

在 BEPCII/BESIII 上寻找胶子球的 Monte Carlo 研究*

朱莹春¹⁾ 沈肖雁 郑志鹏

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 在即将建造的 BEPC II/BES III 上利用 Monte Carlo 模拟研究了 $J/\psi \rightarrow \gamma X \rightarrow \gamma \eta \eta'$ ($\eta' \rightarrow \gamma \rho^0, \rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-, \eta \rightarrow \gamma \gamma$) 过程. 研究显示 BES III 的良好性能和大统计量的 J/ψ 事例样本为寻找胶子球态的一些候选者并确认其存在提供了可能. 基于所研究的衰变道, 为 BES III 电磁量能器晶体 BGO 和 CsI 的选择及磁场强度的选择提供了数据.

关键词 胶子球 格点 QCD 蒙特卡罗模拟

1 引言

到目前为止, 理论上发展了一些基于 QCD 的唯象模型理论来预言和计算胶子球和混杂态的方法. 如: 位势模型、口袋模型^[1]、流管模型^[2]、QCD 求和规则^[3]、格点 QCD^[4] 及等效拉氏量方法等. 在这些模型中, 格点 QCD 被认为能给出较好的结果, 但非常费时. 淬灭近似下格点 QCD 预言最轻的纯胶子球是 0^{++} , 其质量在 1.5—1.7 GeV 范围, 次轻的胶子球为 2^{++} , 其质量约为 2.2 GeV^[4]. 胶子球和具有相同 J^{PC} 且质量相近的 $q\bar{q}$ 介子态的混合, 可能会改变胶球的衰变模式, 同时也为胶球的鉴别增加了难度. 基于束缚态组分胶子图像和 QCD 中的胶子反常, 理论预言^[5], 2^{++} 胶球的衰变分支比应满足 $Br(X \rightarrow \eta' \eta') \geq 0.6 Br(X \rightarrow \eta \eta')$, $Br(X \rightarrow \eta \eta') \geq 5.6 Br(X \rightarrow \eta \eta)$, $Br(X \rightarrow \eta \eta) \gg Br(X \rightarrow \pi \pi)$. 如果实验上能证实某个 2^{++} 态满足此关系, 这将为胶子球的确提供有利证据.

世界上许多实验组已经开展了大量与胶子球寻找有关的工作, 例如: 质子和质子中心产生^[6,7] (CERN-WA-091, CERN-WA-102 等), 质子和反质子湮没^[8,9] (Crystal Barrel 等), J/ψ 辐射衰变产生^[10,11], 双光子实验等, 观察到许多令人感兴趣的胶子球候选者, 如, $f_0(1500)$, $\xi(2230)$ 等.

$f_0(1500)$ 已经在很多实验中被观察到, 如: $\pi^- p$ 反应、 $p\bar{p}$ 湮没及 J/ψ 辐射衰变到 4π 末态等. 大量关于 $f_0(1500)$ 的结果来自于 Crystal Barrel 实验组对 $p\bar{p}$ 湮没到 $\pi^0 \pi^0, \eta \eta, \eta \eta', K_L K_L$ 和 $4\pi^0$ 等末态的研究. 而在胶子球被压制的 $\gamma \gamma \rightarrow K_s K_s (\pi^+ \pi^-)$ 中, 却没有观察到该态. 所有的实验事实都支持 $f_0(1500)$ 是一个非 $q\bar{q}$ 介子态.

IHEP-IISN-LANL-LAPP 实验组^[12] 在 38 GeV 的 $\pi^- p$ 实验中发现 X(1910) 衰变到 $\eta \eta'$ 的迹象, 并测得其质量和宽度分别是 $(1917 \pm 15) \text{ MeV}$ 和 $(90^{+35}_{-50}) \text{ MeV}$, 且具有量子数 $J^{PC} = 0^{++}, 1^{-+}$ 或 2^{++} , $I^G = 0^+$. 并且认为 X(1910) 或是一个胶子球态 (0^{++} 或 2^{++}) 或是一个混杂态 (1^{-+}) 或四夸克态. 然而其数据统计量并不高.

