

# 四输出闪烁描述仪的研制

郑志鹏 荣刚 杨春敏 奚建平

(中国科学院高能物理研究所)

## 摘 要

制造了两块尺寸皆为  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$  (厚  $5\text{mm}$ ) 的闪烁描述仪 (闪烁体为 ST401 型), 利用安装在四角的四个光电倍增管的输出脉冲幅度的分析来达到定位的目的。研究了两种不同形状的光导对位置分辨的影响。其中较好的一种对单个带电粒子的位置分辨率为  $\pm 2\text{cm} - \pm 4\text{cm}$ 。

## 一、引 言

早先的闪烁描述仪是由许多等宽度条状闪烁体组成, 其位置分辨恰为闪烁体条的宽度。这样只能提供一维定位, 二维定位则还需另一组垂直方向的条状闪烁体。由于每一条后面需接一个光电倍增管, 因此需要光电倍增管的数量很大。例如为了对 50 厘米见方面积获得 5 厘米的两维空间分辨, 需要二十个光电倍增管。以后虽然采用了一些办法, 但节省光电倍增管的数目有限。

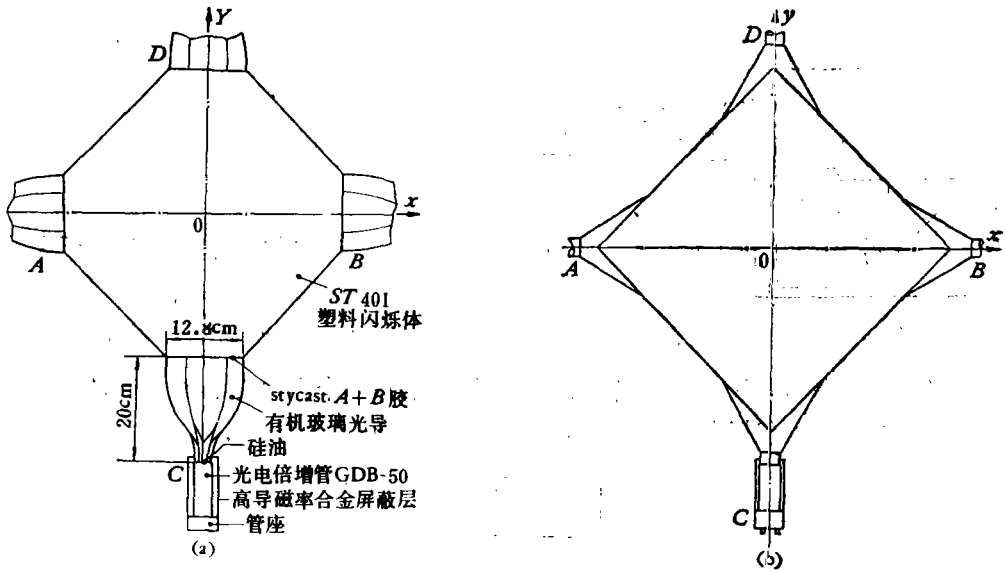
近些年来采用了长条闪烁计数器两端接光电倍增管的方法以达到一维位置分辨的目的。可利用两光电倍增管输出脉冲幅度关系或传播时间差来定位。

1975 年, W. K. Schmidt 等人<sup>[1]</sup>在 1 米见方的闪烁计数器四个角配上光电倍增管, 利用幅度分析达到二维定位的目的。他们获得了  $\pm 7\text{cm}$  的位置分辨率。显然这是一种有不错的位置分辨而又节省光电倍增管的作法。分析方法虽复杂一些, 但可与计算机相联, 作在线分析, 很快得到结果。文[1]中没有对所使用光导形状、结构作报道, 也没有详细讨论影响位置分辨率的诸因素。我们企图对这些问题作一些研究。

## 二、计数器结构

我们采用国产 ST401 型塑料闪烁体, 制成了两个尺寸皆为  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$  (厚  $5\text{mm}$ ) 的闪烁计数器  $S_1$ 、 $S_2$ 。它们都有四个光电倍增管输出, 但有不同的光导结构。

$S_1$  使用的扭曲条状光导, 由四块等宽度 (宽  $32\text{mm}$ , 厚  $5\text{mm}$ ) 的有机玻璃条扭转  $90^\circ$  而成。一端呈板状, 与闪烁体相接; 另一端呈方柱形, 与光电倍增管相联 (图 1(a))。  $S_2$  的

图 1 (a)  $S_1$  的结构 (b)  $S_2$  的结构

光导为叉形平板, 一端接闪烁体一角的两边, 另一端镶嵌在直径 4 厘米的圆柱体上, 再与光电倍增管相联 (图 1(b)). 上述光导材料皆采用国产二号光学有机玻璃. 光导与闪烁体用 Stycast A + B 胶粘接.

