

提高气体取样簇射计数器能量 分辨率的实验研究

马金源 陆伟达 陆昌国 张羽 周月华 顾维新
(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文报告了最小电离 β 粒子在气体计数管中形成的正比、饱和正比和SQS信号谱,指出了用SQS模式代替传统的正比模式气体取样簇射计数器以改善其能量分辨率的可能性.对SQS的死时间、死空间测量的结果表明,虽然它们对不同的气体成分数值有所不同,但数量级相似,典型值为死时间 $\sim 10\mu\text{s}$,死空间 $\sim 3\text{mm}$.

一、引 言

根据简化的电磁簇射模型,由于簇射本身的统计涨落,取样簇射计数器的本征能量分辨率为

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{取样}} \approx \frac{1}{\sqrt{N}},$$

其中 N 即穿越粒子径迹数.实际上在计数器中探测到的是与簇射次级粒子在取样层中的电离能损有关的量,如采用正比丝室作为取样计数器,则由于带电粒子在其中造成的电离能损的Landau涨落,使总的能量分辨率比本征分辨率为大,如下式

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{总}} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma(e)}{e}\right)^2},$$

其中 $\sigma(e)$ 为最小电离粒子在一层取样层中造成电离能损 e 的均方根误差.由于这种分布很宽,所以使气体取样簇射计数器的能量分辨率大大变坏.如果我们能够抑制电离能损的统计涨落,即使 $\sigma(e)/e$ 变得很小,则可望提高这类计数器的能量分辨率.

近年来有人利用饱和雪崩计数管^[2]和盖革计数器技术^[3]制成的簇射计数器就是这种想法的尝试,得到了肯定的结果.本文作者试图采用一种新的气体放电模式——自猝灭流光(SQS)来作为气体取样计数管的工作方式^[4],通过最小电离粒子穿过气体计数管时,在三种气体放电模式(正比,饱和雪崩和SQS)下产生的输出信号谱形的比较,以及SQS信号的死空间、死时间的测量,来探讨在簇射计数器中应用SQS的可能性.

二、最小电离粒子在三类计数管中的信号谱

(1) 实验装置

由于缺乏加速器束流,为了研究最小电离粒子在计数管中产生的信号,我们在 Sr^{90} 的 β 粒子中用闪烁计数器挑选出能量大于 1.2 MeV 的 β 粒子,实验装置如图 1 所示。

铅准直器由两块 $30 \times 47 \times 90\text{mm}$ 的铅块拼合而成,在它们合拢的一侧分别铣了 $12 \times 6\text{mm}$ 的槽,正好将实验计数管嵌入(计数管内截面为 $11 \times 11\text{mm}^2$),并在这侧面上铣了四条 $1.5 \times 1.5\text{mm}$ 的槽,分别与阳极丝方向成 $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ 角。计数管的铜壁与这些槽相对应的地方,钻上小孔,并覆盖上薄膜以作为窗口。在测量某一角度的信号谱时,将 Sr^{90} 源放于相应的槽上,然后将闪烁计数器置于槽的另一端的位置。经过准直的 β 粒子穿入 1cm 厚的闪烁体。调节甄别阈可以选择进入闪烁体的 β 粒子的能量,用 Cs^{137} 对闪烁体进行刻度后,很容易选择出 Sr^{90} 发出约 1.2 MeV 以上的 β 粒子,用这些信号来作为多道分析器的符合输入,就能测得这些近似于最小电离的 β 粒子放电信号谱。我们同时测量了 Fe^{55} 的 5.9keV X 射线及这种 β 粒子的正比信号电荷量谱,得到两者峰值之比为 ~ 2.7 ,由此可见后者的最可能能损约为 (2.1 ± 0.2) keV,这与用 Landau 的最可能能损公式^[5]计算得的结果符合得很好。

