

北京谱仪大型精密圆柱漂移室 dE/dx 粒子识别的研究

荣 刚 马基茂 毛慧顺 白景芝 谢佩佩 颜 洁
王运永 毛泽普 刘荣光 孙式军 李卫国 宋晓非 武振东

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1995-11-21 收稿

摘 要

本文简要描述了北京谱仪主漂移室的 dE/dx 粒子识别方法, 给出在物理实验应用中 dE/dx 性能测量的主要结果. 经过系统效应的软件修正和绝对的能量刻度后, 对最小电离粒子 ($0.4-0.5\text{GeV}/c$ 的 π) 大于 30 次 dE/dx 取样的能量分辨率为 7.5%. 大于 $3\sigma_K/\pi$ 分离的动量 $p \leq 0.65\text{GeV}/c$. 大于 $3\sigma_{e/\pi}$ 分离的相应动量范围为 $0.2 \leq p \leq 4\text{GeV}/c$.

关键词 北京谱仪, 主漂移室, 电离能量损失, 能量分辨率, 能量刻度, dE/dx 系统效应, 朗道公式, 粒子识别.

1 引 言

北京谱仪是工作在北京正负电子对撞机第一对撞点上的—台通用磁探测器^[1]. 谱仪的物理目标要求在粲粒子物理能区重建 e^+e^- 对撞产生的遍举终态. 在这一能区内, 广泛的物理课题的研究要求谱仪对带电粒子具有很高的动量测量精度和很强的粒子识别能力.

北京谱仪由多个子探测器组成. 谱仪中心的大型精密圆柱漂移室(以下简称主漂移室)主要用于测量带电粒子的动量 and 在工作气体中的电离能量损失 dE/dx 及提供数据获取的在线触发. 联合粒子的动量及其电离能量损失 dE/dx 测量, 可以得到有关粒子质量的信息, 从而实现鉴别粒子类型的目的^[2].

北京谱仪 dE/dx 粒子识别的主要目标是要在低动量下 ($\beta\gamma < 5.5$, $\beta = v/c$ 是粒子的相对论速度, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$) 识别 $\pi/K/p$; 在粒子的动量大于 $0.2\text{GeV}/c$ 区域识别 e/π .

2 北京谱仪主漂移室

2.1 几何结构及工作气体

主漂移室是一个有效长度为 2.12m、内径 31cm、外径 2.3m 的精密圆柱漂移室。它由同心的 5 个轴向丝层和 5 个斜向丝层组成。各层上的漂移单元数从 48 到 108 不等，共计 702 个。每个漂移单元有 4 根引出信号的灵敏丝，整个室共有 2808 根灵敏丝。每个单元内灵敏丝之间被电位丝隔开，电位丝间距为 1cm，形成标准的 dE/dx 取样厚度。当带电粒子通过时，相应灵敏丝给出粒子产生的原初电离电子的 φ 向漂移时间(位置)和在取样气体内的电离能量损失信息。Z 向位置由斜丝信息计算得到。图 1 给出主

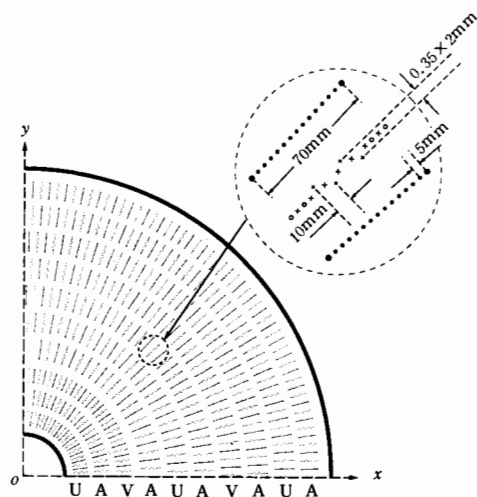


图 1 主漂移室漂移单元结构及单元排布示意图

A: 轴向丝层, + 电位丝, U, V: 斜向丝层, x 信号丝, O 保护丝, · 电场丝, ● 粗电场丝。

漂移室 1/4 端面内漂移单元和第 6 层单元内各种丝的排布图^[2]。

主漂移室的工作气体是 89%Ar + 10%CO₂ + 1%CH₄ 的混合气体。

2.2 读出电子学和数据获取

当带电粒子通过漂移室工作气体时，它们产生的原初电离电子在漂移电场的作用下向灵敏丝漂移，并在灵敏丝附近的高电场区产生雪崩增殖。大量次级电子和正离子分别朝向正负极的运动导致在灵敏丝上产生感应电流信号。经过安装在主漂移室端面板上的电流前置放大器放大变换后输出电荷信号。前置放大器输入端含有耦合电阻网络，用以消除邻丝间的信号串扰。电荷信号被送到后放大器中进一步放大并删除 $1/t$ 尾巴，然后信号被分成两路。其中一路信号进一步放大后被送到电荷测量道中的取样保持电路测量总电荷量。另一路信号经过放大甄别后被送到 TAC 中做时间幅度变换，并且与 t_0 信号一起测量漂移时间(径迹位置)。变换后的时间信息与存放在取样保持电路中的电荷信息

