

多丝正比室探测效率、能量分辨率和空间分辨率的测量

实验目的

1. 了解多丝正比室的基本结构和工作原理。
2. 了解多丝正比室工作性能并学习其测试方法。

实验原理

多丝正比室(MWPC)是1968年以后发展起来的一种新型探测器。它具有以下优点:空间分辨好、对带电粒子探测效率高、时间分辨好、能量响应线性好、连续灵敏、最大计数率可达 10^6 粒子/秒、面积容易做得很大、可以在强磁场中工作等。目前在粒子物理实验中,许多探测设备都采用多丝正比室,并可与其它触发计数器配合组成混合谱仪,完成对大动量粒子的动量测量和粒子鉴别工作。近几年来在低能物理实验及医学、天文学、生物学、晶体结构等其它领域的研究中,多丝正比室也得到了广泛的应用。

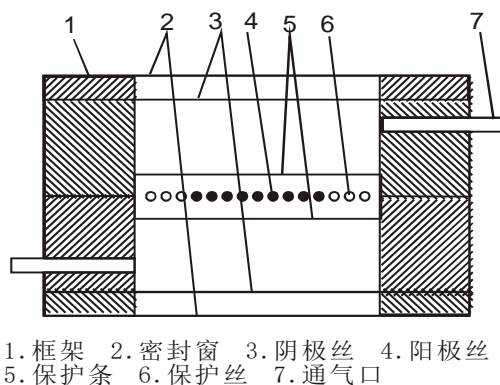


图 10-1 多丝正比室结构示意图

1. 多丝正比室的基本结构

多丝正比室根据不同的实验要求,可以做成各种几何形状和不同尺寸。本实验介绍一种最常见的方形室,它的基本结构如图 10-1 所示。(1) 框架:常用环氧树脂玻璃纤维板制成。

(2) 密封窗:用涤纶薄膜或聚脂薄膜制成。(3) 阴极丝:用镀金钨丝或镀铜丝绕制而成,丝径 d 为 $76-100\mu\text{m}$,丝间距为 1mm 。阴极丝平面通过几兆欧的保护电阻与负高压电源相接。(4) 阳极丝平面:把镀金钨丝平行等间距地焊接在阳极框架的印刷板上,丝径 d 为 $20-25\mu\text{m}$ 。阳极丝一般垂直于阴极丝。阳极丝平面的质量直接影响室的性能,故在制作过程中对所加张力、丝间距、丝径的均匀性要求都很高。阳极丝平面一般处于地电位,并由它输出信号,所以又称为信号丝平面。(5) 保护条:常用铜片做成,放在阳极丝两端上下两侧(垂直于阳极丝),距阳极丝 $0.5-1\text{mm}$ 。保护条处于地电位,用以减小阳极丝端部电场,收集表面漏电流,减少阳极丝的假计数。(6) 保护丝:逐步加粗阳极丝平面两边边缘的阳极丝直径,这些较粗的丝直接接地,用以减小边缘电场。为了避免外界电磁波的干扰,多丝正比室要装在屏蔽盒内并很好的接地。为了保证工作气体均匀流过全室,还要有特殊设计的进气口和出气口。常用的工作气体为氩气和其他多原子气体组成的混合气体。本实验用的是氩气(75%)和二氧化碳(25%)所组成的混合气体。

2. 多丝正比室的工作原理

通常多丝正比室的阴极丝平面加负高压,阳极丝处于地电位。从电场分布情况可知(见图 10-2),距阳极丝较远处电场基本是均匀的。在靠近阳极丝周围附近(相当于丝径数量级)电场分布可以近似地认为按 $1/r$ 的规律变化。 r 为阳极丝附近一点到丝中心的距离。带电粒子穿过多丝正比室时,使气体的原子电离产生电子—离子对。原初电离电子在电场作用下向阳极丝漂移,经过均匀电场区进入阳极丝周围的高电场区,获得足够的能量使气体原子再次

电离，这样就引起电子雪崩。这种现象就称作气体放大，其气体放大倍数为：

$$M = \exp \sqrt{2\alpha N} f(r_0) \sqrt{V_0} \left(\sqrt{\frac{V_0}{V_s}} - 1 \right),$$

$$\text{其中 } f(r_0) = \left[\frac{r_0}{\frac{\pi d}{s} - \ln^2 \left(\frac{2\pi r_0}{s} \right)} \right]^{1/2}.$$

V_0 是外加工作电压； V_s 是阈压，即刚刚能发生电子倍增所需加的工作电压； r_0 是阳极丝半径； l 是气隙； s 是丝距； N 是单位体积内气体原子数目； α 是电离