$S_1$ ,  $S_2$  分别接同一组四个光电倍增管, 型号为国产 GDB-50.

因为我们使用幅度法定位, 因而要求光电倍增管的增益有较高的稳定性, 为此, 我们从大量的光电倍增管中经测试选出几个稳定性能好的. 然后再经过一百小时以上的老化, 从其中挑出四个最优者, 每个 8 小时漂移  $< \pm 2\%$ .

### 三、计数器的标定

我们用放射源标定方法, 得到四个光电倍增管输出幅度和位置的关系. 采用了图 2 的线路.

在闪烁体上贴上坐标纸, 计数器中心为坐标原点, 坐标方向如图 2. 一个经过准直的  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  源放在计数器不同位置上, 分别记录下 A、B、C、D 端的输出脉冲幅度.

$\beta$  放射源有连续能谱, 使输出脉冲幅度有一连续分布, 因此就存在如何选取幅度标准的问题. 我们采用了两种方法: 一种是测量最大脉冲幅度, 这个方法简单, 但误差较大; 另一种是调节甄别阈, 使积分计数等于某一固定值, 以此阈值为脉冲幅度标准, 可以用多道分析器, 也可用单道分析器记录、分析. 这种方法有较好的精度<sup>[2]</sup>.

光电倍增管工作电压的选取, 根据以下两个原则: 一是工作在计数率坪区, 二是将放射源放在坐标原点上, 使四个光电倍增管有相同计数. 我们采用高压电源的长期稳定性好于 0.03%, 而且有数字电压表监视.

当高压维持不变,  $^{90}\text{Sr}$   $\beta$  源位置不变 (在计数器中心处), 分别测出四个光电倍增管 A、B、C、D 输出脉冲幅度随时间的变化, 可得到漂移曲线. 图 3 给出 A 管 (包括电子学

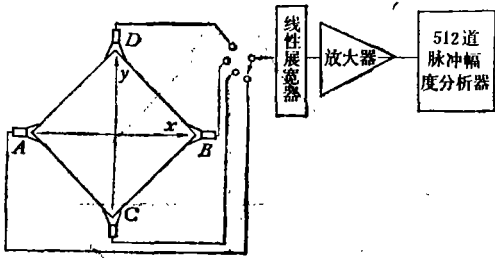


图2 计数器标定的电子学线路

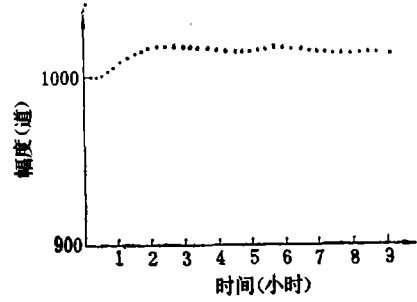


图3 A光电倍增管的漂移曲线

线路)的9小时漂移曲线,若前一个小时为预热时间,后8个小时的漂移 $\approx \pm 0.4\%$ 。其余的三个光电倍增管(包括电子学线路)最大漂移 $< \pm 2\%$  (8小时内)。

