

ψ' 衰变中 VP 和 PP 模式的事例产生器*

叶树伟¹⁾ 赵家伟 陈宏芳 张子平

(中国科技大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 在北京谱仪(BES)原有模拟程序框架下,建立了适用于 J/ψ , ψ' 衰变到 VP 和 PP 模式、以及 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 而后 J/ψ 衰变到 VP 和 PP 模式的事例产生器,考虑了相应的角分布,为 J/ψ , ψ' 物理的研究提供了方便,在 $\psi' \rightarrow \gamma\eta, \gamma\eta', \omega\pi^0, \pi^+ \pi^-, K^+ K^-$ 等分支比的测量中,这一事例产生器可用于选择效率的确定和本底估计.

关键词 事例产生器 角分布 VP 和 PP 模式 ψ' 衰变 北京谱仪

1 引言

事例产生器是根据具体的粒子反应过程,模拟产生粒子反应事例末态的信息,包括粒子的类型、动量和方向,以便对该过程进行研究.因此,事例产生器应尽可能真实地反映对应物理过程的实际情况.它的重要性在于,正确地描述了一个反应过程的事例产生器给出的事例末态,经过探测器蒙特卡罗模拟后产生的数据,是估计该反应在该探测器中事例选择效率的重要方法,有时甚至是唯一实际可行的方法.例如,在北京谱仪(BES)^[1]实验中,对于 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 过程,利用一组事例判选条件,包括要求 $|\cos \theta| < 0.7$,来选择这类事例,其选择效率为 87.8%,但采用简单相空间产生器 HOWL 给出的效率为 70.0%,两者相差较大,原因是 HOWL 没有正确地反映该反应的角分布.目前 BES 还没有普适的、包括 J/ψ 和 ψ' 所有衰变道的产生器,只有某些特定反应道,如 $\rho\pi, K^+ K^-$ 等,或部分过程 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ (包括了 $\pi^+ \pi^-$ 的角分布)的产生器.但是, ψ' 许多重要的 VP 和 PP 模式的衰变过程,如 $\psi' \rightarrow \pi^0 \omega (\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0)$, $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 或 $\psi' \rightarrow K^+ K^-$,都没有对应的产生器.另外在相应的本底研究中,需要考虑更多的过程,尤其是 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 或 $\psi' \rightarrow$ neutrals J/ψ 而后 J/ψ 衰变到各道.虽然有简单相空间产生器 HOWL,但这对选择效率和本底的估计会引入附加的系统误差.因此,有必要编写能正确描述角分布、简单可靠且普适于所有 VP 和 PP 模式的衰变过程的产生器.

1999-02-01 收稿

* 国家自然科学基金(19675033)和北京正负电子对撞机国家实验室资助项目

1) E-mail: yesw@ustc.edu.cn

2 ψ' 衰变到 VP 和 PP 模式的角分布

2.1 VP 过程的角分布

对于 $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow V_1 P_1$ 或 $e^+e^- \rightarrow \psi \rightarrow V_1 P_1$ (这里 ψ 表示 J/ψ 和 ψ' , 下同), 即末态为矢量介子和赝标介子的过程且 V_1 不衰变, 两者都有相同且唯一确定的角分布^[2,3,4]: $1 + \cos^2 \theta_v$. 如果矢量介子 V_1 继续衰变为两个赝标介子 PP 或 3 个赝标介子 PPP, 则有角分布: $\sin^2 \theta_1 (1 + \cos^2 \theta_v + \sin^2 \theta_v \cos 2\phi_1)$. 如果来自 γ^* 或 ψ 的赝标介子 P_1 也继续衰变成 $V_2 V_3$, 并且其中 $V_3 \rightarrow P_2 P_3$, 则以上角分布乘上 $\sin^2 \theta_2$. 也就是说, 总体角分布 $WTANG = WTANG_v \times WTANG_p$, 其中

$$WTANG_v = \begin{cases} 1 + \cos^2 \theta_v & \text{如果 } V_1 \text{ 不衰变} \\ \sin^2 \theta_1 (1 + \cos^2 \theta_v + \sin^2 \theta_v \cos 2\phi_1) & \text{如果 } V_1 \rightarrow \text{PP 或 PPP,} \end{cases}$$

