

BES II 上光子探测效率的研究^{*}

李树敏^{1;1)} 苑长征¹ 何康林¹ 房双世^{1,2} 王文峰¹ 吕峰¹ 沈肖雁¹

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(中国高等科学技术中心 北京 100080)

摘要 利用 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 衰变道,对 BES II 上 BSC 对于光子的探测效率做了细致的研究.结果表明在从探测器光子能量阈值直到 BES 上可产生的最大光子能量范围内,用目前的 Monte Carlo 可以在 1%—3% 的精度下模拟光子的探测效率.并且对 Monte Carlo 在探测效率上与数据的差别进行了详细研究.同时用质心系能量 $\sqrt{s} = 3.770\text{GeV}$ 处的 $e^+e^- \rightarrow \gamma e^+e^-$ 数据检验了高能区 Monte Carlo 和数据的探测效率都达到 100%,并且在 1% 精度下是一致的.

关键词 低能光子 探测效率 Monte Carlo 模拟

1 引言

光子的探测效率是探测器的一个重要性能指标,尤其是低能光子会直接影响到一些信号道的寻找、探测等.例如在衰变道 $\psi' \rightarrow \gamma\eta_c'$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta_c$ 中,光子的能量都很低,若不能清楚地了解光子在低能端的探测效率,则会直接影响这些衰变道的精确测量.对于高能光子,由于光子与其他中性径迹或带电径迹等夹角太小而重建不出来也会造成效率损失.对于含 π^0 ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) 的过程,低能光子的效率会直接影响 π^0 的重建.

北京谱仪(BES II)^[1-3]上光子的探测由簇射计数器(SC)完成,目前的物理分析仅使用了桶部簇射计数器即 BSC 的信息.BSC 是一个气体取样型电磁量能器,利用电磁簇射的原理来探测光子或电子的能量及空间击中位置.BSC 为圆筒形,沿径向分为 24 层,每层丝工作于自淬灭流光(SQS)模式.信号输出时,按照 2-2-2-3-3-12 沿径向组成 6 个读出层,以减少电子学读出道数,每层 560 路,两端总计 6720 路电子学读出.BSC 径迹的重建包括寻迹和确定物理信息两个过程.其特点是 ϕ 方向位置分辨较好, z 方向位置分辨较差,在两个簇射的 ϕ 方向差

别较小时, z 方向无分辨能力.

目前 BSC 的 Monte Carlo 模拟用 GEANT3 模拟径迹在 BSC 中的电磁级联过程.击中信号数字化,电荷输出用朗道分布来描述,同时模拟实际数据中的死道效应.

本文首先介绍研究光子探测效率的 3 种方法及样本选择,本底分析,测量,然后研究 Monte Carlo 模拟与数据差别的原因,最后给出相关结论.

2 分析方法

本文采用最大能量光子法^[4],循环好光子法和 π^0 衰变角分布测量法等 3 种方法来分析光子的探测效率.

利用 BSC 选择光子束并观察探测器的响应,得光子的探测效率 ϵ 满足:

$$\epsilon = \frac{N^{\text{obs}}}{N^{\text{tot}}},$$

其中 N^{tot} 为发射到 BSC 中的光子数, N^{obs} 为 BSC 中实际观测到的光子数.对于不同能量的光子,可以得到 ϵ 随光子能量的关系.最大能量光子法和循环好光子法中都是用这种方法定义光子的探测效率,该

2003-11-25 收稿

* 国家自然科学基金(19991480)和科学院知识创新工程项目(U-602)资助

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

方法的关键是要选择纯净的光子样本。

一般说来,高能光子的探测效率比较高,在光子能量大于 200MeV 时探测器对光子的探测效率基本上达到 100%。在 π^0 质心系中组成一个 π^0 的两个光子是反方向的,转换到实验室系,低能光子与 π^0 方向夹角较大。利用四动量守恒条件,可以通过 $\cos\theta$ 分布得到光子的能量分布。这种方法被称之为效率的 π^0 衰变角分布测量法。

3 光子样本选择

本工作通过 $J/\psi \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 衰变道来研究光子的探测效率(其中最大能量光子法和循环好光子法为了纯化样本,只用了 $J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$)。利用这个衰变道的优点是分支比大,本底小,事例选择简单。而且可借助运动学拟合来纯化样本。更为关键的一点是由该道的 π^0 衰变出来的光子能谱范围大,有利于分析。