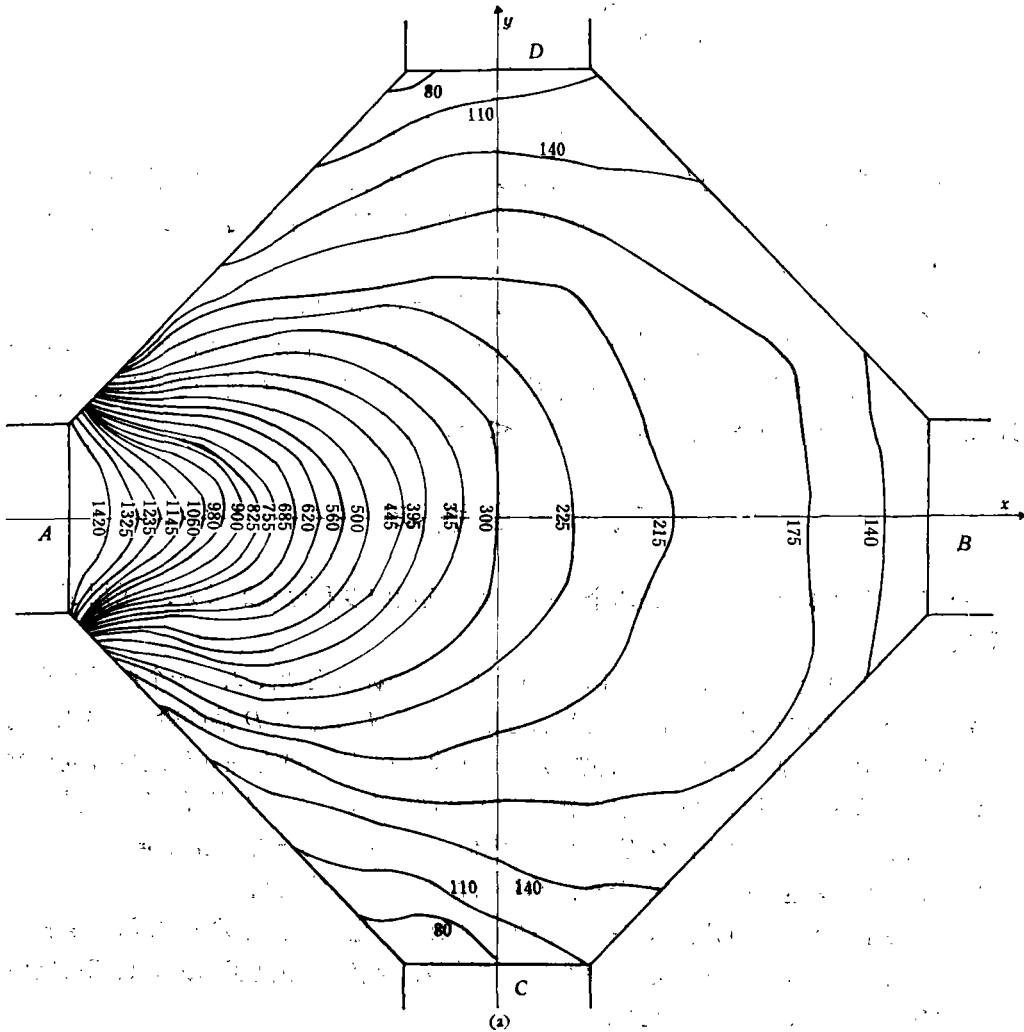
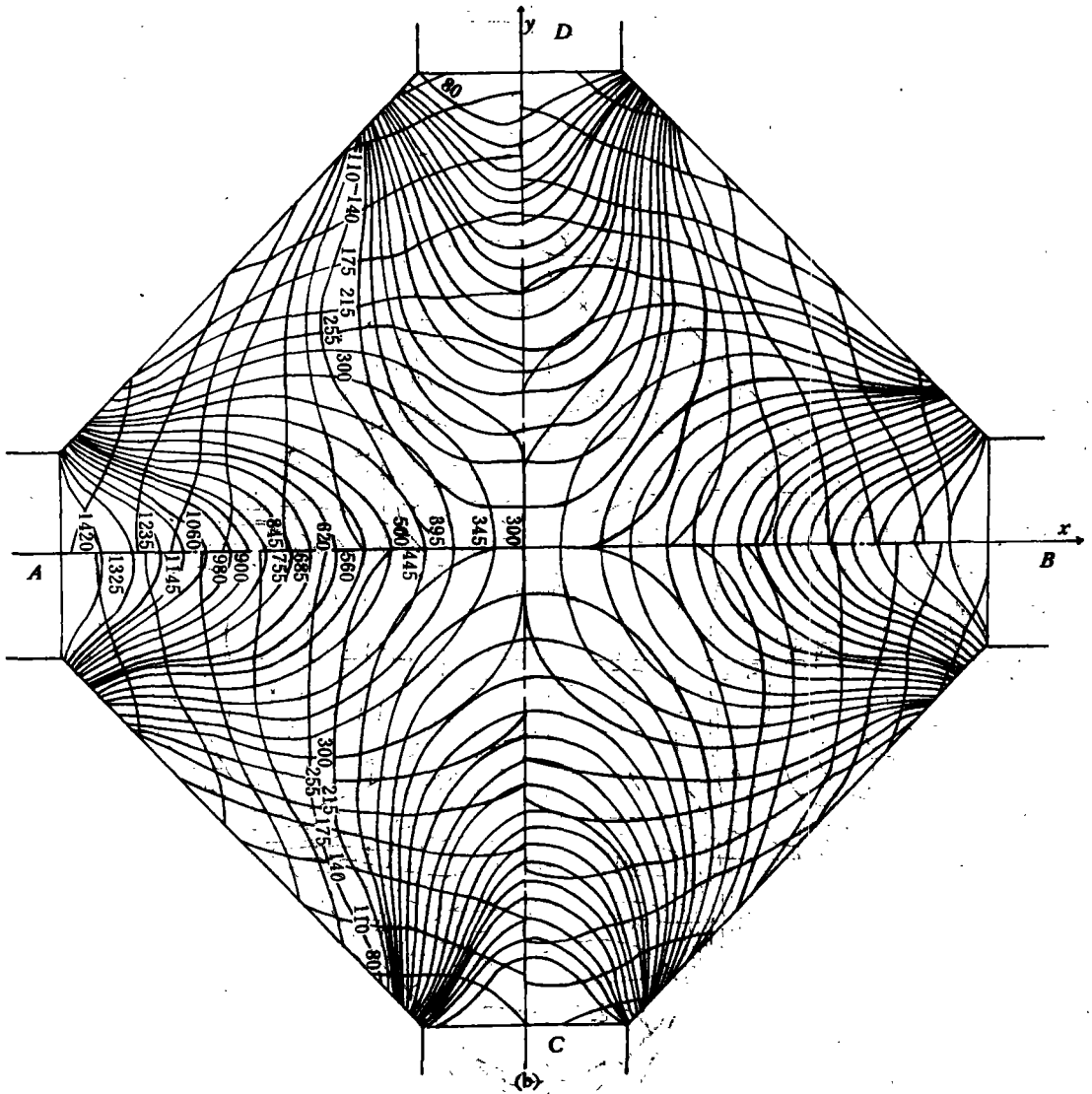


