

BES 实验数据离线刻度

毛泽普 王 俊 叶诗章 兰慧彬 孙式军 刘怀民
刘 琦 刘 靖 李卫国 李佩琴 陈少敏 陈光培
邱进发 宋晓非 范晓舫 周 莉 荣 刚 张少强
张家文 韩 纓 薛生田 潘玲君

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1995-11-28 收稿

摘 要

概述了北京谱仪(BES)各子探测器的实验离线数据刻度,包括主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器和 μ 子鉴别器.给出了 BES 1994年D_s运行期间的探测器运行性能,以及数据质量情况.

关键词 数据的离线刻度, 动量分辨, 时间分辨, 能量分辨, dE/dx 能量分辨, 事例重建.

1 引 言

北京谱仪(BES)是工作在北京正负电子对撞机(BEPC)上的一台多用途谱仪^[1].它由中心漂移室(CDC)、主漂移室(MDC)、飞行时间计数器桶部和端盖部分(TOF)、簇射计数器桶部和端盖部分(BSC和ESC)、 μ 子鉴别器等组成.从1990年开始运行以来, BES成功地在3.08、3.52、3.68、4.03GeV能区获得了大量物理数据: $9 \times 10^6 J/\psi$ 事例; 5pb^{-1} τ 轻子质量测量数据; $3.4 \times 10^6 \psi'$ 事例和 $22.3\text{pb}^{-1} D_s$ 数据.并在这些领域取得了一些具有世界水平的物理结果^[2]. BES实验数据主要处理流程如图1.

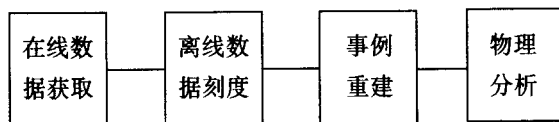


图1 数据处理流程图

BES在线数据获取系统通过 BES 探测器和与其相连接的电子学读出系统、触发系统和在线计算机数据获取系统将正负电子对撞产生的高能粒子在 BES 中留下的各种信息记录在磁带上.利用在线获取的原始数据,建立粒子径迹和计算粒子动量、能量、质量等称为事例重建.事例重建时必须对原始数据作各种系统的特殊的修正,并且计算

事例的各种物理量. 完成这些修正和产生用于事例重建中的各种系数, 即是离线数据刻度^[3].

2 BES 实验数据离线刻度

BES 在线获取的原始数据粗略地可分为三类: 一类是记录取数环境的数据, 包括各探测器状态信息、束流参数和其它环境数据等. 第二类是噪声事例. 第三类是物理数据, 物理数据包括粒子经过的探测器记录的时间信息和电离量信息(简称时间信息和能量信息), 和探测器的地址(简称探测器地址信息). 利用这些时间、能量和探测器的地址信息以及探测器的几何位置, 计算粒子的空间坐标、能量、动量, 以及作粒子识别. BES 物理目标的需要决定了各探测器测量的各种量所需的精度, 如 MDC 的 xy 平面位置分辨 $\sigma \leq 200 \mu\text{m}$, 动量分辨 $(\sigma_{p_{\perp}} / p_{\perp})_{\text{ms}} \approx 1.3\%$, $(\sigma_{p_{\perp}} / p_{\perp})_{\text{sp}} = 0.7\%$, 这里 p_{\perp} 是横动量, ms 表示多次散射, sp 表示漂移室本征空间分辨. dE/dx 能量分辨 $\sigma_E/E \approx 8.2\%$. 要达到如此高精度的测量, 必须对原始数据作精细的修正和标定(简称刻度), 其中包括:

1) 探测器测量中的各种系统误差以及探测器本身位置的系统偏差, 如时间“0”点的设置和信号阈值设置的偏差; 探测器和电子学系统各部分之间性能不一致引起的信号不均匀性; 以及在探测器几何位置测量中存在的偏差.

2) 由于取数环境变化引起的信号随机的或短时期的变化, 如环境温度、气体压力变化; 电子学读出系统受环境的影响; 探测器高压的浮动和加速器条件的变化等引起的信号变化.

