

北京谱仪桶部簇射计数器径迹重建方法

赵海文 王泰杰 毛泽普 李金 刘洪涛¹ 李卫国
严武光 陈光培 刘靖 李佩琴 荣刚 袁野

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

¹(北京大学技术物理系 北京 100871)

摘要 介绍了北京谱仪桶部簇射计数器径迹的重建方法,包括簇射径迹(独立簇射)的寻找、簇射的劈裂与合并等;并讨论了重建的性能和结果。

关键词 簇射计数器 径迹重建 簇射团 簇射

1 引言

北京谱仪是工作在北京正负电子对撞机上的大型通用探测器^[1,2]。桶部簇射计数器(BSC)^[3]是其重要的子探测器之一。它是一个气体取样型电磁量能器,利用电磁簇射的过程探测光子或电子的能量及空间击中位置。BSC的几何结构为圆桶形(见图1),由24层自淬灭流光(SQS)计数器和24层Al-Pb-Al吸收层相叠加组成。每层560个单元共 $24 \times 560 = 13440$ 根信号丝。信号输出时,沿径向1至6层双丝组合,7至12层三丝组合,后12层组合在一起,以减少电子学的读出道数。采用双端信号读出以便利用电荷分配法确定入射粒子沿信号丝方向(z 方向)的位置。这样形成了6个读出层,每层560路,总计6720路电子学读出。读出的信号由在线数据获取系统记录并储存,供离线数据分析使用。在数据的离线分析过程中,簇射径迹的重建是BSC数据处理的极为重要的一环,它是物理分析的基础。

北京谱仪桶部簇射计数器重建软件于80年代中期由SLAC的MARK III移植而来。由于北京谱仪桶部簇射计数器在硬件上与MARK III的簇射计数器在诸如探测单元数目、几何尺寸、计数器的工作模式(北京谱仪为SQS模式,MARK III为正比模式)、高压、气体及电子学读出等都有较大差别,因而重建软件在MARK III所采用基本原理基础上有重要的改进和完善。北京谱仪运行期间也不断地对其进行改进和维护,以适应BSC硬件状况、性能的变化以及数据处理的需要。这些改进是多方面的,例如,对原始数据的筛选、程序结构的调整、重要参数的修改和确定、错误的消除等...,以改善数据的重建质量,为数据的物理分析服务。本文以BSC软件的当前版本(V.100)为基础,介绍BSC的径迹

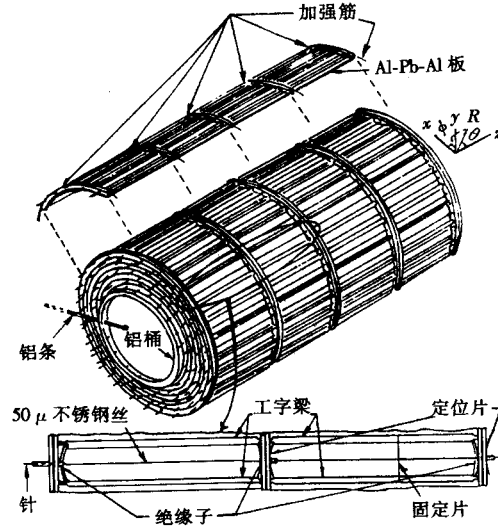


图1 BSC结构示意图

重建过程及重建的性能和结果.

2 径迹重建原理

入射粒子击中簇射计数器后,在其中产生电磁级联簇射,从而将粒子的能量沉积在计数器中.簇射产生的次级粒子(如光子、电子)击中探测单元后,将在其信号丝的两端输出电荷 Q . 所有关于击中的信息,如击中单元的单元号、层号、两端分别输出的 Q 等,均由数据在线获取系统按特定的数据结构记录在数组 IRAW(8000)中,称之为原始数据(RAWDATA). 对每个事例的原始数据进行处理及计算,还原出正负电子对撞后终态粒子在 BSC 中的沉积能量、击中位置 (x, y, z) 或 (R, θ, ϕ) 、簇射发展的方向等物理信息和其它的有用信息,供物理分析使用,这一过程由径迹重建来完成. 桶部簇射计数器的径迹重建大致分为如下几步进行¹⁾.

