

北京谱仪桶部簇射计数器性能的研究*

杜书先¹ 苑长征² 刘觉平¹ 漆纳丁²

1(武汉大学物理科学与技术学院 武汉 430072)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 研究了北京谱仪桶部簇射计数器的性能,对刻度和重建方法作了改进,更好地确定了 z 向位置坐标,改善了位置分辨率,给出了正确的簇射发展方向.

关键词 北京谱仪 桶部簇射计数器 位置分辨 簇射发展方向 刻度 重建

1 引言

北京谱仪(BES)是运行在北京正负电子对撞机(BEPC)上的一台通用磁谱仪^[1],用于测量正负电子对撞后产生的遍举末态反应,研究末态粒子的性质及其相互作用的规律.桶部簇射计数器(BSC)是北京谱仪的重要子探测器之一.它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和空间击中位置. BSC 的几何形状为圆桶形,沿径向分为 24 层,每层 560 个单元共 13440 根信号丝,每根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 沿径向组合成 6 个读出层,以减少电子学的读出道数,每层 560 路,两端总计 6720 路电子学读出^[1,2].

桶部簇射的信息对于物理分析,特别是含有光子和电子等衰变产物的衰变道的分析,有着非常重要的作用.没有 BSC 的信息就无法鉴别光子;BSC 的信息还常常用来区分电子和其他带电粒子.

物理分析中常用的 BSC 信息主要包括:(1)能量及能量分辨;(2)位置及位置分辨;(3)簇射发展方向.其中(1),(2)用于光子四动量的确定;(3)主要用于真实光子和本底光子的鉴别.本文对除能量以外的信息作了详细的研究,提高了位置的测量精度及其分辨,并正确地确定了簇射发展方向.

2 现状及存在的问题

利用在 $\sqrt{s} = 3.686\text{GeV}$ 即 $\psi(2S)$ 峰上的 Bhabha 事例和 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 事例对 BSC 的性能作了研究.因为这一类事例有明显的拓扑特征,便于事例的选择和性能测量.

两种事例的选择条件如下:

对 Bhabha 事例要求:(1)有且仅有两条带电径迹;(2)两条带电径迹都有好的螺旋线拟合;(3)电子在 BSC 中的极角满足 $|\cos\theta| < 0.7$;(4)两个电子在 BSC 中的沉积能量应分别 $\geq 1.0\text{GeV}$;(5) μ 计数器没有信息.

对于 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 事例要求^[3]:(1)是纯中性事例,主漂移室(MDC)中没有信息;(2)中性径迹的个数 $2 \leq N_\gamma \leq 5$;(3)中性径迹与束流方向夹角 $|\cos\theta| < 0.7$;(4)两个最大动量的光子满足背对背条件: $|\phi_1 - \phi_2 - 180^\circ| < 2^\circ$,这里 ϕ_1 和 ϕ_2 分别是两个最大动量光子的 ϕ 角;(5)光子在 BSC 中沉积能量 $E_\gamma > 1.0\text{GeV}$.

利用 Bhabha 事例中电子在 BSC 中重建出的位置 (z_{sc}, ϕ_{sc}) 与利用内层主漂移室(MDC)外推的位置 (z_{DC}, ϕ_{DC}) 比较,得到 z 向和 ϕ 向的分辨分别为 3.1cm 和 7.6mrad(图 1),与文献[2]中的结果 2.3cm

2002-09-12 收稿

* 国家自然科学基金(19991480,10075036),中国科学院百人计划(U-25),北京正负电子对撞机国家实验室开放课题和 BES 合作组研究基金资助

和 7.7mrad 比较,我们发现两者的 z 向分辨相差很大(对于电子, MDC 径迹的位置分辨远小于 BSC 的位置分辨,对 BSC 位置分辨率影响不大,可以略去)。

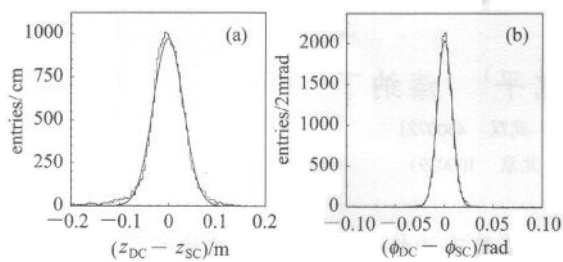


图 1 重建中的 Δz 和 $\Delta\phi$

(a) Δz , z 向分辨为 3.1cm; (b) $\Delta\phi$, ϕ 向分辨为 7.6mrad.

