

# 北京谱仪亮度监测器

倪蕙苓 周化十 姜春华 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

本文报道了北京谱仪亮度监测器的设计、建造,探测器的性能指标,读出线路及数据获取系统的工作原理. 1988年10月,监测器给出北京正负电子对撞机(BEPC)的首次对撞亮度,起始对撞亮度值为  $5 \times 10^{28}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ . 在以后的对撞实验中给出的对撞亮度与根据加速器运行参数估计的数值符合得较好.

## 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. 由于监测器的接受度和小角度 Bhabha 散射的截面都可以精确计算,所以探测到的 Bhabha 事例计数率可以作为贮存环对撞亮度的绝对测量<sup>[1]</sup>.

在设计亮度监测器时,应设法使加工安装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为亮度监测器的原理图. 图中P为定义计数器,C为辅助计数器. Bhabha 散射事例的一对  $e^+$ 、 $e^-$ , 能量与碰撞前相同,运动方向相反,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). S为量能器,测量入射到P和C上的  $e^+$ (或  $e^-$ )的能量.

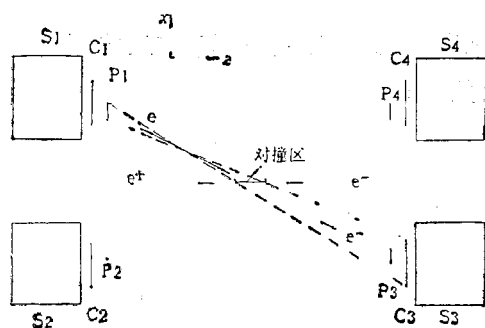


图1 亮度监测器的原理图

P计数器接收到的 Bhabha 事例计数率

为:

$$R_B = L \cdot \sigma_B, \quad (1)$$

其中  $\sigma_B$  为 P 计数器接受的 Bhabha 散射积分截面,  $L$  为贮存环的对撞亮度.

图1所示的布局特点是:四个P计数器探测到的事例率总和提供了亮度测量,它对于对撞区位移和旋转以及纵向轮廓变化是不灵敏的,而四个各自独立的P计数器计数率之间的相互关联的变化,可以反映对撞区在  $x$ 、 $z$  方向的位移以及对  $y$  轴旋转的程度. 因

此,对撞区的位移和转动对亮度测量的影响是较小的,而且这种效应是可以计算的。从任何条件来讲,亮度的精确测量原则上可以简化为定义四个 P 计数器的接受度和它们之间的纵向和横向距离精度。

为了减少本底,让 P 计数器与其对角的 C 计数器符合以探测 Bhabha 事例的  $e^+e^-$  对,同时还测量粒子能量以及各探测器接受到的粒子相对于对撞时刻的时间谱。

本文报道北京谱仪亮度监测器探测器的设计、制作、性能测试、安装及定位测量;读出线路及数据获取;亮度监测器的运行及实验结果。

## 二、探 测 器<sup>[2]</sup>

### (1) 探测器的设计及制作

P、C 计数器尺寸的确定,必须考虑对撞区纵向 ( $z$ ) 及横向 ( $x, y$ ) 的轮廓。BEPC 束流截面为:  $\sigma_x \sim 0.9\text{mm}$ ;  $\sigma_y \sim 0.2\text{mm}$ ;  $\sigma_z \sim 60\text{mm}$ 。表 1 列出探测器的尺寸及位置。

表 1 探测器的尺寸及位置

| 计数器 | 尺 寸 (mm) |     |     | 中心位置 (mm) |     |       |
|-----|----------|-----|-----|-----------|-----|-------|
|     | 宽        | 高   | 厚   | $x$       | $y$ | $z^*$ |
| P   | 23       | 70  | 3   | 94        | 0   | 1920  |
| C   | 55       | 90  | 5   | 97.5      | 0   | 1960  |
| S   | 87       | 120 | 130 | 101.5     | 0   | 1980  |