图4 (a)  $S_1$  A端的等幅线图(图上  
(b)  $S_1$  四端的等幅线图(只画

测量时,将放射源每隔 5 厘米移动一次,共测一百个点左右。把记录下来的脉冲幅度值作适当处理,被测点之间的值由插值法算出,可分别对每一输出端给出等幅线图(图 4、5),同一根等幅线表示脉冲幅度相等,其上所标数字为幅度值(以毫伏为单位)。

从图 4(a), 5(a) 可看出,离 A 端越远,幅度梯度越小。这是因为脉冲幅度随距离按指数衰减。等幅线不是一组同心圆,这是因为光电倍增管窗口有一定面积,不是一个点;还因为在闪烁体边缘区域光的传播情况比较复杂(详见下面讨论部分),因此导致了如图的分布。图 4(a), 5(a) 等幅线形状不同是因为光导不同而有不同的收光形式,从而导致随位置不同的衰减规律。

图 4(b)、5(b) 绘出了四端输出的等幅线交汇图。为了避免混乱,每端只画出了靠近



所标数字为幅度值)  
出靠光电倍增管的一半,另一半略)。

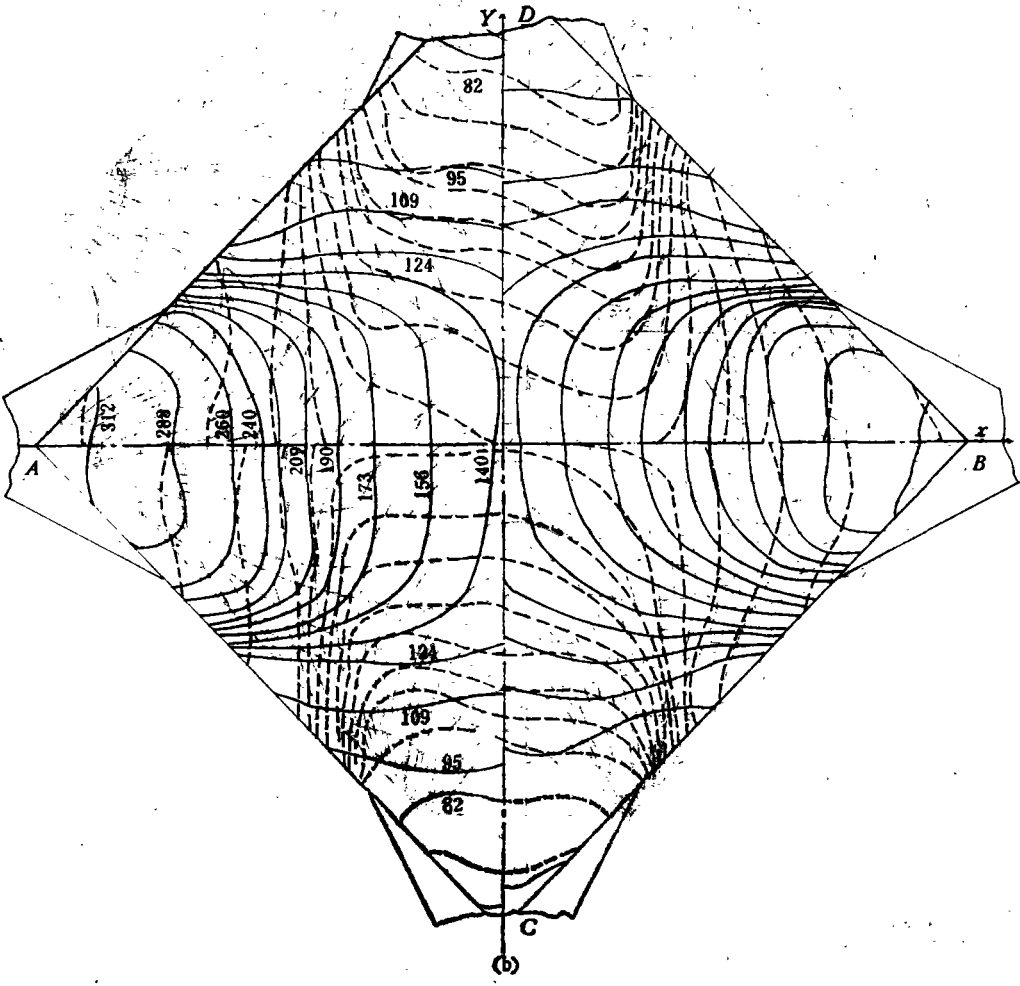
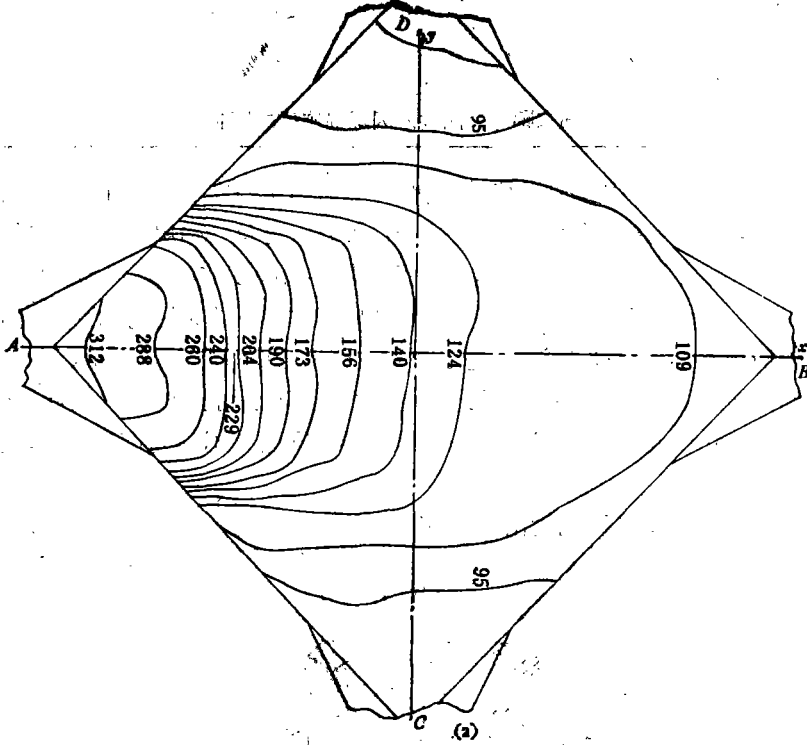


FIG. 5. (a) Contour plot of the function  $f(x, y) = x^2 + y^2$  on the diamond-shaped domain  $|x| + |y| = 1$ . (b) Contour plot of the function  $f(x, y) = x^2 + y^2 + 1$  on the same domain.