3.1 事例初选条件

在 $J/\psi \rightarrow \rho\pi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 衰变道中有两条带电径迹和两个光子。由于该衰变道分支比较大,为得到较为纯净的样本,对其要求比较严格,具体的选择条件如下:

要求选择的事例中带电径迹有良好的螺旋线拟合,且其横动量须大于 60MeV/c,以排除在主漂移室(MDC)中打圈的带电径迹;好的带电径迹数为 2;总电荷数为 0;带电径迹的出射方向满足 $|\cos\theta_{\text{chg}}| < 0.8$ 。其中 θ_{chg} 是带电径迹的极角。该条件是由探测器本身的限制和小角度区域 Monte Carlo 不能很好地模拟数据决定的。在全能区内用粒子的能损信息(dE/dx)和飞行时间计数器(TOF)的信息联合做粒子鉴别,并要求带电径迹至少有一个被鉴别为 π 。

由于实际数据中端盖簇射计数器的数据不能用,所以只选择桶部簇射计数器的光子。光子与带电径迹的夹角不小于 15° ,以排除带电径迹的辐射光子;光子簇射方向(光子从顶点到簇射计数器首层击中的方向)与簇射发展方向(簇射计数器中,对级联簇射击中各层击中点的拟合方向)^[3]夹角 $\theta < 30^\circ$,以减少其他中性径迹的影响;为排除由于簇射劈裂造成的假光子,要求 $\theta_{\gamma\gamma} \geq 10^\circ$ 或者 $\sqrt{2E_1 E_2 (1 - \cos\theta_{\gamma\gamma})} > 0.05\text{GeV}$,其中 $\theta_{\gamma\gamma}$ 为任意两个光子的夹角。 E_1, E_2 分别为两个光子的能量。若不满足该条件将较小能量光子去掉。

将选择后的两条带电径迹作为 $\pi^+ \pi^-$,一条确定的中性径迹和另一条丢失中性径迹约束到 π^0 进行四动量约束的运动学拟合,要求 $\chi^2 < 30$ 。经过上述选择后,事例的 Dalitz 图见图 1。从图 1(b)不难看出数据中的本底比较大,为了纯化样本,在计算光子探测效率时加入 ρ 的质量要求,即 $|M_{\pi^+ \pi^-} - M_\rho^0| < 0.15\text{GeV}$,并且要求 $M_{\pi^+ \pi^0} > 1.2\text{GeV}$ 和 $M_{\pi^- \pi^0} > 1.2\text{GeV}$ 。

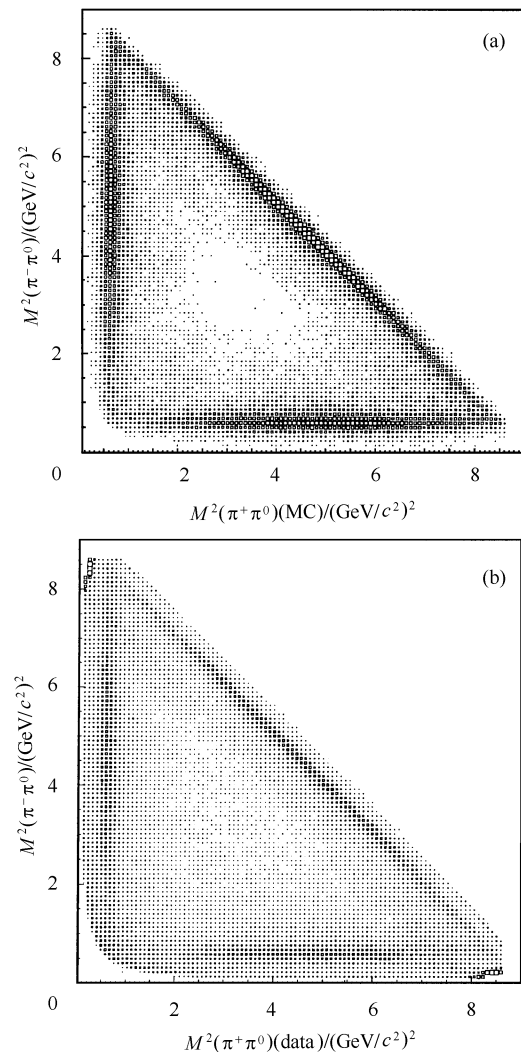


图 1 ρ 质量限制之前的 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ 事件的 Dalitz 图
(a) Monte Carlo; (b) 数据。

