

研究简报

北京谱仪主漂移室 dE/dX 的估算

毛 慧 顺

(中国科学院高能物理所)

摘 要

本文对北京谱仪主漂移室的能量损失 dE/dX 问题作了估算。计算了最可几能量损失,并用经验公式计算了对 π 、K、P 和 e 四种粒子的分辨能力。最后,还用郎道分布随几数作了模拟计算以进行比较。

一、引 言

近代,在高能物理中对测量能量损失 dE/dX 来辨认粒子的方法越来越感兴趣。原理是:带电粒子通过放置于磁场中的多丝漂移室,由径迹的弯曲可决定粒子的动量,但要辨认出粒子类型必须知道粒子的质量。 dE/dX 是仅与粒子速度有关的量,测出 dE/dX 可知道粒子的速度,由动量和速度将求得粒子质量。

由于能量损失是一个涨落十分大的统计量,同一动量的不同粒子间的 dE/dX 在高能区又相差极小,为此采用多次取样方法来提高精度,数据处理时又用截断平均法去掉大能量损失的郎道尾巴,使粒子的分辨在一定的动量区得以实现。

根据北京谱仪主漂移室的参数对同 dE/dX 辨认粒子的能力作了估算。主要参数如下:对一个带电粒子通常有 40 根测量 dE/dx 的阳极丝,即取样数 $n = 40$;对垂直于丝入射的粒子,阳极丝可测得能量损失的范围,即取样厚度 $t = 1\text{cm}$;室内充气是

$$89\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2 + 1\% \text{CH}_4.$$

二、最可几能量损失 E_{mp} 的估算

一般用如下的表达式进行计算^[1,2]:

$$E_{mp} = \frac{0.153Z/A \cdot \rho \cdot t}{\beta^2} \left[\ln \frac{0.153Z/A \cdot \rho \cdot t \cdot m_e c^2}{I^2} + 0.891 \right. \\ \left. + 2 \ln \beta \gamma - \ln \beta^2 - \beta^2 - \delta \right] \quad (1)$$

其中 E_{mp} : 最可几能量损失, 单位 MeV, t : 取样厚度, 我们是 1 cm, Z, A : 介质(室气体)的原子序数、原子量, ρ : 介质密度, I : 平均电离电位, m_e : 电子质量, $m_e c^2 = 0.511$ MeV, β : 以光速 c 为单位的人射粒子速度,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

δ : 密度效应校正项, 对我们的气体 δ 如下^[3]:

$$\delta = 0 \quad (X < 2.0) \quad (2)$$

$$\delta = 4.606 \cdot (X - 2.61) + 0.3518 \cdot (4.0 - X)^3 \quad (2.0 < X < 4)$$

$$\delta = 4.606 \cdot (X - 2.61) \quad (4 < X)$$

其中 $X = \log_{10} \gamma$.

1) 平均电离电位 I 的估算: 由于所用的气体不是单质, 是化合物的混合物, I 的计算较复杂^[4-6]. 首先是考虑单元素情况: 我们的气体涉及 C、O、Ar、和 H 四种元素. 该方面计算皆由综合实验结果的经验公式作出.

$$I_H = 18.7 \text{ eV} \quad (\text{氢元素})$$

根据 $I = 13Z$ ($Z < 13$ 时), $I = 9.76Z + 58.8Z^{-0.19}$ ($Z \geq 13$ 时)

对于碳元素, $Z = 6$, $I_C = 78 \text{ eV}$.

对于氩元素, $Z = 16$, $I_{Ar} = 209.6 \text{ eV}$.

而氧元素 $Z = 8$, 按上式计算结果大于实际值, 将采用 $I = 12Z$ 的近似公式, $I_O = 96 \text{ eV}$ ^[5,7]. 第二步是计算化合物的平均电离电位:

$$\ln I = \sum_i f_i \cdot \ln I_i^{[4]},$$

f_i 是化合物中按元素的原子序数 Z (核外电子数) 分配的份额. 例如 CH_4 :

$$f_C = \frac{Z_C}{Z_C + 4Z_H} = \frac{6}{6 + 4 \times 1} = \frac{6}{10}$$

$$f_H = \frac{4}{10},$$

由上面 $I_C = 78$, $I_H = 18.7$ 得

$$\ln I_{\text{CH}_4} = \frac{6}{10} \ln 78 + \frac{4}{10} \ln 18.7$$

由此得

$$I_{\text{CH}_4} = 44.06 \text{ eV}.$$

同理得

$$I_{\text{CO}_2} = 90.7 \text{ eV}.$$

最后是混合物的平均电离电位^[2]. 不再是化合物的对数关系; 而是按混合物百分比 R_i 相加.

