

北京谱仪亮度监测器探测器的束流测试和刻度

倪蕙苓 姜春华 周化十 郭红菲 徐建国 朱启明

王芳 刘炜 李家华

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

北京谱仪亮度监测器的探测器在日本 KEK 进行了束流测试和刻度。在 $0.25\text{GeV}/c$ 到 $4\text{GeV}/c$ 动量范围内, 测量了量能器的性能。在电子为 $1.5\text{GeV}/c$ 时, 量能器的能量分辨为 13%。时间分辨为 660ps。定义计数器和辅助计数器的性能也作了测量, 半高宽能量分辨率为 30—40%, 时间分辨为 $\sim 300\text{ps}$ 。实验结果表明探测器的性能可以适用于北京谱仪亮度监测器。

一、引 言

北京谱仪上的亮度监测器所依据的是探测小角度 Bhabha 散射事例 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 。由于接受度和小角度 Bhabha 散射的截面都可以进行精确地计算, 所以亮度监测器的计数率可以非常精确地作为对撞机亮度的绝对测量^[1,2]。

在设计亮度监测器时, 应设法使加工制造的公差和贮存环束流参数的变化对亮度测量的影响达到最小。图 1(b) 给出亮度监测器的原理图。图中 L、R 表示亮度区, P 为亮度定义计数器, C 为辅助计数器, Bhabha 散射事例的一对 e^+e^- , 其能量与对撞前相同, 但运动的方向相反, 成 180° 。P 计数器探测其中一个电子(或正电子)相对的 C 计数器则探测另一个正电子(或电子), 因此 Bhabha 事例的一对正、负电子, 将在 P 与 C 计数器同时引起计数。S 为量能器, 用于测量入射到 P 和 C 的 Bhabha 事例正、负电子的能量。由于加速器亮度区的纵向 (z) 及横向 (x, y) 轮廓有限大小的存在, C 计数器的面积必须大于 P 计数器, 才能使在亮度区内产生的 Bhabha 事例的正、负电子同时被 P, C 计数器探测。P, C 计数器的尺寸与束流参数有关。

Bhabha 事例在 P 计数器的计数率为:

$$R = L \cdot \sigma,$$

σ : 在 P 计数器上接受的 Bhabha 散射的积分截面;

L : 贮存环的亮度.

Bhabha 散射的微分截面经简化后如下:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{4\alpha^2}{E^2\theta^4} \left(1 - \frac{1}{3}\theta^2\right),$$

E : 正、负电子的能量;

θ : Bhabha 散射粒子与 z 向的夹角;

α : 精细结构常数.

由于本底的存在,为了鉴别出 Bhabha 事例,采用了多重符合技术,并且测量了各个探测器所接受的粒子的能谱以及相对于束流对撞时刻的时间谱. 从四重符合计数 $(P1 \cdot S1) \cdot (C3 \cdot S3)$ 可以得到 P1 接受的 Bhabha 事例率 R_1 ,因此这种探测器的布局可以得到四个独立的计数率: R_1, R_2, R_3 和 R_4 .

这一布局的特点是: 四个 P 计数器的事例率总和提供了一个亮度测量,它对于亮度区的位移及旋转以及纵向轮廓变化是不灵敏的. 而四个各自独立的 P 计数器的计数率之间的相互关联的变化可以反映亮度区在 x, z 方向的位移以及对 y 轴旋转的程度.

本文报道亮度监测器的探测器模型在日本 KEK 12 GeV 质子同步加速器上进行性能实验的结果.