被同时输入到 CAMAC 机箱 BADC 插件进行模数变换. 图 2 给出读出电子学框图, 其中包括放大电路、电荷测量通道、时间测量通道、逻辑控制电路、阈电压调节电路和校准电路 6 个组成部分.

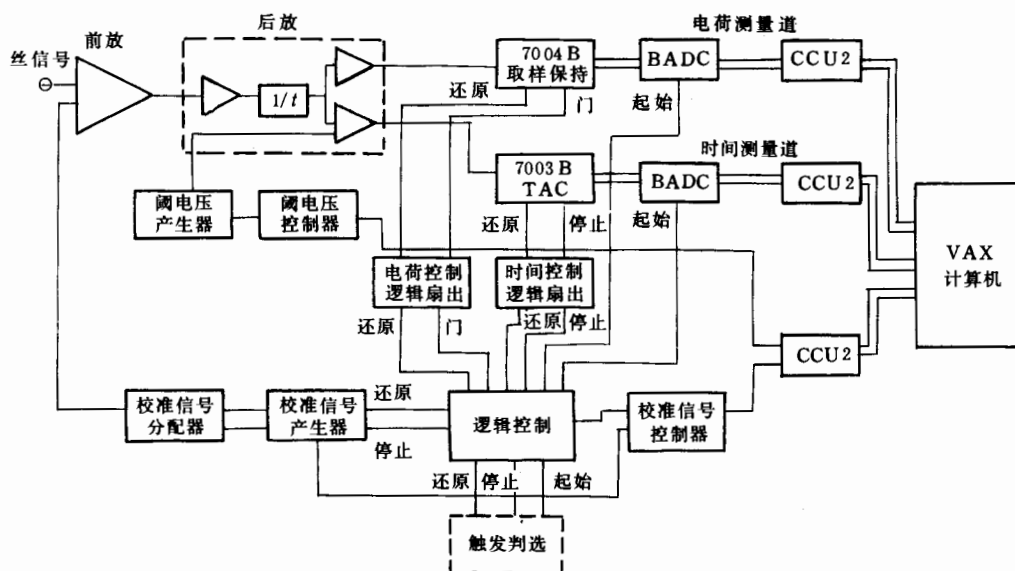


图 2 主漂移室读出电子学框图

在每次数据获取的准备阶段, 通过在线计算机经由校正电路向前置放大器的输入端输送标准的电流信号, 用来校正电荷和时间通道并给出台阶、非零数据的一次和二次校正参数等. 在数据获取过程中, BADC 在完成模数变换后, 将利用存储的参数对输出数据自动地进行处理, 然后把处理后的每一路电荷和时间信号按照一定的格式记录到磁带上. 这种数据带将由离线计算机做进一步的处理.

3 主漂移室 dE/dx 粒子识别的物理基础和数据处理方法

3.1 带电粒子在取样气体中的电离能量损失

单位电荷的带电粒子通过等效厚度为 $t(\text{g}/\text{cm}^2)$ 的气体时, 由于同气体分子碰撞而损失的最可几能量由 Landau 公式^[3]给出:

$$dE/dx|_{\text{prob}} = \frac{2\pi n e^4 t}{m_e v^2 \rho} \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2 (2\pi n e^4 t / m_e v^2 \rho)}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 + 0.198 - \delta \right], \quad (1)$$

式中 n 、 ρ 、 I 分别为介质单位体积中的电子数、物质密度和平均电离电位; e 、 m_e 为电子电荷量和质量; v 为带电粒子的速度; δ 是由于密度效应引起的修正. 对于 89%Ar + 10%CO₂ + 1%CH₄ 工作气体, 公式(1)可以简化为,

$$dE/dx|_{\text{prob}} = \frac{125x}{\beta^2} (8.226 + \ln x + 2\ln \gamma - \beta^2 - \delta), \quad (2)$$

式中 x 是以 cm 为单位的取样厚度. 根据 Sternheimer 密度修正的理论^[3] 算出:

$$\begin{aligned} \delta &= 0 & y < 1.985; \\ \delta &= 4.606(y - 2.609) + 0.3417(3.985 - y)^3 & 1.985 \leq y \leq 3.985; \\ \delta &= 4.606(y - 2.609) & y > 3.985, \end{aligned}$$

其中 $y = \log_{10}(\beta\gamma)$. 一些实验研究发现, 对于 89%Ar+10%CO₂+1%CH₄ 混合气体, 按

Sternheimer 的理论算出的 δ 值与实验值有偏离.