第一步,对原始数据进行筛选和预处理. 首先,调用一个初始化程序将重建中用到的一些变量初始化. 然后在一个事例的 RAWDATA 中依据击中的层号(layer),单元号(cell),输出端号(end,分东、西两端)及每端输出的电荷 Q 对所有击中进行筛选. 选择所有具有双端输出的击中及共计不超过 300 个 cell 的具有单端输出的击中. 对每一个 cell,击中点的 z 坐标由电荷分配法确定:

$$z = [Q_1 / (Q_1 + Q_2) - 0.5] / \eta,$$

其中 Q_1, Q_2 分别为该 cell 东、西两端的电荷的 ADC 输出值. 对不同的击中层,系数 η 有不同的值. 对具有单端输出的击中,采用与其相邻的击中单元的 z 的平均值来确定该击中

1) BES程序库, BSCODE V. 85, V. 86, V. 100(内部资料)

的 z 坐标值. 每个击中单元的能量沉积则由该单元两端输出的电荷总量乘以一个常数因子确定. 把每个 cell 的击中信息填入指定数组如 ISCHIT 中, 以备寻迹之用.

第二步, 进行初级寻迹. 粒子进入 BSC 后, 发生电磁级联簇射. 粒子径迹在 BSC 中表现为簇射, 每个簇射由许多击中组成. 对于相距较近的簇射, 它们在空间分布上有可能是重叠的. 在所有的 BSC 击中 cell 中, 如果相邻的击中的 cell 号之差小于一个可调参数 $celgap$ (根据簇射的展宽, 通常选择 $celgap = 5$), 认为它们属于同一个簇射集团, 称为簇射团 (cluster); 否则, 它们分属于不同的簇射团. 这样, 所有的击中 cell 被分为许多组, 每组为一个簇射团, 它由 cell 号相邻近的击中组成. 对不能形成簇射团的零散击中, 将它们归为一类, 称之为无效簇射 (null-cluster). 对于那些具有太多单端输出击中的事例, 则在寻找簇射团的过程中, 仅考虑有双端输出的击中而忽略单端输出击中. 然后, 把每个簇射团的信息如起止 cell 号、层号、击中数等, 存入数组 ICLUE 中, 以便进行模式识别.

第三步, 进行模式识别. 由初级寻迹找到的簇射团并不是一个严格意义上的簇射, 它可能由一个或多个入射粒子产生的簇射混合而成. 模式识别就是在每个簇射团中, 尽可能地找出所有可能的子簇射, 根据其特点, 合并 (merge) 或劈裂 (split) 为一个或几个独立簇射, 每一个独立簇射被认为是由一个入射粒子产生的. 在模式识别中, 首先在每个簇射团中寻找可能的簇射顶点 (seed), 即子簇射产生点. 从一个簇射团中具有最小 layer 号及最小 cell 号的击中开始, 沿径迹向左、向右、向上、向左上、向右上方向, 在与其相邻的 cell 中寻找击中. 所有相邻的击中都被认为是属于这个顶点产生的子簇射. 然后, 在剩余的击中中重复这一过程, 直到找出所有的子簇射. 这样, 在一个簇射团中可能存在若干个顶点, 由它们发展的子簇射可能是相互重叠的. 其次, 将符合合并条件的子簇射合并为一个簇射. 做法是: 先将那些太小的子簇射 (少于 3 个有双端输出的击中), 并入距它最近的较大子簇射. 然后, 确定哪些子簇射是相互重叠的, 并确定相互重叠的每个子簇射的基底, 即每个子簇射的最小 layer 号击中层上最大与最小击中 cell 号之间的 cell 区间, 同时找出其中具有最小 layer 号基底的子簇射. 这个具有最小 layer 号基底的子簇射叫做基础子簇射. 然后, 把那些基底与基础子簇射基底相交或相互包含的子簇射并入基础子簇射, 并把那些基底分布在基础子簇射基底 45° 发展角之内的子簇射也并入基础子簇射, 使之形成一个较大子簇射. 原基础子簇射的顶点即为该较大子簇射的顶点. 然后, 在剩余在相互重叠的子簇射中不断地重复这一合并过程. 不能与任何基础子簇射合并的子簇射, 单独形成一个较大子簇射. 于是, 在一个簇射团中, 其中的子簇射合并成几个较大子簇射. 较大子簇射之间仍可能相互重叠. 这时, 可决定是否劈裂它们或继续合并它们. 具体做法是: 对于其中相互重叠的两个较大子簇射, 例如, A 与 B, 在重叠部分的击中当中, 找出 cell 号位于 A 的顶点与 B 的顶点之间并且 layer 号为最小的那个击中. 如果该击中的 layer 号与两个顶点的 layer 号之差的绝对值都大于 2, 或者两个顶点的 z 坐标值之差的绝对值大于给定值 $ZCUT$ (目前为 $2m$, 此切割条件非常松), 则应劈裂它们. 进行劈裂时, 首先计算较大子簇射 A 与较大子簇射 B 各自的不相互重叠部分的击中的平均位置点 S_A 及 S_B . 设 S_A 的坐标值为 (L_A, C_A, Z_A) , 其中的 L_A, C_A, Z_A 分别是较大子簇射 A 的与 B 不重叠部分的击中的平均 layer 号、平均 cell 号及平均 z 坐标值, 计算 A 与 B 相互重叠部分的任意一个击中与 S_A 的距离:

$$DA = |LAY - LA| + |CEL - CA| + |z - ZA| .$$

式中 LAY , CEL , z 为该击中的 layer 号, cell 号及 z 坐标. 同样, 计算该击中与 S_B 的距离 DB , 并比较 DA 与 DB 的大小. 若 $DA < DB$, 则将这个击中归入较大子簇射 A, 否则, 将其归入较大子簇射 B. 对 A 与 B 相互重叠部分中的每一个击中都做如此处理. 这样, 重叠的两个较大子簇射就被劈裂为两个完整意义上的簇射, 即独立簇射 (shower). 一个独立簇射被认为是由单个的入射粒子产生的. 对于不满足劈裂条件的, 则将它们合并为一个独立簇射. 这样, 就完成了对一个簇射团的模式识别.

对于 BSC 的每一个簇射团都作上述处理, 就完成了 BSC 的寻迹过程.

第四步, 确定物理信息, 即对每一个独立簇射, 计算其空间信息及能量信息. 对一个给定的独立簇射, 其每一击中层平均 z 坐标 z_l 和平均 ϕ 角 ϕ_l 由下式计算:

$$z_l = \frac{\sum_i^n (E_i \cdot z_i)}{\sum_i^n E_i}$$

$$\phi_l = \frac{\sum_i^n (E_i \cdot \phi_i)}{\sum_i^n E_i}$$

其中, E_i , z_i , ϕ_i 分别为该层每个有双端输出的击中的能量、 z 坐标和方位角 ϕ , n 为有双端输出的击中的数目. 在给定的独立簇射中, 找出具有好的 ϕ 、 z 的击中, 定出击中的径向位置 R , 并由 z 和 R 求得击中的 $\text{tg}\theta$. 然后, 对所有击中的 R 及单元号 cell 按粒子数据表给出的直线拟合方法^[4]进行加权拟合 (layer < 4 时, 权重 $w_i = E_i/2$; layer = 4, 5 时, 权重 $w_i = E_i/3$; layer = 6 时, 权重 $w_i = E_i/12$). 得到拟合常数 a, b

$$R = a + b \cdot \text{cell} .$$

独立簇射的 ϕ 角由下式计算:

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

式中 R_{in} 是独立簇射的最小击中层半径. 独立簇射的 $\text{tg}\theta$ 由每个好击中的 $\text{tg}\theta$ 加权平均得到. 于是, 产生独立簇射的入射粒子的击中位置坐标 (x , y , z) 可由下式定出:

$$x = R_{\text{in}} \cdot \cos\phi ,$$

$$y = R_{\text{in}} \cdot \sin\phi ,$$

$$z = R_{\text{in}} \cdot \text{tg}\theta .$$

采用同样方法, 以独立簇射最大击中层的半径 R_{out} 替代上面公式中的 R_{in} , 可定出独立簇射最大击中层的平均位置坐标 (x_{out} , y_{out} , z_{out}). 簇射发展方向与 x 坐标轴的夹角 θ_x 可由下式计算:

$$\cos\theta_x = (x_{\text{out}} - x)/L ,$$

其中,

$$L = \sqrt{(x_{\text{out}} - x)^2 + (y_{\text{out}} - y)^2 + (z_{\text{out}} - z)^2} .$$

同样,可计算出簇射发展方向分别与 y 轴及 z 轴的夹角 θ_y 和 θ_z . 独立簇射的能量由组成它的所有击中的能量求和定出. 对独立簇射的位置和能量进行刻度修正以消除系统偏离, 得到准确值并给出误差.

最后一步, 与主漂移室径迹匹配并确定簇射性质, 即确定独立簇射是由中性粒子如光子, 或由带电粒子如电子等产生. 计算每个独立簇射与主漂移室每条径迹的间距, 在满足下列条件:

$$|\phi_{DC} - \phi| < 0.1,$$

$$|z_{DC} - z| < 0.5 \quad (\text{m})$$

(其中 ϕ_{DC} , z_{DC} 为主漂移室径迹的 ϕ 角及 z 坐标) 的独立簇射与主漂移室径迹中, 找出 ϕ 差值最小的一对匹配, 即认为这个独立簇射是由该主漂移室带电径迹产生的. 否则, 是由光子产生的.

最后, 将计算得到的各种独立簇射信息写入数组 TRKLST, 完成 BSC 径迹重建.

3 结果与讨论

北京谱仪运行多年来, BSC 重建软件一直处于良好的工作状态. 其间根据数据状况及探测器状况对其做过一些修改和维护. 在整个事例重建过程中用于 BSC 重建的 CPU 时间占整个事例重建 CPU 时间平均不到 10%. 通过扫描大量辐射 Bhabha 事例, 统计事例