二、探测器的构造

亮度监测器所在位置及空间受到谱仪其他部件及加速器部件的限制,探测器的尺寸

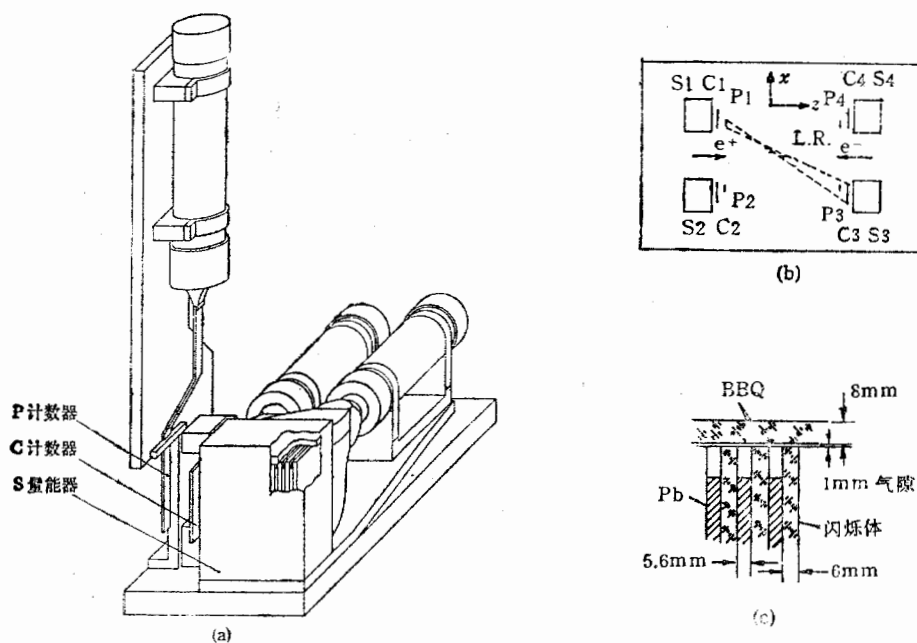


图 1 亮度监测器探测器结构图

在表1给出。图1(a)给出一组P,C和S探测器的结构示意图。

定义计数器P和辅助计数器C的薄闪烁体为NE102,其厚度分别为3mm和5mm,光导的长度分别为280mm和300mm。由于P计数器的面积精度将对亮度测量的系统误差有贡献,所以其闪烁体的面积经过精细加工、抛光和测量,实际面积值与理想矩形面积之差小于0.5%。计数器C的光导其中一段为扭曲光导,P,C联结较长的光导是为了减少束流本底直接打在光电倍增管的光阴极引起激发产生虚假计数,同时也为了远离谱仪铁门附近的强漏磁区。P,C光电倍增管为XP2020。

表1 探测器的尺寸

	宽(mm)	高(mm)	厚(mm)
P	24	73	3
C	55	90	5
S	87	120	130

量能器S是由Pb片和闪烁体夹层组成^[3,4],总厚度为11辐射长度。每层由5.6mm厚度的铅和6mm厚度的闪烁体组成,闪烁体为NE110,共11层。闪烁体所发的光由BBQ波长移片收集^[5]。BBQ波移片分别放在闪烁体的上方和下方,上下波移片联到扭曲的有机玻璃光导,然后合到一起,耦合到XP2020。波移片厚度为8mm(100mg/L)。

三、实验安排

1. 束流

探测器的性能实验先后在日本KEK 12GeV质子同步加速器的内靶引出束T1束和 π^2 束上进行。所用的粒子种类为 e^- 、 π^- ,动量范围对T1和 π^2 束分别为0.2—2.0 GeV/c和1.0—4.0 GeV/c。图2给出实验时束流望远镜(T₁·T₂·T₃·T₄)以及契伦柯夫计数器与探测器的相对位置。在 π^2 束流线上,契伦柯夫计数器与望远镜距离大约5m,望远镜与T₀探测器距离由63cm缩短到~6cm。 e^- 由T₁·T₂·T₃·T₄· \check{C} 定义, π^- 由T₁·T₂·T₃·T₄· \check{C} 定义。在4GeV/c时,测量了 π^2 束水平方向的强度分布,给出了很好的高斯分布,其半高宽度为~25mm。