公式(2)仅是粒子速度的函数, 对单电荷粒子是普适的. 图3标绘出由公式(2)和 Sternheimer 密度修正项预期的5种带电粒子在主漂移室工作气体中的 dE/dx 随其动量的变化. 由于动量相同的 $e/\mu/\pi/K/p$ 具有不同的 $\beta\gamma$ 值, 因此, 它们的电离能量损失值 $dE/dx|_{\text{prob}}$ 就不一样. 实验上根据这个差别来实现粒子识别.

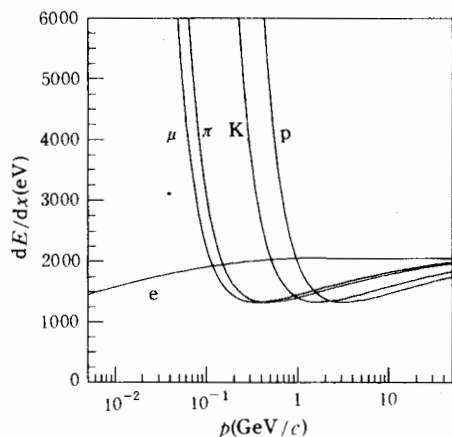


图3 最可几电离能量损失与粒子动量的关系

带电粒子在标准厚度取样气体内的电离能量损失 dE/dx 的取值近似地服从 Landau 分布. 为了去掉电离碰撞中偶然产生的大的能量损失的取样事例 (δ 电子), 改善能量分辨率, 提高粒子的识别能力, 一个常用的方法是对带电粒子在各取样层内产生的信号做系统效应的软件修正^[4], 并且按一定的比例截断其大的电荷量取样事例, 然后计算其剩余部分的平均值. 这个平均值被称之为截断平均值. 物理测量表明, 丢弃电离能量损失的 Landau 尾巴后得到的截断平均值不仅其分布的相对宽度变小, 而且该分布近似为高斯分布. 使用经过这种方法处理过的数据做粒子质量信息重建, 不仅可以改善粒子的识别能力, 同时使粒子质量信息在物理分析工作中使用更为方便.

通过对主漂移室 dE/dx 的蒙特卡罗和实验数据的研究发现, 当截断约 27% 大电荷量的单次取样事例时, 其截断平均值分布的分辨率最好. 在北京谱议 dE/dx 数据重建过程中, 取 30% 的截断百分比. 此时, 电荷量截断平均值分布的最可几值与平均单丝电荷量分布的最可几值一致.

4 dE/dx 数据系统效应的修正与能量刻度

4.1 系统效应的软件修正

带电粒子在主漂移室工作气体中的电离能量损失值是从测量到的总电荷量(同脉冲高度成正比)经过刻度变换后得到的. 因此, 为了更好地使用 dE/dx 信息实现粒子鉴

3.2 dE/dx 数据处理的截断平均方法

带电粒子在标准厚度取样气体内的电离

别, 要求主漂移室 dE/dx 系统要有尽量好的能量分辨率和能量线性. dE/dx 系统的能量分辨率主要由下述 4 个因素所决定:

- (a) 电离过程中电离能量损失的统计涨落;
- (b) 工作气体中电子雪崩过程的统计涨落;
- (c) 电子学系统的固有分辨;
- (d) 系统效应——测量的系统偏差对输出信号总电荷量的影响.