\*  $z$  向位置为探测器面对对撞区的界面位置。

P、C 计数器的闪烁体为 NE102, 厚度分别为 3mm 及 5mm。光导长度分别为 280 mm 和 300mm。由于 P 计数器面积精度对亮度测量的系统误差贡献很大,所以闪烁体的面积必须精细加工、抛光。测量得到的实际面积和表 1 给出的理想矩形面积之差小于 0.5%。C 计数器的光导为扭曲形。P、C 计数器联接较长的光导,是为了减少束流本底粒子直接射到光电倍增管的光阴极上引起虚假计数,同时也为了远离谱仪铁门附近的强漏磁区。P 和 C 计数器的光电倍增管为 XP2020。

量能器 S 由 11 层 Pb 片 (厚为 5.6mm) 和闪烁体 NE110 (厚 6mm) 夹层组成。总厚度为 11 个辐射长度,闪烁体所发的光由 8mm 厚的 BBQ 波长移位片收集。波移片分别放在闪烁体的上方和下方。上下波移片连接到扭曲光导,最后耦合到光电倍增管 XP2020。

用 EGS-III 程序对量能器的一些参数进行了模拟计算。

### (2) 探测器的性能

用放射源  $\text{Sr}^{90}$ ,  $\text{Ru}^{106}$  及宇宙线对 P、C 计数器作了初步测试,测量了时间分辨、效率曲线、 $\frac{dE}{dX}$  谱以及半高宽能量分辨。探测器的重要性能,特别是量能器的性能,是在日本 KEK12GeV 质子同步加速器上进行测试的<sup>[2]</sup>。表 2 给出测试得到的 P、C 计数器的能量

表2 P, C 计数器的能量分辨 ( $\frac{\Delta E}{E}$ )

| 动量 GeV/c |       | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 能量分辨率    | P 计数器 | 40.4% | 42.6% | 41.3% | 44.4% | 40.6% |
|          | C 计数器 | 34.7% | 40.4% | 40.5% | 43.2% | 37.7% |

分辨率  $\frac{\Delta E}{E}$  (FWHM),  $\Delta E$  和  $E$  分别为计数器  $\frac{dE}{dX}$  谱经朗道函数拟合后得到的半高宽和峰值。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约为 10%, C 计数器的不均匀性也约为 10%, 它们的时间分辨分别为 320ps 和 230ps。

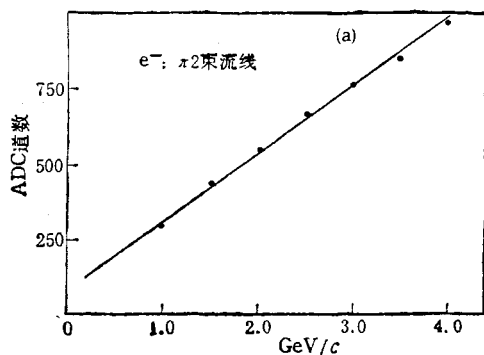


图 2(a) 量能器的能量线性

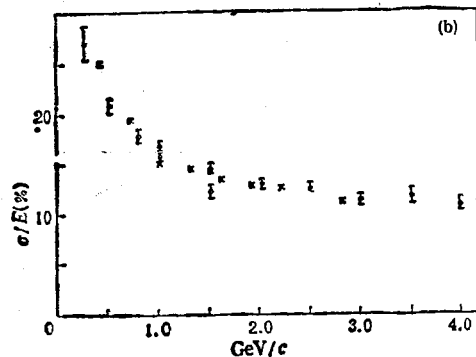


图 2(b) 量能器能量分辨率和入射粒子动量的关系

- : e<sup>-</sup>π<sub>1</sub> 束流线
- : e<sup>-</sup>π<sub>2</sub> 束流线
- ×: Monte-Carlo 模拟计算

图 2 给出量能器的能量分辨率及能量线性。由于采用了波移片 BBQ, 改善了光的收集条件, 使量能器获得了较好的均匀性。对于不同位置入射的粒子, 其输出幅度变化大约  $\pm 10\%$ 。量能器的时间分辨为 660ps。