在后面介绍的 π^0 衰变角分布测量法中,事例选择条件如下:横动量大于 70MeV/c;好的带电径迹数为 2;总电荷数为 0;带电径迹的出射方向 $|\cos\theta_{\text{chg}}| < 0.8$,其中 θ_{chg} 是带电径迹的极角;在全能区内用粒子的能损信息(dE/dx)和飞行时间计数器(TOF)的信息联合做粒子鉴别,要求带电径迹至少有一个

被鉴别为 π ; 只选择桶部簇射计数器的好光子. 光子与带电径迹的夹角不小于 15° ; 光子簇射方向与簇射发展方向夹角 $\theta < 30^\circ$; 光子能量大于 10MeV .

3.2 本底分析

经过上述事例选择 $\rho\pi$ 的样本仍含有一些本底. 用 lund-charm^[5] 产生子产生的 3000 万的 $J/\psi \rightarrow \text{anything}$ 事例通过事例挑选程序, 以及对比 Monte Carlo 与数据的 ρ^0 不变质量谱, 发现衰变道 $J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1270), f_2(1270) \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta', \eta' \rightarrow \gamma \rho^0$ 混进来的可能性比较大. 为此我们产生 10 万个 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta', \eta' \rightarrow \gamma \rho^0$ 和 5 万个 $J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1270), f_2(1270) \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 的 Monte Carlo 事例并使其通过 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 事例选择程序. 表 1 列出了相关本底道占信号的百分比, 其中的本底事例数是两个本底道经过事例选择后的实际事例数, 没有进行事例数归一. 在后面的光子探测效率分析中把这个本底加入 Monte Carlo 模拟的信号道中, 可以看出 Monte Carlo 与数据探测效率的差别变小.

表 1 $\rho\pi$ 事例样本中本底占信号的比例

本底	事例数	占信号百分比
$\gamma f_2(1270)$	243	0.65
$\gamma \eta'$	1987	1.29

4 光子探测效率测量

在选择了较为纯净的 $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ 样本并对本底及其含量做了分析之后, 下面用不同的方法来研究光子的探测效率.

4.1 最大光子能量测量法

该方法的具体操作过程是, 样本初选后, 在好光子候选者中选出一个最大能量的光子, 做运动学拟合时忽略另一个光子的径迹信息, 同时将两个光子约束到一个 π^0 不变质量, 即从两个带电径迹和最大能量光子的能动能量信息, 及两个光子约束到 π^0 来推出另一个即丢失光子的能动能量. 这里要求丢失光子的能量小于最大能量光子的能量, 以排除最大能量光子由于探测器立体角的限制等因素没有探测到的情况. 若在丢失光子的动量方向小于 30° 的锥角内有光子候选者(不含最大能量光子)则称光子被探测到了(此光子候选者被称为匹配光子), 反之则没有探测到. 由此可以得到数据和 Monte Carlo 的探测效率

比如图 2 所示. 从图 2(a) 可以看出 Monte Carlo 的探测效率要比数据高, 根据前面的本底分析, 知道数据样本不纯. 若在 Monte-Carlo 的 $\rho\pi$ 样本中混入 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta', \eta' \rightarrow \gamma \rho^0$ 的本底, 数据和 Monte Carlo 的一致性大大改善, 如图 2(b) 所示.