Brookhaven 实验室 A. ETKIN^[13] 等人先后对 $\pi^- p \rightarrow \phi \phi n$ 做了多次研究, 观察到 $\phi \phi$ 谱中 $\sim 2150 \text{ MeV}$ 的峰. 分波分析得到其 $I^G J^{PC} = 0^+ 2^{++}$. Crystal Barrel 实验组也看到 X(2150) 存在的迹象. 然而, X(2150) 是胶子球还是胶子球与其质量相近且具有相同量子数的普通 $q\bar{q}$ 介子态的混合, 一直还没有定论.

$\xi(2230)$ 首先由 Mark III 实验组在 $J/\psi \rightarrow \gamma K \bar{K}$ 道中被观察到. 随后, GAMS 实验组在 38 GeV 和 100 GeV 的 $\pi^- p \rightarrow \eta \eta' n$ 实验中观察到 $\eta \eta'$ 谱中 2.22 GeV 处有一窄共振结构. BES 基于 BES I 的 $7.8 \times 10^6 J/\psi$ 事

2002-10-30 收稿

* 国家自然科学基金(19991480)和中国科学院九五重大项目(KJ95T-03)资助

1) E-mail: yezhu@mail.ihep.ac.cn

例,在 $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$, $\gamma K_s^0 K_s^0$, $\gamma p \bar{p}$ 及 $\gamma \pi \pi$ 道中均观察到了 2.23 GeV 附近的共振峰. $\xi(2230)$ 在 J/ψ 辐射衰变中丰富产生、窄宽度、味对称及很小的双光子耦合都表明其可能是最轻的张量胶球候选者. 然而,在 Crystal Barrel 的遍举光子谱中未看到 $\xi(2230)$. 根据一些理论的预言^[5],如果 $\xi(2230)$ 是胶子球,其主要衰变方式可能是 $\xi(2230) \rightarrow \eta\eta'$, $\eta'\eta'$. 同时 $\xi(2230)$ 还可以衰变到 $\eta\eta$, $\pi^0\pi^0$, $\omega\omega$ 等末态. 为更好的分析这些含有多光子和双叉带电径迹的末态,不仅需要要有高统计量的数据样本,而且要求探测器有好的粒子鉴别、好的光子能量分辨等. BEPC II / BES III 正符合这一要求. 可在 BES III 中直接通过单举光子谱寻找和确认 $\xi(2230)$.

即将升级改造的 BEPC II,其设计峰值亮度是 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,运行一年预期产生 1×10^{10} J/ψ 事例数. 正是由于大统计量样本的存在和具有好的光子能量分辨、好的角度分辨等高性能 BES III 探测器的建造,为纯中性道或多光子过程的研究、利用分波分析进行胶子球候选者的寻找和确认及胶子球产生和衰变性质的系统研究提供了极有利的条件. 本文将对上述课题进行 Monte Carlo 模拟研究.

2 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ 过程的蒙特卡罗模拟

2.1 反应道的选择

BES III 探测器由主漂移室 (MDC), 飞行时间计数器 (BTOF 和 ETOF), 电磁量能器 (桶部与端盖), μ 子计数器, 磁铁组成. MDC 用于测量带电粒子的动量并提供 dE/dX 信息来做粒子鉴别. TOF 测量带电粒子的击中点位置和飞行时间, 并与 MDC 信息配合, 实现粒子鉴别, 预期时间分辨为 100ps (桶部) 和 110ps (端盖). 电磁量能器用于测量 γ 光子和电子的能量和位置信息, 其设计指标为: 在 1 GeV 处, 能量分辨 $\Delta E/\sqrt{E} = 2.5\%$, 电磁簇射位置分辨 $\sigma_{xy} = 5\text{mm}$. μ 子计数器用来探测和鉴别 μ 子.