光电倍增管的一半等幅线。将等幅线的函数关系存入计算机,一旦记录下粒子入射后四端的输出脉冲幅度,即可拟合等幅线,并从等幅线的交点来确定粒子入射位置。例如对  $S_1$  计数器(图 4(b)),  $B$  端和  $D$  端的等幅线交点可定出  $I$  象限区间的位置。当两条等幅线出现两个交点时(如 395( $B$ ) 与 300( $D$ ) 的交点  $a, b$ ), 还需第三者  $C$  (或  $A$ ) 端的输出幅度,再进行等幅线的拟合来区别这两个点。在  $S_2$  计数器(图 5(b)) 靠近光导的一个小范围内,因为两组等幅线接近平行而不能相交,因而只有一维定位能力,而其它区域仍可作二维定位,分析方法同  $S_1$ 。

#### 四、位置分辨率和测量结果

我们常遇到的是对单个粒子的测量,下面讨论一下  $S_1, S_2$  对单个粒子的位置分辨率。设位置分辨率为  $\Delta L$ , 应由下式确定:

$$\Delta L = \frac{\Delta A}{|\nabla A|} \quad (1)$$

其中  $\Delta A$  为幅度测不准量;  $\nabla A$  为入射粒子处的幅度梯度,其绝对值表示沿等幅线法线方向单位距离幅度的变化值。

由 512 道分析器可以读准一道;光电倍增管(包括电子学线路)的漂移值较小(小于  $\pm 2\%$ ), 因而  $\Delta A$  的主要来源于单粒子脉冲幅度的统计误差,即等于脉冲幅度谱的半高宽度  $\Gamma$ 。它与闪烁体的发光效率、厚度以及闪烁体、光导的光传输特性有关。