这里, θ_v 是 V_1 的极角, θ_1 和 ϕ_1 是 $V_1 \rightarrow \text{PP}$ 过程的一个赝标介子在 V_1 静止系中, 以 V_1 的螺旋度坐标系表示的极角和方位角. 在 $V_1 \rightarrow \text{PPP}$ 中, θ_1 和 ϕ_1 则分别是 V_1 的衰变平面法线在 V_1 静止系中以 V_1 螺旋度坐标系表示的极角和方位角.

$$WTANG_p = \begin{cases} \sin^2 \theta_2 & \text{如果 } P_1 \rightarrow V_2 V_3 (\rightarrow P_2 P_3) \\ 1.0 & \text{如果 } P_1 \text{ 不发生一次以上级联衰变,} \end{cases}$$

这里, θ_2 是赝标介子 P_2 或 P_3 在 V_3 静止系中以 V_3 动量方向为 z 轴的极角.

2.2 PP 过程的角分布

$e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{PP}$ 或 $e^+e^- \rightarrow \psi \rightarrow \text{PP}$ 即两个赝标介子, 这两个过程角分布完全相同, 为 $\sin^2 \theta$ ^[4,5], 其中 θ 是衰变产物赝标介子的极角. 如 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 或 $\psi' \rightarrow K^+ K^-$ 就是这种过程.

3 事例产生器的实现

BES 已经安装了简单相空间的产生器 HOWL, 并且为用户提供了修正事例抽样权重的因子. 因此, 可以用 HOWL 来首先产生简单相空间的事例, 计算出该类事例相应角分布的权重因子, 然后在 HOWL 的最终抽样(对产生事例根据权重随机地进行取舍)中乘上这一考虑了角分布的权重因子.

在末态($V_1 \rightarrow \text{PP}$ 或 PPP)的 $WTANG_v$ 计算中, 需要确定角度 θ_1 和 ϕ_1 . V_1 的螺旋度坐标系规定为: 将 V_1 的方向作为 z' 轴方向, $z \times z'$ 作为 y' 轴方向, 而 x' 轴方向则为 $y' \times z'$, 其中 z 为实验室系中的 z 轴方向.

设矢量介子 V_1 的动量 p_v 方向角为 (θ_v, ϕ_v) , 那么沿 p_v 方向的单位向量 n_v 为:

$$n_v = \sin \theta_v (\cos \phi_v i + \sin \phi_v j) + \cos \theta_v k = k',$$

这里 i, j 和 k 分别是实验室系中沿 x, y 和 z 轴方向的单位向量.

另设 i', j', k' 为 V_1 衰变的螺旋度坐标系中沿 x', y', z' 轴方向的单位向量. 而 $k \times k' = \sin \theta_V [\cos \phi_V j - \sin \phi_V i]$, 它的单位向量为 j' , 即 $j' = -\sin \phi_V i + \cos \phi_V j$. 那么

$$i' = j' \times k' = [-\sin \phi_V i + \cos \phi_V j] \times [\cos \theta_V (\cos \phi_V i + \sin \phi_V j) + \sin \theta_V k] = \cos \theta_V (\cos \phi_V i + \sin \phi_V j) - \sin \theta_V k .$$

于是,

$$\begin{cases} i' = \cos \theta_V \cos \phi_V i + \cos \theta_V \sin \phi_V j - \sin \theta_V k , \\ j' = -\sin \phi_V i + \cos \phi_V j , \\ k' = \sin \theta_V \cos \phi_V i + \sin \theta_V \sin \phi_V j + \cos \theta_V k . \end{cases} \quad (1)$$

有了 i', j', k' 与 i, j, k 之间的变换公式(1), 在两个坐标系中的动量转换就很简单, 从而可以很方便地求得 θ_1 和 ϕ_1 .

作为检验, 利用以上考虑角分布的产生器产生了 $\psi' \rightarrow \pi^0 \omega (\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0)$ 过程 ($\psi' \rightarrow V_1 P_1, V_1 \rightarrow PPP$) 和 $\psi' \rightarrow \gamma \eta' (958) (\rightarrow \gamma \rho, \rho \rightarrow \pi^+ \pi^-)$ 过程 ($\psi' \rightarrow V_1 P_1, P_1 \rightarrow V_2 V_3 \rightarrow P_2 P_3$) 的蒙特卡罗事例.

