

北京谱仪上 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0, \gamma\eta, \gamma\eta' \rightarrow 3\gamma$ 衰变道的分支比测量*

BES 合作组

白景芝	卞建国	柴正维	陈光培	陈宏芳 ¹	陈江川
陈少敏	陈雅清	陈宇	陈元柏	程宝森	崔象宗
丁慧良	杜志珍	范晓舲	方建	高翠山	高美丽
高树琦	顾建辉	顾树棣	顾维新	顾以藩	过雅南
韩世温	韩纓	何景棠	何炬	何瑁 ²	胡贵云
胡敬亮	胡琼辉	胡涛	胡晓庆	黄秀萍	黄因智
姜春华	金山	金艳	康书辉	柯尊建	赖元芬
兰慧彬	郎鹏飞	李金	李佩琴	李群	李如柏
李蔚	李卫东	李卫国	李新华	李小南	林树子
刘怀民	刘靖	刘经华	刘琦	刘荣光	刘延
刘振安	吕峰	吕军光	鲁建业	罗栓群	罗勇
马爱民	马恩成	马基茂	毛慧顺	毛泽普	孟祥承
倪蕙苓	聂晶	漆纳丁	屈云河	邱进发	阙友昆
荣刚	邵毓莺	沈本蔚	沈定力	沈红	沈肖雁
盛华义	史焕章	宋晓非	孙舫	孙汉生	孙式军
谈益平	唐素秋	田建玲	童国梁	王锋	王菊芳
王临洲	王灵淑	王曼	王萌	王佩良	王平
王少敏	王泰杰	王运永	魏诚林	吴义根	席德明
夏小米	谢佩佩	熊伟军	许国发	许榕生	徐芷菁
薛生田	颜洁	严武光	杨长友	杨春敏	杨杰
杨晓峰	叶铭汉	叶诗章	叶树伟 ¹	易凯	于传松

* 国家自然科学基金资助.

喻纯旭	余志堂	郁忠强	苑长征	张炳云	张长春
张达华	张德红	张会领	张 建	张家文	张 霖
张良生	张勤俭	张少强	张学尧 ²	张 羽	张月元
赵棣新	赵海文	赵京伟	赵 萌	赵维仁	郑建平
郑林生	郑志鹏	周光谱	周化十	周 莉	周月华
朱国义	朱启明	朱永生	祝玉灿	庄保安	

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

2(山东大学物理系 济南 250100)

1996-10-08 收稿

摘 要

分析 J/ψ 衰变终态为三个光子的衰变道, 测量得到了衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 的分支比分别为 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0) = (4.6 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ 和 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') = (4.12 \pm 0.82) \times 10^{-3}$; 相对分支比 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta) = 4.79 \pm 0.85$, 在实验误差范围内与两个理论模型的预言都能一致.

关键词 J/ψ , 辐射衰变, 三光子末态, 分支比.

北京正负电子对撞机(BEPC)上的北京谱仪(BES)^[1]自1989年运行以来采集了四批 J/ψ 数据, 北京谱仪实现了中性触发, 能获取衰变终态都是光子的事例. 在四批 J/ψ 数据中实现中性触发的约有 700 万事例, 在线记录的总积分亮度为 3.67pb^{-1} , 我们对 J/ψ 辐射衰变到三个光子终态的衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0, \gamma\eta, \gamma\eta' \rightarrow 3\gamma$ 进行了分析, 测量了衰变道的分支比 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0)$ 和 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')$ 以及相对分支比 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)$.