其中(a)和(b)是物理过程所固有的, (a)的贡献为主. 通过适当地选取工作气体, 增加取样次数和取样厚度, 可以减少它们对能量分辨率的影响. 对于确定的工作气体, 在一定的硬件条件下(漂移单元和室的整体结构、电子学性能、室的工作状态特别是工作气体的增益变化等) dE/dx 系统能量分辨率的好坏将主要取决于对系统效应的软件修正能力. 系统效应使测得的总电荷量偏离其真值, 导致能量分辨率变坏、粒子分辨能力变弱. 工作[4]仔细地研究了各种系统效应对能量分辨率的影响并且建立了相应的软件包对这种系统效应做软件修正. 其修正方法和软件包一直用于主漂移室 dE/dx 的重建工作中. 其中修正的主要系统效应包括:

- (a) 不同方向径迹取样长度的差别;
- (b) 每根信号丝的气体放大和对应道的电子学增益的差别;
- (c) 径迹在单元中心平面的“左”和“右”击中产生的信号的差别;

(d) 信号的空间电荷效应使具有不同极角(径迹与信号丝之间的夹角)入射的粒子产生信号的差别;

(e) 负电性气体的吸附效应使来自不同漂移距离的粒子产生信号的差别;

(f) 由于温度和压力的变化而引起的气体密度的变化产生的信号的差别(由于目前漂移室还不具备工作气体的压力和温度联合有效的监测系统, 故无法对气体密度的变化引起的气体增益的变化作直接的软件修正. 这一项修正暂时合并到下一项修正之中);

- (g) 不同次数数据获取(Run 与 Run)之间增益的差别.

对实验上测量得到的原始电荷量在做了上述七项系统效应的软件修正之后, 来自 2808 道的平均单丝能量分辨率(FWHM)从 160% 提高到 93%. 图 4 标绘出平均单丝能量分辨率随前 5 个典型修正项的变化^[4]. 图中横坐标为联合实施的修正项, 纵坐标为对应实施这些修正项后获得的平均能量分辨率. 其中横坐标“0”、“1”、“2”、“3”和“4”分别表示无修正; 仅修正(a)项; 联合修正(a、b、c)项、(a、b、c、d)项和(a、b、c、d、e)项.

4.2 能量的绝对刻度

由于主漂移室工作电压的设置优先考虑的是径迹测量, 气体的增益很高($G \approx 5 \times$

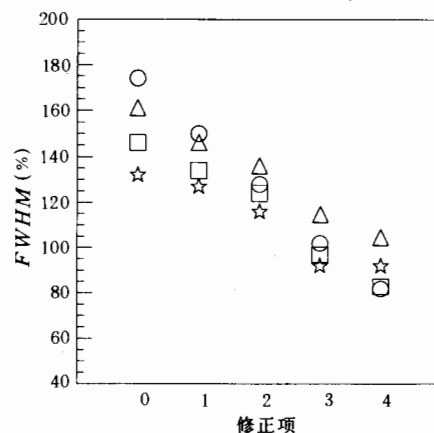


图 4 能量分辨率与实施的修正项的关系

☆、○、□和△分别表示第 1、第 4、第 6 和第 9 层.

10⁴)。灵敏丝附近强烈的空间电荷效应使输出的电荷量出现严重的饱和。这种饱和效应仅用电荷量随径迹极角变化的修正不能完全消除, 将导致 dE/dx 系统输出的电荷量与粒子的电离能量损失出现非线性的关系。因此, 为要得到线性的关系, 还需进一步对截断平均的电荷量做绝对的能量刻度, 以期彻底消除饱和效应, 优化 dE/dx 的粒子识别能力、特别是 e/π 识别能力。

选择 $e^+e^- \rightarrow$ 强子(主要是 π , K 和 p)、辐射的巴巴事例和宇宙线 μ 介子事例来刻度 dE/dx 系统。工作[5]详细地讨论了 dE/dx 系统的绝对能量刻度。经过系统效应的软件修正和绝对的能量刻度后, 北京谱仪主漂移室 dE/dx 系统的电离能量损失的相对论上升值从 $\sim 17\%$ 增长到 $\sim 51\%$ (详见后述)。

5 实验结果与讨论

5.1 电离能量损失的观测值与理论值的比较

通过绝对的能量刻度, 可以从信号电荷量的截断平均值得到带电粒子在 1cm 取样体内的最可几的电离能量损失。图 5 给出 30% 截断平均的测量值与理论预期的最可几能量损失值的比较。