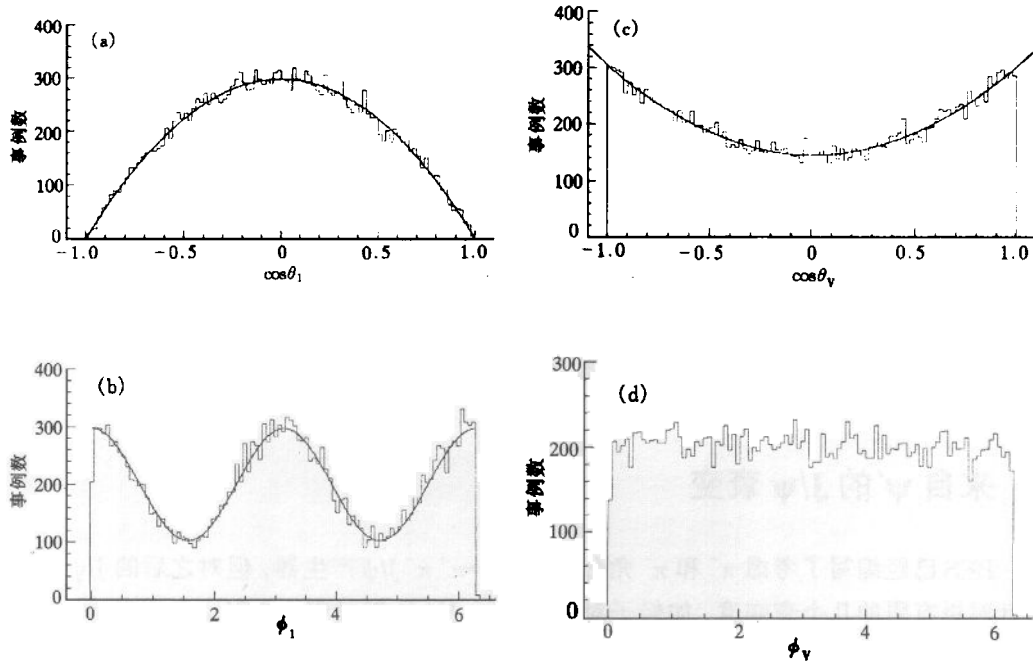


图1 $\psi' \rightarrow \omega \pi^0$ 蒙特卡罗模拟中的角度分布

(a) θ_1 分布; (b) ϕ_1 分布; (c) θ_V 分布; (d) ϕ_V 分布. ($\theta_1, \phi_1, \theta_V, \phi_V$ 的含义见正文).

对于 $\pi^0 \omega (\rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0)$ 过程, 它的 θ_1 符合 $\sin^2 \theta_1$ 分布(图1(a)), ϕ_1 符合 $2 + \cos 2\phi_1$ 分布(图1(b)), θ_V 符合 $1 + \cos^2 \theta_V$ 分布(图1(c)), ϕ_V 为均匀分布(图1(d)), 全部与预期的一致. 因为在角分布 $\sin^2 \theta_1 (1 + \cos^2 \theta_V + \sin^2 \theta_V \cos 2\phi_1)$ 中, 对 θ_V 和 ϕ_1 积分, 留 θ_1 , 则成为 $A_1 \times \sin^2 \theta_1$; 对 θ_1 和 θ_V 积分, 留 ϕ_1 , 则为 $B_1 \times (2 + \cos 2\phi_1)$; 对 θ_1 和 ϕ_1 积分, 留 θ_V ,

则有 $A_V \times (1 + \cos^2 \theta_V)$, 其中 A_1 , B_1 和 A_V 都是常数.

对于 $\gamma\eta'(958) \rightarrow \gamma\rho$ 过程, 来自 ψ' 的 γ 的 θ_γ 符合 $1 + \cos^2 \theta_\gamma$ 分布(图 2(a)), 而 π 在 ρ 静止系中的 θ_π 符合 $\sin^2 \theta_\pi$ 分布(图 2(b)), 与预期的一致.

