V_1} 是在 J/ψ 静止系中出射矢量介子 V_1 的方向和正电子束流方向的夹角; (θ_1, ϕ_1) 和 (θ_2, ϕ_2) 分别描写在 V_1 静止系和 X 静止系 (取 J/ψ 静止系中 V_1 运动方向为 z 轴) P_1 的运动方向 (对于 V_1 的二体衰变) 或衰变平面的法线方向 (对于 V_1 的三体衰变) 和 P_4 的运动方向; (θ_3, ϕ_3) 描写在 V_2 静止系中 (取 X 静止系中 V_2 的运动方向为 z 轴) P_5 的运动方向; λ_1, λ_2 和 λ_X 分别为 $J/\psi, V_1, V_2$

和 X 的螺旋度. A_{λ_1, λ_X} 为过程 $J/\psi \rightarrow V_1 + X$ 的螺旋度振幅, 一般地我们可以定义如下螺旋度振幅之比:

$$x = \frac{A_{1,1}}{A_{1,0}}, y = \frac{A_{1,2}}{A_{1,0}}, z = \frac{A_{0,0}}{A_{1,0}}, z' = \frac{A_{0,1}}{A_{1,0}}. \quad (9)$$

对于 $J^{PC} = 1^{-+}$ 的粒子, 只有 x, z, z' ; 而对于 $J^{PC} = 1^{++}$ 的粒子只有 x 和 z' . B_{0, λ_2} 是过程 $X \rightarrow P_1 + V_2$ 的螺旋度振幅. 对于 $J^P = 1^-$ 的 X 粒子, 只有 $B_{0,1}$; 而对于 $J^P = 1^+$ 的 X 粒子, 独立的螺旋度振幅有 $B_{0,1}, B_{0,0}$. 以上我们用到了宇称守恒条件:

$$\begin{aligned} A_{\lambda_1, \lambda_X} &= P(-1)^J A_{-\lambda_1, -\lambda_X}, \\ B_{0, \lambda_2} &= P(-1)^{J+1} B_{0, -\lambda_2}. \end{aligned} \quad (10)$$

而时间反演不变性要求 A_{λ_1, λ_X} 和 B_{0, λ_2} 均相对为实.

利用推广的矩分析法^[2], 我们可以定义矩的矢量介子角分布

$$\begin{aligned} H_J(\theta_{V_1}, L M l_1 m_1 l_2 m_2) &= \int W_J(\theta_{V_1}; \theta_1, \phi_1; \theta_2, \phi_2; \theta_3, \phi_3) \\ &D_{M, m}^L(\phi_2, \theta_2, 0) D_{m_1, 0}^{l_1}(\phi_1, \theta_1, 0) D_{m_2, 0}^{l_2}(\phi_3, \theta_3, 0) \sin \theta_1 d\theta_1 \\ &\sin \theta_2 d\theta_2 \sin \theta_3 d\theta_3 d\phi_1 d\phi_2 d\phi_3 \\ &\approx \sum_{\substack{\lambda_1 \lambda_1' \lambda_2 \\ \lambda_2' \lambda_X \lambda_X'}} I_{\lambda_1 \lambda_1'}(\theta_{V_1}) A_{\lambda_1, \lambda_X} A_{\lambda_1', \lambda_X} B_{0, \lambda_2} B_{0, \lambda_2'} (1 \lambda_1' l_1 m_1 | 1 \lambda_1) \\ &(10 l_1 0 | 10) (J - \lambda_X' L M | J - \lambda_X) (J - \lambda_2' L m | J - \lambda_2) \\ &(1 \lambda_2' l_2 m_2 | 1 \lambda_2) (10 l_2 0 | 10), \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $M = \lambda_X' - \lambda_X, m = \lambda_2' - \lambda_2 = -m_2, m_1 = \lambda_1 - \lambda_1'$. 相应的矩为

$$M_J(L M l_1 m_1 l_2 m_2) = \int_0^\pi H_J(\theta_{V_1}, L M l_1 m_1 l_2 m_2) \sin \theta_{V_1} d\theta_{V_1}. \quad (12)$$

相应的向前矩为

$$\bar{M}_J(L M l_1 m_1 l_2 m_2) = \int_0^{\pi/2} H_J(\theta_{V_1}, L M l_1 m_1 l_2 m_2) \sin \theta_{V_1} d\theta_{V_1} \quad (13)$$

对于 $J = 1$ 的情况, 如何判别 $P = -$ 还是 $+$ 呢? 这是判断是否存在 1^{-+} 奇特态的关键. 为简单起见, 我们考虑 $l_2 = m_2 = 0$ 的情况, 这样, 我们共有 17 个独立、非零、实的 $\bar{M}_J(L M l_1 m_1 00)$ 和 11 个独立、非零、实的 $M_J(L M l_1 m_1 00)$. 和文献[1]以及本文第一部分不同的是, 对于 $J^{PC} = 1^{-+}$ 情况, 当 $L = 0$ 和 2 时, 相应的矩及向前矩的表达式要分别作如下替换

$$|R_0|^2 \rightarrow \begin{cases} 2B_{0,1}^2 & L = 0, \\ -B_{0,1}^2 & L = 2, \end{cases} \quad (14)$$

对于 $J^{PC} = 1^{++}$ 情况, 则分别作如下替换

$$|R_{+1}|^2 + |R_{-1}|^2 \rightarrow \begin{cases} 2B_{0,1}^2 + B_{0,0}^2 & L = 0, \\ 2B_{0,1}^2 - 2B_{0,0}^2 & L = 2. \end{cases} \quad (15)$$