探测器性能测试及其结果详见文献[2]。

### (3) 探测器的安装及定位测量

十二个探测器安装在可调节的亮度监测支架上(见图 3)。P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub>(或者 P<sub>3</sub> 和 P<sub>4</sub>) 固定在支架的一块子板上, 其位置在精密的坐标镗床上进行测量, 两者之间  $x$  方向的定位精度为  $\pm 0.06\text{mm}$ ,  $y$  方向的定位精度为  $\pm 0.4\text{mm}$ 。这一子板又固定在可调节的亮度监测器支架上, 支架相对对撞中心的定位精度在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上分别为  $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 1\text{mm}$  及  $\pm 2\text{mm}$ 。这样的定位精度, 对亮度测量的误差贡献小于 1%。

P 计数器相对对撞中心张角的上限及下限分别为 55mrad 和 42mrad。

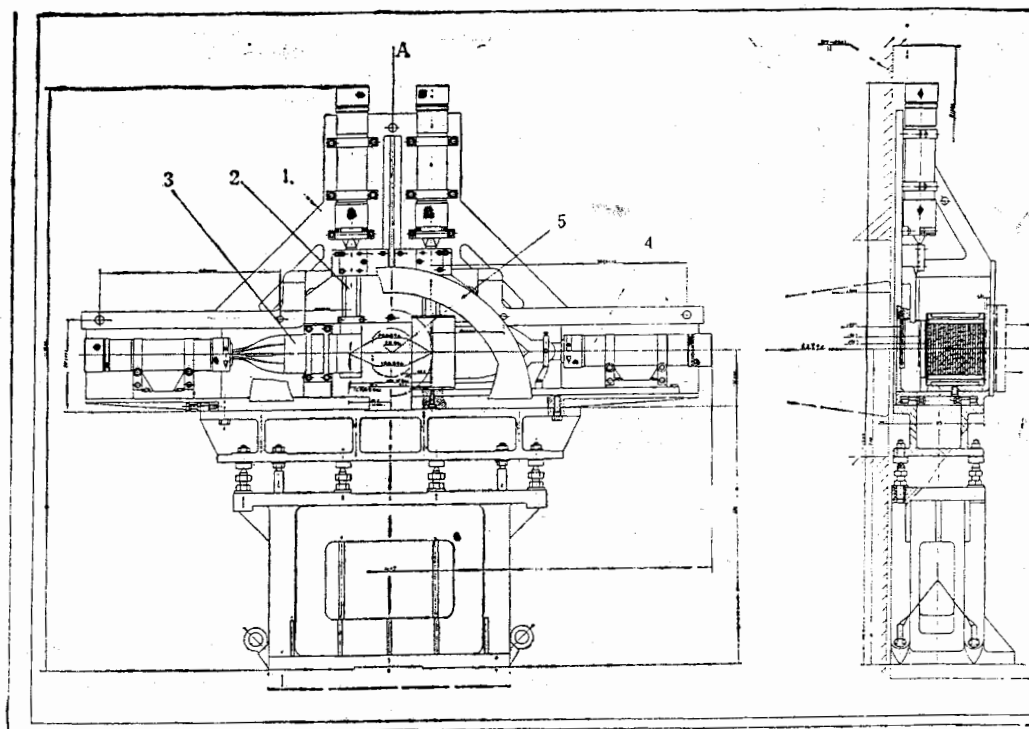


图 3 亮度监测器调节支架结构图

1. 支撑板; 2. P 计数器; 3. C 计数器; 4. S 计数器; 5. 束流中心

### 三、读出线路及数据获取

#### (1) 读出线路

亮度监测器的读出线路基本上采用标准的 NIM 和 CAMAC 插件, 控制单元是自制。图 4 给出读出线路原理框图。读出线路记录了每个探测器的幅度信息、P 探测器和量能器的时间信息, 以及各种符合的定标及状态信息。亮度监测器读出线路的主要考虑是降低本底。线路中除了采用通常的门控、阈甄别、反符合、符合等技术外, 还可由状态信息、时间信息及幅度信息剔除本底。

读出线路的触发方式有三种:

##### 1) 正常事例触发

Bhabha 散射事例的一对正、负电子在对角线上的各探测器中的信号进行符合, 例如将  $P_1$  和  $S_1$  探测器信号与对角线上另一端的  $C_3$  探测器和  $S_3$  探测器信号组成四重符合  $(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)$ , 作为好事例的“候选者”, 即正常事例触发方式。显然, 这样的触发方式共有 4 种 (见表 3)。由于随机的一些本底计数也会产生这样的符合, 因此, 这类事例触发也包括了一些随机本底。这类事例在寄存器中被相应地记录下来, 称之为状态数。四种符合方式对应的状态数分别为“1”, “2”, “4”及“8”。