截面随能量的增加率。要使电子在一个自由程内从电场获得足以产生电离碰撞的能量，要求电场强度至少要大于 10^4 v/cm 以上。实际上气体放大过程发生在阳极丝附近一个很小的范围，大约几十 μm 的区域内， M 可大到 $10^4 - 10^5$ ，甚至可达到 10^6 。

雪崩产生的电子和离子在电场的作用下分别向阳极和阴极漂移，结果在离雪崩最近的一根阳极丝上形成一个负脉冲，而在阴极平面和相邻的阳极丝上则同时感应出正的脉冲信号。若阳极丝分别接上只对负脉冲灵敏的电子线路，这样就可以根据有信号输出的阳极丝位置来确定射线通过室体的位置。脉冲幅度大小与入射粒子在气体中产生原初离子对的数目成正比，即与入射粒子在室中的能量损失成正比。

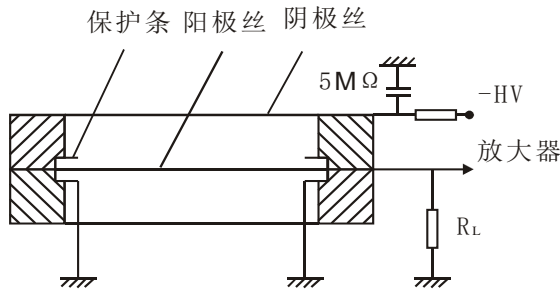
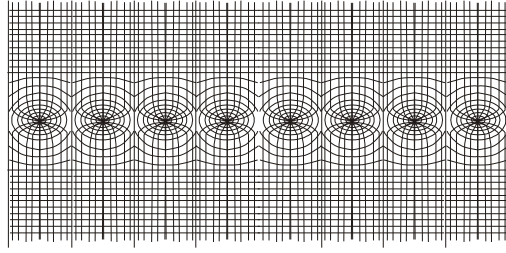


图 10-3 阳极丝信号引出图

图 10-2 多室正比室电场分布图



电子和离子是在雪崩过程中同时产生的，所以脉冲信号的形成是两者共同的贡献。但雪崩是在很靠近阳极的地方发生的，电子很快为阳极所收集，因此脉冲主要是正离子离开阳极的运动在丝上感应出电荷的结果。实际应用时仅仅选用最初的快上升部分。阳极丝信号引出如图 10-3 所示。本实验用 ^{55}Fe 源；负载电 $R_L = 10\text{K}\Omega$ ；放大器灵敏阈为

5mV ，阳极输出脉冲幅度为 15mV ，脉冲上升时间为 50ns 。

3. 多丝正比室主要性能的测量

(1) 空间分辨率：多丝正比室在很多实验中都是作为位置灵敏探测器使用的。空间分辨率是指多丝正比室能区分同时入射粒子的最小空间距离。空间分辨率的好坏直接影响确定入射粒子通过室体的位置精度，是多丝正比室的重要性能之一。

在逐丝读出的情况下，空间分辨率主要取决于丝距 s 。当粒子垂直丝平面在某根丝附近 ($\pm s/2$ 范围内) 入射时，仅被该丝接收而不会被其他丝所接收。在理想情况下，空间分辨曲线是一个宽度为 s 的矩形。实验中准直的放射源总有一定宽度，曲线呈梯形分布。见图 10-4，其半宽度即表示多丝正比室的空间分辨率。测量得到的数据比丝距略宽，主要是因为 ^{55}Fe 源准直缝有一定宽度以及 X 射线在室内产生的光电子有一定的射程所引起的。测量装置如图 10-5 所示。

