

过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2$ 的角分布和玻色子 B 的自旋分析*

严武光 郁宏

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

本文给出了过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2$ 的螺旋性形式 (HF)^[1] 和等效相互作用形式 (EIF)^[2] 之间的关系. 在 B 的不同自旋 ($J=2, 4$) 下赝标介子的角分布显示, 为了确定 B 的自旋, 存在敏感区域和不敏感区域. 令人遗憾的是, $\theta/f_2(1720)$ 和 $\xi(2230)$ 的数据正好掉入不敏感区域.

一、引 言

$$e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2 \quad (1)$$

是一个实验上相当重要的过程, 其中 P_1 和 P_2 是两个赝标介子, 互为正反粒子. 正是通过这个过程, DESY 的 DASP^[3] 和 PLUTO^[4] 组观测到了 $f_2(1270)$; MARK II^[5] 组首先发现了 $f_2'(1525)$; 特别是晶体球组发现的胶子球的候选者 $\theta/f_2(1720)$ ^[6] 和 MARK III 组^[7] 提出了新态 $\xi(2230)$ 存在的证据更是十分令人感兴趣.

显然, 以上过程中 J/ψ 辐射衰变产生的双赝标介子体系 B 具有量子数 $J^{PC} = (\text{偶})^{++}$. 然而, 至今我们不能确定 $\xi(2230)$ 的自旋是 2 还是 4. 文献[2]用等效相互作用方法给出了一个方案. 他们认为, 该方案对于确定 $\xi(2230)$ 的自旋十分有效. 现在, 我们要问, 通常的螺旋性形式和等效相互作用形式的关系是什么? 本文的目的一是要找出这两种形式之间的关系, 二是试图借鉴 EIF 方案, 较全面地对 B 粒子作自旋分析. 希望确实能有助于确定 $\xi(2230)$ 的自旋.

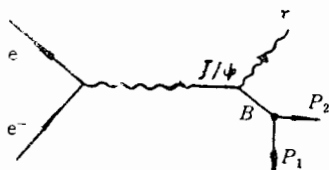
二、HF 和 EIF 之间的关系

过程(1)实际上包括三个子过程:

$$e^+e^- \rightarrow J/\psi, J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2. \quad (2)$$

其费曼图如图 1 所示.

* 本工作得到国家自然科学基金会的支持.
本文 1988 年 6 月 15 日收到.

图 1 过程 $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2$ 的费曼图.

在 HF 中, 三个子过程的矩阵元分别是

$$\begin{aligned} \langle \phi_{\lambda_j} | T | e^+ e^- \rangle &\sim e_{\mu}^{\lambda_j} (p_j) \bar{v}_r(p_+) \gamma^{\mu} u_{r'}(p_-), \\ \langle \gamma_{\lambda_r} B_A^J | T | \phi_{\lambda_j} \rangle &\sim A_{\lambda_r A}^J, \\ \langle P_1 P_2 | T | B_A^J \rangle &\sim D_{\lambda_0}^{J*}(\phi, \theta, 0). \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\lambda_j, \lambda_r, A, r$ 和 r' 分别是 $J/\psi, \gamma, B, e^+$ 和 e^- 的螺旋性; $e_{\mu}^{\lambda_j}(p_j)$ 是 J/ψ 的极化矢量; (θ, ϕ) 描写 B 静止系中介子 P_1 的动量的方向; $A_{\lambda_r A}^J$ 为螺旋性振幅. 选择出射光子的方向为 z 轴, e^+e^- 束流在 $x-z$ 平面内. 角动量守恒给出关系式 $\lambda_j = \lambda_r - A$. 宇称守恒和时间反演不变性给出

$$A_{\lambda_r, -A}^J = (-)^J A_{\lambda_r A}^J, A_{\lambda_r A}^{J*} = A_{\lambda_r A}^J. \quad (4)$$