3) 探测器的几何结构和某些固有特性引起信号的损失, 如气体探测器中负电性气体对漂移电子的吸附, 探测器的支撑部分和探测器中的物质对信号的影响等.

4) 为了使测量值与理论值比较, 还须作一些特殊修正, 如带电粒子电离涨落方面的处理, 带电粒子理论电离损失曲线与实验测量的修正.

5) 建立一套原始数据与物理量之间转换的常数, 如能量与 ADC 之间的变换系数, 这些常数必定与探测器和取数时间密切相关.

由此可见 BES 离线刻度必须周期性地不断进行, 并且对各种探测器实行各种不同的方法. 在 BES 离线刻度中, μ 子鉴别器用双 μ 事例, 其它探测器都用 Bhabha 事例作样本.

2.1 MDC 刻度

MDC 由 19380 根丝组成, 其中包括 2808 根信号丝, MDC 刻度包括时间部分, 单丝状态和 dE/dx 部分.

MDC 测量带电粒子的电离电子的漂移时间(T_{dr}), 转化为径迹的着火位置, 从而测定带电粒子的径迹和动量.

$$S = v_{\text{dr}} \cdot T_{\text{dr}}, \quad (1)$$

$$p_{\perp} = 0.3B_z R, \quad (2)$$

式中 S 是电离电子的漂移距离, v_{dr} 是电离电子的漂移速度, T_{dr} 是测量的漂移时间, $T_{dr} = \alpha \cdot TDC$, α 是单位 TDC 对应的漂移时间, p_{\perp} 为动量在 xy 平面的分量, B_z 是磁场的 z 分量, R 为径迹的曲率半径. 由此可见时间测量精度与 MDC 空间分辨和动量测量精度直接相关, 所以 TDC 的修正是十分重要的. 其中 T_0 的修正尤其重要, 这一修正是一根一根丝地进行. 图 2(a) 是典型原始的单丝 TDC 分布, 图 2(b) 是信号丝的 δT_0 分布, 图 2(c) 是经过扣除 T_0 后粒子的漂移距离分布. 信号幅度大小对 T_0 的影响用下式作修正:

$$T_{cr} = A + B / Q, \quad (3)$$

式中 A, B 为经过大量数据统计得到的修正因子, T_{cr} 是修正后的漂移时间, Q 是信号幅度值. 在漂移单元中电离电子的漂移速度并非理想的常数^[4], 实际计算用 v_{near} , v_{far} , v_d 代替 v_{dr} , 其中, v_{near} , v_{far} , v_d 分别为在近丝区, 远丝区和漂移区的三个漂移速度. 实际丝位与设计给定值之间的偏离也需作精细的修正. 由于张力不均匀性、重力下垂以及丝之间静电斥力对丝位精度的影响, 洛伦兹力对漂移电子的偏转, 粒子从产生到电离点的飞行时间以及信号沿丝的传播时间都将在径迹重建中给予补偿. 图 2(d) 是经过径迹重建后单丝空间残差 (Δ) 的分布. 所谓单丝空间残差是指在漂移单元内, 径迹拟合的位置与单丝测量位置之差. 由图可得到 MDC xy 平面内空间分辨约 $200\mu m$.