北京谱仪是一台大型通用磁谱仪, 主要的子探测器有中心漂移室(CDC)、主漂移室(MDC)、飞行时间计数器(TOF)、簇射计数器(SC)和 μ 子鉴别器. J/ψ 的中性衰变产物光子主要由 BES 的桶部簇射计数器(BSC)^[2]进行测量. BSC 为取样型量能器, 由厚 0.6mm 的铝和厚 2.8mm 的铅构成吸收层, 每两吸收层之间为取样层, 每层分成 560 个单元. 由于电子学道数的限制, 将径向 24 层阳极丝合成 6 个电子学读出层. BSC 覆盖立体角为 $80\% \times 4\pi$, 利用 Bhabha 散射事例测得 BSC 的能量分辨率 $\Delta E / E = 22\% / \sqrt{E}$, z 向位置分辨 $\sigma_z = 3.6\text{cm}$, ϕ 向角分辨 $\sigma_\phi = 7.9\text{mrad}$. 对于 50MeV 的光子, 探测效率为 65%. 对于 100MeV 以上的光子, 探测效率为 100%.

在 BES 数据获取过程中, 触发判选系统^[3]对事例进行实时快速选择, 尽可能多地排

除本底, 保留真正的物理事例. 中性事例的触发判选条件主要有四个:

- (1) 主漂移室没有带电径迹.
- (2) BSC 中沉积的能量超过高阈(相当于 0.95GeV).
- (3) BSC 的径向楔形(由相邻两单元构成)中沉积的能量超过阈限.
- (4) μ 子鉴别器内层击中反符合, 以排除宇宙线本底.

1 理论预言

用一阶 QCD 微扰计算 $J/\psi \rightarrow \gamma P$ (P 为赝标介子) 的衰变宽度^[4]为:

$$\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma P) = \frac{1}{6} \left(\frac{2}{3} \right)^2 \alpha_s^4 \alpha Q_c^2 \frac{1}{M_\psi^3} \left(\frac{4R_\psi(0)}{\sqrt{4\pi M_\psi}} \right)^2 \left(\frac{4R_P(0)}{\sqrt{4\pi M_P}} \right)^2 x |H^P(x)|^2, \quad (1)$$

其中 α_s 为夸克和胶子的耦合常数, $R_\psi(0)$ 、 $R_P(0)$ 分别是 J/ψ 粒子和质量为 M_P 的赝标介子在原点的波函数, Q_c 是 c 夸克的电荷, $H^P(x)$ 是赝标介子约化螺旋度振幅, $x = 1 - (M_P/M_\psi)^2$. 对于衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$, $x |H^P(x)| \approx 55$, $R_\psi(0)$ 、 $R_P(0)$ 可以通过 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 和 $P \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变宽度的实验测量值计算, 最后得到 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') = 213\text{eV}$.

根据矢量为主模型^[5], 光子和强子的相互作用都是通过光子转化成矢量介子, 矢量介子再与其它强子相互作用. $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0$ 的顶点可以看作由 $J/\psi \rightarrow \rho^0\pi^0$ 的顶点和 $\rho^0 \rightarrow \gamma$ 的顶点连接而成, 由矢量为主模型计算得到 $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0) \approx 1\text{eV}$.

η 、 η' 属于味 $SU(3)$ 九重态的基本粒子, 物理性质相近, 但是在 J/ψ 的辐射衰变中 η' 却有更高的产额. 国外实验组 Crystal Ball^[6] 测得 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 的衰变宽度之比很大. 这一实验结果按 η 、 η' 由 u 、 d 、 s 夸克组成这一传统观点难以很好解释. 同时到目前为止, 实验上并不能排除 η 、 η' 中除 u 、 d 、 s 夸克之外还有少量的其它成份 ($c\bar{c}$ 成份或胶子球成份) 存在的可能性. 为解释这一实验事实, 理论上提出了一些属于 QCD 理论范畴的赝标介子混合模型. 这样的模型主要有两类, η 、 η' 、 η_c 混合模型^[7] 认为 η 、 η' 波函数中混有少量的 η_c 成份 (即 $c\bar{c}$ 成份), η' 比 η 更接近 $SU(3)$ 单态, 因而比 η 有更多的 $c\bar{c}$ 成份, 所以在 J/ψ 的辐射衰变中有更高的产额. 考虑 η 、 η' 、 η_c 的混合, $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 、 $\gamma\eta'$ 衰变的主要贡献来自 η 、 η' 中的 $c\bar{c}$ 分量, 理论上给出两个衰变道的宽度之比 $\Gamma(\gamma\eta')/\Gamma(\gamma\eta) \approx 3.9$. η 、 η' 、 $\iota(1440)$ 混合模型^[8] 假定 $\iota(1440)$ 是一个主要成份为胶子球的 0^-+ 介子, 它可以和 η 、 η' 混合, 考虑过程几率贡献来自 η 、 η' 中胶子球分量, 该模型给出 $\Gamma(\gamma\eta')/\Gamma(\gamma\eta) = 5.1$. 如果实验能精确测定 $\Gamma(\gamma\eta')/\Gamma(\gamma\eta)$ 值, 就能对 η 、 η' 组成成份以及相应的 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 衰变机制有更深入的了解.