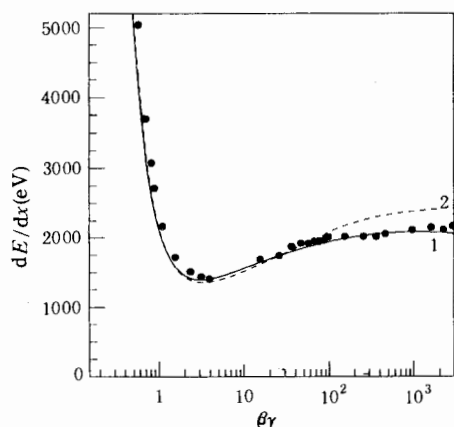


图 5 最可几电离能量损失的预期值与测量值的比较

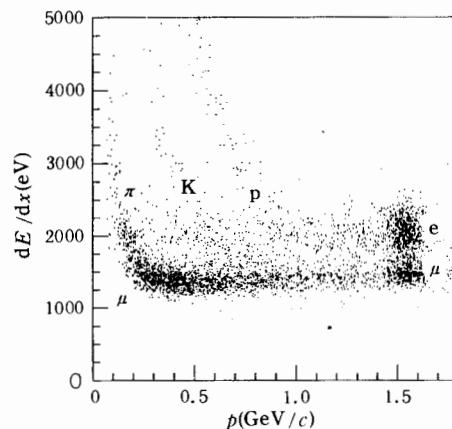


图 6 5 种带电粒子电离能量损失的测量值随其动量的变化

图中的点是实验观测值, 曲线 2 是从 Landau 公式(2)加 Sternheimer 的密度修正计算出的理论预期值。在非相对论区, $\delta=0$, 实验点与理论曲线符合的很好。但在相对论区和饱和区, 实验点与理论曲线 2 偏离较大。曲线 1 是通过拟合相对论上升区的实验值得到的经验密度修正项 δ' 后, 替换公式(2)中的 δ 而计算得到的, 它与实验值符合得较好。 δ' 的形式为:

$$\begin{aligned} \delta' &= 0 & y &\leq 0.7; \\ \delta' &= 0.3329 - 0.9141y + 0.7790y^2 & 0.7 < y &\leq 3.6 \\ \delta' &= -9.3115 + 4.6y & y &> 3.6. \end{aligned}$$

在实际粒子识别的应用中, 采用了 δ' 来修正相对论上升区域内的 Landau 公式, 从而使北京谱仪的 dE/dx 信息可以很好被用于 e/π 识别.

图 6 给出 5 种带电粒子 ($e/\mu/\pi/K/p$) 对应每条径迹大于 30 次取样的电离能量损失的观测值随粒子动量变化的散点图. 在 $1.5\text{GeV}/c$ 附近, 出现两个集中分布的散点“集”, 它们分别对应 QED 过程的 e^+e^- 、 $\mu^+\mu^-$ 及 J/ψ 的纯轻子衰变产生的 e^+e^- 、 $\mu^+\mu^-$ 轻子的电离能量损失. 辐射过程 ($e^+e^-\gamma$ 、 $\mu^+\mu^-\gamma$) 产生的末态轻子的电离能量损失分布在较宽的动量范围内. 来自 J/ψ 衰变产生的强子 (π , K 和 p) 的电离能量损失分别集中在三条彼此分离的带中. 带的清晰程度反应了 dE/dx 粒子识别能力的强弱.

5.2 能量分辨率和电离能量损失的相对论上升

利用谱仪的飞行时间计数器和电磁簇射计数器的信息, 可以选出 π 介子和电子的数据样本. 图 7 标绘出动量范围在 $0.4\text{—}0.5\text{GeV}/c$ 内的、每条径迹取样次数大于 30 的 π 和 e 的电离能量损失的分布.

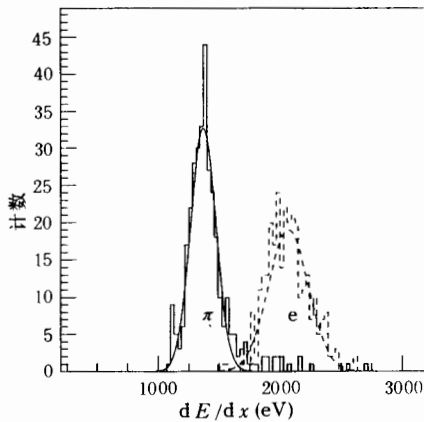


图 7 最小电离 π 介子和坪区电子的电离能量损失的分布

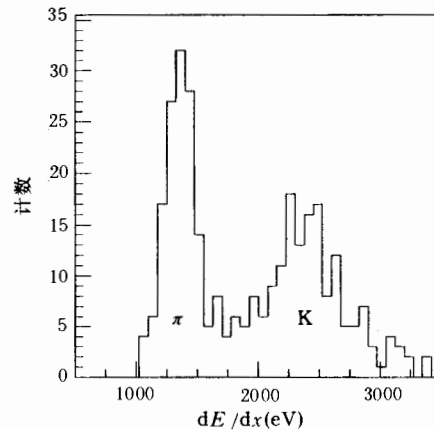


图 8 动量范围在 $0.4\text{—}0.55\text{GeV}/c$ 内的 π 和 K 介子的电离能量损失的分布

用高斯函数拟合两个分布, 得到最小电离粒子 π 和坪区电子 e 的电离能量损失的能量分辨率为:

$$\left(\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} \right)_{\pi} = (7.5 \pm 0.5)\%;$$

$$\left(\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} \right)_{e} = (7.9 \pm 0.5)\%.$$