图 2 给出了 $\Delta z (= z_{DC} - z_{SC})$ 沿 z 向的分布,图上明显看出起伏现象,而不是预期的平坦的分布,表明现有的刻度方法在 z 的定位上存在明显的偏离。

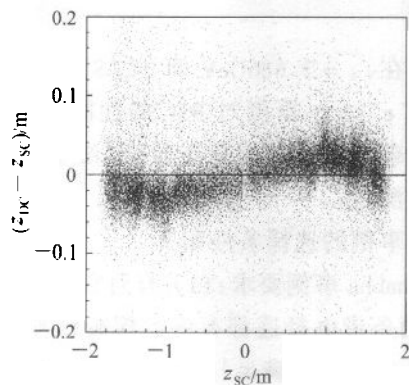


图 2 Δz 沿 z 向的分布有明显的起伏现象

对于簇射发展方向,产生独立簇射的入射粒子的出射方向和簇射发展方向的夹角分布如图 3. 用 α_ϕ 表示在 xy 平面即 ϕ 方向簇射的出射方向和发展

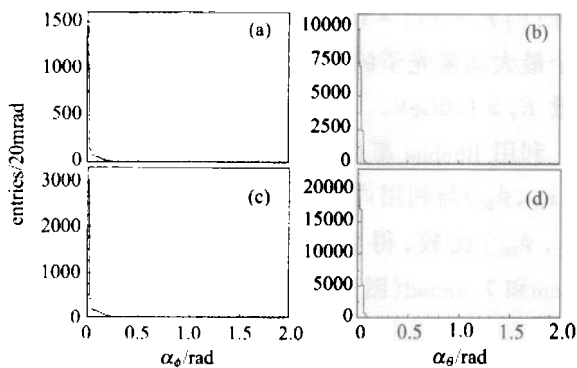


图 3 α_ϕ 和 α_θ 的分布

(a) 电子的 α_ϕ 分布; (b) 电子的 α_θ 分布;
(c) 光子的 α_ϕ 分布; (d) 光子的 α_θ 分布.

方向的夹角, α_θ 表示在 θ 方向两者的夹角,这里给出了夹角分别在 ϕ 方向和 θ 方向的分布. 图中明显看出,在很小夹角处有大量事例堆积,与我们期望的随着夹角的增大而逐渐减小的趋势有很大的差别;另外 α_θ 的分布比 α_ϕ 的分布还要窄,这与 z 向定位明显劣于 ϕ 向定位精度的事实是不符合的,预示着计算中可能存在潜在的问题。

3 BSC 信息的获得

文献[2]详细介绍了 BSC 径迹的重建方法,它主要包括寻迹和确定物理信息两个过程. 经过寻迹,得到独立的簇射,一个独立簇射被认为是由一个人射粒子产生的. 对于一个独立簇射,其位置信息确定如下:

3.1 位置坐标

对于一个独立簇射,按照下面的公式进行直线拟合

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n [\text{cell}_i - (a + b \cdot R_{\text{cell}_i})]^2 \omega_i, \quad (1)$$

这里 n 是该独立簇射所有好的击中单元的个数; cell_i 是第 i 个击中的单元号; R_{cell_i} 是该单元所在读出层的径向半径; ω_i 是权重(层号为 1,2,3 时, $\omega_i = E_i/2$; 层号为 4,5 时, $\omega_i = E_i/3$; 层号为 6 时, $\omega_i = E_i/12$), 如果是最小击中层,权重要乘以 2. a, b 是待拟合参数(文献[2]中 $R = a + b \cdot \text{cell}$ 应为 $\text{cell} = a + b \cdot R$, 计算位置坐标时的 $\text{tg}\theta$ 应为 $\text{ctg}\theta$).