2 实验分析

北京谱仪在线获取的四批 J/ψ 数据经过离线过滤、重建、分类三个步骤得到零叉

样本(重建后,主漂移室中没有荷电径迹),零事例样本中包含大量本底.通过中性事例的初选产生中性事例的初选样本,用于物理分析.中性事例的初选条件有: MDC 击中数小于 10; μ 子鉴别器击中数小于 8; BSC 中的中性径迹数为 3 至 8; 每个事例在 BSC 中沉积的能量为 2.0GeV 至 4.0GeV; 由 BSC 测得的每个事例在实验室系的动量小于 1.0GeV. 经过事例初选,去除了含有带电径迹的事例,也排除了一些丢失部分中性径迹的中性事例.

在初选中性事例样本基础上,进一步筛选出反应终态产物为三个光子的物理事例,主要的事例选择标准有:

(1) 每个事例有三根满足以下条件的中性径迹: 每根中性径迹在 BSC 中沉积的能量大于 0.15GeV; $|\cos\theta| < 0.8$, θ 为光子出射方向和束流方向的夹角; 每根径迹在 BSC 中有两层以上击中,起始击中层为前三层. 蒙特卡罗研究表明能量为 E_1 、 E_2 的两根中性径迹靠得很近, $|\Delta\theta| + |\Delta\phi| < 8^\circ$, 同时其中之一能量很小, $E_1 < 0.2 \times (E_1 + E_2)$, 这两根径迹很可能来源于同一光子形成的簇射团. 在径迹挑选时,对这种能量为 E_1 的低能径迹不予选择.

(2) 要求所选择的三根径迹的径迹拟合方向和光子的出射方向的偏差小于 16° .

(3) 为了排除反应终态为 5γ 和 7γ 事例因丢失部分径迹而混入的本底,要求每个事例在 BSC 中沉积的总能量大于 2.4GeV; 三根中性径迹满足共面性要求 $|n_1 \cdot (n_2 \times n_3)| < 0.06$, n_1 、 n_2 、 n_3 是表示光子出射方向的三个单位矢量.

(4) 要求中性径迹间的最小夹角大于 6° , 以进一步排除 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 本底. 蒙特卡罗模拟表明最小夹角的要求对 π^0 共振峰没有影响,对 η 、 η' 峰更无影响.

(5) 满足上述选择条件的物理事例进行 4C 运动学拟合,即根据中性径迹的能动能量和误差矩阵,在反应初、末态能动能量守恒的约束下,用最小二乘法求出能动能量的最佳估计值. 要求 4C 拟合的 $\chi^2 < 14$.

利用运动学拟合得到的光子能动能量,分别求两个低能光子的不变质量 M_{low} 和两个高能光子的不变质量 M_{high} 作 Dalitz 图(图 1). 将 $M_{high} < 2.8\text{GeV}$ 的事例的两个低能光子作不变质量谱(图 2). 在 Dalitz 图和不变质量谱中,都能清晰地观察到 π^0 、 η 、 η' 三个共振态.