因而, 必须寻找新的关系式. 其结果是, 当 $B_{0,1}^2 \approx B_{0,0}^2$ 时, 对于 $J^{PC} = 1^{-+}$ 和 1^{++} , 我们都有

$$x_1^2 = -M_1(222 - 200)/[\sqrt{6} M_1(202200)]. \quad (16)$$

而如果 $x_1^2 \approx 2$, 则有

$$\begin{aligned} & [5M_1(202000) - 2M_1(200000) + 10\sqrt{6}M_1(202200) \\ & \quad + 5M_1(222 - 200)]/[5M_1(202000) - 2M_1(200000)] \\ & = \begin{cases} 2 & P = - \\ 0 & P = +, \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & [5M_1(202000) - 2M_1(200000) - 10\sqrt{6}M_1(202200) \\ & \quad - 5M_1(222 - 200)]/[5M_1(202000) - 2M_1(200000)] \\ & = \begin{cases} 0 & P = - \\ 2 & P = +. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

如果 $x_1^2 = 2$, 则我们有

$$\begin{aligned} & [2\bar{M}_1(210000) - 5\bar{M}_1(212000)]/\bar{M}_1(212 - 200) \\ & = \begin{cases} 5\sqrt{6}/2 & P = -, \\ -5\sqrt{6}/2 & P = +. \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

当 $B_{0,1}^2 = B_{0,0}^2$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} & 5M_1(202200)/M_1(002200) \\ & = \begin{cases} -1 & P = -, \\ 0 & P = +. \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

因此, 不管何种情况, 总可以利用关系式(17)–(20)中的一个或几个来判别粒子 X 是 1^{-+} 奇特态还是 1^{++} 寻常态.

我们也能利用过程的矩及向前矩直接给出过程的螺旋度振幅之比. 对于 $J^{PC} = 1^{-+}$, 我们有

$$\begin{aligned} x_1 &= 2\sqrt{2}\bar{M}_1(212 - 200)/[\sqrt{3}M_1(202200)], \\ z_1 &= [-2\bar{M}_1(002100) + 20\bar{M}_1(202100)]/[3M_1(002200)], \\ z'_1 &= -5\sqrt{2}M_1(212100)/[\sqrt{3}M_1(002200)]. \end{aligned} \quad (21)$$

对于 $J^{PC} = 1^{++}$ 情况, 当 $B_{0,1}^2 \approx B_{0,0}^2$ 时, 有

$$\begin{aligned} x_1 &= -4\bar{M}_1(210000)/[5M_1(202200)], \\ z'_1 &= M_1(212 - 100)/[\sqrt{6}M_1(202200)], \end{aligned} \quad (22)$$

而当 $B_{0,1}^2 = B_{0,0}^2$ 时, 可得

$$\begin{aligned} x_1^2 &= \frac{\sqrt{6}}{60} \frac{2M_1(000000) - 5M_1(002000)}{M_1(002200)} - 1, \\ z_1^2 &= \frac{\sqrt{6}}{60} \frac{M_1(000000) + 5M_1(002000)}{M_1(002200)}. \end{aligned} \quad (23)$$

x_1 和 z'_1 的相对符号可由下式确定

$$x_1 z'_1 = -2\bar{M}_1(002100)/M_1(002200). \quad (24)$$

四、小 结

对于 J/ψ 强子衰变过程 $J/\psi \rightarrow \omega K\bar{K}\pi$, 本文分别对共振态 X 的直接三体衰变 ($X \rightarrow K\bar{K}\pi$) 和二级二体衰变 ($X \rightarrow \bar{K}K^*, K^* \rightarrow K\pi$) 二种情况作了讨论. 目的是判别在 1420MeV 处的共振态 X 是否是一个 1^{-+} 奇特态. 我们从推广的矩分析出发给出理论上的一些关系式, 对于判别 1^{-+} 奇特态及 1^{++} 寻常态, 并拟合出有相当重要性的螺旋度振幅之比既简洁又方便.

就 BES 的数据分析而言, 当然要对探测器的接收效率作出校正, 并做蒙特卡洛模拟. 我们相信, 有了 1 千万 J/ψ 事例, 对于共振态 X 是否是一个 1^{-+} 奇特态将能作出判断.

参 考 文 献

- [1] 郁宏, 沈齐兴, IHEP-TH-91-8, 高能物理与核物理, 15(1991), 861.
- [2] Yu Hong "The generalized moment analysis and spin-Parity analysis for boson resonances" Proc. XXV Intern. Conf. On H. E. P. (Singapore, August 1990) p. 1172..
- [3] J.J. Becker et al., *Phys. Rev. Lett.*, 59(1987), 186.
- [4] G. Szklarz, LAL 89-61 (1989).
- [5] Z. Bai et al., *Phys. Rev. Lett.*, 65(1990), 2507.

Restudies of Searching for 1^{-+} Exotic State

YU HONG SHEN QIXING

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

In order to convenience for the data analysis of BES some new relations which can be used to search for the 1^{-+} exotic state in $J/\psi \rightarrow \omega X$, $X \rightarrow K\bar{K}\pi$ have been obtained. How to search for the 1^{-+} exotic state in the three-step two-body hadronic decay process $J/\psi \rightarrow \omega X$, $X \rightarrow \bar{K}K^*, K^* \rightarrow K\pi$ is also discussed.