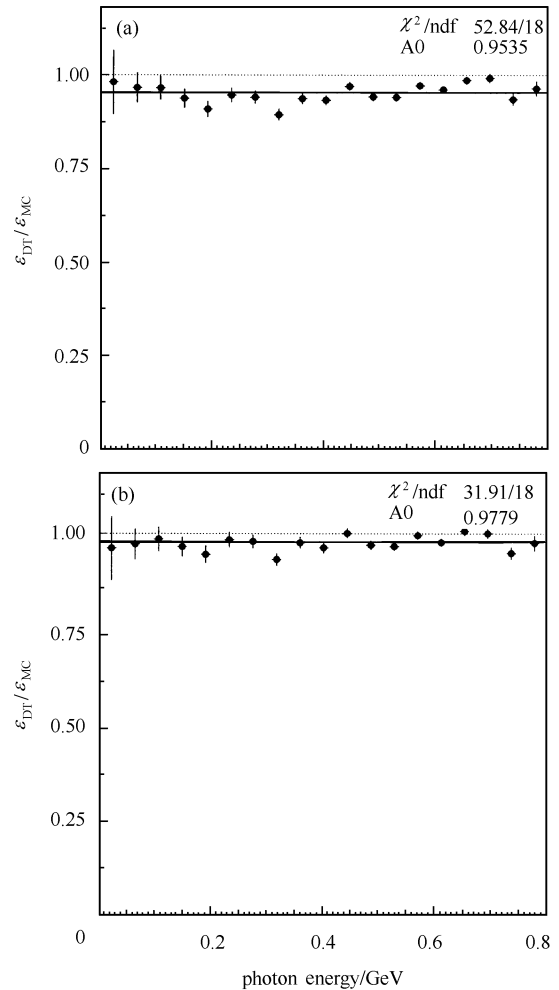


图 2 最大能量光子测量法中给出的 Monte Carlo 和数据的光子探测效率比与光子能量之间的关系
(a) Monte Carlo 只有 $\rho\pi$ 信号; (b) Monte Carlo 加入 $J/\psi \rightarrow \gamma \eta'$ 本底. 图中只是给出统计误差.

需要指出的是这里所谓的效率并不是绝对效率, 因为没有对探测出光子的条件的效率作修正.

4.2 循环好光子测量法

若在选择好光子时, 并不选择最大能量光子, 而是通过光子循环, 选择 χ^2 最小的光子作为光子候选者. 若在丢失光子的动量方向小于 30° 锥角内有光子候选者(不含最大能量光子), 则称光子被探测到了(此光子候选者被称为匹配光子), 反之则没有探测

到.由此得到数据和 Monte Carlo 的探测效率比如图 3 所示.从图 3 中可以看出 Monte Carlo 的探测效率与数据的在 高能区基本一致.

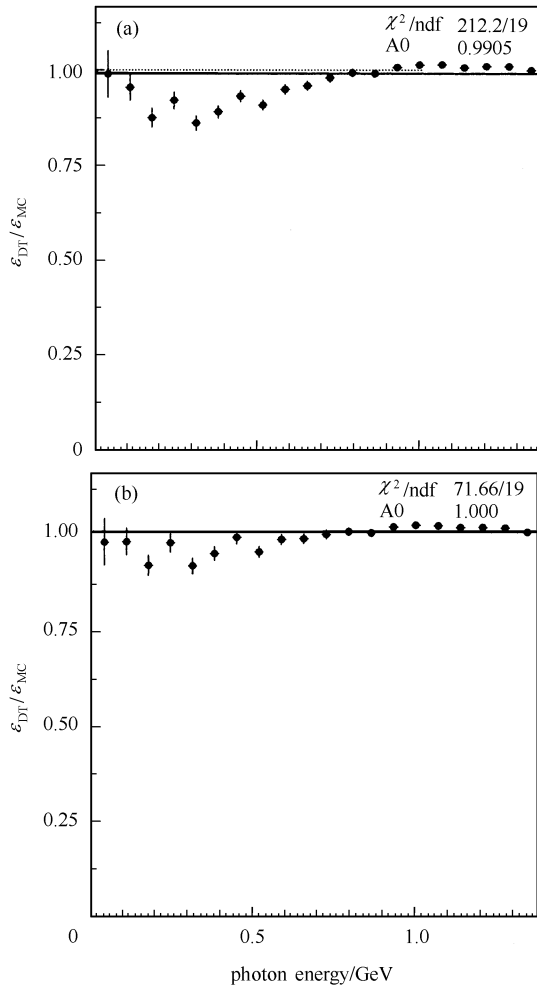


图 3 循环好光子方法中给出的 Monte Carlo 和数据的光子探测效率比与光子能量之间的关系

- (a) Monte Carlo 只有 $\rho\pi$ 信号;
(b) 加入 $\gamma\eta'$ 本底. 图中只是给出统计误差.