显然, 当 $J \geq 2$ 时有三个独立的螺旋性振幅. 定义螺旋性振幅比

$$x_J = \frac{A_{11}^J}{A_{10}^J}, \quad y_J = \frac{A_{12}^J}{A_{10}^J}, \quad (5)$$

可以推得过程(1)的角关联公式为

$$\begin{aligned} W_J(\theta_r, \theta, \phi) &\underset{(J \geq 2)}{\sim} (1 + \cos^2 \theta_r) [d_{00}^J(\theta)^2 + y_J^2 d_{20}^J(\theta)^2] \\ &\quad + \sqrt{2} \sin 2\theta_r \cdot \cos \phi [x_J y_J d_{20}^J(\theta) - x_J d_{00}^J(\theta)] d_{10}^J(\theta) \\ &\quad + 2 \sin^2 \theta_r \cos 2\phi \cdot y_J \cdot d_{20}^J(\theta) d_{00}^J(\theta) \\ &\quad + 2 \sin^2 \theta_r \cdot x_J^2 \cdot d_{10}^J(\theta)^2. \end{aligned} \quad (6)$$

对 θ 和 ϕ 积分, 得到光子的角分布如下:

$$\begin{aligned} W_J(\theta_r) &\underset{(J \geq 2)}{\sim} \frac{4\pi}{2J+1} \{ (1 + \cos^2 \theta_r)(1 + y_J^2) + 2 \sin^2 \theta_r x_J^2 \} \\ &\sim 1 + A_J \cos^2 \theta_r. \end{aligned} \quad (7)$$

其中

$$A_J = (1 + y_J^2 - 2x_J^2) / (1 + y_J^2 + 2x_J^2). \quad (8)$$

注意到对 $J = 2$ 或 4 , 光子的角分布表达式完全一样. 如在(6)中积去 θ_r 和 ϕ , 就得到出射赝标介子 P_1 的角分布:

$$\begin{aligned} W_J(\theta) &\underset{(J \geq 2)}{\sim} \frac{16\pi}{3} [d_{00}^J(\theta)^2 + y_J^2 d_{20}^J(\theta)^2 + x_J^2 d_{10}^J(\theta)^2] \\ &\sim 1 + B_J \cos^2 \theta + C_J \cos^4 \theta + D_J \cos^6 \theta + E_J \cos^8 \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

当 $J = 2$ 时, 我们有

$$B_2 = (-12 + 12x_2^2 - 6y_2^2) / (2 + 3y_2^2),$$

1) 这
现
[17]

+. 给
司,
形
有

2)

$$\begin{aligned} C_2 &= (18 - 12x_2^2 + 3y_2^2)/(2 + 3y_2^2), \\ D_2 &= E_2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

当 $J = 4$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} B_4 &= (-180 + 180x_4^2 - 160y_4^2)/(9 + 10y_4^2), \\ C_4 &= (1110 - 1020x_4^2 + 780y_4^2)/(9 + 10y_4^2), \\ D_4 &= (-2100 + 1820x_4^2 - 1120y_4^2)/(9 + 10y_4^2), \\ E_4 &= (1225 - 980x_4^2 + 490y_4^2)/(9 + 10y_4^2). \end{aligned} \quad (11)$$

在 EIF 中, 文献[2]给出了过程(1)的光子的角分布和两个赝标介子的能量差分布如下:

$$\begin{aligned} d\sigma/d\cos\theta_r &\sim 1 + A_J \cos^2\theta_r \\ d\sigma/d\varepsilon &\sim 1 + B_J\varepsilon^2 + C_J\varepsilon^4 + D_J\varepsilon^6 + E_J\varepsilon^8. \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (E_1 - E_2)/(E_1 - E_2)_{\text{最大}}, \\ (E_1 - E_2)_{\text{最大}} &= (m_1^2 - m_B^2)\sqrt{m_B^2 - 4m^2}/2m_J m_B, \end{aligned} \quad (13)$$