##### 2) 随机本底触发

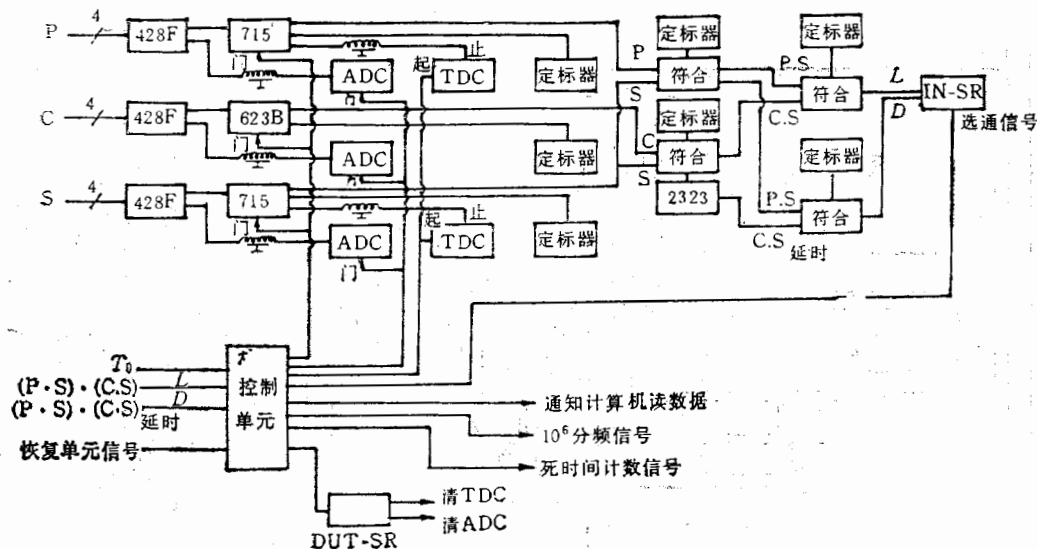


图4 读出线路框图

ADC——幅度数字转换 TDC——时间数字转换 715——恒比定时 428F——线性扇入扇出

623B——甄别器 IN-SR——输入寄存器 2323——延迟产生器 OUT-SR——输出寄存器

$L = (P \cdot S) \cdot (C \cdot S)$ ——4重符合

表3 正常事例触发与延时符合触发

| 正常事例触发                                  |     | 随机本底触发                                   |       |
|---|-----|--|-------|
| 符合方式                                    | 状态数 | 延时符合方式                                   | 状态数   |
| $(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)$ | "1" | $(P_1 \cdot S_1) \cdot (C_3 \cdot S_3)'$ | "16"  |
| $(P_2 \cdot S_2) \cdot (C_4 \cdot S_4)$ | "2" | $(P_2 \cdot S_2) \cdot (C_4 \cdot S_4)'$ | "32"  |
| $(P_3 \cdot S_3) \cdot (C_1 \cdot S_1)$ | "4" | $(P_3 \cdot S_3) \cdot (C_1 \cdot S_1)'$ | "64"  |
| $(P_4 \cdot S_4) \cdot (C_2 \cdot S_2)$ | "8" | $(P_4 \cdot S_4) \cdot (C_2 \cdot S_2)'$ | "128" |

注:  $(C_3 \cdot S_3)'$  表示将  $(C_3 \cdot S_3)$  符合信号延迟 802ns, 再与下一周期的  $(P_1 \cdot S_1)$  符合信号相符合, 其它的延时符合同此。