4.3 π^0 衰变角分布测量法

还利用 π^0 衰变角分布测量法研究了数据和 Monte Carlo 的光子探测效率. 这种方法的好处是没有丢掉光子的信息, 使得光子的信息不再过分依赖于带电径迹的信息. π^0 质心系中组成 π^0 的两个光子是反方向的. 转换到实验室系则低能光子与 π^0 方向夹角较大. 光子与 π^0 方向的夹角 θ 在实验室坐标系下可表示为

$$\cos\theta = \frac{(E_{\text{high}} - E_{\text{low}})}{P_{\pi^0}},$$

其中 E_{high} 和 E_{low} 分别为高能和低能光子的能量, P_{π^0} 是 π^0 的动量. 由四动量守恒条件, 知

$$(E_{\text{high}} + E_{\text{low}})^2 = P_{\pi^0}^2 + M_{\pi^0}^2,$$

其中 M_{π^0} 为 π^0 的不变质量. 联立以上两式得

$$E_{\text{low}} = \sqrt{P_{\pi^0}^2 + M_{\pi^0}^2} - P_{\pi^0} \cos\theta,$$

若不同能量光子探测效率均为 100%, 则探测到的光子数相对于 $\cos\theta$ 是均匀的. 但实验上测得到光子数随 $\cos\theta$ 的变化如图 4(a) 图所示. 可以看出低能光子的探测效率并不是 100%. 因此, 可以通过光子个数随夹角余弦 $\cos\theta$ 的变化确定不同能量光子的探测效率. 这样得到 Monte Carlo 和数据的光子能谱如

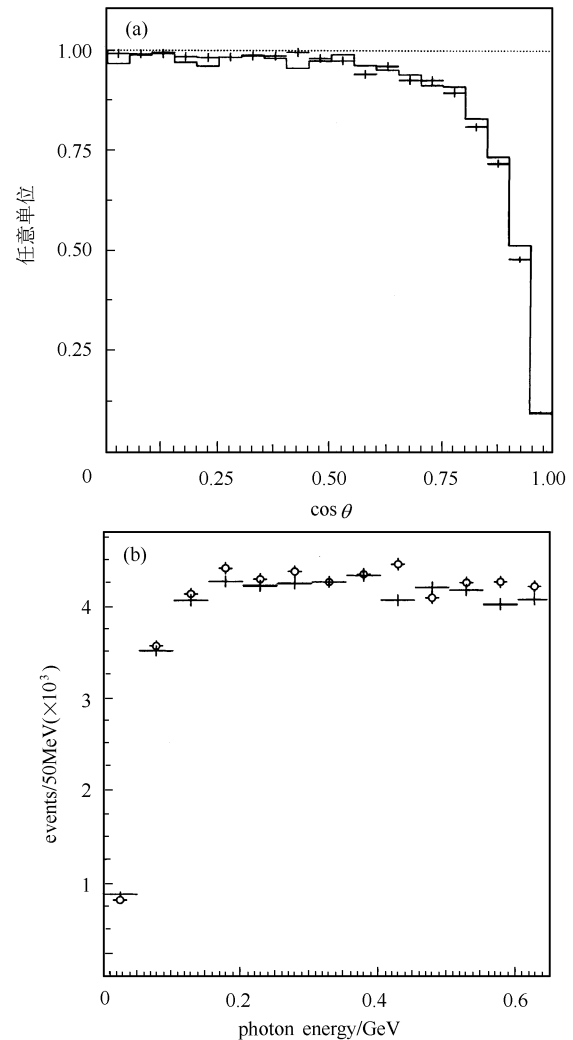


图 4

- (a) 实际探测到光子事例在不同的夹角余弦值下的分布 (其中误差棒是数据, 直方图是 Monte Carlo, 并在任意单位下归一); (b) π^0 衰变角分布测量法中观测到的光子能谱 (300 MeV 以上 Monte Carlo 和数据归一, 其中误差棒是数据, 圆圈是 Monte Carlo, 这里的误差是统计误差).

图 4(b)图所示. 如果认为 Monte Carlo 可以完美地模拟 300MeV 以上能量的光子探测效率, 可以看出对于低能光子的效率模拟在 1.2% 水平上一致.

5 Monte Carlo 和数据效率差别原因的研究

从前面的分析可知用最大能量光子法得到的光子探测效率 Monte Carlo 要比数据高, 即使在加入本底后, Monte Carlo 的光子探测效率仍比数据高. 对此我们做了以下分析来研究其差别的来源.