折算到对应 40 次取样的能量分辨率约为:

$$\left(\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} \right)_{\pi} \approx (7.1 \pm 0.5)\%;$$

$$\left(\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} \right)_c \approx (7.4 \pm 0.5)\%$$

图8给出动量在0.4—0.55 GeV/c 内的 π 和 K 介子的电离能量损失的分布. 在此动量范围内 K 介子的电离能量损失的固有宽度约为 800 eV. 这使得 K 介子的电离能量损失分布的宽度变宽, 并且能谱形状也不呈高斯分布.

图9给出巴巴事例电子的电离能量损失的能量分辨率与径迹取样次数 N 的依赖关系. 拟合的结果为

$$\frac{\sigma_{dE/dx}}{dE/dx} = \frac{0.96}{2.355} \times N^{-0.461},$$

其中 N 为每条径迹的 dE/dx 取样次数. 此结果与1994年粒子表给出的结果一致.

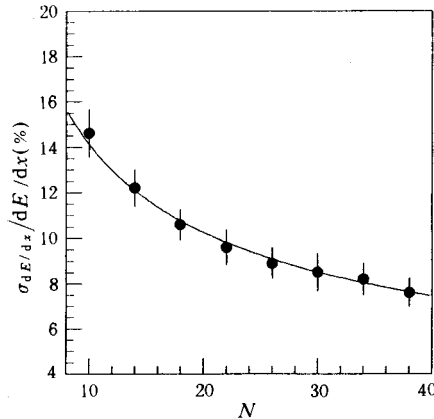


图9 能量分辨率与取样次数的依赖关系

实验发现, 动量为 0.45 GeV/c ($\beta\gamma=880$) 的电子, 其电离能量损失值已达到饱和, 因此, 由图7两个分布拟合的结果, 计算得到带电粒子在工作气体中电离能量损失的相对论上升为

$$E_{\text{rise}} = \frac{(dE/dx)_c - (dE/dx)_\pi}{(dE/dx)_\pi} = 51\%.$$

5.3 dE/dx 测量对带电粒子的识别能力

在实际的粒子识别应用中, 定义 dE/dx 测量对两种带电粒子的识别能力为:

$$SPRT = \frac{(dE/dx)_A - (dE/dx)_B}{\sigma_{(dE/dx)_B}},$$

式中 $(dE/dx)_A$ 和 $(dE/dx)_B$ 分别表示 A 和 B 粒子的最可几电离能量损失; $\sigma_{(dE/dx)_B}$ 为 B 粒子能量损失分布的标准偏差. $SPRT$ 表示在同一动量上以对应某一确定能量分辨率的标准偏差 $\sigma_{(dE/dx)_B}$ 为单位的两种粒子的电离能量损失的差. 它反应了 dE/dx 测量把粒子 A 与粒子 B 分开的能力.

根据实验测量到的能量分辨率和用实验数据修正后的最可几电离能量损失的 Landau

公式, 可以估算 dE/dx 对带电粒子的识别能力. 图 10 标绘出 dE/dx 测量对 e/π 、 K/π 、 p/π 和 p/K 粒子的识别能力随其动量的变化.

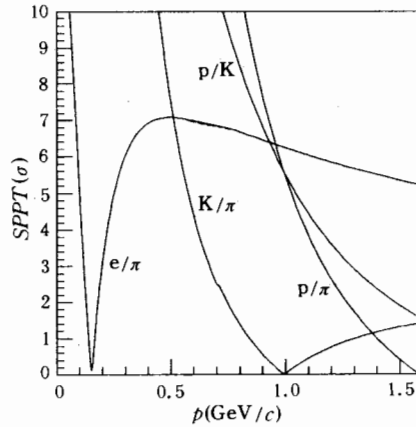


图 10 dE/dx 粒子识别能力与动量的关系

其中 $\sigma_{(dE/dx)_B}$ 对应的能量分辨率取为 7.5%. 对不同的两种粒子(A/B), 大于 $2\sigma_{(dE/dx)_B}$ 分离相应的动量范围分别为:

$$\begin{aligned} e/\pi & 0.17 \leq p \leq 9.5 \text{ GeV}/c, \\ K/\pi & p \leq 0.76 \text{ GeV}/c, \\ p/\pi & p \leq 1.26 \text{ GeV}/c, \\ p/K & p \leq 1.5 \text{ GeV}/c; \end{aligned}$$