利用拟合出的 a 和 b , 入射粒子的 ϕ 角由下面公式得到:

$$\phi = 2\pi(a + b \cdot R_{\text{in}} - 0.5)/560 - \pi/2, \quad (2)$$

R_{in} 是独立簇射的最小击中层半径. 如果没有通过直线拟合(比如所有的击中在同一层内; 归一化的 $\chi^2 > 2$ 等等), 则

$$\text{cell} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{cell}_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i},$$

$$\phi = 2\pi(\text{cell} - 0.5)/560 - \pi/2.$$

最后,沿逆时针方向转动 2.7mrad, 这是 BSC 和 MDC 机械定位引起的偏离. 显然,这种情况下得到的 ϕ 角对应独立簇射内部的某一点(我们称之为重心), 对于从对撞点产生的中性径迹,簇射总是沿着出射方向发展的,重心的 ϕ 角与簇射在最小击中层中的 ϕ 角相同;但对于带电径迹,由于簇射发展受到 BSC 中

的磁场的影 响,因而重心的 ϕ 角和簇射在最小击中层 的 ϕ 角是不同的;而 MDC 径迹外推时只外推到最 小击中层,在利用带电径迹测量 ϕ 的分辨时,导致 ϕ 向的分辨偏大.

独立簇射的 $\text{ctg}\theta$ 由每个好的击中的 $\text{ctg}\theta$ 加权平 均得到.

$$\text{ctg}\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ctg}\theta_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (5)$$

其中 $\text{ctg}\theta_i$ 是第 i 个击中极角的余切,其他参量的定 义如上. 利用上面求出的 ϕ 和 $\text{ctg}\theta$, 位置坐标由下 式定出:

$$\begin{aligned} x &= R_{in} \cdot \cos\phi, \\ y &= R_{in} \cdot \sin\phi, \\ z &= R_{in} \cdot \text{ctg}\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

我们注意到在刻度过程中, $R_{in} = 1.2635\text{m}$, 是 一个定值;而在重建过程中, R_{in} 取最小击中层半径, 其中第一层半径为 1.2833m , 两者是不同的, 这个不 同直接导致了 BSC 位置测量上与真实值的系统偏 离, 由于这个偏离对 $z > 0$ 和 $z < 0$ 造成的效果完全 相反, 结果是 z 测量的平均值仍为 0, 但是分辨变 大了. 这就是重建时得到的 z 向分辨很大的原因. 也 就是说, 如果重建时取 R_{in} 和刻度时一致, 将得到与 刻度同样的分辨. 研究发现的确实如此. 以后的分析 中, 刻度和重建总是取相同的 R_{in} , 即取最小击中 层的半径.

3.2 簇射发展方向

用独立簇射最大击中层 的半径 R_{out} 代替上面公 式中的 R_{in} , 定出最大击 中层的平均位置坐标 $(x_{out}, y_{out}, z_{out})$. 于是计算出簇射发展 方向的方向余弦:

$$\begin{aligned} \cos x &= (x_{out} - x_{in})/L, \\ \cos y &= (y_{out} - y_{in})/L, \\ \cos z &= (z_{out} - z_{in})/L, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $L = \sqrt{(x_{out} - x_{in})^2 + (y_{out} - y_{in})^2 + (z_{out} - z_{in})^2}$, 是 两点间的距离.