本文采用的蒙特卡罗模拟是基于 CERN 库 Geant3.21 模拟框架, 加入设计中的 BES III 探测器的几何尺寸及物质, 事例产生器给出的粒子送入 Geant 并由之模拟粒子在探测器中的相互作用和输运, 最后得到各个粒子在探测器中的信息. 基于 BEPC II / BES III 的设计指标, 模拟了理论预言胶子球衰变分支比较大的一道 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ ($\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $\eta' \rightarrow \gamma\rho^0$, ρ^0

$\rightarrow \pi^+ \pi^-$). 选择该道进行研究的另一个原因是由于它是一个典型的多光子过程, 即有单能光子又有能量分布范围比较广的光子, 见图 1. 通过蒙特卡罗模拟可以看 BES III 探测器是否能够很好的探测到这个多光子过程.

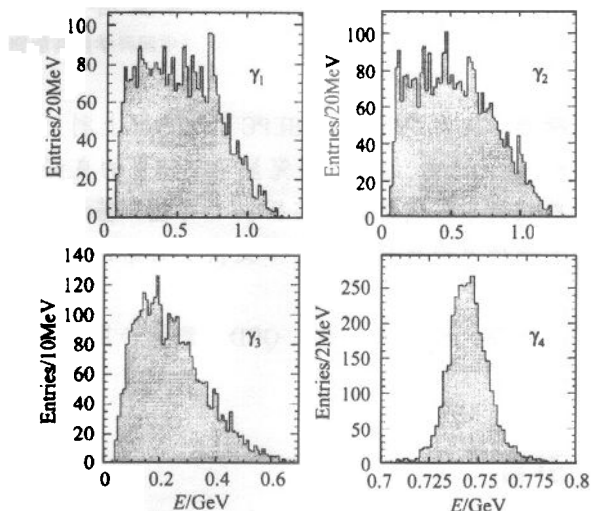


图 1 运动学拟合后的光子能量分布
 γ_1 和 γ_2 为 η 衰变出的光子, γ_3 为 η' 辐射光子, γ_4 为单能辐射光子.

2.2 事例产生与分析

在模拟中除了 $\xi(2230)$ 外, 还考虑了 $f_0(1500)$, $X(1910)$, $X(2150)$ 等在该道中可能出现的共振态及 $J/\psi \rightarrow \omega\pi^0$ ($\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) 和 $J/\psi \rightarrow \omega\eta$ ($\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) 两个主要本底. 如果 J/ψ 总数为 6×10^9 , 根据粒子数据组 (PDG2000) 给出的 Crystal Barrel, Crystal Ball 等实验组得到的分支比, 估算:

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500)) \sim 4 \times 10^{-3},$$

$$Br(f_0(1500) \rightarrow \eta\eta') \sim 2\%,$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma X(1910)) \sim 4 \times 10^{-3},$$

$$Br(X(1910) \rightarrow \eta\eta') \sim 2\%,$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma X(2150)) \sim 4 \times 10^{-3},$$

$$Br(X(2150) \rightarrow \eta\eta') \sim 1\%,$$

$$Br(J/\psi \rightarrow \gamma \xi(2230)) \sim 3 \times 10^{-3},$$

$$Br(\xi(2230) \rightarrow \eta\eta') \sim 1\%,$$

并考虑到 $\eta' \rightarrow \gamma\rho^0$ 约 90% 为共振态, 则所考虑的 4 个信号道的分支比及按分支比产生的 Monte Carlo 事例数见表 1. 其中 5, 6 两个为本底道, 若按分支比产生, 事例数达到 10^6 . 为节省计算机资源, 按实际事例数的 1/30 产生本底道的事例数. 对表 1 的信号和本底进行分析, 初选使用了如下条件:

- (1) 好的带电径迹数 $N_c = 2$, 总电荷 $\sum Q = 0$;
- (2) 仅用到桶部 TOF;

(3) 量能器探测到的中性径迹满足 $|\cos\theta| < 0.93$;

(4) $\chi_{4C}^2 < 50$, $\chi_{5C}^2 < 50$ (除了能、动量守恒,对共振态 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 作了约束)。

在做粒子鉴别时采用 TOF 和 dE/dX 的联合鉴别,这样可以大大提高选择效率。第 2.3 节将提到量能器晶体选用 BGO 或 CsI,运动学拟合后给出相近的质量分辨。因此对于量能器晶体的两种选择情况,终选可采用以下相同的条件:

cut1: $\chi_{4C}^2 < 20$, $\chi_{5C}^2 < 20$;

cut2: $N_\pi = 2$, $N_{\text{good}\phi} \geq 4$ ($N_{\text{good}\phi}$ 表示好的光子数);

cut3: $|M_{\rho 4C} - 0.77| < 0.1$ (GeV) ($M_{\rho 4C}$ 表示 4C 拟合后的 ρ 质量);

cut4: $|M_{\eta' 4C} - 0.958| < 0.024$ (GeV) ($M_{\eta' 4C}$ 表示 4C 拟合后的 η' 质量);

表 1 信号和本底道的分支比及所产生的蒙特卡罗模拟事例数

	分支比	模拟事例数
1	$J/\psi \rightarrow \gamma f_0(1500) \rightarrow \gamma \eta \eta' \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	7.2×10^{-6} 43200
2	$J/\psi \rightarrow \gamma X(1910) \rightarrow \gamma \eta \eta' \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	7.2×10^{-6} 43200
3	$J/\psi \rightarrow \gamma X(2150) \rightarrow \gamma \eta \eta' \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	3.6×10^{-6} 21600
4	$J/\psi \rightarrow \gamma \xi(2230) \rightarrow \gamma \eta \eta' \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	3.0×10^{-6} 18000
5	$J/\psi \rightarrow \omega \pi^0 \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	3.7×10^{-4} 74012
6	$J/\psi \rightarrow \omega \eta \rightarrow 4\gamma \pi^+ \pi^-$	5.5×10^{-4} 109259

cut5: $|M_{\eta 4C} - 0.547| < 0.02$ (GeV) ($M_{\eta 4C}$ 表示 4C 拟合后的 η 质量)。

表 2 给出了经过以上选择条件及其组合后的本底事例数, $N_{\text{-pre}}$ 为经过初选后的事例数。

表 2 本底事例判选

	本底 5	本底 6
$N_{\text{-pre}}$	11741	34696
cut1	5388	22668
cut1&cut2	5283	22301
cut1&cut2&cut3	14	80
cut1&cut2&cut3&cut4	0	0

经过终选条件后,本底被扣除得很干净,所以即使这样的本底事例没有按分支比产生,对模拟的结果不会产生影响。在以下的分析中不再考虑本底。

2.3 量能器晶体 BGO 和 CsI 的选择

电磁量能器在 BES 谱仪中占有十分重要的地位,其基本功能是测量电子和光子的能量与位置信息。根据 BEPC II / BES III 的物理要求, BES III 量能器应达到非常好的能量分辨率,好的角度分辨率等指标。对于量能器晶体, CsI 能量分辨率(3%)比 BGO(5%)好,而 BGO 的位置分辨好于 CsI。为给 BES III 量能器晶体的选择提供依据,在磁场为 0.4T,桶部飞行时间计数器(BTOF)分辨为 100ps,端盖飞行时间计数器(ETOF)分辨为 110ps 且不考虑本底的情况