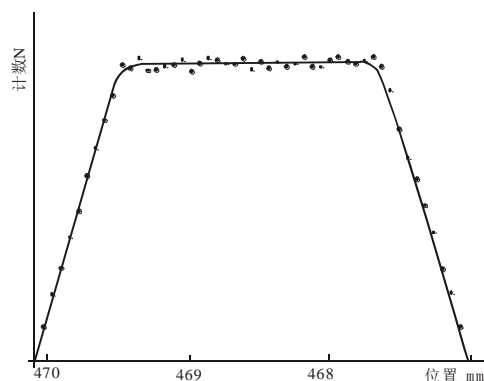


图 10-4 $S=2\text{mm}$ 室的空间分辨曲线
Ar/CO₂(75/25) HV=4.7KV

当带电粒子倾斜入射时，着火丝数增加，从而使位置分辨变差。若加入一定浓度的负电性气体，使灵敏区缩小，则可改善位置分辨率。

(2) 带电粒子的探测效率：多丝正比室探测带电粒子的效率很高，一般都大于 99%。本实验用二重符合法测效率，实验安排如图 10-6 所示。

设有几个粒子穿过多丝正比室到达闪烁计数器。若闪烁计数器的效率为 ε_s ，多丝正比室的效率为 ε_M ，则闪烁计数器的计数 $N_I = N_0 \cdot \varepsilon_s$ 。如符合效率为 100%，则多丝正比室和闪烁计数器同时记录到的粒子数，即二重符合计数 $N_2 = N_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_M$ ，那么多丝正比室的探测效率

$$\varepsilon_M = \frac{N_0 \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_M}{N_0 \cdot \varepsilon_s} = \frac{N_2}{N_1}$$

这里 $N_1 = N_s - N_b$ 。实验中 N_s 和 N_2 分别为有放射源时同时记录的定标器 I 和定标器 II 的计数， N_b 为闪烁计数器的本底计数。

影响多丝正比室探测效率的因素主要有：①高压；效率对高压有极大的依赖关系。当电压过低时，不能形成雪崩或输出幅度不足以被检测到，只有高压超过一定值时才能达到高的效率。典型的效率—高压坪曲线如图 10-7 所示。②工作气体；气体混合物不同，效率坪曲线的坪起始电压和坪长就不一样。二氧化碳是一种猝灭气体，在氩气中加入一定量的二氧化碳可以提高工作电压，获得较长的坪长。二氧化碳浓度与坪起始电压和击穿电压的关系如图 10-8 所示。

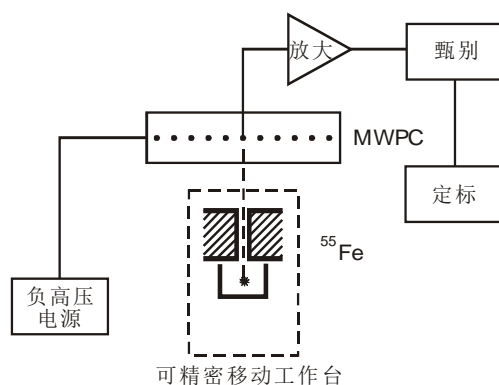


图 10-5 空间分辨率测量装置

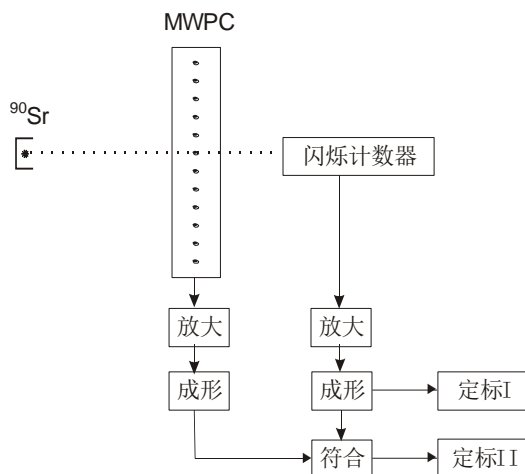


图 10—6 二重符合法测效率装置

此外带电粒子穿过室体的有效长度、电子学电路的灵敏度等等都对实测效率有一定的影响。

(3) 能量分辨率：多丝正比室在没有负电性气体成分且工作在正比区的条件下可以用来测量粒子的能量损失。当粒子垂直于室的阳极丝平面入射时，丝上输出信号的幅度大小与粒子在室内损失的能量成正比。在低能量情况下，入射 X 射线与气体的相互作用主要是光电效应。

用多道测得 ^{55}Fe 的能谱如图 10-9 所示，一个显著的谱形是对应于入射粒子能量的光电峰。由于工作气体会被打出特征 X 射线，它有可能从正比室逃逸出去，因而在能谱上可以看到逃逸峰。光电峰与逃逸峰的能量之差就是工作气体所产生的特征 X 射线能量。图中低能部分的小峰就是 Ar 的逃逸峰。

由于原初离子对数目有一个统计涨落，气体放大倍数 M 也有涨落。 M 与丝半径 r_0 、丝距 s 、气隙 L 、气体成份等有关，与高压稳定性、读出电子学线性也有关，这些因素均造成 M 的涨落，从而使输出脉冲幅度有一定涨落，进而影响室的能量分辨率。