E_1 和 E_2 是两个赝标介子 P_1 和 P_2 的能量, m 为其质量. 当 $J = 2$ 时, 我们有

$$\begin{aligned} A_2 &= [2(\lambda^2 + 24) - 3\mu^2]/[2(\lambda^2 + 24) + 3\mu^2], \\ B_2 &= -6 + \frac{9}{2}(\mu^2 + 32)/(\lambda^2 + 36), \\ C_2 &= 9 - \frac{9}{2}(\mu^2 + 64)/(\lambda^2 + 36), \\ D_2 &= E_2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

当 $J = 4$ 时, 有

$$\begin{aligned} A_4 &= (\lambda^2 - \mu^2 + 40)/(\lambda^2 + \mu^2 + 40), \\ B_4 &= -16 + (9\mu^2 - 144)/(\lambda^2 + 36), \\ C_4 &= 78 - (51\mu^2 - 1632)/(\lambda^2 + 36), \\ D_4 &= -112 + (91\mu^2 - 4368)/(\lambda^2 + 36), \\ E_4 &= 49 - (49\mu^2 - 3136)/(\lambda^2 + 36). \end{aligned} \quad (15)$$

这里, λ^2 和 μ^2 是两个独立的正实参数.

以 $J = 2$ 为例, 在 EIF 中, 顶点 $\phi\gamma B$ 和 BP_1P_2 能用下式描写:

$$\begin{aligned} \langle \gamma_{\lambda_r} B_A^{J=2} | T | \phi_{\lambda_j} \rangle &\sim \alpha(e^{\lambda_j} e^{\lambda_r^*})(p_r e^{A^*} p_r) \\ &\quad + \beta(e^{\lambda_j} p_r)(e^{\lambda_r^*} e^{A^*} p_r) + \gamma(e^{\lambda_j} e^{A^*} e^{\lambda_r^*}), \\ \langle P_1 P_2 | T | B_A^{J=2} \rangle &\sim (p_1 e^A p_2) \end{aligned} \quad (16)$$

其中 e^{λ_r} 是光子的极化矢量, e^A 是 B 粒子的极化张量, α 、 β 和 γ 是三个耦合常数. 在 B 静止系中, 选取 p_r 方向为 z 轴. 若我们取

$$e_{\mu\nu}^A = \sum_{m_1, m_2} c_{m_1, m_2}^{2-A} e_{\mu_1}^{m_1^*} e_{\nu_2}^{m_2^*}, \quad (17)$$

一
其

和

如

和

则
价辨
析
对

(1

差

0:

A

2:

其中, $e_{\mu}^{m_1}$ 和 $e_{\nu}^{m_2}$ 是球极化矢量, 很容易得到

$$\begin{aligned}
 A_{1,2}^{J=2} &= -\gamma, \\
 A_{1,1}^{J=2} &= \frac{(m_J^2 - m_B^2)^2}{4\sqrt{2} m_J m_B} \beta - \frac{m_J^2 + m_B^2}{2\sqrt{2} m_J m_B} \gamma, \\
 A_{1,0}^{J=2} &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{(m_J^2 - m_B^2)^2}{4m_B^2} \alpha - \sqrt{\frac{1}{6}} \gamma, \\
 x_2 &= \left\{ \frac{\sqrt{3} m_B}{m_J} \left[2(m_J^2 + m_B^2) - (m_J^2 - m_B^2)^2 \frac{\beta}{\gamma} \right] \right\} / \left[4m_B^2 \right. \\
 &\quad \left. + 2(m_J^2 - m_B^2)^2 \frac{\alpha}{\gamma} \right], \\
 y_2 &= 4\sqrt{6} m_B^2 / \left[4m_B^2 + 2(m_J^2 - m_B^2)^2 \frac{\alpha}{\gamma} \right], \tag{18}
 \end{aligned}$$