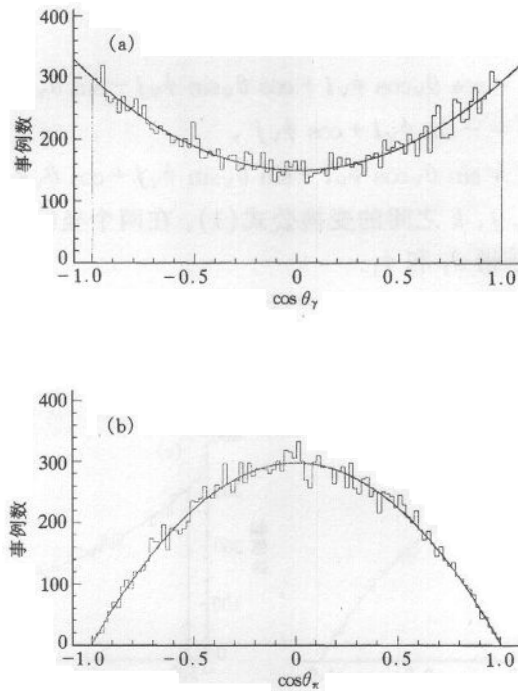


图 2 $\psi' \rightarrow \gamma\eta'(958) \rightarrow \gamma\rho, \rho \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 蒙特卡罗模拟中的角度的分布
(a) θ_γ 分布; (b) θ_π 分布. ($\theta_\gamma, \theta_\pi$ 的含义见正文).

4 来自 ψ' 的 J/ψ 衰变

BES 已经编写了考虑 π^+ 和 π^- 角分布的 $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi$ 产生器, 但对之后的 J/ψ 衰变, 仅针对极有限的几个衰变道, 如轻子对 $l^+ l^-$, $\rho\pi$, $K^* K$ 等过程. 编写了各自独立的子程序, 不能普遍地产生 J/ψ 的任意衰变过程. 为此, 编写了相应的产生器, 使之能调用简单相空间分布的模拟程序 HOWL 产生 J/ψ 的各种可能衰变, 并且对 J/ψ 到 VP 模式和 PP 模式的衰变, 考虑了相应的角分布. 这样, 就不必专门地为各特定道而分别编写程序. 因此, 为研究在 ψ' 衰变中来自 $\psi' \rightarrow X + J/\psi$ 而后 J/ψ 衰变的各类本底提供了可能和方便.

5 应用和总结

VP 和 PP 模式在 J/ψ 和 ψ' 衰变中占很大部分, 对它们的研究是 J/ψ 物理和 ψ' 物理的重要内容. 本文所述的事例产生器为这些研究提供了方便. 在北京谱仪的 $\psi' \rightarrow \gamma\eta, \gamma\eta'^{[6]}$,

$\omega\pi^0$, $\pi^+\pi^-$, K^+K^- 等分支比测量及其它 J/ψ 物理和 ψ' 物理的物理分析中, 都已经采用了这一事例产生器, 用来准确确定选择效率和估计本底.

这一事例产生器的主要思想是: 将密度函数或权重因子分成独立的几部分, 分别对之抽样, 来简化抽样、提高效率. 对于 J/ψ 和 ψ' 其它模式的衰变过程的事例的产生, 也可以类似地实现.

在角分布的计算过程中, 得到中国科学院高能物理研究所张达华研究员的许多帮助, 在此表示感谢.

参考文献(References)

- 1 DING HuiLiang et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1992, **16**:769—789
(丁慧良等. 高能物理与核物理, 1992, **16**:769—789)
- 2 Coffman D et al. Phys. Rev., 1988, **D38**:2695
- 3 Baltrusaitis R M et al. Phys. Rev., 1985, **D32**:2883
- 4 YE ShuWei. PhD. Dissertation, University of Science and Technology (in Chinese), 1997
(叶树伟. 中国科技大学博士论文, 1997)
- 5 Brodsky S J. Exclusive Process in Quantum Chromodynamics, SLAC-PUB-4947, Mar. 1989
- 6 BAI J Z et al (BES Collab.). Phys. Rev., 1998, **D58**:097101

Event Generator for ψ' Decays of VP and PP Modes*

YE ShuWei¹⁾ ZHAO JiaWei CHEN HongFang ZHANG ZiPing

(Department of Modern Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract A convenient generator, based on the existing framework of BES simulation, applicable generally to both ψ' and J/ψ decays of VP and PP modes, is established. The corresponding angular distribution is taken into account. A similar generator is also established for the successive J/ψ decay in the process of $\psi' \rightarrow X + J/\psi$. In the measurement of branching ratios for $\psi' \rightarrow \gamma\eta$, $\gamma\eta'$, $\omega\pi^0$, $\pi^+\pi^-$, K^+K^- , this generator is used to determine the selection efficiency and estimate the background.

Key words event generator, angular distribution, VP and PP modes, ψ' decays, Beijing spectrometer (BES)

Received 1 February 1999

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (19675033) and BEPC National Laboratory

1) E-mail: yesw@ustc.edu.cn