粒子衰变产物的不变质量服从 Breit-Weigner 分布(原分布),但测量误差的存在造成原分布畸变,实验分布可以表示成原分布与探测器质量分辨函数的卷积. 由中心极限定理,可用一高斯函数表示探测器的分辨. 对于衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0$ 、 $\gamma\eta$ 、 $\gamma\eta' \rightarrow 3\gamma$, π^0 、 η 、 η' 的共振峰都很窄,质量分辨函数与原分布相比非常宽,原分布可近似为 δ 函数,因而可以用高斯函数对三个共振峰进行拟合. 用最大似然法拟合不变质量谱时,考虑实际本底的形状,采用三个高斯函数和一次多项式来构造似然函数,对不变质量谱 0.04GeV 至 1.24GeV 区域进行拟合,得到共振峰 π^0 、 η 、 η' 内事例数和各自的质量(表 1). 测得的 π^0 、 η 、 η' 质量和 PDG 公布的数据^[9] 在实验误差范围内完全一致.

实现中性触发的 J/ψ 数据总量可以利用衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$ 按下页式(2)计算.

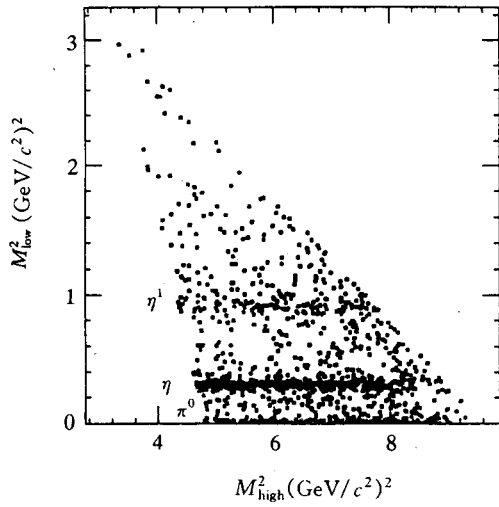


图1 Dalitz 图

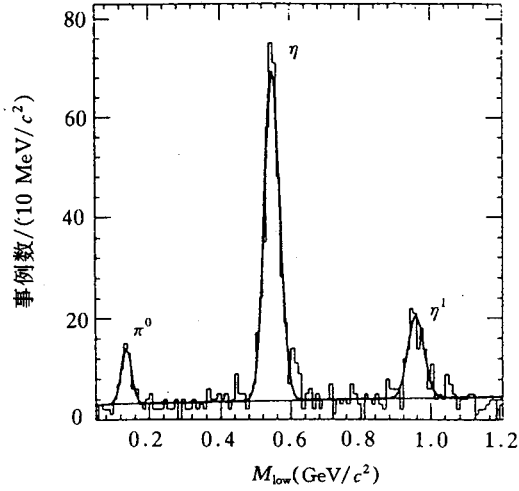


图2 两个低能光子的不变质量谱

表1 两个低能光子的不变质量谱的拟合结果

	π^0	η	η'
事例数	40 ± 8	361 ± 17	99 ± 13
质量(GeV)	0.137 ± 0.003	0.548 ± 0.001	0.958 ± 0.003

$$N_{J/\psi} = \frac{N_\eta}{\varepsilon \times Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta) \times Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma)}, \quad (2)$$

式中 N_η 是拟合区间内共振峰 η 所包含的事例数目, $N_\eta = 361 \pm 17$; ε 是选择 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta \rightarrow 3\gamma$ 事例的效率(接受度), 通过蒙特卡罗计算 $\varepsilon = 14.9\%$, ε 的相对误差为 6.2%; PDG 给出 $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta) = (8.6 \pm 0.8) \times 10^{-4}$, $Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma) = (39.25 \pm 0.31) \times 10^{-2}$, $Br(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$ 的测量相对误差只有 1%, 在 $N_{J/\psi}$ 误差估计时可以不考虑它的贡献. 其余三个物理量来自不同的测量过程, 相互间完全独立. 通过误差传递公式算出事例总数的相对误差为 12.2%, 根据式(2)实现中性触发的 J/ψ 事例总数为 $(7.18 \pm 0.87) \times 10^6$.