大于 $3\sigma_{(dE/dx)_B}$ 分离相应的动量范围分别为:

$$\begin{aligned} e/\pi & 0.2 \leq p \leq 4 \text{ GeV}/c, \\ K/\pi & p \leq 0.66 \text{ GeV}/c, \\ p/\pi & p \leq 1.16 \text{ GeV}/c, \\ p/K & p \leq 1.26 \text{ GeV}/c. \end{aligned}$$

5.4 dE/dx 粒子识别方法在物理分析中的应用

北京谱仪主漂移室的 dE/dx 粒子识别方法已经被广泛地用于物理分析工作中. dE/dx 的 e/π 识别在 τ 轻子质量测量^[6]、 D_s 和 D 介子的纯轻子和半轻子衰变、 J/ψ 和 ψ' 的纯轻子衰变过程的寻找中都起到了重要的作用. 由于在 τ 轻子质量测量工作中使用了 dE/dx 方法做 e/π 识别, 使得在同样的统计水平下, 与不用 dE/dx 方法做 e/π 识别时比较, 完成 τ 轻子质量测量实验所需要的北京正负电子对撞机、北京谱仪的运行时间及数据处理所需要的计算机 CPU 时间均大大减少.

dE/dx 的 K/π 识别在 ψ' 、 D 和 D_s 的物理工作中也都起到了重要的作用. 作为一个简单的例子, 图 11(a)、(b) 和 (c) 分别给出仅用飞行时间计数器信息; 仅用 dE/dx 信息和联合使用两者信息做粒子识别时找到的 $D_s \rightarrow \phi\pi$ 的衰变信号. 图中的横坐标为 $\phi\pi$ 的不变质量. 用高斯函数加多项式本底拟合这三个不变质量谱得到 D_s 的事例数分别为 24.0 ± 5.0 、 34.3 ± 6.0 和 37.8 ± 6.4 ; 质量分别为 $1971.1 \pm 1.1 \text{ MeV}$ 、 $1969.2 \pm 0.8 \text{ MeV}$ 和 $1969.6 \pm 0.8 \text{ MeV}$. 由此可见, 在 D_s 物理分析工作中, dE/dx K/π 识别方法的应用,