和

$$\cos \theta = -\varepsilon. \tag{19}$$

如果我们对 $J=2$ 和 $J=4$ 的情形分别取

$$\lambda^2 = \frac{24}{y_2^2}, \quad \mu^2 = \frac{32x_2^2}{y_2^2}, \tag{20}$$

和

$$\lambda^2 = 40y_4^2, \quad \mu^2 = 80x_4^2. \tag{21}$$

则方程(9)、(10)、(11)和方程(12)、(14)、(15)是完全一样的。这意味着两种方案完全等价。而 x_j 和 y_j 的物理意义显然要比 λ^2 和 μ^2 的物理意义更为明确。

三、结论和分析

在文献[2]中, 由于对参数作了某些特殊的选择(选择了某些特殊区域), 所以很容易辨别 $\xi(2230)$ 的自旋。但我们不能保证实际情况正好就是这样, 所以必须作更完全的分析。方程(7)和(8)告诉我们, 从光子的实验角分布我们可以定出 A_J 的数值, 这就给出了 x_j^2 和 y_j^2 之间的一个线性关系

$$x_j^2 = \frac{1 - A_J}{2(1 + A_J)} (1 + y_j^2). \tag{22}$$

对不同的 A_J ($|A_J| \leq 1$), 我们可挑选若干组 (x_j^2, y_j^2) , 从方程(9)、(10)、(11) (或方程(12)、(14)、(15)、(20)、(21)) 可以得到赝标介子的角分布 (或等价的两个赝标介子的能量差分布)。部份结果见图 2-5。我们清楚地看到, 在某些情况下 (如 $A_J = 1$ 和 $A_J = -0.8$), 确定 B 的自旋是 2 还是 4, 这个角分布是敏感的。但是在另外的一些情况下 (如 $A_J = 0.05$, $2.0 > y_j^2 > 0.5$ 和 $A_J = -0.25$), 赝标介子的角分布对辨别 B 的自旋 ($J=2$ 或 4) 并不敏感。

我们已经知道, 对 θ/f_2 和 ξ 粒子, 拟合实验数据得到的螺旋性振幅之比分别为^[8]

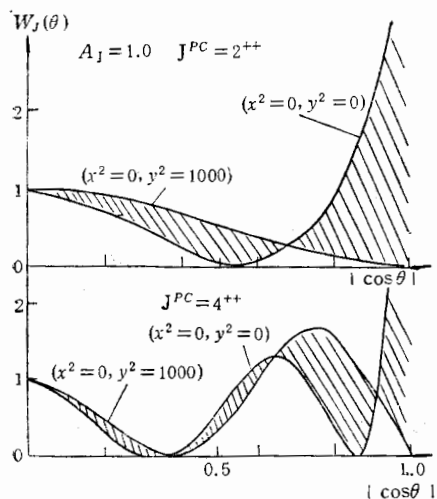


图2 $A_J = 1.0$, (x^2, y^2) 取值从 $(0, 0) \rightarrow (0, 1000)$, $J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 的赝标介子的角分布区域

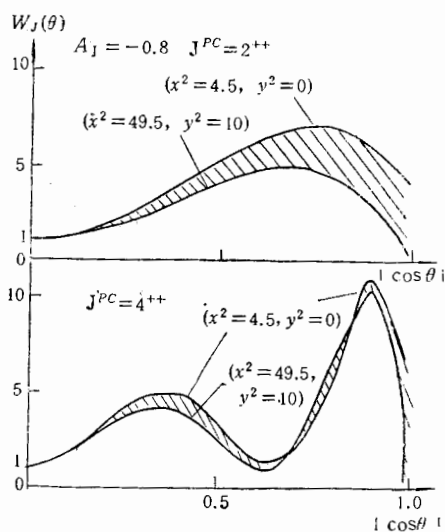


图3 $A_J = -0.8$, (x^2, y^2) 取值从 $(4.5, 0) \rightarrow (49.5, 10)$, $J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 的赝标介子的角分布区域