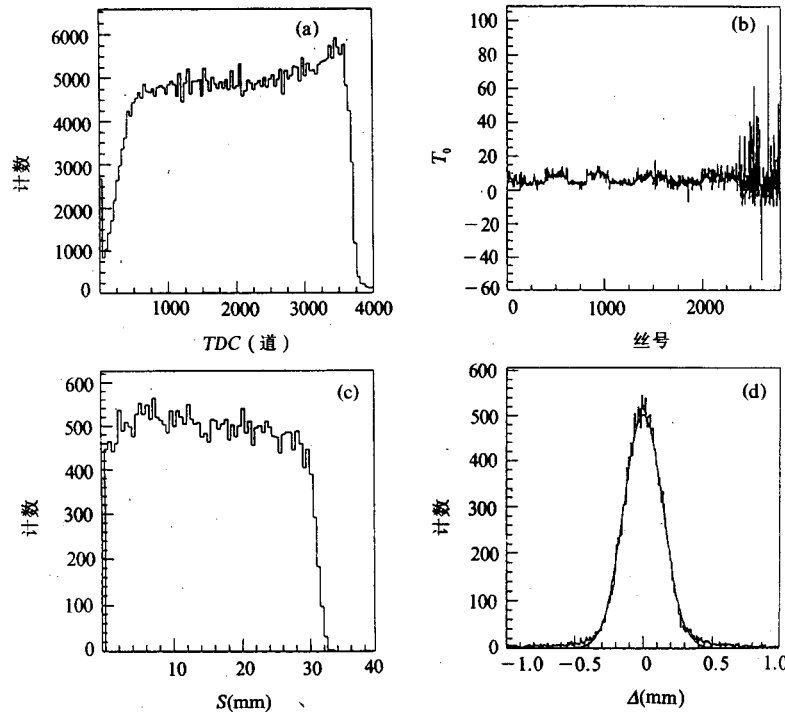


图 2 (a) MDC 原始 TDC 分布; (b) 各丝扣除的 δT_0 分布;
(c) MDC 漂移距离分布; (d) 径迹拟合残差分布

MDC 单丝状态刻度标记表明单丝处于工作、失效和常触发状态中的哪种状态. 这

—信息在事例重建中用于排除噪声信号。

用带电粒子在 MDC 中的电离损失(dE/dx)作粒子鉴别,所以对 dE/dx 的修正必须十分严格^[5]。这方面的修正主要有五项:

- 1) 粒子入射角度不同引起 dE/dx 收集长度的变化。
- 2) 由于各丝之间电压、几何位置和丝直径的差异引起各丝增益的差别。
- 3) 信号丝左右位置偏离单元中心轴引起丝的左右信号的不一致。
- 4) 气体的空间电荷饱和效应的修正。
- 5) 丝增益与漂移距离的修正。

另外为了消除气体压力、温度、气体成分随时间变化对信号幅度的影响还必须对数据逐个 RUN 作幅度归一。图 3(a) 是原始的电离损失谱,图 3(b) 是经过各种修正后以及 30% 的截断平均后的 Bhabha 事例的 dE/dx 分布^[6],由此可得 MDC dE/dx 的分辨率约为 8%。 dE/dx 修正还将对电离能量与脉冲幅度非线性作补偿。图 3(c)、(d) 分别是粒子动量与 dE/dx 的散点图以及实验数据与理论曲线的比较。由图可见 π 、K、p 粒子在 0.7GeV 以内能明显分开,并且理论曲线与实验数据符合也较好。

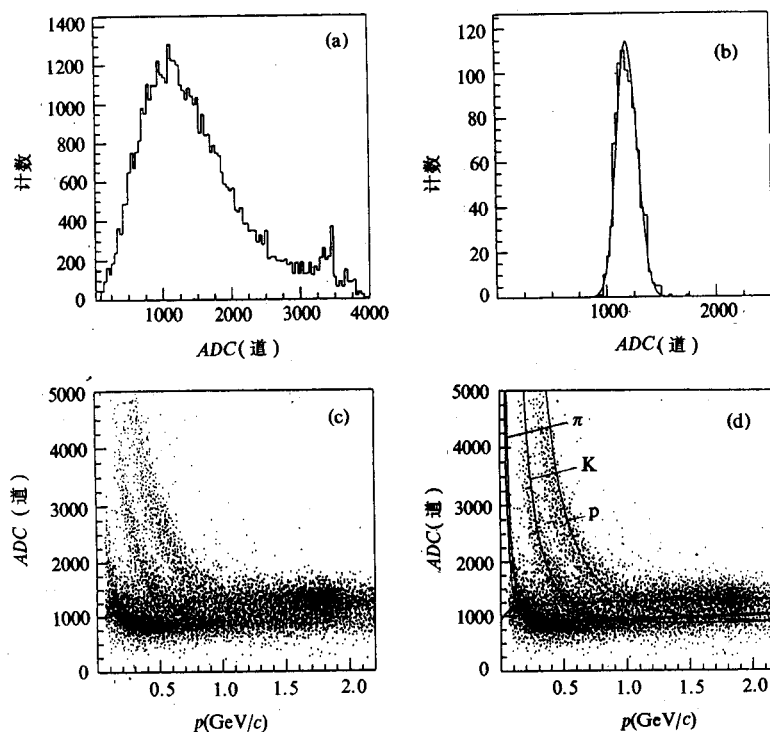


图 3 (a) 未经修正的单丝 dE/dx 分布; (b) 经过系统效应修正后截断平均的 dE/dx 分布;
(c) 经过系统效应修正后截断平均的 dE/dx 与动量的关系; (d) 理论与实验结果的比较