现讨论一下二维位置分辨的情况。设两条等幅线交于  $O$  点,其切线分别为  $A$  和  $B$ , 交角为  $\theta$ 。对  $A$  相应的位置分辨率为  $\Delta L_1$ ;  $B$  相应的位置分辨率为  $\Delta L_2$  (图 6)。

菱形  $EFGH$  相应于误差范围,其半对角线  $OE(\Delta L)$  定义为二维位置分辨率。根据简单的几何关系有:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \sqrt{\left(\frac{\Delta L_1}{\sin \theta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_2}{\sin \theta}\right)^2 - 2 \frac{\Delta L_1 \Delta L_2}{\sin \theta \sin \theta} \cos(\alpha_1 - \theta)} \\ &= \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2 + 2 \Delta L_1 \Delta L_2 \cos \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{当 } \theta = 90^\circ \text{ 时, } \Delta L \text{ 有最小值: } \Delta L = \sqrt{\Delta L_1^2 + \Delta L_2^2}. \quad (3)$$

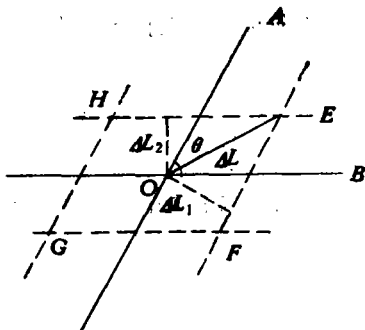


图 6 二维位置分辨的几何关系

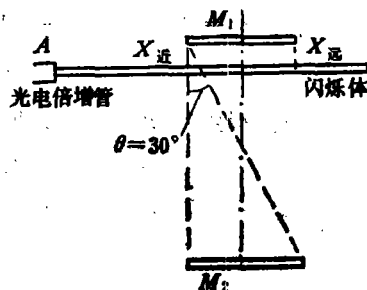


图 7  $M_1, M_2, S_1, S_2$  的相对几何位置

在没有加速器粒子束流的情况下,我们采用了宇宙线( $\mu$ 子)测量法,先确定 $\mu$ 子脉冲幅度谱的半高宽度 $\Gamma$ ,然后再推算出位置分辨率 $\Delta L$ (式(1)).实验装置请参考文献[2]的图6.

两个小闪烁计数器 $M_1, M_2$ 用来选择穿过计数器不同位置的 $\mu$ 子,其面积为 $7 \times 10 \text{ cm}^2$ (厚6mm),分别放在闪烁计数器 $S_1(S_2)$ 的上、下方,呈垂直交迭. $M_1, M_2$ 输出信号分别经过甄别、成形后符合,符合输出再经过拉宽、放大后进入512道脉冲分析器的符合门作为 $S_1(S_2)$ 的开门信号. $S_1(S_2)$ 的输出脉冲经拉宽、放大后输入多道.这样我们就选择了穿过 $M_1, M_2$ 投影在 $S_1(S_2)$ 区域内的 $\mu$ 子.记录十小时左右的时间,可以得到 $\mu$ 子脉冲幅度谱.经过对 $M_1(M_2)$ 面积的修正及 $\mu$ 子斜射的修正后可以估算出该处实在的脉冲幅度谱半高宽度 $\Gamma$ .

$M_1, M_2, S_1(S_2)$ 的相对位置如图7所示.

当 $M_1, M_2$ 中心放在 $S_2$ 的 $x = -25 \text{ cm}, Y = 0 \text{ cm}$ 处(见图2),测量了相应于该位置的 $\mu$ 子脉冲幅度谱(A端输出).其半高宽经几何修正后 $\Gamma = 48$ 道.脉冲幅度峰值读数 $A_m = 247$ 道,故幅度分辨率 $\mathcal{R} = \frac{\Gamma}{A_m} = 19\%$ .

我们还使用了其它两种方法检验在这一点上的幅度分辨率.将 $^{90}\text{Sr}$   $\beta$ 源放置在该点,测出脉冲波形和幅度值,求出在A管光阴极打出的光电子数 $n_e$ .由于脉冲谱近似正态分布,因而其幅度分辨率 $\mathcal{R}$ 为:

$$\mathcal{R} = 2.36 \frac{1}{\sqrt{n_e}} \quad (4)$$

$n_e$ 值有两种估算方法.一种是将一块经过抛光的长15mm,宽6mm,厚15mm的NE110的塑料闪烁体,其五个面都包上铝箔反射层,剩余的一面用硅油耦合,放在A管的中心.将 $^{90}\text{Sr}$   $\beta$ 源在闪烁体正前方垂直入射,当A管高压调至标定时的工作电压并记录下最大输出脉冲幅度,从它与在 $(-25, 0)$ 点标定时最大脉冲幅度比 $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 10.6$ ),可按公式推算出 $\beta$ 粒子入射到该点,A管光阴极打出的光电子数 $n_e$ :

$$n_e = 2.26 \times 1.4 \times 10^4 \times \eta_{\text{发光}} \cdot \eta_{\text{收集}} \cdot \eta_{\text{光电}} \frac{1}{\varepsilon} \quad (5)$$