贮存环的正、负电子束在经过亮度探测器时, 可能产生随机信号, 因而产生偶然符合, 这是本底的一个来源。对撞区与探测器相距近 2m。所以这类偶然符合发生时间约在对撞前 6.7ns 和对撞后 6.7ns。前者与 Bhabha 事例信号相隔 13.4ns, 后者则与 Bhabha 事例同时。由量能器和 P 计数器的时间谱, 可以将对撞前 6.7ns 到来的“早到”本底剔除。对于和 Bhabha 事例同时到达的偶然符合, 则由延时符合来剔除, 即将二重符合  $(C_1 \cdot S_1)$  延迟 802ns, 与下一个加速周期的二重本底符合  $(P_3 \cdot S_3)$  进行 4 重符合, 并把它当作偶然符合。显然, 这样的符合也有 4 组 (见表 3), 这 4 种延时符合对应的状态数依次为“16”, “32”, “64”及“128”。

### 3) 随机取样触发

当束流经过  $10^6$  次以后, 读取电路就自动地采样一次。即不管当时探测器处于何种状态, 获取数据单元会自动地将各探测器的幅度、时间、状态以及定标信息全部记录下来,

目的之一是对各探测器随机本底进行采样,其二是了解各探测器随机本底机率的关联.这种触发对应的状态数为“256”。

各探测器信号经 39m 长电缆送到线性扇出插件 428F, 然后经过门控恒比定时单元 715 及各种符合单元, 产生上述三种触发信号之一。一旦产生了触发信号, 同时就会给出许多控制信号: ADC 的开门信号、TDC 的公共起始信号、输入状态寄存器 (IN-SR) 的选通信号、关门信号、以及通知计算机“取数”的通讯信号。关门信号是使读出线路的输入信号禁止输入, 以保证 ADC 和 TDC 信号正常转换完毕 ( $\sim 100\mu\text{s}$ )。计算机将全部信号取完之后, 通过输出状态器给出快清信号及开门信号, 使读出线路开始新的信号收集。

## (2) 数据获取

在加速器调试阶段, 在线程序通过  $\mu\text{P-6002}$  接口实现了 IBM-PC/XT 微机与 CAMAC 的通讯。在得到读出线路的“取数”通讯信号之后, 计算机将全部信息, 即 ADC、TDC 状态及定标信息采集记盘。由于 IBM-PC/XT 内存太小, 不能在线采样分析, 只能离线进行, 显然不适应北京谱仪工作要求, 现已由 VAX-785 进行再线获取, 并能实时分析数据质量, 显示亮度重要参数和图形信息。

## 四、亮度监测器运行及实验结果

### (1) 运行及实验结果

1988 年 10 月 17 日, 亮度监测器给出 BEPC 首次对撞成功的对撞亮度数据。在能量 1.6GeV 时, 起始亮度为  $5 \times 10^{28}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。从 1988 年 10 月到 1989 年 1 月, 曾在 1.1GeV, 1.6GeV, 1.8GeV, 2.0GeV, 2.4GeV 等能量下工作。

图 5 给出亮度测量数据。图 5(a) 为亮度衰减曲线, 每一点的数值是从 1 分钟内得到的事例数计算出来的亮度值。图中共有 5 组数据, 其中 4 组是各 P 探测器相对应的亮度值, 第五组是平均亮度值。在束流能量为 1.6GeV 时, 起始对撞平均亮度  $\bar{L}$  为  $2.1 \times 10^{30}/$