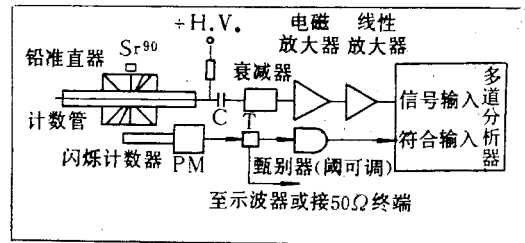


图 1 实验装置

选择进入闪烁体的 β 粒子的能量,用 Cs^{137} 对闪烁体进行刻度后,很容易选择出 Sr^{90} 发出约 1.2 MeV 以上的 β 粒子,用这些信号来作为多道分析器的符合输入,就能测得这些近似于最小电离的 β 粒子放电信号谱。我们同时测量了 Fe^{55} 的 5.9keV X 射线及这种 β 粒子的正比信号电荷量谱,得到两者峰值之比为 ~ 2.7 ,由此可见后者的最可能能损约为 (2.1 ± 0.2) keV,这与用 Landau 的最可能能损公式^[5]计算得的结果符合得很好。

(2) 正比、饱和正比和 SQS 信号电荷量谱的比较

当入射粒子方向相对于阳极丝的角度发生变化时,粒子在计数管内通过的距离也随即发生变化,容易想像三种模式的信号分布都将会有所不同。计数管气体为 $49.3\% \text{Ar} + 49.3\% \text{CH}_4 + 1.4\% \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$,阳极丝直径为 $80\mu\text{m}$,我们测量了在 $90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ 四种角度下的正比与饱和正比信号谱,测量 SQS 信号的计数管工作气体为 $50\% \text{Ar} + 50\% \text{CH}_4$ 通过 0°C 的二甲氧基甲烷,阳极丝直径为 $80\mu\text{m}$ 。我们计算了所有这些分布的平均值,相对均方根分布宽度,归纳于表 1。

表 1 三种工作模式的信号分布随粒子入射角度的变化

	正 比				饱 和 正 比				SQS		
	90°	75°	60°	45°	90°	75°	60°	45°	90°	75°	60°
平均值(道数)	52	62	69	69	54	71	79	82	78	85	106
相对宽度(r.m.s.)	.43	.39	.40	.43	.35	.35	.37	.37	.22	.24	.28

由表 1 的数据我们可以看到三种模式信号分布的平均值都随入射角度的增加而增加,在入射角度较小时,分布宽度以正比信号为最大,饱和正比略小, SQS 最小,随角度的增加,正比与饱和正比信号的分布宽度变化都不大, SQS 信号由于双流光事例的比例迅

速增多,而使分布宽度有所增加,即使如此,在 60° 情况下, SQS 分布宽度还是比正比的要小得多.

在实际使用时为了尽可能减少取样计数器的阳极丝数目,将计数管作成扁矩形,簇射次级粒子可能击中计数管任意位置,这将使最小电离粒子的信号谱变得更宽. 为了研究这种情况,我们制作了一个截面为 $1.0 \times 3.0 \text{cm}^2$ 的计数管,长为 30cm ,然后分别在典型的正比模式及 SQS 模式下测量宇宙线,结果见图 2. 分布都比上面实验中的要宽,但是 SQS 的分布仍比正比模式窄得多.

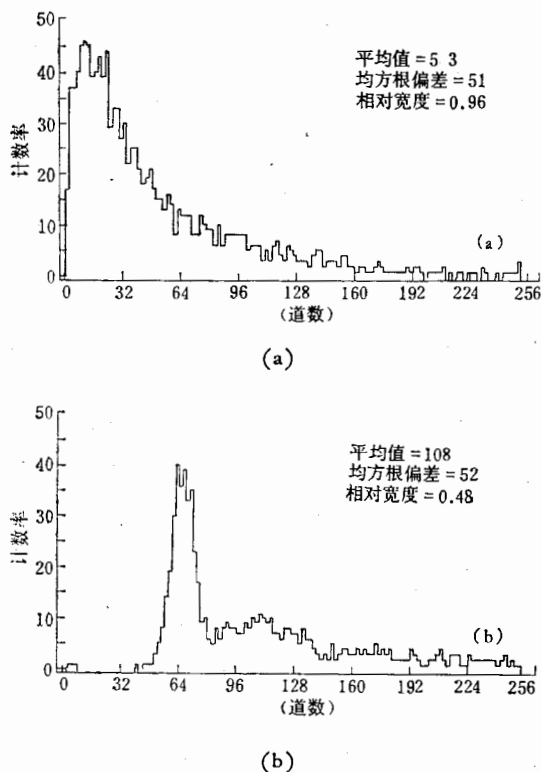


图 2 测量宇宙线得到的信号电荷量谱

(a) $90\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2$, 工作在典型的正比模式 (为了将混杂于谱的低端的噪声去掉,我们在低端设置了下限) (b) $50\% \text{Ar} + 50\% \text{CO}_2$, 通过 0°C 二甲氧基甲烷,工作在典型的 SQS 模式

移动铁片便可实现对源 1 或源 2 或源 1 + 源 2 的计数率的测量. 实验计数管的阳极丝为 $80 \mu\text{m}$ 直径的不锈钢丝,计数管内截面为 $1.1 \times 1.1 \text{cm}^2$.