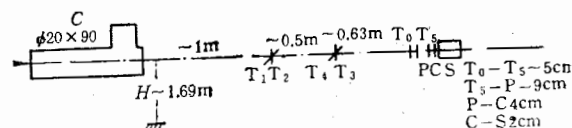


图2 T₁束上的实验布局

2. 读出线路

实验测量了三个探测器的时间谱和幅度谱。测量线路框图在图3给出。T₁·T₂·T₃·T₄与 \check{C} 信号符合给出门信号,以选出 e^- 束,反符合则选出 π^- 束。ADC门宽为

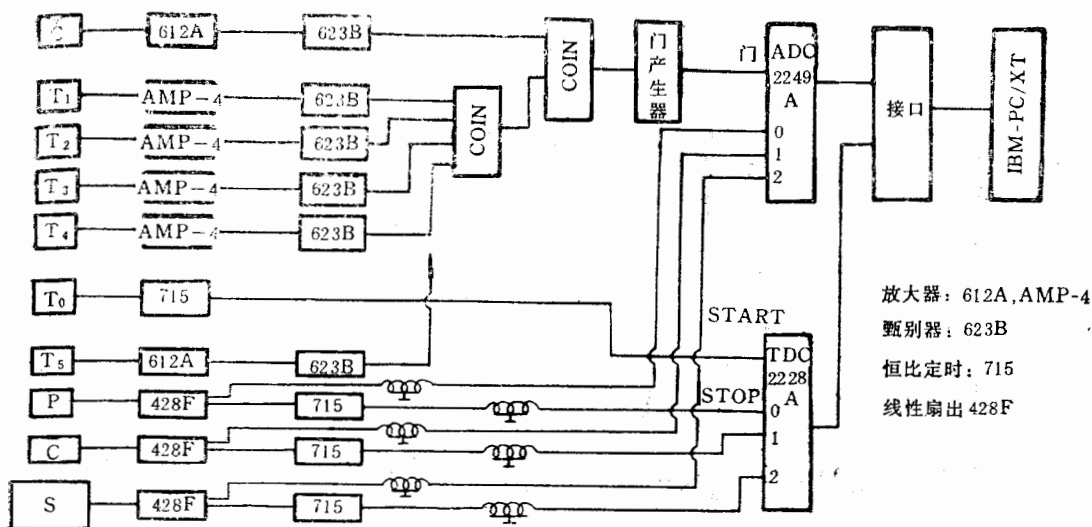


图 3 读出线路框图

400ns. P.C.S 探测器信号经延时以使信号落在门宽之内. TDC 的起始信号 T_0 由薄闪烁体探头给出. TDC 和 ADC 的数据由 IBM-PC/XT 微机获取.

3. 实验过程

调节束流望远镜的位置,使望远镜的方向与束流方向近似平行,并处在计数最强的位置. 调节探测器固定支架,使束流垂直入射到探测器中心. $T_{1,2,3,4}$ 为 10mm (宽) \times 5mm (厚) \times 60mm (长) 的长条闪烁体,选取的束流截面大约为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$. P, C, S 之间沿束流方向的距离依次为 40mm 和 20mm ,并在支架上固定不变.