5.1 Monte Carlo 对加强筋的模拟

由光子立体角余弦分布检查 Monte Carlo 对加强筋效应的模拟. 结果见图 5. 可以看出 Monte Carlo 很好地模拟了加强筋, 也就是说可以排除加强筋效应模拟差别带来的 Monte Carlo 和数据在光子探测效率上的差别.

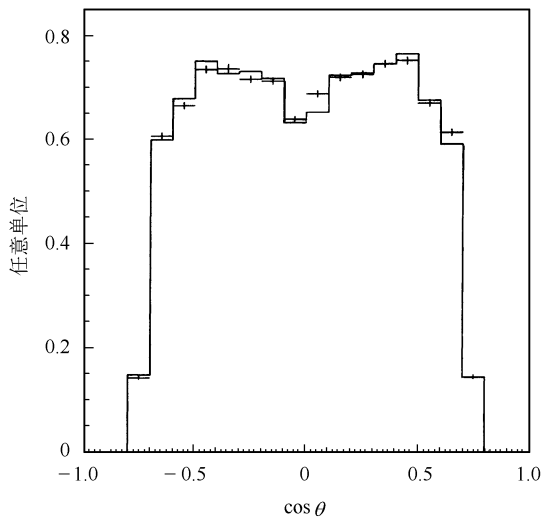


图 5 光子极角余弦分布
直方图是 Monte Carlo, 误差棒是数据.

5.2 重建簇射大小的比较

可以通过对比光子在簇射计数器中每层击中单元数来检查 Monte Carlo 和数据在光子重建簇射大小上是否有差别.

图 6 给出了 $\rho\pi$ 样本中光子在 BSC 中每层的击中单元数, 可以看出, 数据在簇射计数器中击中的单元数要比 Monte Carlo 多. 即数据重建的簇射要大一

些, 使得光子重建过程中两个相邻光子被重建成一个簇射的几率比 Monte Carlo 稍大, 可能导致 Monte Carlo 和数据中光子探测效率有差别.

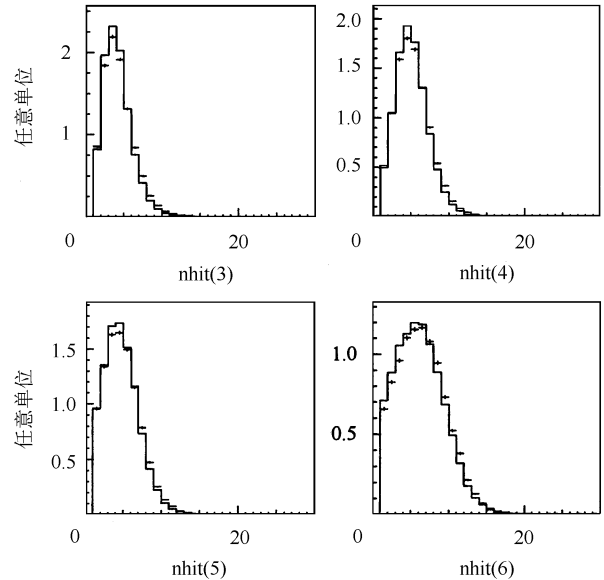


图 6 $\rho\pi$ 样本中的光子在电磁量能器中的每层击中单元数
nhit(3), nhit(4), nhit(5), nhit(6) 分别为簇射计数器 6 层全击中时第 3, 4, 5, 6 层击中单元数的 Monte Carlo 和数据的比较. 直方图是 Monte Carlo, 误差棒是数据. Monte Carlo 和数据在任意单位下归一.

上述效应也可通过对比相邻光子间的夹角分布测得. 将 Monte Carlo 和数据中两光子的夹角分布按大角度事例归一, 计算小角度范围内的差别. 我们知道 π^0 动量越大, 则两个光子之间的夹角越小, 若小角度内 Monte Carlo 和数据的事例有差别, 则这个差别也可以反映 Monte Carlo 和数据探测效率的差别.

图 7 给出了不同动量的 π^0 光子夹角较小时数据和 Monte Carlo 的差别, 可以看出在高动量区 Monte Carlo 和数据的差别在 2.1% 之内.

经过上述研究, 可知重建簇射大小可以影响约 1%—2.1% 的探测效率. 而 Monte Carlo 对加强筋模拟良好, 不会明显影响光子的探测效率.