下,对两种晶体的性能作了比较。分析中只考虑了 $\xi(2230)$ 共振态。比较结果如图 2 和表 3。表 3 中 σ_1 为 4C 拟合前 $\eta\eta'$ 的质量分辨; σ_2 为 4C 拟合后 $\eta\eta'$ 的质量分辨; ϵ 为效率。可以看到, 4C 拟合后质量分辨相近,但 4C 拟合前选用 CsI 晶体会更好的质量分辨。若使用 L3 退役的 BGO,由于其尺寸不能满足 BES III 的需要,要对已有的晶体进行再加工。既要增加经费,又要冒加工的风险,而且 BGO 量能器需要的支撑部分造价高。因此根据 BES III 总体的物理要求及综合考虑,决定 BES III 量能器晶体选用 CsI。

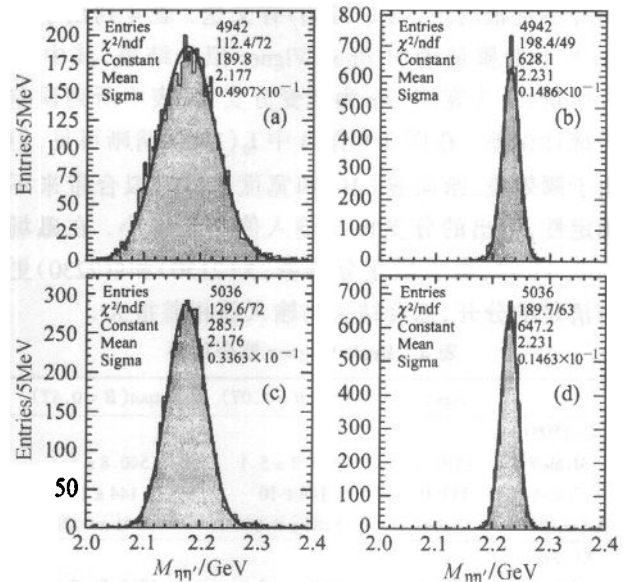


图 2 $J/\psi \rightarrow \gamma \xi(2230) \rightarrow \gamma \eta \eta'$ 事例经过 BES III

探测器模拟后的 $\eta\eta'$ 的不变质量谱

(a) BGO, 4C 拟合前; (b) BGO, 4C 拟合后;

(c) CsI, 4C 拟合前; (d) CsI, 4C 拟合后。

表 3 量能器晶体选用 BGO 和 CsI 的性能比较

$\xi(2230)$	BGO	CsI
σ_1 /MeV	49.1	33.6
σ_2 /MeV	14.9	14.6
ϵ	9.9%	10.1%

2.4 磁场为 0.4T 和 1.0T 时的蒙特卡罗模拟

对于 BES III 探测器的磁铁,一方面考虑用磁场为 1.0T 的超导螺线管磁铁,它能提供较大的偏转本领和好的动量分辨。但由于经费的限制,另一方面又考虑利用 BES 现有的磁铁,磁场为 0.4T,而且这种选择技术上容易些。在晶体量能器选用 CsI 晶体的情况下,以下分别模拟了磁场为 0.4T 和 1.0T 时的 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta'$ 衰变道。根据 BES III 预期的 TOF 设计指

标, BTOF 的时间分辨为 100ps, ETOF 的时间分辨为 110ps. 模拟中同样仅考虑 $f_0(1500)$, X(1910), X(2150) 和 $\xi(2230)$ 4 个共振态, 其中 $f_0(1500)$ 质量在阈附近, 所用的蒙特卡罗产生子不能模拟这种阈效应, 所以产生时质量输入值放为 1.51GeV. 对 $\eta\eta'$ 的不变质量作 Breit-Wigner 拟合, 见图 3 和图 4.