2.2 TOF 刻度

TOF 由 48 块闪烁体组成,用于测量粒子飞行时间,并利用粒子动量计算粒子质量,

用于电子、 π 、K、p 的粒子识别. TOF 的时间分辨是极其重要的指标. 图 4(a) 显示了 Bhabha 事例的电子原始飞行时间分布. 实际粒子飞行时间与测量时间的修正关系如下^[7]:

$$T = T_{\text{raw}} - T_i - (A + BZ) / Q^{1/2} - (C + DZ) / Q - EZ - FZ^2 - GZ^3, \quad (4)$$

式中 Q 是脉冲幅度, Z 是由 MDC 计算的粒子到达 TOF 的 z 向位置. T 是校正后的飞行时间, T_{raw} 是测量到的原始时间, T_i 是每个 RUN 对应的平均零时间偏移. 上式得到单端飞行时间, 然后对两端作加权平均得到实际飞行时间:

$$T = (W_e T_e + W_w T_w) / (W_e + W_w), \quad (5)$$

式中 W_e 、 W_w 分别为东西两端的权重, 表示如下:

$$W = A_i + B_i \times Z + C_i \times Z^2, \quad (6)$$

整个修正过程是一个优化过程, 式中各系数为优化参数. TOF 刻度中对每一个计数器共产生 10 个修正系数, 这些系数将用于 TOF 的径迹重建中. 图 4(b)、(c) 分别是修正后的单端时间分布和测量值与理论值之差的分布, 由此图可得 TOF 的时间分辨率约 365ps. 图 4(d) 是粒子速度与动量的散点图, 由此可见不同种类的粒子(π 、K、p)明显分开.

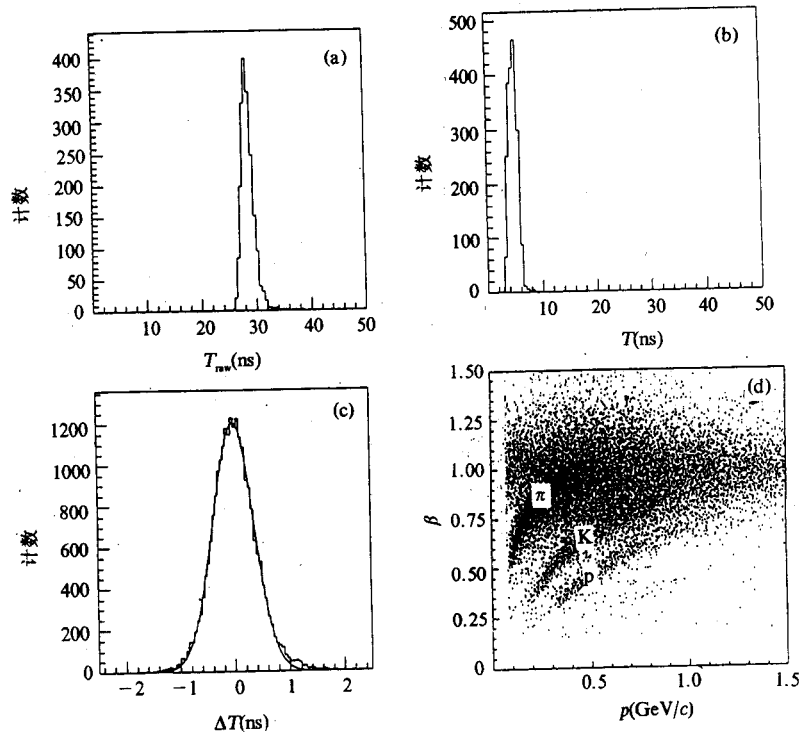


图 4 (a) Bhabha 事例电子未经修正的飞行时间分布;
 (b) Bhabha 事例电子修正后的飞行时间分布;
 (c) Bhabha 事例电子飞行时间测量值与理论值之差的分布;
 (d) 粒子速度 (β) 与粒子动量的关系