经过蒙特卡罗模拟计算, 衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0 \rightarrow 3\gamma$ 事例选择效率为 12.3%, 衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta' \rightarrow 3\gamma$ 的事例选择效率为 15.8%, 它们各自的相对误差分别为 5.7% 和 6.6%. 根据以上求出的 J/ψ 总数和 PDG 给出的 $Br(\eta' \rightarrow \gamma\gamma)$ 和 $Br(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$ 值, 得到两个衰变道的分支比为:

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0) = (4.6 \pm 1.1) \times 10^{-5};$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') = (4.12 \pm 0.82) \times 10^{-3},$$

分别和 PDG96 的值 $(3.9 \pm 1.3) \times 10^{-5}$ 和 $(4.31 \pm 0.30) \times 10^{-3}$ 在误差范围内相符合.

$J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 之间的相对衰变宽度不依赖于 J/ψ 总数, 只由两个衰变道的事例数和事例选择效率决定:

$$\frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)} = 4.79 \pm 0.85 .$$

同样可得

$$\frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0)}{\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta)} = 0.053 \pm 0.012 .$$

3 结果讨论

在 BES 获取的约 700 万实现中性触发的 J/ψ 事例中, 筛选出反应终态为三个光子的纯中性事例, 在不变质量谱中看到清晰的 π^0 、 η 、 η' 信号. 测量 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 衰变道的分支比为 $(4.12 \pm 0.82) \times 10^{-3}$, 即衰变宽度为 $358 \pm 75 \text{eV}$, 和一阶 QCD 微扰计算符合; 衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0$ 的分支比为 $(4.6 \pm 1.1) \times 10^{-5}$, 即衰变宽度为 $4.0 \pm 1.0 \text{eV}$, 与矢量为主模型相差较大.

在 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta$ 的末态为 3γ 的衰变道中, 观察到 η' 的产额要比 η 高许多, η 、 η' 、 η_c 混合模型和 η 、 η' 、 $\iota(1440)$ 混合模型给出的两个衰变道的宽度比分别为 3.9 和 5.1, 在实验误差范围内, 我们的实验结果和两种模型的预言都能一致, 在现有的实验精度下仍无法检验两种模型的正确性. 由于 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 的衰变几率很大 (39.25%), 而 $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ 的衰变几率相对较小 (2.12%), 如果利用 $\eta' \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ 、 $\eta' \rightarrow \gamma\rho^0$ 等几个分支比较大的 η' 的衰变道来测量将能进一步减小误差.

参 考 文 献

- [1] 丁慧良等, 高能物理与核物理, **16**(1992)769.
- [2] 周月华等, 高能物理与核物理, **13**(1989)973.
- [3] 过雅南、郁忠强等, 高能物理与核物理, **14**(1990)1057.
- [4] M. Krammer *et al.*, *Nucl. Phys.*, **B229**(1983)115.
- [5] T. F. Walsh, *Nuovo. Cim Lett.*, **14**(1975)290.
- [6] E. D. Bloom, G. W. Peck, *Ann. Rev. Nucl. and Part. Sci.*, **33**(1983)143.
- [7] H. Fritzsch *et al.*, *Phys. Lett.*, **B66**(1977)365.
- [8] 郁 宏, 高能物理与核物理, **12**(1988)754.
- [9] R. M. Barnett *et al.*, *Physical Review*, **D54**(1996)1.