6 辐射 Bhabha 检验

前面的几种研究光子探测效率的方法都是相对测量, 也通过辐射 Bhabha 实验对光子探测效率做绝对测量. 在质心系能量 $\sqrt{s} = 3.770\text{GeV}$ 处的 $e^+e^- \rightarrow \gamma e^+e^-$ 样本中, 通过测量辐射出光子的电子的探测

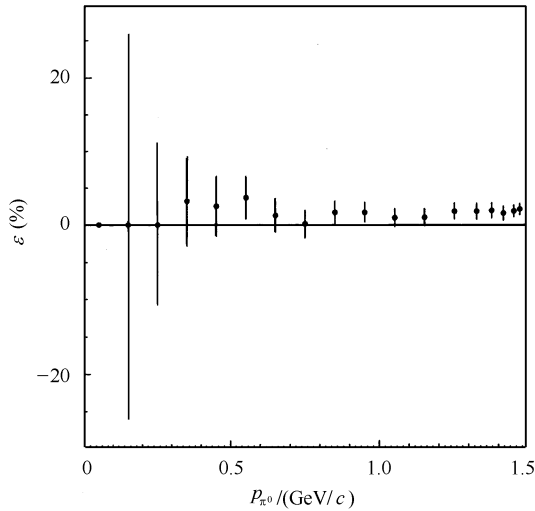


图 7 Monte Carlo 和数据差别随 π^0 动量的分布

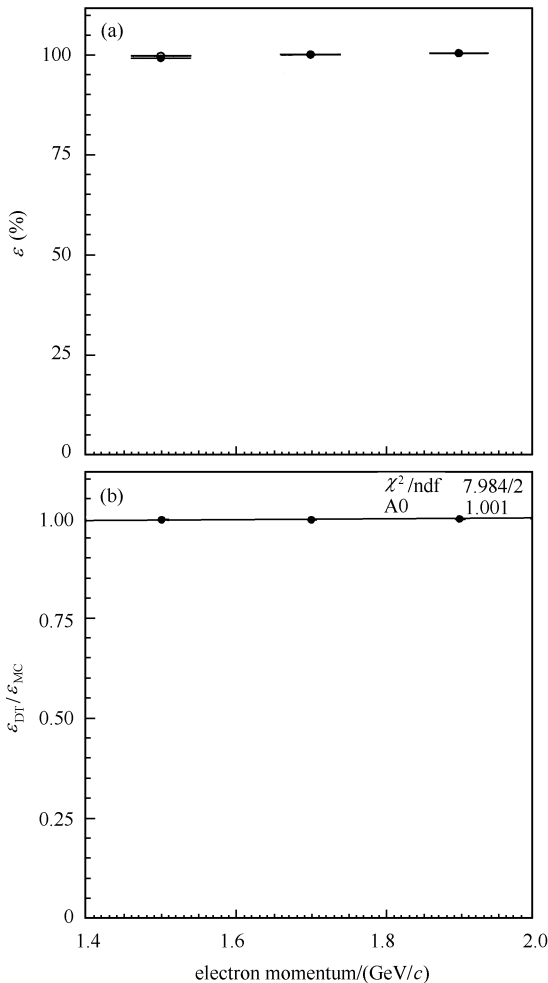


图 8 辐射 Bhabha 事例电子的探测效率及数据和 Monte Carlo 比

(a) 电子的探测效率. \circ 数据, \bullet Monte Carlo;
(b) 数据和 Monte Carlo 的电子探测效率比.

效率可得到光子的探测效率(两者是一致的).数据和 Monte Carlo 的效率及其效率比见图 8.由于缺少低动量事例,该方法只是分析高动量区域数据.从 (a)图可以看出在动量大于 $1.4\text{GeV}/c$ 时 Monte Carlo 和数据的探测效率都达到 100%, (b)图是 Monte Carlo 和数据的探测效率比,可以看出两者的差别在 1%之内. Monte Carlo 可以很好地模拟数据.

7 结果和结论

我们用 3 种不同的方法对光子探测效率做了研究,相关结论如下.

π^0 衰变角分布法给出在 300MeV 下 Monte Carlo 和数据的探测效率差别小于 1.2%.

最大能量光子法和循环好光子法由于本底的混入使得 Monte Carlo 和数据的探测效率差别大约在 3%之内.分析知光子重建簇射的大小会引起 1%—2.1%的 Monte Carlo 和数据探测效率差别.加强筋会影响光子的探测效率,但对 Monte Carlo 和数据的效率差别影响可以忽略.