^{55}Fe 源 Mn 的 5.9KeV X 射线能量完全消耗在多丝正比室中，由全能峰的半高宽度 ΔU 比全能峰所对应的 U_0 ，即得到多丝正比室的能量

$$\text{分辨率 } \eta = \frac{\Delta U}{U_0} \times 100\%, \text{ 通常室的}$$

能量分辨率为 20—25%。

(4) 气体放大倍数：多丝正

比室在某电压下的气体放大倍数可以用几种方法进行测量。本实验是用 ^{55}Fe 源，利用电荷灵敏放大器和多道脉冲幅度分析器测量多丝正比室阳极丝输出信号能谱。根据 ^{55}Fe 光电峰的位置，电荷灵敏放大器的放大倍数和电荷灵敏度，我们可以估算出多丝正比室的气体放大倍数。改变高压，可以测得气体放大倍数随电压变化的关系。实验测定公式

$$M = \frac{W \cdot V_p}{G \cdot E \cdot e}, \text{ 其中 } e \text{ 为电子电荷 } 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑; } E \text{ 为入射粒子能量, 对 } ^{55}\text{Fe} \text{ 源实为}$$

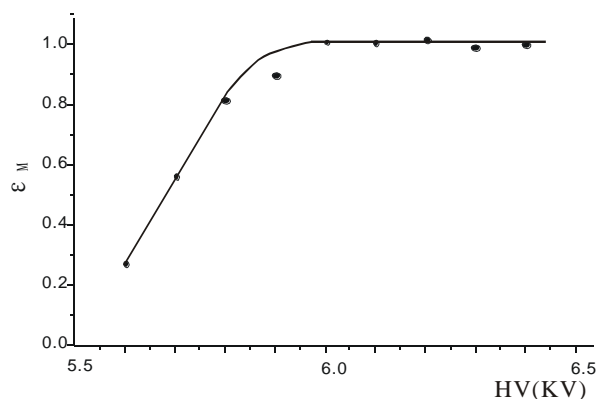


图 10-7 S=2mm 室的效率曲线
幻异气体(67.6%氩+25%异丁烷
+0.4%氟里昂+7%甲醛缩甲醇)

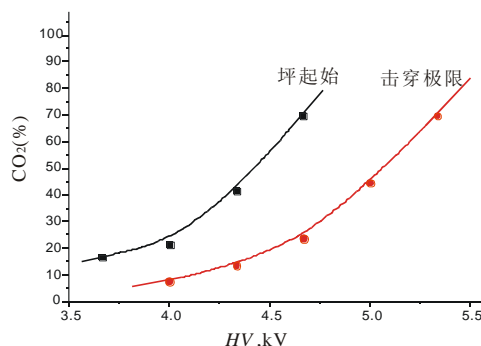


图 10-8 坪起始电压和击穿电压与二氧化碳浓度的关系 (S=2mm l=7mm d=20 μm 甄别阈 1mV)

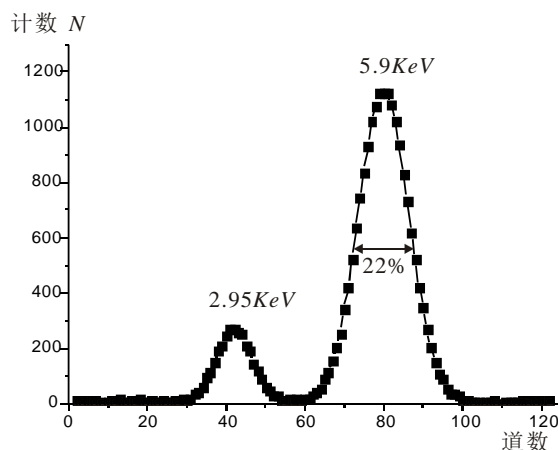


图 10-9 ^{55}Fe 源 x 射线能谱图

^{55}Mn 的 X 射线能量 $E=5.9\text{KeV}$; G 为电荷灵敏放大器的电荷灵敏度, 单位为伏 / 库仑; V_p 为电荷灵敏放大器输出信号幅度, 可从多道峰位和电荷灵敏放大器放大倍数计算得到; W 为带电粒子在工作气体中产生一个电子离子对所需的平均能量, 我们常用 Ar (80%) + CO_2 (20%) 混合气体, $\overline{W}=27.7\text{eV}$.