$^{90}\text{Sr}$ 源电子最高能量为2.26MeV,将被15mm厚的闪烁体全吸收.对蒽晶体每MeV产生 $1.4 \times 10^4$ 光子, $\eta_{\text{发光}}$ 为NE110相对于蒽的发光效率( $\eta_{\text{发光}} = 0.6$ ); $\eta_{\text{收集}}$ 为光的传播、收集效率(按经验,取 $\eta_{\text{收集}} = 0.9$ ); $\eta_{\text{光电}}$ 为光电倍增管光阴极光电转换效率( $\eta_{\text{光电}} = 0.1$ ).代入(5)式可得: $n_e \approx 162$ ,代入(4)式得:

$$\mathcal{R} = 18.6\%$$

与第一个方法得到的 $\mathcal{R} = 19\%$ 非常相近.

另一种估算 $n_e$ 的方法是直接利用光电倍增管的参数,从输出脉冲幅度和波形推出.设 $G$ 为光电倍增管的增益,应有

$$G = \frac{r_a}{r_K} \quad (6)$$

其中 $r_a$ 为阳极光照灵敏度; $r_K$ 为阴极光照灵敏度,皆可查出.

$$G \cdot n_e \cdot e = \int_0^{\Delta t} I dt = \int_0^{\Delta t} \frac{U}{R} dt \quad (7)$$

$e$  为电子电荷量； $I$  为阳极电流， $U$  为阳极输出电压， $R$  为输出电阻， $\Delta t$  为脉冲宽度  
从 (7) 式可得：

$$n_e = \frac{r_K}{r_a e R} \int_0^{\Delta t} U dt \quad (8)$$

其中右边的积分项表示电压脉冲波形的面积，

根据 A 管的参数  $r_K = 60 \mu A/\text{流明}$ 、 $r_a = 200 A/\text{流明}$ ；

$$\int_0^{\Delta t} U dt = 5.63 \text{ 伏} \cdot \text{毫微秒}, R = 50 \Omega$$

(用上述单位，(8) 式右端还需乘  $10^{-15}$  系数)

最后得  $n_e = 210$ ，

$$\mathcal{R} = 16.2\%$$

这个结果与上面两种方法的结果差别不大，这样就增加了对  $\nabla A = \Gamma$  估算的可靠性。  
在其它点，三种方法也有非常接近的结果。

按上述方法，根据 (1) 式可以得到  $S_1$ 、 $S_2$  不同区域的单粒子位置分辨率 (用标准偏差  $\sigma$  表示)。我们大致分成三个区域讨论。

表 1.  $S_1$ 、 $S_2$  对单粒子的位置分辨率

粒子入射区域	$S_1$			$S_2$		
	$\Delta L_1(\text{cm})$	$\Delta L_2(\text{cm})$	$\theta(^{\circ})$	$\Delta L_1(\text{cm})$	$\Delta L_2(\text{cm})$	$\theta(^{\circ})$
中心区域 (I)	$\pm 2.5$	$\pm 2.5$	90	$\pm 3.2$	$\pm 3.2$	90
靠近光电倍增管区域 (II)	$\pm 2.0$	$\pm 4.0$	45	$\pm 4.7$	$\pm 10$	0
两相邻光电倍增管间的区域 (III)	$\pm 3.0$	$\pm 3.0$	60	$\pm 3.5$	$\pm 3.5$	60

其中  $\Delta L_1$  为对应于一条等幅线的位置分辨率；

$\Delta L_2$  为对应于另一条与之相交的等幅线的位置分辨率；

$\theta$  为它们之间的夹角。

测量了各点对带电粒子探测效率达到百分之九十九 (测量方法详见 [2])。脉冲上升时间为 5 毫微秒。

从上述指标可以看出， $S_1$  ( $S_2$ ) 可以作为有一定位置分辨能力的触发计数器。

## 五、讨 论

1. 从公式 (1) 可看出要想获得较好的位置分辨率，应减小  $\Delta A$  (即  $\Gamma$ )，亦即需增加收集到光电倍增管光阴极的光子数 (从而光电子数，看 (4) 式)，这就需要采用发光效率高、有足够厚度、有较长衰减长度的闪烁体，而且要求光导有较高的光传输效率。提高位置分辨率的另一面是增加幅度梯度  $|\nabla A|$ ，这又要求闪烁体衰减长度不能太长。从计数器的均匀性及欲使用幅度比值法 [4] 则又要求衰减长度长。因此需权衡上述各种条件取一适当值，通常选用闪烁体衰减长度接近或大于其尺寸大小。ST401 闪烁体的衰减长度为 47