若 S_1 为源 1 放上后的计数率, S_2 为源 2 的计数率, S_3 为两源同时放上时的计数率,则根据公式

$$\tau = \frac{1}{S_3} \left\{ 1 - \left[1 - \frac{S_3}{S_1 S_2} (S_1 + S_2 - S_3) \right]^{1/2} \right\}^{[8]}$$

便可计算得死时间. 文献 [8] 的作者是在两个放射源对准阳极丝上同一点的情况下得此公式的,当两个放射源位置错开时,若将 $\tau(l)$ 定义为一个放射源在另一放射源所对应的阳极丝处造成的死时间, l 为两个放射源之间的距离,则经过不太复杂的推导也得到同

三、SQS 信号的死时间与死空间

因为 SQS 是一种饱和型的放电现象,它的信号大小并不随初始电离的大小而变化,所以在一次 SQS 型放电所形成的死空间中,即使有多个人射粒子,其输出信号大小也与单粒子一样. 将来用于簇射计数器就会出现能量线性响应的饱和效应,即当入射粒子能量太高,簇射产生的次级粒子过于密集,使二个或二个以上的次级粒子处在同一 SQS 放电死空间内,丢失了一定数量的粒子数^[6,7].

我们用双源法测量了 SQS 信号的死空间与死时间,实验装置如图 3 所示. 准直器是用 10mm 厚的铝板作成如图所示的直角形状,在两侧面上分别钻上一些 2mm 直径的小孔,作为准直孔,铝板中间开了 2mm 宽的槽,可插入铁片遮住准直孔. 当将两个 Fe^{55} 源在 S_1, S_2 准直孔前放置好以后,不用移动放射源,只需

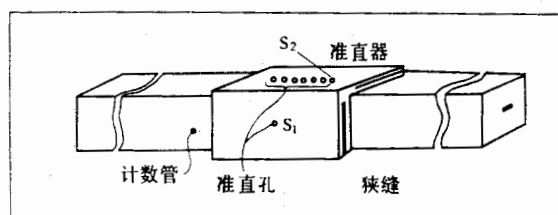


图 3 双源法测死区结构的实验装置

样形式的公式。

混合气体为 49.3% Ar + 49.3% CO₂ + 1.4% C₂H₅OH 的结果如图 4 所示,当两源相距

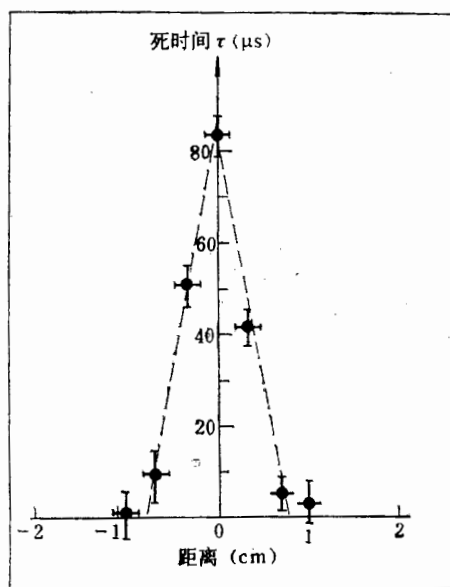


图 4 双源法测死区的实验结果 (纵向误差是计数率测量的统计误差造成, 横向误差表示准直孔直径为 2mm)