由以上算法可知, $\cos z$ 与簇射的方向相同, $\cos x, \cos y$ 在不能通过上述直线拟合的情况下, 也将 与簇射方向的相同;只有在能通过上述直线拟合时, 在 $R - \phi$ 平面内方向余弦才有定义. 图 4 为 Bhabha 事例中对电子形成的簇射拟合的 χ^2 分布. 我们发 现直线拟合常常 (79%) 通不过 $\chi^2 < 2$ 这一条件. 此时出射方向和发展方向是一样的. 这就是为什么 看到大部分夹角特别小的原因.

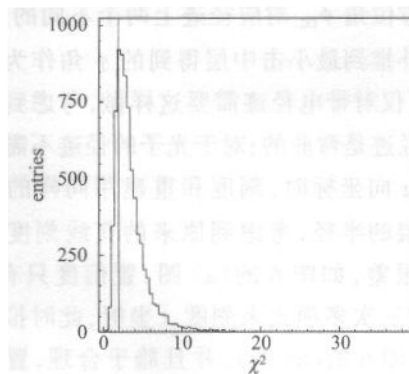


图 4 直线拟合过程中归一化的 χ^2 分布

4 问题的解决

4.1 位置坐标

原来对于位置坐标计算的逻辑对于真实光子是 正确的, 但对于假光子显然有问题, 当出射方向和簇 射发展方向夹角较大时, 最小击中层的击中点将严 重偏离簇射的中心; 对于利用直线拟合确定位置, 其 误差显然在最小击中层处较重心处更大; 而且很多 时候拟合不能通过, 得到的位置坐标相当于加权平 均得到的位置坐标. 考虑到这些因素, 我们用加权 平均来确定入射粒子独立簇射的位置, 即 ϕ 和 $\text{ctg}\theta$. 其中权重 ω_i 应该直接用该击中的能量, 但考虑到对 于 6 个读出层, 层数越大, 对应的半径 R 的不确定性 越大, 我们总是把该读出层的中间作为该层的位置, 所以仍用平均能量作权重, 对于最小击中层相应的 权重不再乘以 2. 图 5 给出了改进后最小击中层权 重不乘以 2 的情况下 z 向和 ϕ 向的分辨. 研究也表明 最小击中层权重不乘以 2 相对于最小击中层权重乘 以 2, 位置分辨略有提高, z 向分辨由 2.2cm 提高到 2.1cm , ϕ 向分辨由 6.0mrad 提高到 5.8mrad .

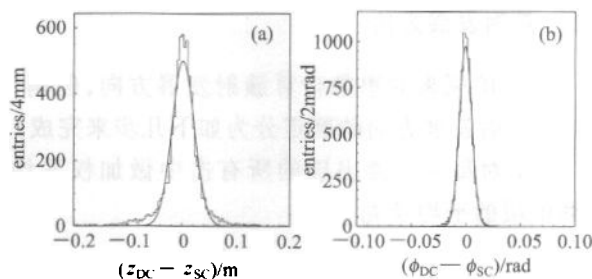


图 5 改进后的 Δz 和 $\Delta\phi$

(a) Δz , 分辨为 2.1cm ; (b) $\Delta\phi$, 分辨为 5.8mrad .

注意到此时的方位角 ϕ 和 MDC 径迹外推到最小

击中层的方位角 ϕ_{DC} 对应径迹上两个不同的点,把 ϕ 沿着径迹外推到最小击中层得到的 ϕ 角作为独立簇射的 ϕ 角(仅对带电径迹需要这样做,考虑到它们在磁场中的径迹是弯曲的;对于光子的径迹不需要).

确定 z 向坐标时,刻度和重建用同样的 R_{in} ,即最小击中层的半径,考虑到原来的直线刻度 z 导致拟合质量很差,如图 6 的(a)图,置信度只有 3.0×10^{-5} .改用三次多项式来刻度 z 坐标,此时拟合优度大大提高(图 6 的(b)图),并且趋于合理,置信度为 60%.图 7 给出了改进后 Δz 沿 z 向的分布,可以看到起伏现象基本消失了.