厘米,用做50厘米见方的计数器看来还是适宜的。再做更大面积的闪烁描迹仪,则需选用更厚的ST401型或其它本征衰减长度更长(如NE110)的闪烁体。

2. 上述等幅线方法适用于单电荷高能(接近最小电离)粒子,如 $p, \pi^\pm, e^\pm, \mu^\pm \dots$ 或动能相近的同类低能粒子,其位置分辨率接近表1指标。若需记录不同电荷、不同动能的低能粒子,则需用幅度比值法<sup>[1]</sup>。例如采用比值 $f_1 = \frac{A}{A+B}; f_2 = \frac{C}{C+D}$ ( $A, B, C, D$ 分别为四端输出脉冲幅度),然后分别画等值线,由其交点来定位。显然这种方法将带来较大的定位误差。本计数器也曾按此方法处理过,对计数器中心较大部分区域有类似的规律性,但在边缘区域出现反常。如果面积做大或采用衰减长度更长的闪烁体或采用特殊形状(如椭圆形)的光导集光面(即光导与闪烁体的粘接面),有可能克服边缘区域的反常。

3. 这类计数器若用在加速器束流输运系统或磁谱仪束流的定位上,会有比单粒子有更好的位置分辨。对我们的计数器,实验系统误差主要来源于光电倍增管和电子学仪器的漂移( $\approx \pm 2\%$ ),而512道分析器测量精度为一道,读数误差 $< 1\%$ 。于是(1)式的 $\Delta A = 2\% \cdot A_n$ ,而 $|\nabla A|$ 已测出,因此很容易算出 $S_1, S_2$ 不同区域的位置分辨率。

表2  $S_1, S_2$  对束流的位置分辨率

入射粒子区域	$S_1$		$S_2$	
	$\Delta L_1$ (mm)	$\Delta L_2$ (mm)	$\Delta L_1$ (mm)	$\Delta L_2$ (mm)
I	$\pm 3$	$\pm 3$	$\pm 5$	$\pm 5$
II	$\pm 2$	$\pm 3$	$\pm 7.6$	$\pm 100$
III	$\pm 5$	$\pm 5$	$\pm 3$	$\pm 3$

4.  $S_1$ 与 $S_2$ 比较,其它条件相同,唯一不同的是光导。 $S_1$ 采用扭曲条状光导,有较好的光传输特性,收集到光电倍增管光阴极的光子数多。 $S_2$ 为板状光导,收光性能不如扭曲光导,因而 $S_1$ 的位置分辨率优于 $S_2$ 的。

ST401的折射系数为1.6, Stycast胶及二号光学有机玻璃折射系数为1.5。临界角 $\theta_c = \arcsin \frac{1.5}{1.6} = 70^\circ$ 。大于 $\theta_c$ 角的部分光被全反射而不能进入光导。这种情况对 $S_1$ 的边缘区域较严重,而对 $S_2$ 情况有改善,在 $S_2$ 中心部分等幅线正交范围扩大了。但 $S_2$ 这种形状的光导使得在光导邻近的范围内没有横向的位置分辨。 $S_1$ 在这点上有优越性,可是以损失6.8%的有效面积的条件下来换的。

使用与闪烁体折射系数相近的光导材料(如聚乙烯基甲苯或聚苯乙烯)和粘胶,会改善光的人射情况。

5. 我们准备下一步用光电倍增管输出脉冲时间差的方法来定位,以便与幅度法比较。沈本蔚同志参加了部分测试工作,谨表谢意!

### 参 考 文 献

- [1] W. K. H. Schmidt 等, *Nucl. Instr. and Meth.*, **123**(1975), 333.  
 [2] 郑志鹏等, *高能物理与核物理*, **5**(1981), 576.

## THE STUDY ON THE FOUR OUTPUT SCINTILLATION HODOSCOPE

ZHENG ZHI-PENG RONG GANG YANG CHUN-MIN XI JIAN-PING

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

### ABSTRACT

Two scintillation hodoscopes with the same dimension ( $50 \times 50 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ) but different shape of light guide have been built with the scintillator type ST 401.

Analysing the amplitudes of outputs from four photomultipliers, the position of incident particles is definite. The effect of the two shapes of light guide on the position resolution has been studied. The position resolution of the better one is  $\pm 2 \text{ cm}$  to  $\pm 4 \text{ cm}$ .