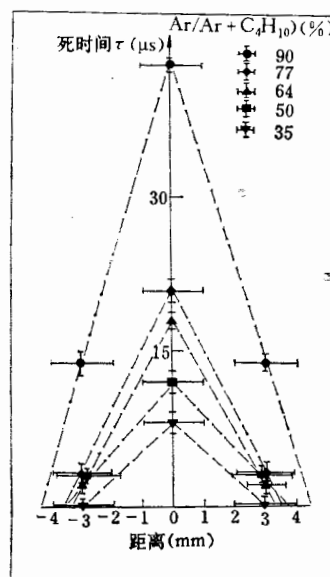


图 5 氩气、异丁烷、二甲氧基甲烷混合气体中死区测量的实验结果

6 mm 时,死时间基本上已降为 0 了。

气体换成不同比例的 Ar 和异丁烷通过 0°C 的二甲氧基甲烷,结果见图 5。由于双源法测量中统计误差影响很严重,需要很高的统计才能得到一个误差较小的实验点,所以限于时间关系,不可能在一种气体成份下测很多点,故而我们不能描出较为精确的死时间与死空间的关系曲线。为了简单起见,我们可将相应实验点连成直线,得到如图所示的三角形,其面积就近似地认为死区 ξ 。从延迟自符合法测得的死空间-时间曲线^[3]可知我们的近似是行得通的。实验结果归纳于表 2。在混合气体中异丁烷含量越高,其死时间和死区也越小。

从图 5 可以看出,当两源相距 3mm 时,死时间实际上已接近于 0 了,由此可推知,死空间约在 3mm 左右。根据 Monte Carlo 计算可知^[10], 2GeV 以下的 γ 光子在气体取样簇射计数器中形成的簇射,其次级粒子密度并不太高,3mm 左右的死空间不至显著引起能量

表2 不同比例的氩气、异丁烷混合气体的 SQS 死时间和死区

Ar/(Ar + 异丁烷)(%)	$\tau(\mu\text{S})$	$\xi(\mu\text{S} \cdot \text{cm})$
90	43 ± 0.4	19.4
77	20.6 ± 1.2	9.2
64	18.2 ± 0.7	6.7
50	11.9 ± 1.5	4.7
35	7.5 ± 1.7	2.3

线性响应的饱和。

四、结 论

从以上实验结果我们可以初步得出如下结论:

(1) 对小角度入射的电子或光子,用饱和正比模式代替正比模式作为取样方法,将使能量分辨率有所改善,而用 SQS 模式可能会更显著些。 对大角度入射,这种改善将不如小角度那么明显。

(2) 对 2 GeV 以下的电磁簇射, SQS 的 3mm 左右的死空间并不会显著影响其能量线性响应。

所以,用 SQS 作为簇射计数器的取样工作方式是值得尝试的。

本工作得到我所物理二室有关同志,特别是王德武、李云山等的大力支援,特此致谢。 本文蒙叶铭汉先生审阅原稿,并提出宝贵意见,作者在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Ugo Amaldi, *Physica Scripta*, **23**(1981), 409.
- [2] M. Atac et al., FN-368, 2562.000(1982).
- [3] C. W. Fabjan and T. Ludlam, CERN-EP/82-37.
- [4] 马金源等,“饱和雪崩和自淬灭流光放电模式的研究”,《高能物理和核物理》待发表。
- [5] L. Landau, *J. Phys. USSR.*, **8**(1944), 201;
K. Sieghahn, “ α , β and γ Spectroscopy”, Chap.1
- [6] F. Bergsma et al., *IEEE NS-30*, No. 1(1983), 122.
- [7] M. Atac et al., *IEEE NS-30*, No. 1(1983), 103.
- [8] G. Battistoni et al., *N. I. M.*, **164**(1979), 57.
- [9] G. D. Alekseev et al., *N. I. M.*, **177**(1980), 385.
- [10] Y. Unno, “Showers in the MARK-III Shower Detector By Several Different Energy Photons”, 私人通信。

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON IMPROVING THE ENERGY RESOLUTION OF THE GAS SAMPLING SHOWER COUNTER

MA JIN-YUAN LU WEI-DA LU CHANG-GUO
ZHANG YU CHOU YUE-HUA GU WEI-XIN
(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The charge spectra of the proportional, saturated proportional and SQS signals produced by the minimum ionizing β particles in the gas counter are presented. It is pointed out that using the SQS mode, instead of the traditional proportional mode as the sampling means in gas sampling shower counter is a promising way to improve the energy resolution. The measured results of SQS dead time and dead space vary with different gas mixtures, but they are in the same order of magnitude and the typical values are $\sim 10 \mu\text{s}$ for dead time and $\sim 3 \text{ mm}$ for dead space.