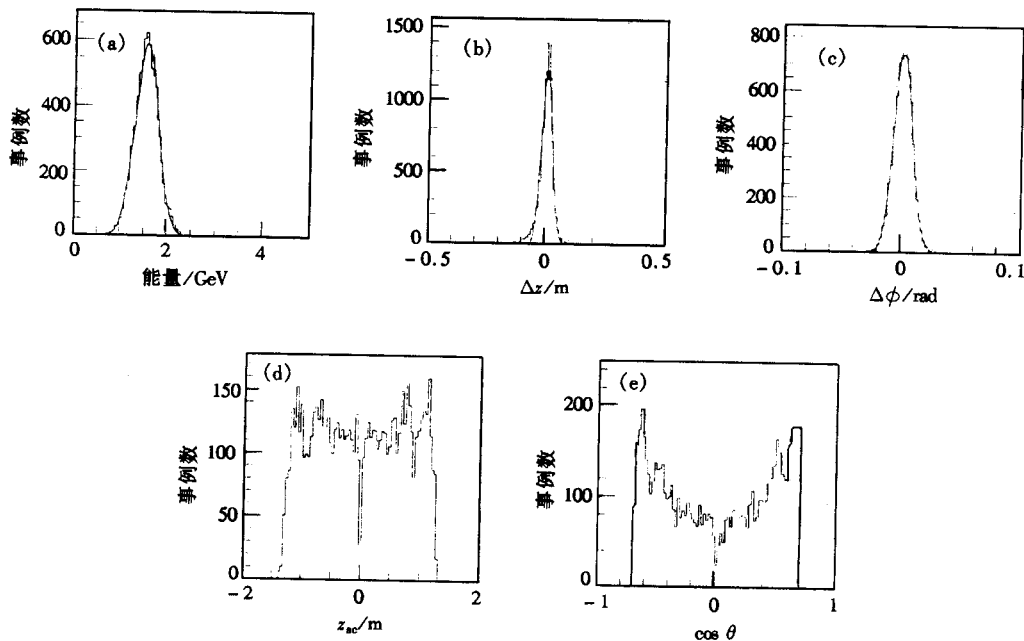


图2 Bhabha事例中电子的几种信息分布

(a) 沉积能量分布; (b) Δz 分布; (c) $\Delta\phi$ 分布; (d) z 分布; (e) $\cos\theta$ 分布.

中簇射的数目及重建出来的簇射的数目,得到当簇射的能量大于 18MeV 时 BSC 重建效率好于 99%.

目前,由 Bhabha 事例重建及刻度后得到的结果, BSC 的能量分辨率 $\sigma_E / \sqrt{E} = 19.8\%$, z 方向位置分辨率 $\sigma_z = 2.3\text{cm}$, ϕ 方向位置分辨率 $\sigma_\phi = 7.7\text{mrad}$ (主漂移室径迹的位置分辨率对 BSC 位置分辨率影响不大,在此略去). 图 2 显示了能量分辨,位置分辨及 Bhabha 事例正负电子产生簇射的 z 坐标分布和 $\cos\theta$ 分布.

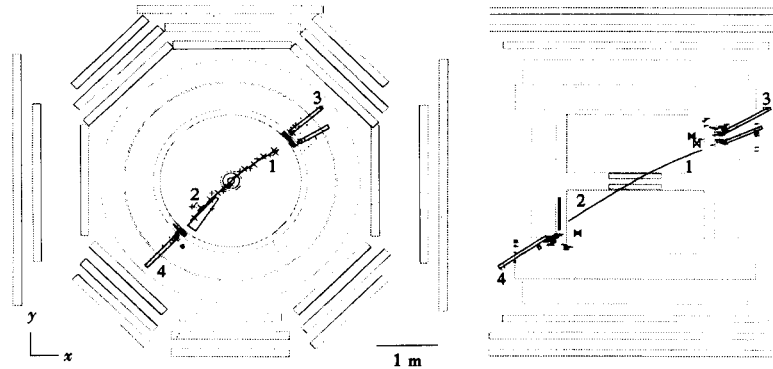


图3 一个典型的辐射 Bhabha 事例

图 3 为一个典型辐射 Bhabha 事例的单事例显示图,图的右上方有两个簇射,一个由电子产生,一个由辐射光子产生. 图 4 为图 3 右上方两个簇射的结构显示图,清晰地显示了这两个簇射的分离和与主漂移室径迹匹配的情况.

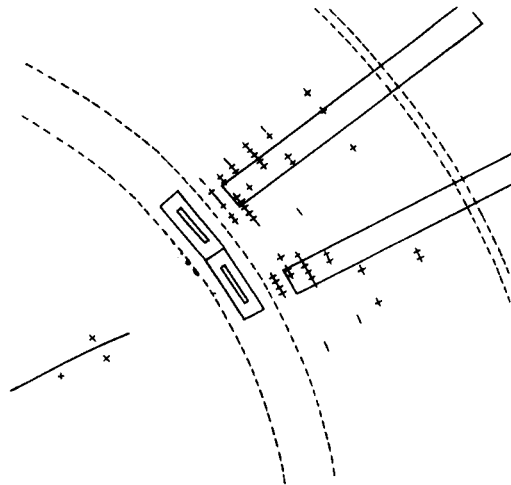


图4 光子簇射、电子簇射及与MDC径迹匹配(对应于图3右上侧的两个簇射)

此外,从入射粒子的动量与其产生的簇射沉积能量的联合分布上也能在一定程度上对粒子进行鉴别. 对于动量相同的电子、 μ 子、和强子,电子产生的簇射的沉积能量最大, μ 子和强子的簇射沉积能量较小. 但是, μ 子簇射的沉积能量受动量影响不大,而强子簇射的沉积能量随着动量的增大有所增加. 图 5 是 J/ψ 能区带电粒子的沉积能量-动量分布.