2.3 簇射计数器刻度

BSC 和 ESC 测量粒子的沉积能量和位置, 并用于识别电子和光子. 在簇射计数器的能量刻度中^[8], 欲把电子学输出的 ADC 幅度值与能量联系起来, 必需选择已知能量的背靠背的 Bhabha 事例. 由于簇射计数器结构复杂, BSC 一共 13440 个单元, 6720 路读出电子学, 信号受环境影响大, 刻度周期应在满足统计量的条件下尽量缩短, 从而减少信号随时间的变化. 桶部簇射计数器采用自猝灭流光(SQS)取样方式, 工作气体 Ar 和 CO₂ 的比例为 4 : 1, 加入 25% 的正戊烷. 由于气体含量分布的不均匀性, 死道的存在以及电子学插件的不稳定性, 都能造成 SQS 信号在 φ 方向上的不均匀性. 同时由于粒子入射方向不同, 穿过的路径长度不同, 以及 BSC 上加强筋的存在, 也造成 SQS 信号在 z 方向上的分布不均匀性, 所以, BSC 的修正从 φ 方向和 θ 方向分别分不同区间对 ADC 信号作修正. 图 5(c) 是修正前沉积能量 E 的 z 向散点图, 图 5(d) 是经过 θ 方向和 φ 方向修正后的沉积能量 z 向散点图. 由此可见修正后 z 向均匀性改善了. BSC 从里到外有 6 个读出层, 每层均有 560 个单元, 每个单元大小不同, 却加相同的高压, 所以信号大小在各层分布是不均匀的. 因此选择不产生簇射的 μ 事例, 得到各层间信号的校正系数. 修正后的 ADC 值与 Bhabha 事例的已知能量比较, 得到一套 ADC 与沉积能量转换

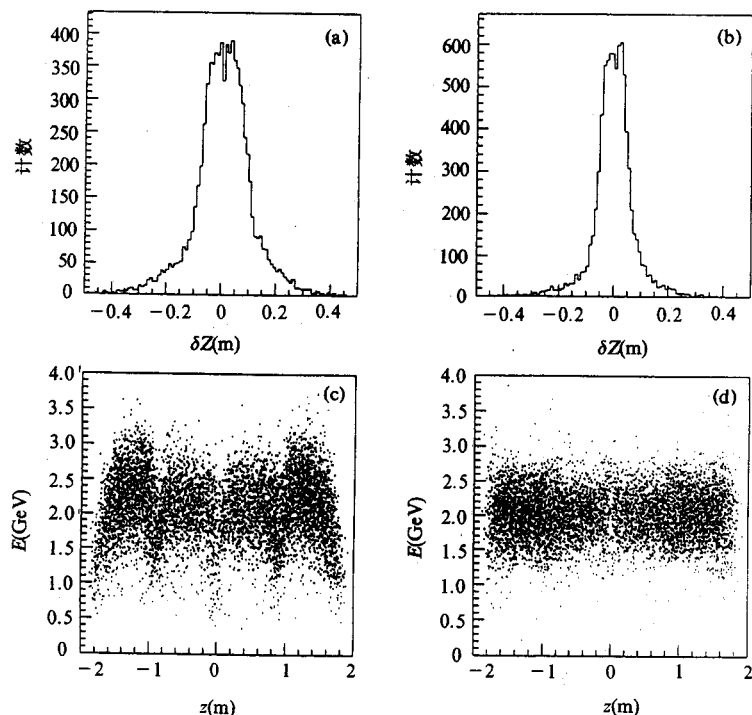


图 5 (a) 修正前 BSC 与 MDC 测量 Z 值之差的分布;
 (b) 修正后 BSC 与 MDC 测量 Z 值之差的分布;
 (c) 修正前粒子能量沿 z 方向的分布;
 (d) 修正后粒子能量沿 z 方向的分布

的系数. z 向位置修正系数是将 BSC 在 ϕ 方向分成八个区间, 以 MDC 径迹给出的 z 坐标与 BSC 径迹的 z 坐标作比较, 并用最小二乘法拟合得到. 图 5(a) 是 BSC 测量 Z 值与 Z_{MDC} 之差修正前的分布, 图 5(b) 是其修正后的分布. 自此可得 BSC 的 z 向测量误差约 4.5cm.