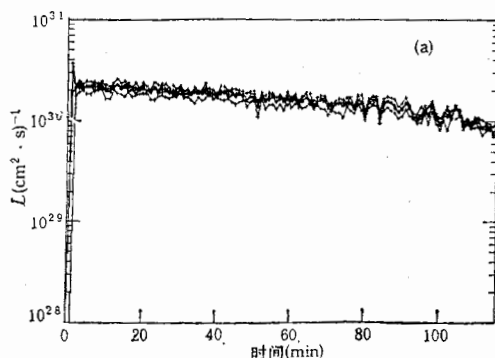


图 5(a) 亮度衰减曲线

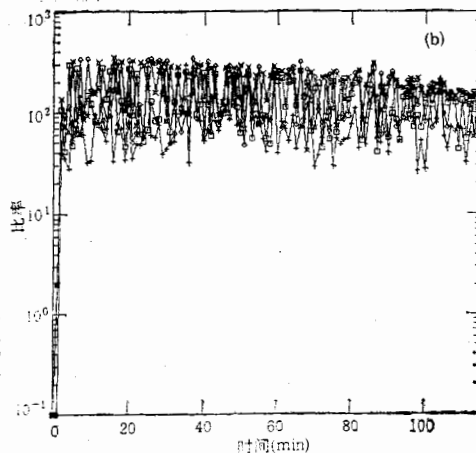


图 5(b) 正常触发事例与延时触发事例比

$\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ , 这与按加速器运行参数估算的亮度值  $2 \times 10^{30}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  符合得相当好. 四组正常触发事例每分钟约 300 个, 统计误差为 6%. 亮度曲线的寿命大约 3 小时. 图 5(b) 为正常触发事例与延时触发事例之比, 它表示亮度监测器环境本底的状况, 加速器运行状态不同将会引起这一比值的变化. 当本底非常大时, 此比值接近于 1, 这时给出的亮度值是没有意义的.

图 6 给出束流能量 1.6 GeV 时探测器的典型能谱与时间谱. 图 6(a) 是  $S_4$  的能谱; 图 6(b) 和 6(c) 分别是  $P_4$  和  $C_4$  的  $\frac{dE}{dX}$  谱; 图 6(d) 是  $S_1$  的时间谱, 在 Bhabha 事例前 13 ns 处(约 260 道)有少量计数, 这是对撞时刻之前的本底计数.

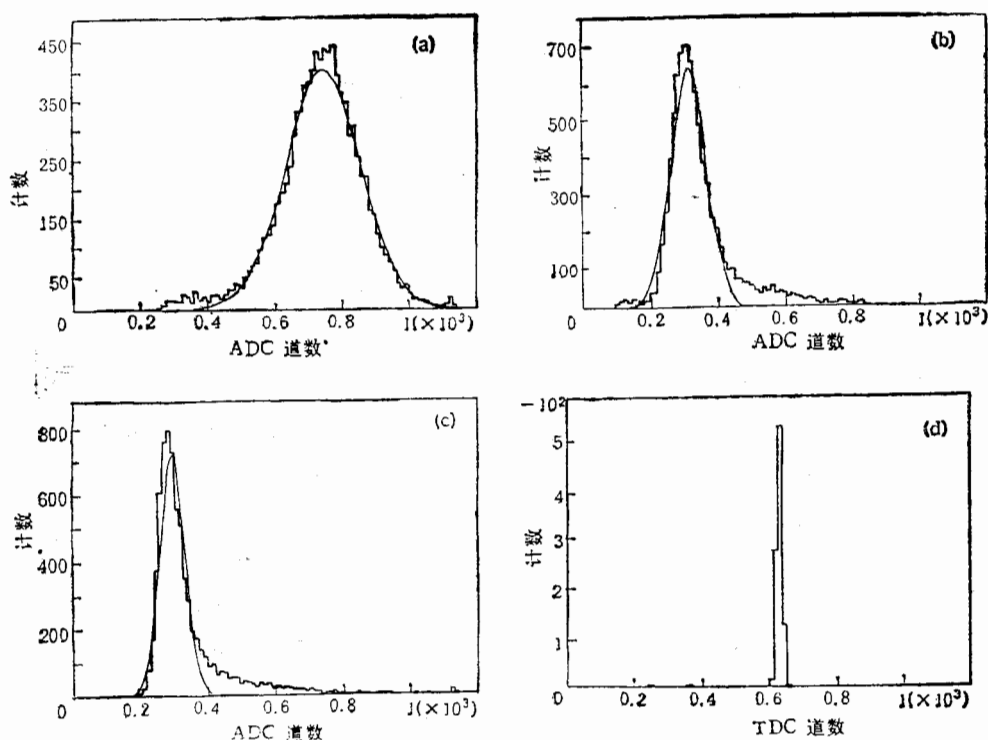


图 6 探测器能谱及时间谱

图 5 及图 6 都是 BEPC 运行本底计数较低时的数据, 若本底增大, 量能器的能谱低端明显增高. 时间谱除了 Bhabha 事例主峰外, 距 Bhabha 事例主峰前 13 ns 处的本底事例明显增加. 所以, 亮度监测器也能对 BEPC 运行给出有意义的信息.