$$\begin{aligned} I &= \sum_i R_i I_i = 89\% \times 209.6 + 10\% \times 90.7 + 1\% \times 44.06 \\ &= 196.1 \text{ eV}. \end{aligned}$$

2) 混合气体的 E_{mp} 计算. 公式(1)指单一物质, 对混合物采用

$$dE/dX = \sum_i R_i (dE/dX)_i^{[7,8]}$$

先算出在混合物的不同成分 Ar, CO₂, CH₄ 中的能量损失, 再按混合比 R_i 相迭加. 已计算了 E_{mp} 作为 βr 函数的曲线, βr 在 3.3 和 3.4 间得 E_{mp} 最小值, 约 1367eV. 还计算了 E_{mp} 作为粒子动量函数的曲线 (图 1), 各曲线的差别是由于同一动量的不同粒子有不同质量, 从而 βr 不同引起. 正是这种差别将利用来辨认粒子.

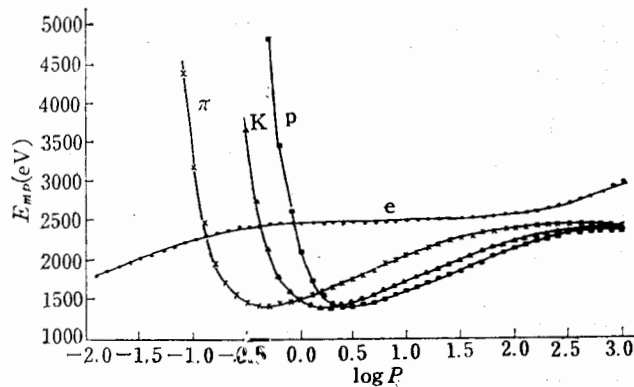


图 1 最可几能量损失 $E_{mp} - \log P$ (动量 P 单位 GeV/c)

对平均能量损失 E_{av} 也作了计算, 这儿不述了.

三、粒子辨认

为预期 dE/dX 技术的分辨能力, 首先采用了经验公式^[9,10]:

$$\frac{\Delta E}{\sigma} = \frac{E_2 - E_1}{\sigma(n)} = 2.35 n^{0.43} \frac{E_2 - E_1}{E_1} \frac{E_1}{W(1)} \quad (3)$$

Allison 通过对 Walenta 的单个单元数据拟合结果得出^[11]:

$$\frac{W(1)}{E} = 81.0 \left(\frac{\alpha t}{I} \right)^{-0.32} \quad (4)$$

这里, n ——测量能量损失的取样数, 我们室取 $n = 40$, E_1, E_2 ——需辨认的两种粒子的最可几能量损失, $W(1)$ ——仅一次取样时能量损失分布曲线的半高全宽 FWHM, $\sigma(n)$ —— n 次取样时的均方根偏差,

$$\alpha t = 0.153 Z / A \cdot \rho t$$

I ——混合气体的平均电离电位, 196.1eV. 为此, 对北京谱仪主漂移室得出:

$$\frac{W(1)}{E} = 93.4\% \text{ (FWHM)}$$

$$\frac{\sigma(1)}{E} = \frac{\text{FWHM}}{2.35} = 39.7\%,$$

即一次取样的均方根偏差, 对 40 次取样,

$$\frac{\sigma(40)}{E} = \frac{\sigma(1)}{E} \cdot \frac{1}{n^{0.43}} = 8.13\%$$

这就是期望用 dE/dX 方法来识别粒子所能达到的分辨本领。但实际采用的是: 两种粒子在同一动量上的能量损失之差包含着多少 σ 值, 即量 $\frac{|E_c - E_\pi|}{\sigma_\pi}$, $\frac{|E_K - E_\pi|}{\sigma_\pi}$ 和 $\frac{|E_p - E_\pi|}{\sigma_\pi}$ 。其中 $E_i (i = e, \pi, K, p)$ 四种粒子) 为最可几能量损失, σ_π 是 π 介子在 40 次取样时的分辨本领, 我们室是 8.13%。

图 2 中的实线表示了按公式(1),(3)求得的上述三个量作为动量函数的估算结果。由图看出对于 $\frac{|E_\pi - E_K|}{\sigma_\pi} = 2$, 即 2σ 的 π -K 分离可以直到 720 MeV/c, 而 2σ 的 π -p 分离动量直到约 1230 MeV/c。该估算值是从简单的经验模型来的, 实际结果可能要坏 10—30%。