因为 Monte Carlo 可以相当好地模拟数据,为了避免带电径迹及其他中性径迹对于测量的影响,直接由 Monte Carlo 给出来光子的绝对探测效率,图 9 为利用 Monte Carlo 向探测器 BSC 灵敏区内发射单能光子时探测器的响应随光子能量的变化.可见光子的探测效率在 300MeV 以上基本上达到饱和.

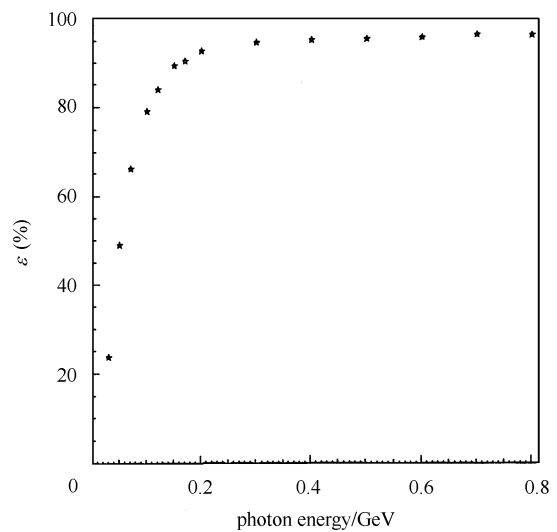


图 9 单光子事例的效率图

同样用质心系能量 $\sqrt{s} = 3.770\text{GeV}$ 处的 $e^+e^- \rightarrow \gamma e^+e^-$ 样本检验了动量大于 $1.4\text{GeV}/c$ 时 Monte Car-

lo 和数据的探测效率差别在 1% 之内, Monte Carlo 可以很好地模拟数据. Monte Carlo 和数据的探测效率都达到 100% .

所有的分析都表明数据和 Monte Carlo 在 1%—

3% 精度下一致.

感谢金山研究员, 杨洪勋博士对本工作提出很好的建议.

参考文献 (References)

- 1 BAI J Z et al. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **A344**:319—334
- 2 ZHOU Yue-Hua, LU Chang-Guo, GU Wei-Xin et al. HEP & NP, 1989, **13** (11):973—979 (in Chinese)
(周月华, 陆昌国, 顾维新等. 高能物理与核物理, 1989, **13**(11): 973—979)
- 3 DU Shu-Xian, YUAN Chang-Zheng et al. HEP & NP, 2003, **27**(6): 521—525) (in Chinese)
(杜书先, 苑长征等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(6):521—525)
- 4 YUAN Chang-Zheng. Ph. D Thesis, Search for the η_c' and study of the χ_{cJ} decays by-products of η_c searching. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, 1997 (in Chinese)
(苑长征. 博士论文, 粲夸克偶素 S 波自旋单态 η_c' 的寻找和相应过程 P 波三重态 χ_{cJ} 的研究. 中国科学院高能物理研究所, 1997)
- 5 CHEN J C, HUANG G S, QI X R et al. Phys. Rev., 2000, **D62**:034003

Study of Photon Detection Efficiency at BES II *

LI Shu-Min^{1;1)} YUAN Chang-Zheng¹ HE Kang-Lin¹ FANG Shuang-Shi^{1,2}

WANG Wen-Feng¹ LÜ Feng¹ SHEN Xiao-Yan¹

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

2(China Center of Advanced Science and Technology, Beijing 100080, China)

Abstract The photon detection efficiencies of Monte Carlo simulation and data are studied using three methods in the decay of $J/\psi \rightarrow \rho\pi$ at BES II. The results show that the Monte Carlo can simulate the photon detection efficiency of data in the precision of 1%—3%. The source of discrepancy between Monte Carlo and data is also studied in this work. The sample of $e^+e^- \rightarrow \gamma e^+e^-$ at the center of mass energy of $\sqrt{s} = 3.770\text{GeV}$ is used to study the detection efficiencies of the photons with the energies greater than 1.4 GeV for Monte Carlo and data that are both 100%, and the difference of the photon detection efficiency between Monte Carlo and data is less than 1%.

Key words low energy photon, detection efficiency, Monte Carlo simulation

Received 25 November 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19991480), Knowledge Innovation Project of CAS(U-602)

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