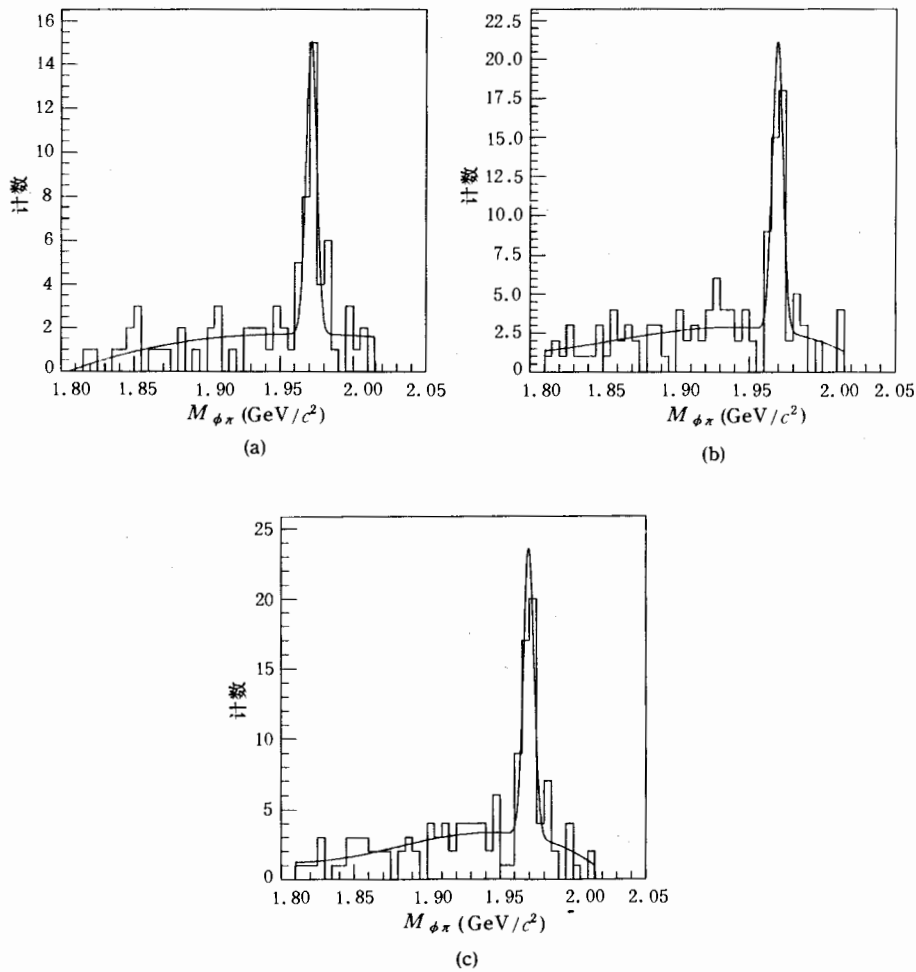


图 11 $\phi\pi(D_s \rightarrow \phi\pi)$ 的不变质量谱

使事例接收效率比仅用飞行时间计数器时提高了约 58%.

6 结 语

北京谱仪在北京正负电子对撞机上已经成功地运行了 6 年, 共积累了 $9 \times 10^6 J/\psi$ 事例, $3 \times 10^6 \psi'$ 事例, 5pb^{-1} 积分亮度的用于 τ 轻子质量测量的数据和 25pb^{-1} 积分亮度的用于研究 D_s 和 D 介子的数据. 在这 6 年的实验中, 主漂移室的工作一直是稳定的. 经过系统效应的软件修正和绝对的能量刻度后, 主漂移室的 dE/dx 系统对最小电离粒子 π 大于 30 次 dE/dx 取样测量的能量分辨率为 7.5%. 此能量分辨率指标已经达到并略好于原设计值(对于 40 次 dE/dx 取样 $\sigma_{dE/dx}/dE/dx = 8.7\%^{[2]}$). 配合适用于北京谱仪硬件环境的数据离线刻度和重建的软件方法^[7], 重建后的 dE/dx 信息可以很好地被用于对带电粒子的识别, 在北京谱仪的物理工作中起到了重要的作用.

参 考 文 献

- [1] 丁慧良等, 高能物理与核物理, **16**(1992)769.
- [2] 马基茂等, 高能物理与核物理, **9**(1990)777.
- [3] R. M. Sternheimer, R. F. Peierls, *Phys. Rev.*, **B3**(1971)3681.
- [4] 荣刚, 北京谱仪主漂移室 dE/dx 系统效应的软件修正, 第四次全国高能实验物理学术会议, 北京, 1991. 10.
北京谱仪主漂移室 dE/dx 系统效应软件修正方法的研究与应用, 内部报告, 高能物理研究所, 1992, 11.
- [5] 荣刚, 核电子学与探测技术, **12** 增刊(1992)200.
- [6] 荣刚、马基茂、毛慧顺等, 高能物理与核物理, **17**(1993)866.
- [7] 荣刚, 北京谱仪 dE/dx 粒子识别的软件方法, 第四次全国高能实验物理学术会议, 北京, 1991. 10.

Study of Particle Identification Using dE/dx in the BES Large Cylindrical Drift Chamber

Rong Gang Ma Jimao Mao Huishun Bai Jingzhi Xie Peipei
Yan Jie Wang Yunyong Mao Zepu Liu Rongguang Sun Shijun
Li Weiguo Song Xiaofei Wu Zhendong

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

Received 21 November 1995

Abstract

The method for particle identification using dE/dx in the BES large cylindrical drift chamber has been briefly described. The performance of the particle identification using dE/dx has been given. After applying systematic effect corrections and absolute energy calibration to the dE/dx raw data, the dE/dx energy resolution of 7.5% has been obtained for minimum ionization particles ($0.4 - 0.5\text{GeV}/c$ π) in a case corresponding to more than 30 dE/dx samples per track. This results in 3σ K/π separation for momentum up to $0.65\text{GeV}/c$ and 3σ e/π separation in a momentum range of $0.2 \leq p \leq 4\text{GeV}/c$.

Key Words Beijing Spectrometer, main drift chamber, ionization energy loss, energy resolution, energy calibration, dE/dx systematic effect, Landau formula, particle identification.