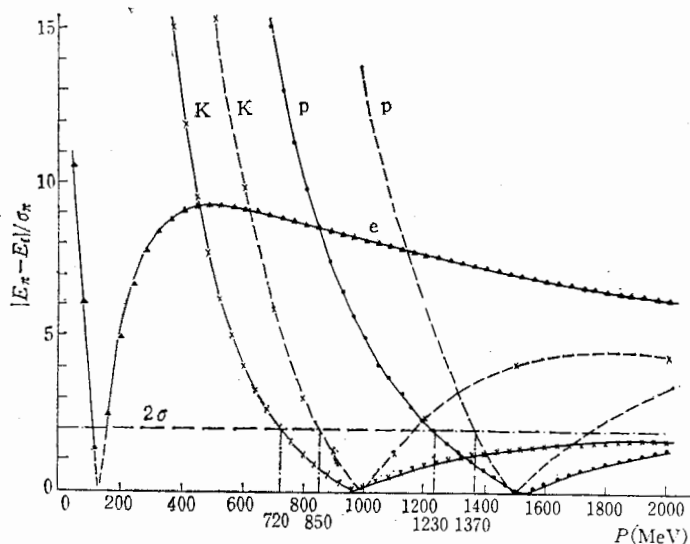


图 2 粒子辨认能力与动量 P
(实线: 经验公式; 虚线: 郎道分布模拟, 60% 截断平均)

四、用郎道分布作模拟估算

一定动量的某种粒子在物质中产生的电离能量损失, 基本上是一个不对称的郎道分布。我们在计算机上取得郎道分布随几数 $\lambda^{[12]}$, 测到的能量损失 E 应是

$$E = E_{mp} + \lambda \xi^{[7,13,14]} \quad (5)$$

$$\xi = 0.153Z/A \cdot \rho t / \beta^2$$

考虑取样数是 40, 故取 40 个随几数求得 40 个 E 值, 合成一个事例。我们可模拟几百个事例(例如 200 个), 并对每一个事例用截断平均法加以处理。所谓截断平均, 即把每次事例中的 40 个取样值排出大小, 再按一定百分比把顺序大值截断丢弃不要, 物理上看就是

把高能郎道尾巴截去。余下部分按对称的高斯分布求平均,求得的截断平均值 \bar{E} 认为是每次事例的 E_{mp} , 各次事例的 \bar{E} 本身是一个统计量,其分布的均方根值即是上节的 $\sigma(40)$ 。

计算表明, 40 个取样中保留 60% 作截断平均时得到的 \bar{E} 分布的峰值最接近 E_{mp} 。图 2 中的虚线表示了按郎道分布模拟取截断平均计算所得的 $\frac{|E_{\pi} - E_K|}{\sigma_{\pi}}$ 和 $\frac{|E_{\pi} - E_P|}{\sigma_{\pi}}$ 相对动量的关系曲线。对 2σ 的 π, K 分离可达 $850\text{Mev}/c$, 2σ 的 π, P 分离到约 $1370\text{MeV}/c$, σ_{π} 也比前节的 8.13% 好得多。其主要原因是郎道分布仅仅是指带电粒子电离能量损失的几率分布, 而漂移室测到的值中还包含气体“雪崩”的增殖过程。也就是说即使初电离是一固定值, 也会因气体增殖而得到有一定分布的输出, 计算中未包括这一统计过程, 故结果好于经验公式是可理解的。我们认为由经验公式求得的估算值将更接近实际, 最终结果已制作模型来实验测定。

最后, 谨向离线在线组在提供郎道随几数上给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. M. Paul, *N. I. M.*, 96(1971), 51.
- [2] J. N. Marx, SLAC-239 p. 215.
- [3] J. Roehrig et al., SLAC-PUB-3199.
- [4] R. M. Sternheimer and R. F. Peierls, *Phys. Rev. B* Vol. 3, No. 11(1971), 3681.
- [5] J. Va'Vra, SLAC-Note (内部资料).
- [6] Walter H. Barks and Martin J. Berger, NAS-NRC PUBL, No. 1133(1964), 103.
- [7] F. Sauli, CERN, 77-09(1977).
- [8] Particle properties data booklet (1984), p. 109.
- [9] A. H. Walenta, *Physica Scripta*, Vol. 23(1981), 354.
- [10] J. Va'Vra et al., SLAC-PUB-2882.
- [11] Allison, *Ann. Rev. Part. Sci.*, (1980), 253.
- [12] B. Schorv, CERN-DATA Handling Division DD/73.
- [13] V. C. Ermilova et al., *N. I. M.*, 145(1977), 555.
- [14] P. V. Ramana Murthy et al., *N. I. M.*, 56(1967), 93.

ESTIMATION OF ENERGY LOSS dE/dX AT MAIN DRIFT CHAMBER OF BEIJING SPECTROMETER

MAO HUI-SHUN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

For the main drift chamber of Beijing Spectrometer, the most probable energy loss and particle identification capability for π, k, p, e are evaluated by using phenomenological approach. A simulation calculation with Landau distribution is also made.