Measurements of the Branching Ratios for the Decays

$J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0, \gamma\eta, \gamma\eta' \rightarrow 3\gamma$ at BES

BES Collaboration

Bai Jingzhi Bian Jianguo Chai Zhengwei Chen Guangpei Chen Hongfang¹
 Chen Jiangchuan Chen Shaomin Chen Yaqing Chen Yu Chen Yuanbo
 Cheng Baosen Cui Xiangzong Ding Huiliang Du Zhizhen Fan Xiaoling
 Fang Jian Gao Cuishan Gao Meili Gao Shuqi Gu Jianhui Gu Shudi
 Gu Weixin Gu Yifan Guo Yanan Han Shiwen Han Ying He Jingtang
 He Ju He Mao² Hu Guiyun Hu Jingliang Hu Qionghui Hu Tao
 Hu Xiaoqing Huang Xiuping Huang Yinzhi Jiang Chunhua Jin Shan
 Jin Yan Kang Shuhui Ke Zunjian Lai Yuanfen Lan Huibin
 Lang Pengfei Li Jin Li Peiqin Li Qun Li Rubai Li Wei Li Weidong
 Li Weiguo Li Xinhua Li Xiaonan Lin Shuzi Liu Huaimin Liu Jing
 Liu Jinghua Liu Qi Liu Rongguang Liu Yan Liu Zhenan Lü Feng
 Lü Janguang Lu Jianye Luo Shuanqun Luo Yong Ma Aimin
 Ma Encheng Ma Jimao Mao Huishun Mao Zepu Meng Xiangcheng
 Ni Huiling Nie Jing Qi Nading Qu Yunhe Qiu Jinfa Que Youkun
 Rong Gang Shao Yuying Shen Benwei Shen Dingli Shen Hong
 Shen Xiaoyan Sheng Huayi Shi Huanzhang Song Xiaofei Sun Fang
 Sun Hansheng Sun Shijun Tan Yiping Tang Suqiu Tian Jianling
 Tong Guoliang Wang Feng Wang Jufang Wang Linzhou Wang Lingshu
 Wang Man Wang Meng Wang Peiliang Wang Ping Wang Shaomin
 Wang Taijie Wang Yunyong Wei Chenglin Wu Yougeng Xi Deming
 Xia Xiaomi Xie Peipei Xiong Weijun Xu Guofa Xu Rongsheng
 Xu Zhijing Xue Shengtian Yan Jie Yan Wuguang Yang Changyou
 Yang Chunmin Yang Jie Yang Xiaofeng Ye Minghan Ye Shizhang
 Ye Shuwei¹ Yi Kai Yu Chuansong Yu Chunxu Yu Zhitang
 Yu Zhongqiang Yuan Changzheng Zhang Bingyun Zhang Changchun
 Zhang Dahua Zhang Dehong Zhang Huiling Zhang Jian Zhang Jiawen
 Zhang Lin Zhang Liangsheng Zhang Qinjian Zhang Shaoqiang
 Zhang Xueyao² Zhang Yu Zhang Yueyuan Zhao Dixin Zhao Haiwen
 Zhao Jingwei Zhao Meng Zhao Weiren Zheng Jianping Zheng Linsheng
 Zheng Zhipeng Zhou Guangpu Zhou Huashi Zhou Li Zhou Yuehua

Zhu Guoyi Zhu Qiming Zhu Yongsheng Zhu Yucan Zhuang Baoan

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

1 (*Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

2 (*Department of Physics, Shandong University, Jinan 250100*)

Received 8 October 1996

Abstract

Decays of the J/ψ resonance into the final states with three photons are investigated. Branching ratios for the decays of $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0$ and $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ are determined to be $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0) = (4.6 \pm 1.1) \times 10^{-5}$ and $Br(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') = (4.12 \pm 0.82) \times 10^{-3}$. The ratio of the two decay rates, $\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') / \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0)$, is 4.79 ± 0.85 . Within experimental errors, this value agrees well with the predictions of two theoretical models'.

Key words J/ψ , radiative decay, final state with three photons, branching ratios.