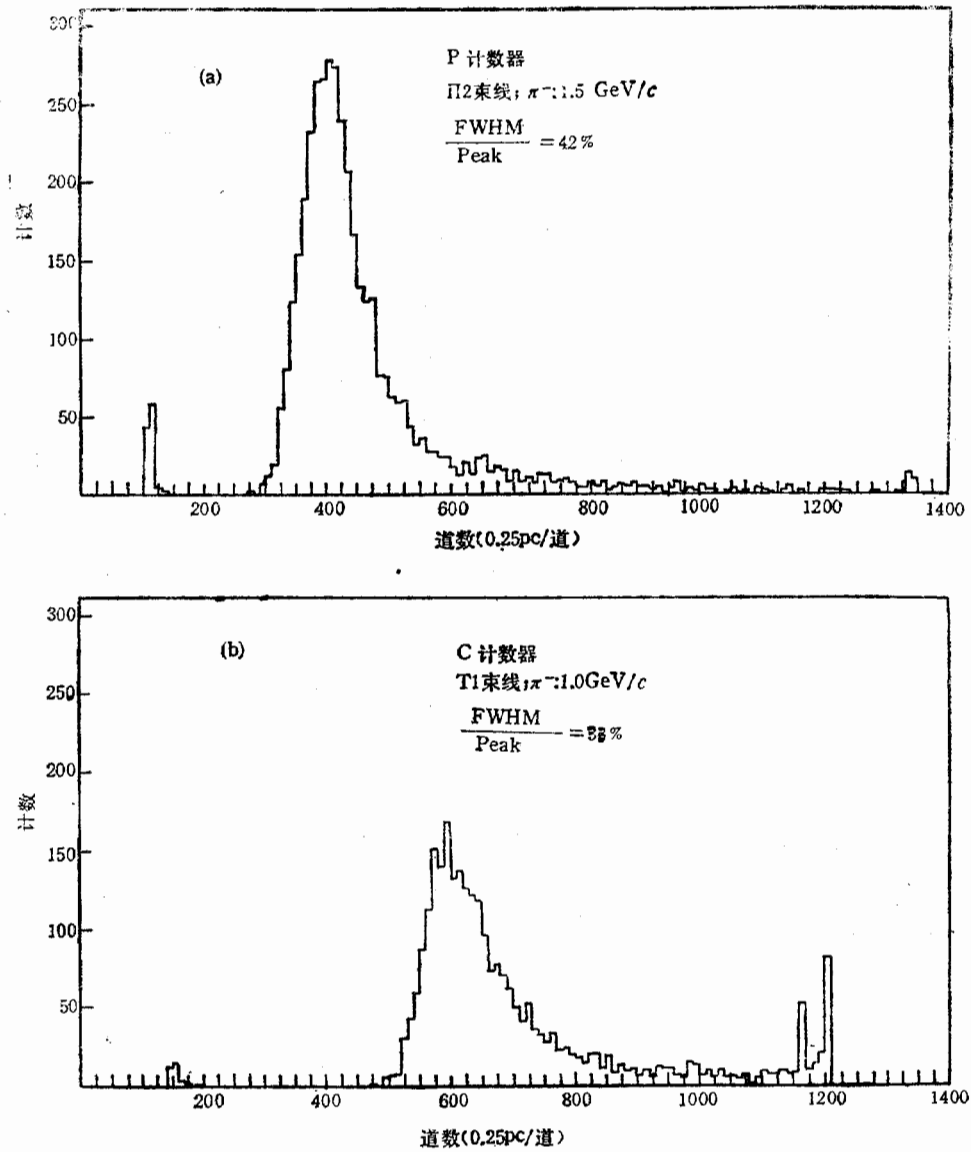
在 T_1 束和 π_2 束上测量了 e^- 和 π^- 入射到三个探测器时产生的幅度谱和时间谱. 动量值如下: T_1 束: $0.25, 0.35, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0\text{GeV}/c$; π_2 束: $1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0\text{GeV}/c$. 从测得的数据可以得到量能器的能量分辨率,线性, P, C 探测器的 $\frac{dE}{dx}$ 谱以及各个探测器的时间分辨. 在 T_1 束上用 $1\text{GeV}/c$ 的 e^- 和在 π_2 束上用 $1.5\text{GeV}/c$ 的 e^- 测量了量能器的均匀性,用 $4\text{GeV}/c$ 的 π^- 束测量了 P, C 的均匀性. 粗略地观察了 e^- 和 π^- 在 BBQ 波移片上引起的响应.

四、实验结果及讨论

实验数据经过处理,得到能量分辨,线性, $\frac{dE}{dx}$ 谱,均匀性及时间分辨等结果.