可以看到, 磁场为 1.0T 时会给出更好的质量分辨. 并且从输入 $f_0(1500)$, X(1910), X(2150) 和 $\xi(2230)$ 后得到的结果可看到 $f_0(1500)$, X(1910) 和 $\xi(2230)$ 明显的峰. 由于质量分辨不够好, X(2150) 的峰不是很清楚, 与 $\xi(2230)$ 有交迭. 表 4 列出了对 $\eta\eta'$ 的不变质量谱的 Breit-Wigner 拟合结果, 其中 M 为质量, Γ 为宽度, Br 为衰变分支比, 表中所列误差为统计误差. 在图 3 和图 4 中 $f_0(1500)$ 清晰可见, 但由于阈效应, 给质量 (M) 和宽度 (Γ) 的拟合带来不确定性, 给出的分支比与输入值相比偏小. 在磁场为 0.4T 时, 由于质量分辨差, X(2150) 和 $\xi(2230)$ 更难清楚的分开, 拟合结果与输入值相差很大.

表 4 Breit-Wigner 拟合结果

	input	output ($B = 1.0T$)	output ($B = 0.4T$)
$f_0(1500)$			
M/MeV	1510.0	1538.7 ± 5.1	1540.8 ± 5.1
Γ/MeV	112.0	148 ± 10	144 ± 11
$Br (\times 10^{-6})$	7.20	5.84 ± 0.20	5.41 ± 0.21
X(1910)			
M/MeV	1910.0	1910.0 ± 2.4	1911.5 ± 2.8
Γ/MeV	150.0	156.2 ± 8.6	157.7 ± 9.6
$Br (\times 10^{-6})$	7.20	7.85 ± 0.31	7.63 ± 0.38
X(2150)			
M/MeV	2150.0	2145.9 ± 7.6	2135.1 ± 13.0
Γ/MeV	157.0	141 ± 21	136 ± 46
$Br (\times 10^{-6})$	3.60	3.50 ± 0.57	2.89 ± 0.95
$\xi(2230)$			
M/MeV	2230.0	2231.3 ± 1.0	2231.3 ± 1.4
Γ/MeV	25.0	29.6 ± 4.3	35.9 ± 7.3
$Br (\times 10^{-6})$	3.00	3.20 ± 0.31	3.58 ± 0.53

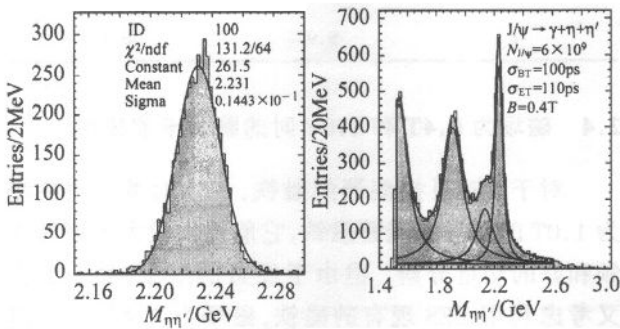


图 3 $\eta\eta'$ 的不变质量谱 ($B = 0.4T$)

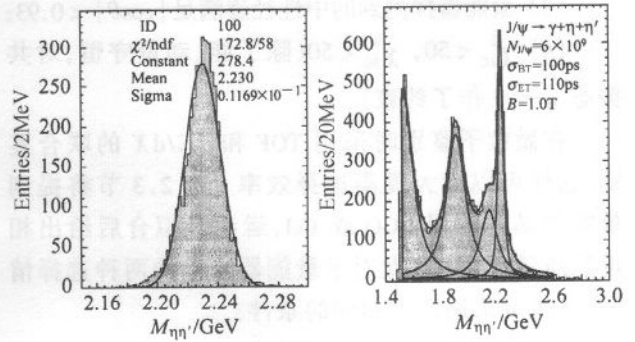


图 4 $\eta\eta'$ 的不变质量谱 ($B = 1.0T$)

2.5 BES II 和 BES III 的比较

由以上分析, 如果 $\xi(2230)$ 等共振态存在, 就可以很好的在 BES III 上看到. 在 BES II 上, 使用和 BES III 相同的分支比, 同样模拟 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta'$ ($\eta \rightarrow \gamma\gamma, \eta' \rightarrow \gamma\rho^0, \rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$). 结果表明: 在 BES II 上不仅质量分辨差, 而且效率很低. 例如, 对于 $\xi(2230)$, 质量分辨为 28.5MeV, 效率为 2.7%; 而 BES III 情形下 (见表 3), 质量分辨为 14.6MeV, 效率为 10.1%. 这也是建造 BES III 以及在 BES III 上寻找新物理的一个原因.