2.4 μ 鉴别器刻度

μ 子鉴别器位于 BES 外层, 用于 μ 粒子的识别与位置测量. 径迹的 xy 由计数器本身位置决定. z 坐标由电荷分配法计算:

$$Z = A \cdot [(Q_1) / (Q_1 + Q_2)] + B, \quad (7)$$

式中 Q_1 、 Q_2 为计数管两端输出的脉冲高度, A 、 B 为刻度确定的系数. μ 子鉴别器的刻度用双 μ 事例为样本, 并用 MDC 径迹给出的 z 坐标为准, 设目标函数:

$$\chi^2 = \sum (Z_M - Z_{\text{MDC}})^2, \quad (8)$$

式中 Z_M 为 μ 计数器测量得到的 μ 介子击中的 z 向位置, Z_{MDC} 为主漂移室外推到 μ 计数器的 z 向位置. 用最小二乘法拟合求出 A 、 B 系数^[9]. 图 6(d) 显示了 μ 鉴别器第一层测定的 μ 径迹 z 坐标与 MDC z 坐标之差的分布, 由此可得 μ 鉴别器的 z 向分辨 $\approx 5.4\text{cm}$.

3 刻度文件的产生与利用

各探测器的刻度方法和周期由各探测器测量对象以及探测器状态决定. MDC 时间部分、单丝状态部分和 dE/dx 系统修正部分一般在一个运行周期作一至两次. dE/dx 幅度归一每个 RUN 刻度一次. BSC、ESC 每 10 个 RUN 刻度一次. TOF 取 20 个 RUN 刻度一次. μ 计数器比较稳定, 不经常做. 每刻度一次都产生一个标准格式的常数文件. 这些常数文件按不同的探测器和特定使用的 RUN 号, 指定特殊的名字, 用严格的格式存放在一个文件(MASTER)中. BES 事例重建时首先从 MASTER 文件中读入常数文件名, 并严格检查常数文件与探测器和 RUN 号是否严格对应, 然后打开常数文件并读入常数进行事例重建.

4 BES 硬件性能与数据质量

BES 离线刻度提供事例重建使用的常数文件, 包括一些常数的误差. 经过事例重建后, 得出一套与数据质量相关的探测器运行性能参数, 它们是 BES 各探测器在相应能区达到的实际指标(其中也包含软件带来的误差). 图 6(a) 和 (b) 分别是 BES 运行在 4.03GeV 时(94 年数据) Bhabha 事例电子在 BSC 和 MDC 中的能量和动量分布, 图 6(c) 为双 μ 事例的动量分布. 由此得到的 MDC 的动量分辨为 $\delta p/p = 1.76\%(1+p^2)^{1/2}$. BSC 的能量分辨率为 $\delta E/E^{1/2} = 23.8\%$. 图 6(d) 为 μ 径迹 z 坐标与 MDC 测量 z 坐标差值的分布.

表 1 列出了 BES 在 D_s 能区 94 年运行中各探测器的性能指标. 从表中可见 BES 各探测器性能基本达到预期设计值^[10].