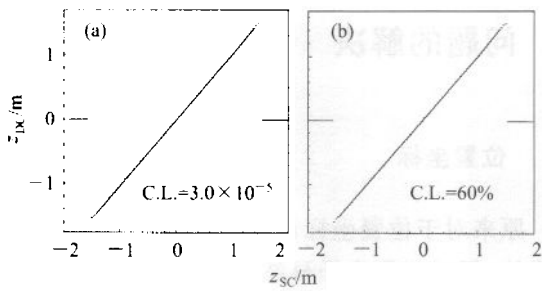


图 6 z 坐标刻度的置信度

- (a) 直线刻度的结果,置信度只有 3.0×10^{-5} ;
- (b) 三次多项式刻度的结果,置信度为 60%.

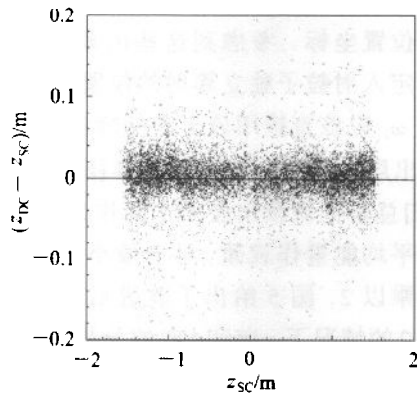


图 7 改进后 Δz 沿 z 向的分布,起伏现象基本消失了

4.2 簇射发展方向

仍沿用原来的思想计算簇射发展方向,但稍作改进.簇射发展方向的确定分为如下几步来完成:

(1) 对每一个读出层的所有击中做加权平均,得到该层的平均 ϕ 角,

$$\phi_j = \frac{\sum_{i=1}^k \phi_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i},$$

其中 ϕ_j 是第 j 个读出层的平均 ϕ 角, k 为该层中好的击中单元的个数.

(2) 对上述求得的 ϕ_j 作直线拟合,求出拟合直

线与最小击中层和最大击中层交点的方位角: ϕ_{in} 和 ϕ_{out} .

(3) 同样的方法确定最小击中层和最大击中层的 z 坐标: z_{in} 和 z_{out} .

(4) 由最小击中层和最大击中层的两个点 $(\phi_{in}, z_{in}, R_{in})$ 和 $(\phi_{out}, z_{out}, R_{out})$,利用公式(7)来确定簇射发展方向.

5 结果与讨论

通过以上对刻度和重建过程所做的改进,得到了更好的位置分辨率.表 1 给出了改进前后位置分辨的比较, z 向分辨由 3.1cm 变为 2.1cm,改善达 33%; ϕ 向分辨由 7.6mrad 提高到 5.8mrad,改善达 24%.图 8 是利用改进后的计算方法得到的簇射发展方向和出射方向的夹角分布.与前文图 3 中相应的图对比,可以看到两者有显著的差别,改进后的方法给出了合理的分布.对 Monte Carlo 模拟数据作了同样的分析研究,发现 MC 模拟的 z 向分辨为 2.4cm,明显劣于真实值; ϕ 向分辨为 4.8mrad,明显好于真实值.图 9 给出了改进后 MC 数据中簇射发展方向和出射方向的夹角分布,与图 8 真实数据的分布比较,可以看到 MC 数据 α_ϕ 的分布与真实数据基本一致, α_θ 的分布比真实数据相应的分布更平滑一些. MC 与真实数据的不一致表明 MC 模拟中尚存在需要改进的地方.

表 1 改进前后位置分辨率的比较

位置分辨率	改进前	改进后
σ_z/cm	3.1	2.1
$\sigma_\phi/mrad$	7.6	5.8

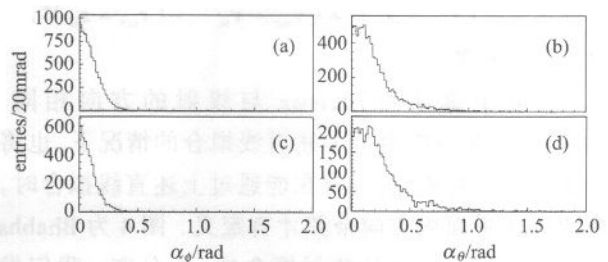


图 8 改进后 α_ϕ 和 α_θ 的分布

- (a) 电子的 α_ϕ 分布; (b) 电子的 α_θ 分布;
- (c) 光子的 α_ϕ 分布; (d) 光子的 α_θ 分布(真实数据).