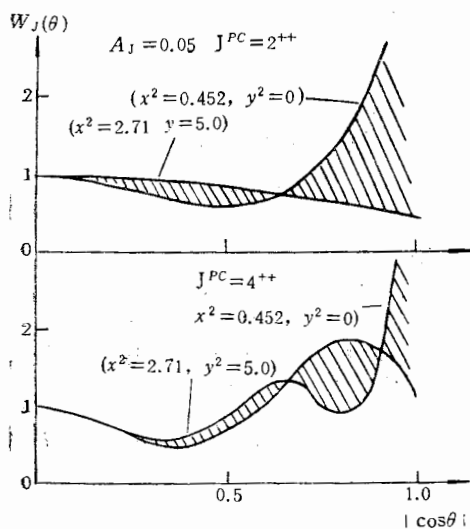


图4 $A_J = 0.05$, (x^2, y^2) 取值从 $(0.452, 0) \rightarrow (2.71, 5.0)$, $J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 的赝标介子的角分布区域

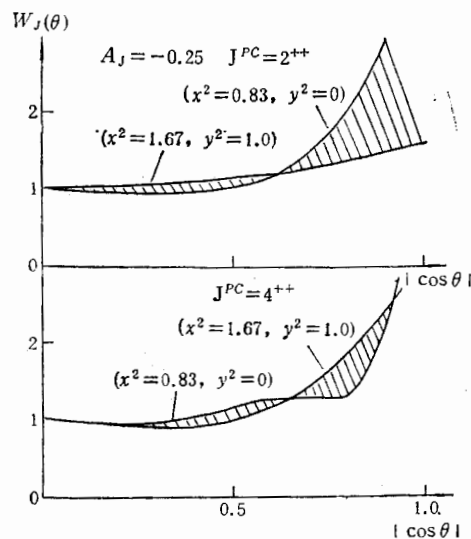


图5 $A_J = -0.25$, (x^2, y^2) 取值从 $(0.83, 0) \rightarrow (1.67, 1.0)$, $J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 的赝标介子的角分布区域

θ/f_2	$x = -1.07 \pm 0.16$	$y = -1.09 \pm 0.15$	
$\xi(J=2)$	$x = -0.67 \pm \begin{matrix} 0.14 \\ 0.16 \end{matrix}$	$y = 0.13 \pm \begin{matrix} 0.21 \\ 0.19 \end{matrix}$	
$\xi(J=4)$	$x = 1.29 \pm \begin{matrix} 0.62 \\ 0.30 \end{matrix}$	$y = 0.4 \pm \begin{matrix} 0.76 \\ 0.39 \end{matrix}$	(23)

手

定
(
身在
图
身
影

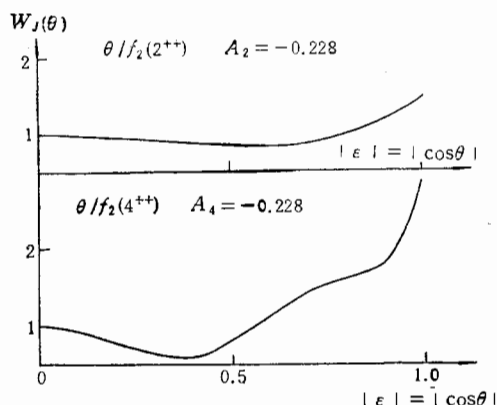


图 6 对 $\theta/f_2, x = -1.07, y = -1.09, J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 的赝标介子的角分布

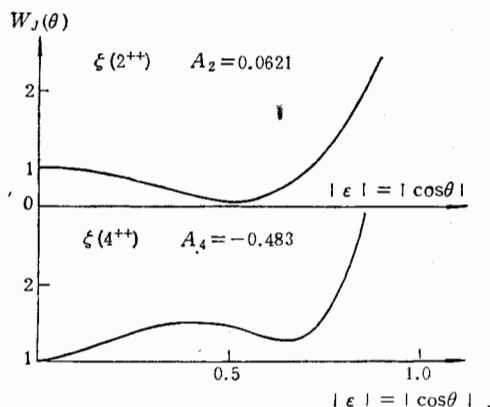


图 7 对 $\xi(2^{++}), x = -0.67, y = 0.13$ 和 $\xi(4^{++}), x = 1.29, y = 0.4$ 的赝标介子的角分布.