1. 定义计数器 P 及辅助计数器 C

P, C 探测器得到的 ADC 幅度谱,即 $\frac{dE}{dx}$ 谱,进行朗道函数的拟合:

图 4 P、C 计数器 dE/dx 谱的直方图

$$f(x) = \frac{C_1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\lambda(x) + e^{-\lambda(x)}) \right]$$

$$\lambda(x) = \frac{x - C_2}{C_3}$$

其中 C_1, C_2, C_3 为三个拟合参数。 C_2 为朗道分布最高峰值时的 x 值, 即幅度值。 从拟合得到的曲线中求出半高宽, 然后求出能量分辨率 $\Delta E/C_2$ 。

图 4(a)(b) 给出 P、C 计数器 $\frac{dE}{dx}$ 谱的直方图, 图 5(a)(b) 为不同动量下 P、C 计数器 $\frac{dE}{dx}$ 谱经过拟合的最高峰的幅度值及能量分辨, 在所测量的动量范围内基本不变。 测量均匀

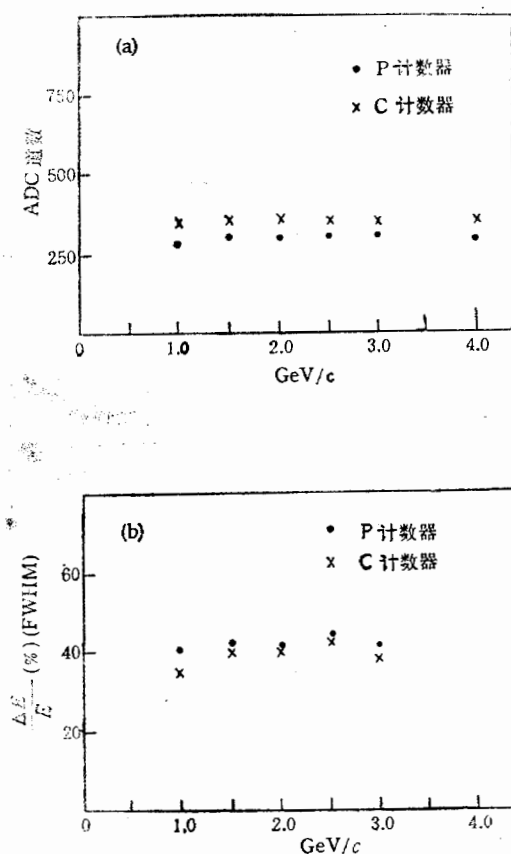


图 5 (a) P、C 计数器最高峰幅度值和入射粒子动量的关系
(b) P、C 计数器的能量分辨率和入射粒子、动量的关系

性时, 由于望远镜面积为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$, 因此移动束流入射位置, 只能显示出平均效果。P 计数器在长度方向上不同位置输出信号幅度的不均匀性 $\sim 10\%$ 。C 计数器的不均匀性 $\sim 10\%$ 。P、C 计数器的时间谱经过高斯拟合得到的时间分辨分别为 320ps 和 230ps 。

P、C 计数器良好的能量分辨说明其结构使之具有足够的光输出。曾用宇宙射线测量了 P、C 计数器的效率, 测量结果为 99% , 测量时宇宙射线望远镜的面积略小于计数器的面积。

2. 量能器 S

将量能器的幅度谱进行高斯拟合:

$$f(x) = \frac{C_1}{\sqrt{2\pi}C_3} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-C_2}{C_3}\right)^2\right],$$