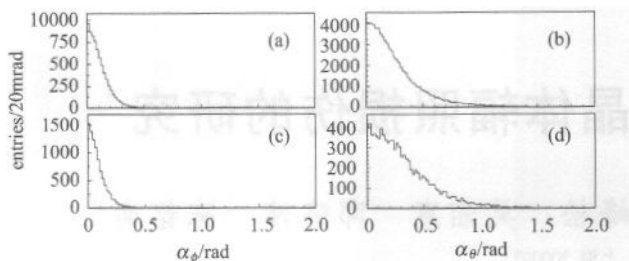


图 9 改进后 α_4 和 α_9 的分布

(a) 电子的 α_4 分布; (b) 电子的 α_9 分布;
(c) 光子的 α_4 分布; (d) 光子的 α_9 分布(MC 数据).

因为簇射发展方向和出射方向的夹角常用来鉴别低能光子,用 Monte Carlo 模拟数据来研究真假光子夹角分布的差别.产生 $\psi(2S) \rightarrow \gamma\chi_{c,2} \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ 末态 10000 个 Monte Carlo 事例,把通过 4C 拟合的低能光子 ($E_\gamma < 0.5\text{GeV}$) 标记为真实光子,其他重建出来的低能光子标记为假光子.图 10 给出了真假光子的 α_4 和 α_9 的分布.可见真假光子在 α_4 和 α_9 的分布上

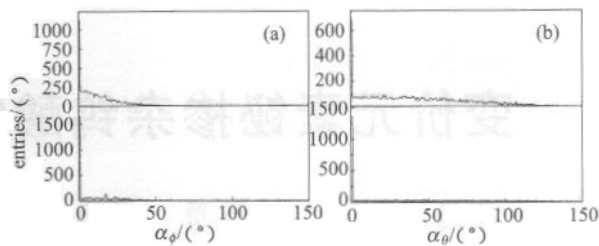


图 10 MC 数据中低能真假光子的 α_4 和 α_9 的分布

(a) α_4 ; (b) α_9 . 上图是真光子,下图是假光子.

确实存在差别,可以用来帮助鉴别真假光子.

综上所述,我们对 BES II BSC 的刻度和重建作了改进,使得探测器的位置分辨率有所提高,电磁簇射发展方向的确有所改进,这对于更有效地利用 BSC 的信息进行物理分析是很有意义的.

诚挚地感谢毛泽普,陈江川和黄秀萍等的有益讨论.

参考文献 (References)

1 BES Collab. Nucl. Instr. Meth., 1994, **A344**:319
 2 ZHAO Hai-Wen et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, **23**:846—853(in Chinese)

(赵海文等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:846—853)
 3 LI Hai-Bo et al. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1999, **23**:607—615(in Chinese)
 (李海波等. 高能物理与核物理, 1999, **23**:607—615)

Study of BES II Barrel Shower Counter Performance*

DU Shu-Xian¹ YUAN Chang-Zheng² LIU Jue-Ping¹ QI Na-Ding²

1(Physical Science and Technical College, Wuhan University, Wuhan 430072, China)
 2(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The performance of BES II Barrel Shower Counter (BSC) was carefully studied. Calibration and reconstruction of BSC were improved. Better determination of z coordinate, better resolutions on z coordinate and ϕ angle were achieved. A method to determine correct shower developing direction was given.

Key words BES, BSC, position resolution, shower developing direction, calibration, reconstruction

Received 12 September 2002

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480, 10075036), One Hundred Person Project of CAS (U-25), BEPC National Laboratory Project and BES Collab. Research Foundation