## (2) 误差的初步分析

亮度( $L$ )的误差来自 Bhabha 散射积分截面  $\sigma_B$  的计算和事例率  $R_B$  的测量. 积分截面  $\sigma_B$  为:

$$\sigma_B = \int_{\text{接受立体角}} \frac{d\sigma_B}{d\Omega} d\Omega. \quad (2)$$

计算误差来自两方面: 一是微分截面  $\frac{d\sigma_B}{d\Omega}$  公式的误差; 一是亮度监测器的几何因素, 即接受立体角在积分截面计算中所引起的系统误差。事例率  $R_B$  除了获取数据时的统计误差外, 还存在着系统误差的贡献, 如触发效率、环境本底等。

微分截面的误差主要来自辐射修正, 大约为百分之几。束流能量引起的微分截面误差来自束流能散度和能量标定的不准确性, 根据 BEPC 设计书的参数, 估算误差  $\sim 0.1\%$ 。

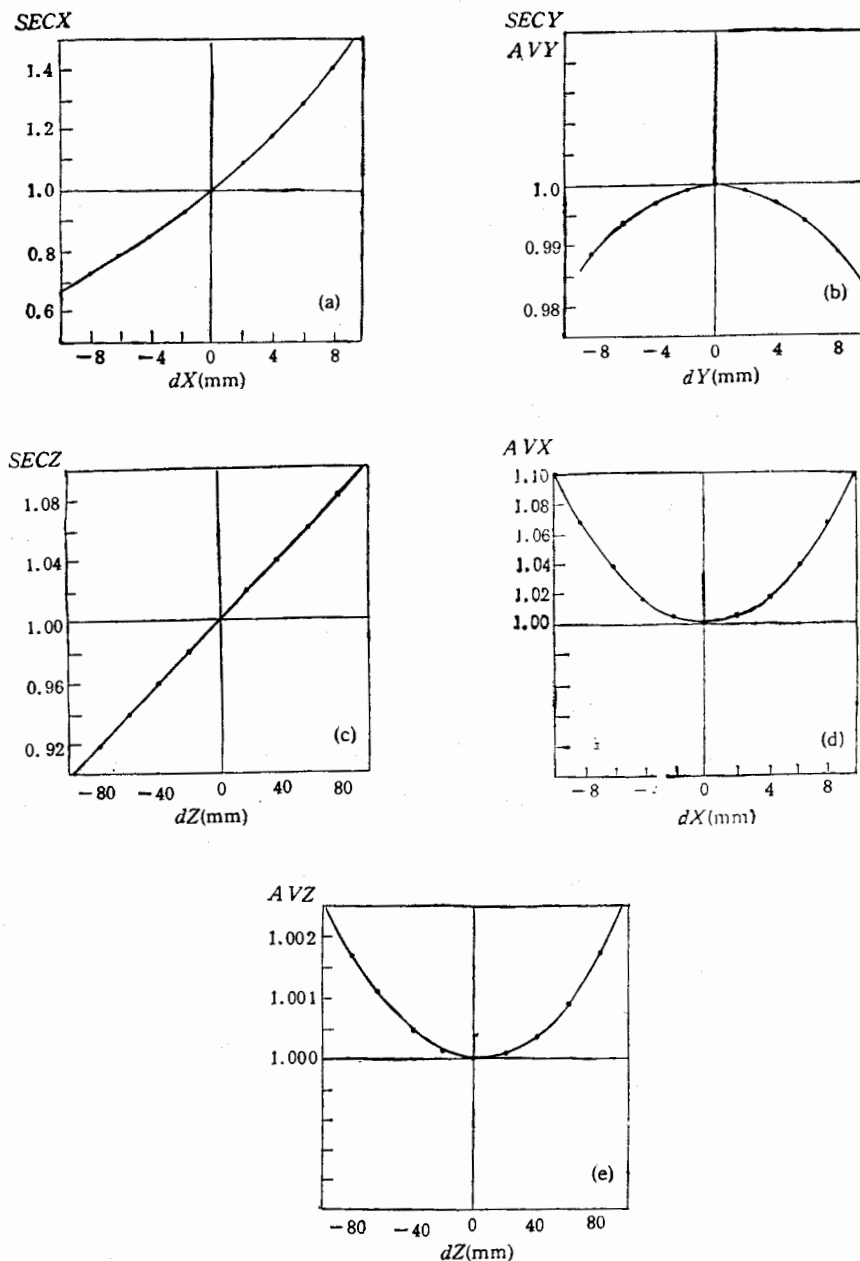


图 7 积分截面  $\sigma_B$  与对撞区位置的关系



定义计数器P的大小、位置以及束流的几何尺寸、位移等都对积分截面计算误差有贡献。如前所述,定义计数器的实测面积与理想矩形面积偏差不大,为了简化截面计算,采用了理想矩形面积。计算中,考虑了束团的纵向分布 $\sigma_z = 60\text{mm}$ 。图7给出积分截面与定义计数器位置不确定量或束团位置位移量的关系。图中SECX、SECY、SECZ为束流位移后的积分截面与理想对撞中心位置的积分截面的比值,AVX、AVY、AVZ为位移前后四组定义计数器(P)的积分截面平均值之比。

定义计数器的定位精度达到以下数值:

$$dx = \pm 0.06\text{mm} \quad \text{SECX} \approx 0.3\%;$$

$$dy = \pm 2.0\text{mm} \quad \text{SECY} \approx 0.1\%;$$

$$dz = \pm 2.0\text{mm} \quad \text{SECZ} \approx 0.3\%,$$

所以它带给积分截面也即亮度(L)值的系统误差 $<1\%$ 。

当对撞区相对于设计位置有一偏移时,各定义计数器的积分截面都有改变,而且彼此之间是关联的,四组的平均值将是位移量的二次项关系。如对撞区沿z向位移 $\delta z = 20\text{mm}$ ,则每个探测器的积分截面将会改变 $\pm 2\%$ ,四组平均将改变 $\sim 0.05\%$ 。由于亮度监测器可利用的空间有限,C探测器的几何大小受限,所以当束流参数变化很大时,有可能发生这样情况,即 $e^+e^-$ 从对撞区设计位置 $\pm 2.5\sigma_z$ 处发射时, $e^+$ 入射到定义计数器而 $e^-$ 未被对面的C计数器接收到,因此Bhabha事例被探测的几率将 $<99\%$ ,这将给亮度值带来误差。这类误差有待进一步分析。