其中 C_1 、 C_2 、 C_3 为拟合参数值, C_2 为高斯分布最高峰的幅度值, C_3 为 σ 值。

在束流垂直入射到量能器中心位置时, 测量了能量分辨及线性。图 6(a)(b) 给出了

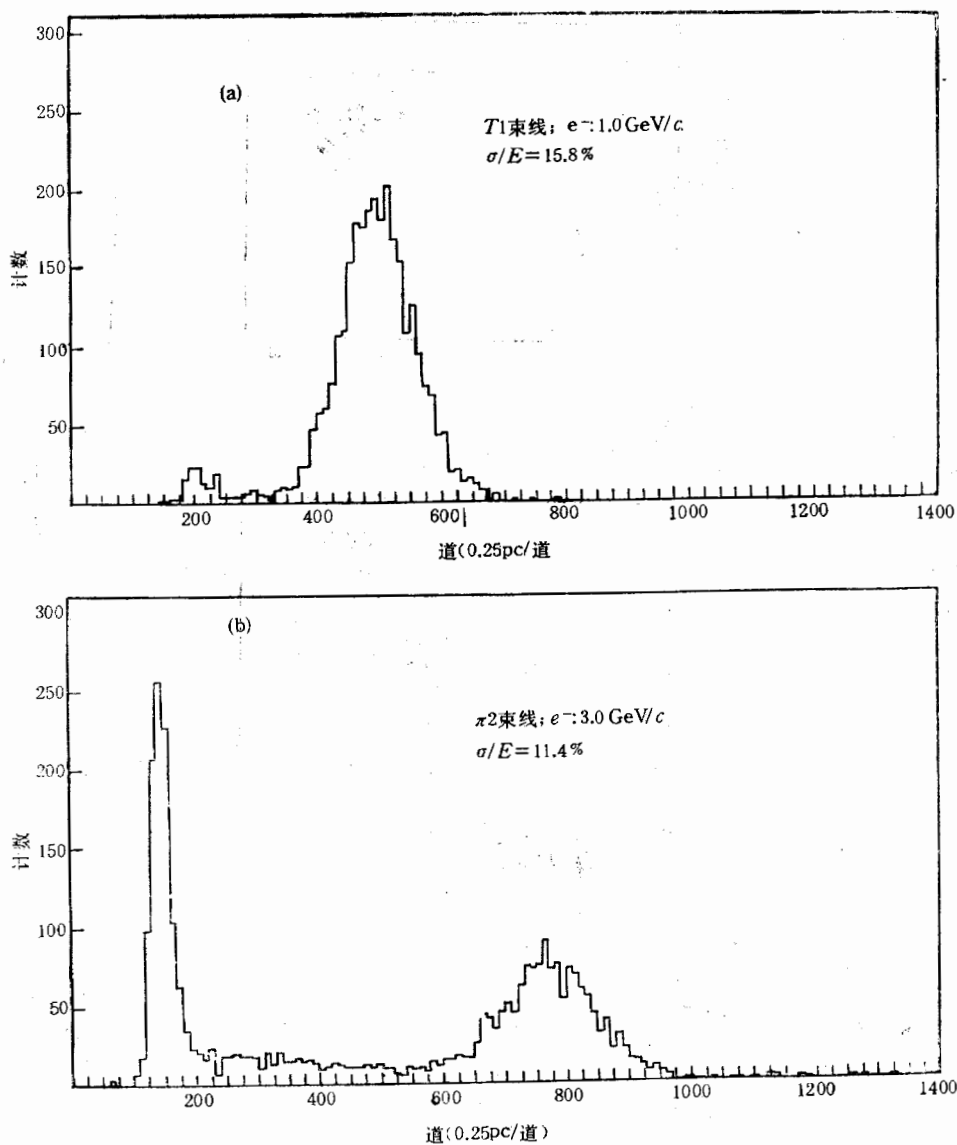


图 6 量能器的能谱

在 T1 和 π^2 束上得到的幅度谱,低能端的峰为 π^- 粒子在量能器中产生的 $\frac{dE}{dx}$ 谱,虽然实验时用阈式 \checkmark 计数器选择了 e^- ,但其中仍混有 π^- 粒子. 经高斯拟合后的能量分辨及线性在图 7、图 8 给出. 图中还给出用 EGS 程序进行的蒙特卡罗模拟计算结果. 实验与计算结果相符. 在高端的能量分辨偏大,可能是由于高能 e^- 的能量泄漏增大引起的. 动量低于 $3 \text{ GeV}/c$ 时,具有良好的线性,在大于 $3 \text{ GeV}/c$ 时输出幅度略低于拟合直线值,其偏差 $\sim 3\%$.