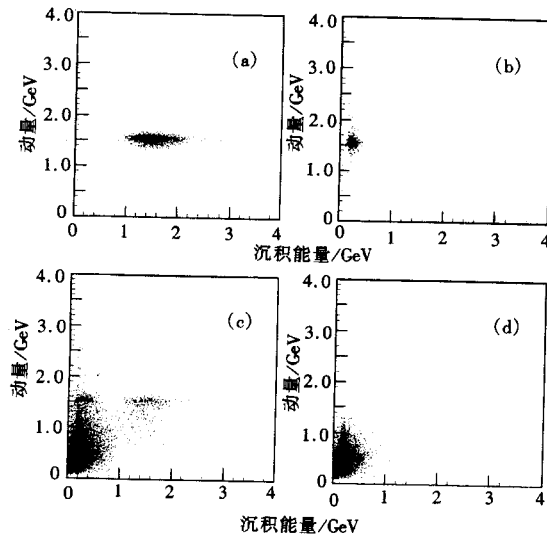


图5 J/ψ能区粒子的MDC动量与BSC沉积能量二维分布
(a) Bhabha事例的 e^\pm ; (b) 双 μ 事例的 μ^\pm ; (c) J/ψ能区事例中的荷电粒子径迹; (d) J/ψ事例中的强子径迹.

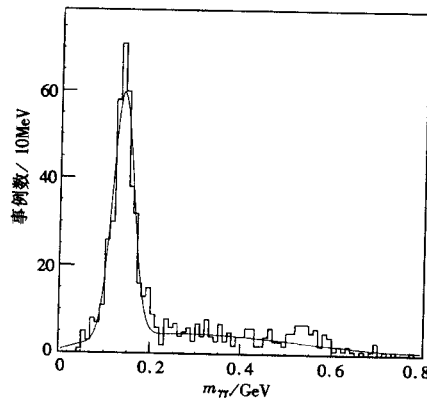


图6 $\psi' \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$ 衰变中由两个光子组合形成的 π^0 不变质量谱

图中左上方为双 μ 事例中的 μ 子分布, 右上方为 Bhabha 事例电子的分布, 左下方是 J/ψ 事例的全径迹分布(包括了电子、 μ 子和强子), 右下方为强子 π , K 的分布. 由于光子的动量不能由主漂移室给出, 在图中未予显示.

桶部簇射的信息对物理分析, 尤其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. 图 6 显示的是由两个光子(由 BSC 重建得到)组合得到的 π^0 不变质量谱, 可以看到准确的 π^0 不变质量的峰位.

本工作的完成,是 BES 软件研究人员及 BSC 硬件工作人员长期努力的结果。作者感谢 BES 桶部簇射计数器组同志的有益讨论和帮助,感谢李海波博士为本文提供了 π^0 事例样本。

参 考 文 献

- 1 Ding Huijiang et al (BES Collaboration). High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1992, **16**: 769—789
(丁慧良等(BES 合作组). 高能物理与核物理, 1992, **16**: 769—789)
- 2 Bai Jingzhi et al (BES Collaboration). Nucl. Instr. Meth., 1994, **A344**:319—334
- 3 Zhou Yuehua et al. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1989, **13**:973—979
(周月华等. 高能物理与核物理, 1989, **13**: 973—979)
- 4 PDG. Review of Particle Properties, Phys. Rev., 1996, **D54**:161

Track Reconstruction in BES Barrel Shower Counter

Zhao Haiwen Wang Taijie Mao Zepu Li Jin Liu Hongtao¹
Li Weiguo Yan Wuguang Chen Guangpei Liu Jing Li Peiqin
Rong Gang Yuan Ye

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

¹(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The track reconstruction of BES barrel shower counter was presented and the shower finding, pattern recognition technique were described. The reconstruction results from experimental data were presented and discussed.

Key words shower counter, track reconstruction, cluster, shower