至于触发效率及环境本底的仔细研究,需要积累更多的数据进行离线分析,这些工作将在以后的进展报告中给出。

## 五、结 束 语

本亮度监测器的主要特点有:

1. 探测器具有较好的性能,如能量分辨、时间分辨、能量线性以及均匀性等。探测器的几何因数、定义计数器的面积及定位精度给亮度测量带来的系统误差小于 $1\%$ 。
2. 读出线路及数据获取系统给出的信息比较多,对本底有较强的抑制能力,除了测量对撞亮度外,对BEPC运行也可提供有意义的信息。

本文所报道的是BEPC调试及早期 $e^+e^-$ 对撞时的亮度测量结果。对于引起误差的诸多因素,还需进一步研究。

作者感谢叶铭汉教授、BEPC工程领导、高能物理所一室许多组及有关同志在亮度监测器的研制、制作及运行工作中所给予的指导、关心、支持和帮助。感谢安徽光机所及高能物理所工厂和安装队的大力协作。

## 参 考 文 献

- [1] L. H. O'NEILL et al., Nucl. Instr. and Meth., **216** (1983), 361.  
 [2] 倪蕙苓等,高能物理与核物理,**13**(1989),870.

## THE LUMINOSITY MONITOR OF BES

NI HUILING ZHOU HUASHI JIANG CHUNHUA GUO HONGFEI XU JIANGOU

ZHU QIMING WANG FANG LIU WEI LI JIAHUA

*(Institute of High Energy Physics Academia Sinica, Beijing)*

### ABSTRACT

In this paper, we present the design and construction of the luminosity monitor, the main features of the detectors, and the functions of the read-out circuits and data acquisition system of the Beijing spectrometer (BES). In October of 1988, the luminosity monitor provided the first colliding luminosity of BEPC, and the initial luminosity was  $5 \times 10^{28}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ . During the later colliding experimental operation, the luminosity monitor also provided the colliding luminosities, which were in good agreement with those calculated by the operation parameters of the BEPC.