3 结果和讨论

本文比较了 BGO 和 CsI 晶体的性能. 量能器晶体选用 CsI 不仅效率高而且能给出较好的质量分辨. 磁场为 1.0T 也会给出比 0.4T 时更好的质量分辨. 如果 BES III 探测器能够达到预期的物理要求, 即好的光子能量分辨、角度分辨, 精确测量低动量带电粒子的四动量及好的强子识别能力等, 并基于 BES III 的大统计量的样本, 使用表 1 的分支比和表 4 的各共振态的输入值, 经过 BES III 探测器, 可以清晰的看到 $f_0(1500)$, X(1910) 等信号, 并可进行分波分析确定其自旋宇称. 为进一步研究胶子球, 在 BES III 上还可以分析 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'\eta', \gamma\eta\eta$ 等可能存在胶子球信号的主要衰变道. 因此, BES III 的建造为寻找和确认胶子球及系统研究其衰变性质提供了极有利的条件, 这将对 QCD 理论的强有力的检验.

感谢高能所实验物理中心 J/ψ 组和 MC 组每位成员对作者的帮助, 尤其是金山研究员、何康林副研究员、彭海平博士、季小斌博士、郭子金博士、傅成栋博士对作者的指导和帮助.

参考文献 (References)

- 1 Barnes T, Close F E et al. Nucl. Phys., 1983, **B224**:241
- 2 Isgur N et al. Phys. Rev., 1985, **D31**:2910
- 3 Latorre J L et al. Phys. Lett., 1984, **B147**:169
- 4 Michael C et al. Nucl. Phys., 1989, **B314**:347
- 5 Chao K T. Commun. Theor. Phys., 1997, **27**:263
- 6 Amsler C et al. CBR Collaboration, Phys. Lett., 1995, **B355**:425
- 7 Abele A et al (CBR Collaboration). Phys. Lett., 1996, **B380**:453
- 8 Bali et al. Phys. Lett., 1993, **B309**:378
- 9 Morningstar C et al. Phys. Rev., 1997, **D56**:4043
- 10 Abele A et al (CBR Collaboration). Nucl. Phys., 1996, **A609**:562
- 11 Abele A et al (CBR Collaboration). Phys. Lett., 1996, **B385**:425
- 12 Alde D et al. Phys. Lett., 1989, **B216**:447
- 13 Ethin A et al. Phys. Lett., 1988, **B201**:568

Monte Carlo Simulation of Searching for Glueball on BEPC II /BES III *

ZHU Ying-Chun¹⁾ SHEN Xiao-Yan ZHENG Zhi-Peng

(Institute of High Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Using Monte Carlo simulation, the process of $J/\psi \rightarrow \gamma X \rightarrow \gamma \eta \eta'$ ($\eta' \rightarrow \gamma \rho^0$, $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$, $\eta \rightarrow \gamma \gamma$) is studied on BEPC II /BES III. Based on the better performance of BES III and the large J/ψ data sample, it's possible to search for glueball state candidates and confirm their existence. Based on the study of this J/ψ radiative decay channel, it provides us some useful data for the selection of crystal BGO or CsI of electromagnetic calorimeter and for the selection of magnetic field intensity.

Key words glueball, lattice QCD, Monte Carlo simulation

Received 30 October 2002

* Supported by NSFC(19991480) and Major Subject of CAS(KJ95T-03)

1) E-mail: yczhu@mail.ihep.ac.cn