实验内容

1. 测量多丝正比室的空间分辨率。
2. 用二重符合法测定多丝正比室对带电粒子的探测效率。
3. 测量多丝正比室的能量分辨率。
4. 测量多丝正比室的气体放大倍数。

实验装置

小型多丝正比室, 灵敏面积 $100\times 100\text{ mm}^2$ (带屏蔽盒),	1 个
电荷灵敏放大器,	1 台
光电倍增管, GDB44	1 个
塑料闪烁体, $\phi 40\times 10$	1 块
符合反符合, FH1014,	1 台
自动定标器, FH1011A	2 台
线性放大器, FH1002A	1 台
插件机箱和电源, FH0001A, FH0002B	1 台
负高压电源, KD405,10kV	1 台
放射源 ^{90}Sr , Al 准直孔 $\phi 2\times 4, \mu\text{ci}$ 级,	1 个
^{55}Fe , Al 准直缝 $0.2\times 20\times 8, \text{mci}$ 级,	1 个
高精度可移动距离工作台, 移动精度:0.05 mm,	1 个
512 道幅度分析器, FH419G1,	1 台
小型通用打印机, FH444,	1 台
氩气, 纯度 99.99%	1 瓶
二氧化碳, 纯度 99.99%	1 瓶
转子流量计, LZW—12,	2 个
硅油分离器,	1 个

实验步骤

1. 打开 Ar 和 CO_2 流量调节阀, 按流量计读数把两种气体以一定比例混合通入多丝正比室。
2. 打开负高压电源, 预热一、二分钟后逐步升高电压。用 ^{55}Fe 源测量多丝正比室计数率—高压坪曲线并确定工作电压。
3. 在工作电压下, 调节精密移动距离的工作台使 ^{55}Fe 源逐渐移动。每移动 0.1 mm 记录多丝正比室一根丝的计数率 (要求计数的统计误差 $<5\%$)。
4. 换用 ^{90}Sr 源。将多丝正比室 15 根丝并联输出。在坪区范围内逐渐增加多丝正比室的高压, 在每一电压下同时记录符合计数 N_2 和闪烁计数器计数 N_s , 然后拿开 ^{90}Sr 源, 测量闪烁计数器本底计数 N_b 。
5. 改变 Ar 和 CO_2 的比例。在 CO_2 占 10%、20%、33% 和 50% 的情况下, 分别测量多丝正比室的效率坪曲线和击穿电压 (每改变气体成份要等待 20 分钟使气体在室内均匀)。

6. 将 ^{55}Fe 源对准某根阳极丝，用多道分析器测量能谱，并观察氩的逃逸峰。
7. 测量 ^{55}Fe 源全能峰随高压变化的关系。

注意事项

多丝正比室放电或打火，极易损坏电子仪器甚至造成断丝事故，所以给室体加电压一定要缓慢地升高，且不能超过其击穿电压。一旦发生室内打火，应立即降低高压并寻找打火原因。

实验结果分析与数据处理

1. 作出多丝正比室计数率—高压坪曲线并确定工作电压。
2. 画出空间分辨曲线，确定多丝正比室的空间分辨率。
3. 计算相应电压下多丝正比室的探测效率 $\varepsilon_M = \frac{N_2}{N_s - N_b}$ 。画出效率—高压坪曲线。
4. 作出坪起始和击穿电压与 CO_2 浓度的关系曲线。
5. 根据 ^{55}Fe 源能谱图求出多丝正比室的能量分辨率。
6. 计算相应电压下气体放大倍数 $M = \frac{W \cdot V_p}{G \cdot E \cdot e}$ 。作出气体放大倍数与高压的关系曲线。

思考题

1. 多丝正比室的工作电压应如何选取？它与哪些因素有关？
2. 多丝正比室的空间分辨本领主要取决于哪些因素？如何提高室的空间分辨本领？
3. 应用准直的电子束能否测量多丝正比室的空间分辨率？实验应如何安排？
4. 论述二重符合法测效率的误差来源，如何改进？
5. 用二重符合法测效率时，闪烁探头、多丝正比室和放射源的相对位置和探测器的有效体积对测量结果有何影响？并说明在测量效率时为什么要将 15 根丝并联输出。

参考资料

- [1] 徐克尊等，粒子探测技术，180～194 页，上海科学技术出版社，1981。
- [2] G.Charpak, *Nucl. Instr. Meth.*, 62, 235 (1968).
- [3] G.Charpak and D.Rahm, *Nucl. Instr. Meth.*, 80, 13 (1970).
- [4] G.Charpak and G.Fisher, *Nucl. Instr. Meth.*, 97, 377 (1971).
- [5] R.Bouclier, *Nucl. Instr. Meth.*, 88, 149 (1970)