图 9 给出量能器能量分辨及输出幅度的均匀性. 量能器在北京 $e^+ e^-$ 对撞机上接受 Bhabha 事例的面积在图中用虚线表示,大约距边缘有 1.5 cm . 以带电粒子在中心位

置 ($x = 0, y = 0$) 入射时的输出为比较标准, 沿水平即 x 方向两侧位置入射时的输出幅度明显变小, 能量分辨变坏, 沿 y 方向, 接近上、下 BBQ 波移片入射时的输出幅度明显变大, 能量分辨变坏. 幅度变化大约 $\sim \pm 10\%$, 能量分辨由 13% 变坏到 20% .

在蒙特卡罗计算中, 当电子能量为 2.2 GeV 垂直入射时, 电磁簇射在各层的横向发展区域逐渐增大, 在第 11 层的横向发展为 $\sigma_{11} = 0.927 \text{ cm}$. 如果粒子在离边缘 2 cm 垂直入射, 各层的横向发展区域大都在量

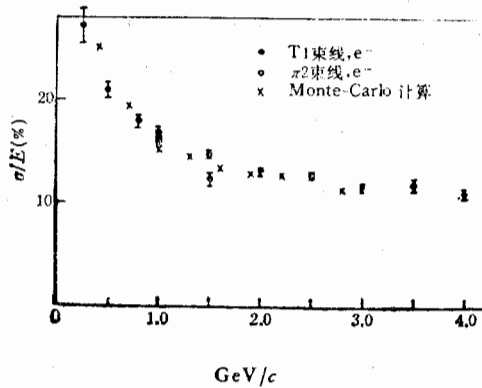


图 7 量能器能量分辨率和入射粒子动量的关系

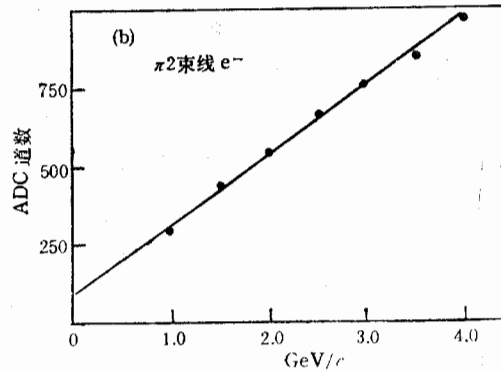
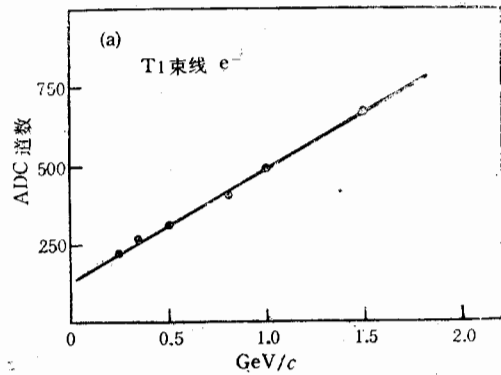