我们可以利用这些结果作一逆向分析. 略去这些值的误差, 把它们代入方程(8), 得到

	A_2	A_4	
θ/f_2	-0.0228	-0.0228	
$\xi(J = 2)$	0.0621		
$\xi(J = 4)$		-0.483.	(24)

这里我们假设 $\theta/f_2(1720)$ 的自旋可能是 2 或者 4. 值得注意的是, 对 $\xi(2230)$ 有两组 (x, y) 值, 它们对应的 A_2 和 A_4 的差别非常大, 显然是因为 J/ψ 辐射衰变产生的 $\xi(2230)$ 事例太少, 以致误差太大.

略去(23)式中各值的误差, 代入方程(9)、(10)和(11)中, 我们可得到赝标介子的角分布. 对 $\theta/f_2(1720), J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} 如图 6 所示, 对 $\xi(2230), J^{PC} = 2^{++}$ 和 4^{++} , 如图 7 所示. 正如我们所担心的, 它们都落入不敏感区. 即通过以上逆向分析可知, 现有的实验数据对于判别 θ/f_2 和 ξ 的自旋是 2 还是 4 是不够充分的. 为了确定 B 粒子的自旋, 除了要求积累更多的实验数据之外, 有必要寻求新的分析方法. 我们对矩分析法^[9]进行

推广,得到了一个可能的确定 $\xi(2230)$ 的自旋的新的方法^[10]. 当然, 积累更多的实验数据总是重要的. 如果北京正负电子对撞机正常工作, 就有可能获得更多的数据, 其结果将会十分令人感兴趣.

参 考 文 献

- [1] M. Jacob and G. C. Wick, *Ann, Phys.* (N. Y.) 7(1959), 404;
S. U. Chung, *Phys. Rev.* 169(1968), 1342;
P. K. Kabir and A. J. G. Hey, *Phys. Rev.*, D13(1976), 3161;
T. L. Trueman, *Phys. Rev.*, D18(1978), 3423;
Shen Qi-xing et al., *Physica Energiac Fortis Et Physica Nuclearis*, 8(1984), 573.
- [2] Gao Chong-shou et al., *Proceedings of the workshop on colliding beam physics*" (1984), 243;
Zhao Pei-ying et al., *Acta Physics Sinica*, 26(1977), 16.
- [3] R. Brandelik et al., *Zeit. Phys.*, C1(1979), 233.
- [4] G. Alexander et al., *Phys. Lett.*, 72B(1978), 493 and 76B(1978), 652.
- [5] M. E. B. Franklin Ph. D Thesis SLAC-254 (1982).
- [6] C. Edwards et al., *Phys. Rev. Lett.*, 48(1982), 458.
- [7] K. F. Einsweiler, Ph. D Thesis, SLAC-278 (1984);
D. Hitlin, *Proc. Int. Symp. Lepton and Photon Interactions*, Cornell, 1983.
- [8] G. Eigen, CALT-68-1483.
- [9] S. U. Chung, *Phys. Rev.*, 169(1968), 1342.
- [10] Hong Yu BIHEP-TH-88-19. 郁宏, *高能物理与核物理*, 13(1989), 87.

THE ANGULAR DISTRIBUTION FOR THE PROCESS $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 + P_2$ AND THE SPIN ANALYSIS OF B

YAN WUGUANG YU HONG

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

ABSTRACT

This paper gives the relation between the helicity formalism(HF) and the effective interaction formalism (EIF) for the process $e^+e^- \rightarrow J/\psi \rightarrow \gamma B, B \rightarrow P_1 P_2$. The angular distributions of the pseudoscalar meson for different spin ($J=2, 4$) of B indicate that there exist sensitive and insensitive regions to determine the spin of B . Unfortunately the data of θ/f_2 (1720) and ξ (2230) just fall into the insensitive region.