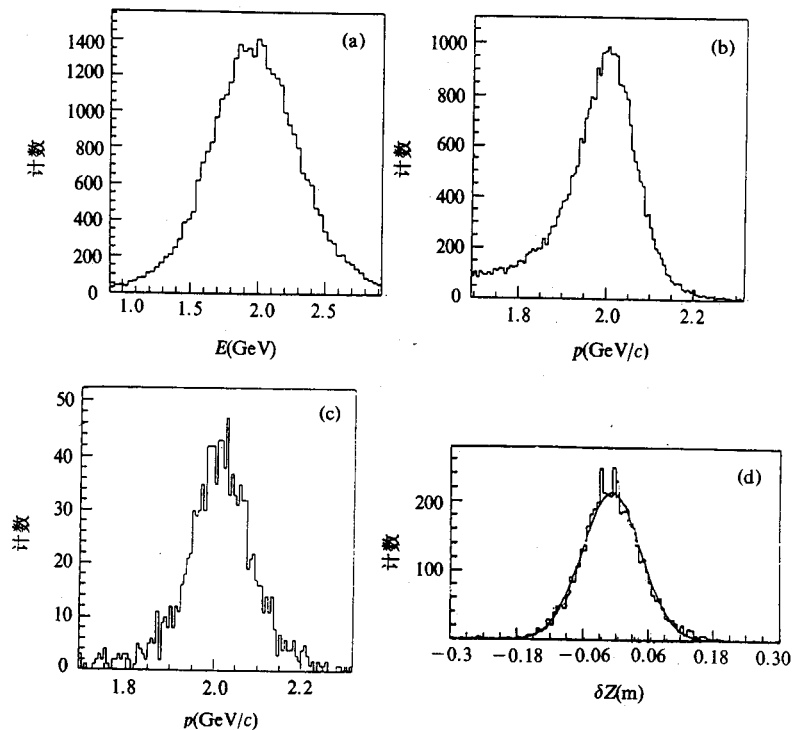


图6 (a) Bhabha 事例电子在 BSC 中沉积能量的分布;
 (b) Bhabha 事例电子在 MDC 中的动量分布;
 (c) 双 μ 事例粒子动量分布;
 (d) μ 径迹 z 坐标与 MDC 测量 z 坐标之差的分布

表 1 D. 取数期间探测器性能

主漂移室	性能
单丝效率	96%
空间分辨	0.2—0.25mm
动量分辨	$\delta p / p = 1.76\% \sqrt{1+p^2}$
z 向分辨	0.6cm
束团 z 向展宽	4—5cm
主漂移室 dE/dx	
dE/dx 能量分辨(BB事例)	7%—8%
K/π 分辨动量上限	0.65GeV/c
飞行时间探测器	
时间分辨	365—385ps
衰减长度	1—1.2m
桶部簇射计数器	
能量分辨(BB事例)	$\delta E / \sqrt{E} = 23.8\%$
z 向位置分辨	4.5cm
端盖簇射计数器	
能量分辨(BB事例)	$\delta E / \sqrt{E} = 24.4\%$
μ 鉴别器	
μ 单丝效率	95%
z 向位置分辨	5.5cm

参 考 文 献

- [1] 丁慧良等, 高能物理与核物理, **9**(1992) 770.
- [2] 丁慧良等, 高能物理与核物理, **10**(1992) 866.
- [3] 李卫国, CCAST 文集第二卷(1992) P32; 毛泽普, CCAST 文集第二卷(1992) P63.
- [4] 毛泽普等, 高能物理与核物理, **17**(1993) 194.
- [5] 荣 刚, 核电子学与探测技术, **12**(1992) 201; 孙式军, 高能物理所硕士论文.
- [6] 荣 刚, 高能物理与核物理, **20**(1996) 577.
- [7] 薛生田、刘 琦, 高能物理所内部报告, 1990 年.
- [8] 李佩琴, 高能物理所内部报告, 1990 年.
- [9] 范晓睿, 高能物理所内部报告, 1993 年.
- [10] 北京谱仪研制报告(探测器部分), 高能物理所内部报告, 1989 年.

BES Data Off-line Calibration

Mao Zepu Wang Jun Ye Shizhang Lan Huibin Sun Shijun
Liu Huaimin Liu Qi Liu Jing Li Weiguo Li Peiqin
Chen Shaomin Chen Guangpei Qiu Jinfa Shong Xiaofei
Fang Xiaoling Zhou Li Rong Gang Zhang Shaoqiang
Zhang Jiawen Han Ying Xue Shengtian Pan Lingjun

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

Received 28 November 1995

Abstract

The off-line calibration system for sub-detectors of BES, including main drift chamber, time of flight counter, shower counter and muon-identification counter, is described. The detector performance during the period of D_s physics runs in 1994 and results of data quality check are presented.

Key words off-line calibration of data, momentum resolution, time resolution, energy resolution, dE/dx energy resolution, event reconstruction.