图 8 量能器能量的线性

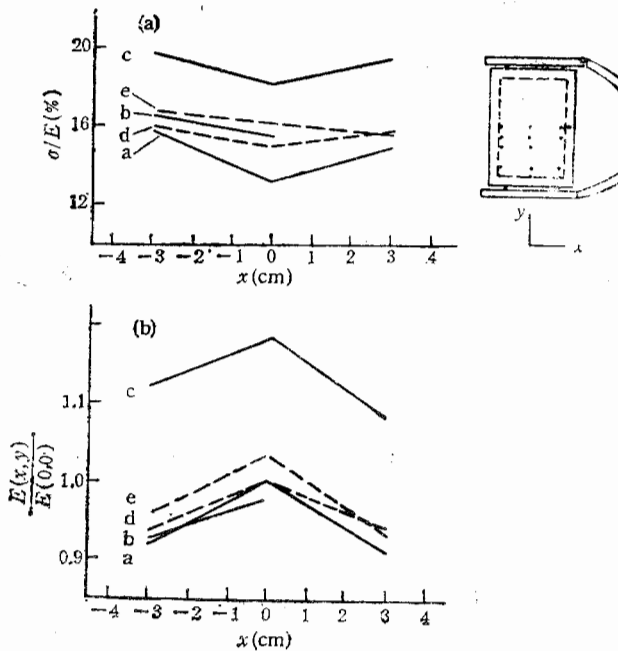


图 9 量能器能量分辨及输出幅度的均匀性

— e^- : $1.5 \text{ GeV}/c$;
 - - - e^- : $1.0 \text{ GeV}/c$;
 a: $y = 0$; b: $y = -2$;
 c: $y = -5$; d: $y = -1$;
 e: $y = -4$

能器体积之内. 在实验测试中, 当 $y = -4 \text{ cm}$ 入射时, 量能器输出幅度及能量分辨没有明

显变化,这与计算结果相一致。但是在 $y = -5\text{cm}$ 入射时,由于 e^- 束的面积较大,所以束流中不少粒子实际上将靠近边缘入射,引起性能明显变坏。

量能器由于采用了 BBQ 波移片上下对称引出,虽然增加了制作上的困难,但对光的均匀收集提供了较好的条件,获得较好的均匀性。量能器的时间分辨为 $\sigma_t \sim 660\text{ps}$ 。

BBQ 波移片用能量为 $3\text{GeV}/c$ 和 $2\text{GeV}/c$ 的 π^- 粒子辐照,其输出幅度谱是典型的 dE/dx 谱。在 $3\text{GeV}/c$ 的 e^- 辐照下也得到 dE/dx 谱。

五、结 束 语

通过在日本 KEK 的实验表明 P,C,S 探测器的性能可以适用于北京谱仪上的亮度监测器。P,C 探测器的结构可以保证有足够的光输出,使 dE/dx 谱具有较好的半高宽能量分辨($\sim 30\% - 40\%$)和较好的时间分辨($\sim 300\text{ps}$)。量能器的能量分辨在 $1.5\text{GeV}/c$ 的 e^- 为 13% ,而且具有较好的能量线性和时间分辨($\sim 660\text{ps}$)。由于采用了 BBQ 波移片进行光的收集,获得了较好的均匀性。

作者感谢高能所叶铭汉所长和日本 KEK 西川哲治所长对本工作的支持,感谢 KEK 吉村喜男教授给予的热情帮助,感谢高能所物理一室毛泽普,郑宏伟同志以及飞行时间组在工作中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] J. F. Crawford, E. B. Hughes, L. H. O'Neill and R. E. Rand, *Nucl. Instr. and Meth.*, **127**(1975), 173.
- [2] L. H. O'Neill, R. L. Ford, E. B. Hughes, E. Hieger and J. W. Simpson *Nucl. Instr. and Meth.*, **216** (1983), 361.
- [3] W. Hofmann et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **195**(1982), 475.
- [4] J. Fent et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **211**(1983), 315.
- [5] C. Aurouet et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, **211**(1983), 309.

TEST AND CALIBRATION OF THE DETECTORS OF THE BES LUMINOSITY MONITOR

NI HUILING, JIANG CHUNHUA, ZHOU HUASHI, GUO HONGFEI,
XU JIANGUO, ZHU QIMING, WANG FANG, LUI WEI, LI JIAHUA
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing*)

ABSTRACT

The test and calibration of the detectors of the BES luminosity monitor were performed at KEK Japan. In the momentum region from $0.25\text{ GeV}/c$ to $4.0\text{ GeV}/c$, the properties of the shower counter, such as energy resolution, energy linearity, homogeneity and time resolution were measured. The energy resolution of the shower counter σ_E is approximately 13% at $1.5\text{ GeV}/c$. The time resolution is 660 ps . The performance of the defining counter and the complementary counter was also measured, and the energy resolution was $30-40\%$, the time resolution was about 300 ps . The experimental results show that the properties of all these detectors are satisfactory for the BES luminosity monitor.