

物质对 β 射线的吸收（一）

（最后修订时间：2022 年 2 月 26 日）

射线与物质的相互作用，使射线通过一定厚度的物质后，能量或强度有一定的减弱，称为物质对射线的吸收。研究物质对射线的吸收规律及不同物质的吸收性能等，在了解核性质和核参数、防护核辐射、核技术应用和材料科学等许多领域都有重要的意义。

实验目的：

- 1、了解 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源；
- 2、了解 G-M 计数管的结构、工作原理，测出高压坪曲线；
- 3、测量铝吸收片对 β 射线的吸收曲线，求出 β 射线的射程和最大能量；
- 4、学习使用放射源的安全操作规则。

实验原理与内容

1、如何获得 β 射线？

β 射线是指放射性核素发生 β 衰变时所释放出的高能电子。本实验中采用 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源出射的 β 射线，其衰变纲图如下图 1。由于发生 β 衰变的原子核在发射电子的同时还放出中微子，两者分配能量的结果导致发射出的电子能谱为 0 至最大动能 E_{max} 之间连续分布的能谱。

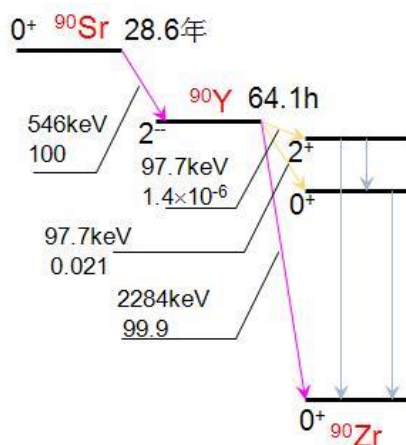


图 1 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源的衰变纲图（紫红色箭头： β 衰变）



图 2 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源（实物图）

图 2 为 ^{90}Sr - ^{90}Y 放射源实物图。

2、如何探测 β 射线？

在本实验中测量核辐射的仪器为 G-M 计数管，它是盖革-米勒(Geiger-Muller)计数管的简称，属于气体计数器型的核辐射探测器，其工作物质是气体，其功能是记录射线粒子的数目但不能区别粒子能量。G-M 计数管有易于加工，输出信号幅度大，配套仪器简单等优点，在放射性测量方面有广泛的应用，为近代物理的早期发展作出了重要的贡献。

2.1、G-M 计数管的结构和工作原理

G-M 计数管的结构如下图所示，通常为密封并抽真空的容器，中央是一根细金属丝作为阳极，玻璃管内壁涂以导电材料薄膜或另装一金属圆筒作为阴极构成真空二极管。同时充有一定量的惰性气体和猝灭气体。G-M 计数管有很多类型，按结构形状区分有圆柱形和钟罩形等；按探测粒子种类不同有 α 、 β 计数管和 X、 γ 计数管；按所

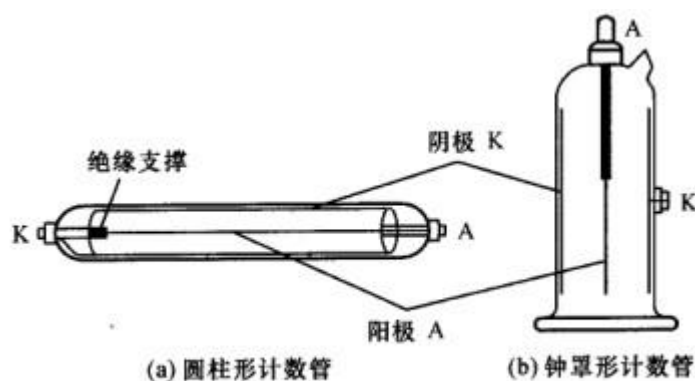


图 4.3.1-1 G-M 计数管结构图

充猝灭气体种类不同分，有卤素管（ Br_2 、 Cl_2 等）、有机计数管（乙醇或乙醚）等。

当计数管的阳极和阴极之间加有适当的工作电压时，管内形成柱形对称电场。如有带电粒子进入管内，由于粒子与管内惰性气体原子的电子之间的库仑作用，可使气体电离（或激发），形成正、负离子对，这种电离称为初级电离。在电场作用下，正、负离子分别向相反的电极运动，但正离子向阴极运动的速度比电子向阳极运动的速度慢得多。电子向阳极运动过程中不断被电场加速，又会和途中遇到的原子碰撞而再次引起气体电离，称为次级电离。此外，原子激发后的退激发及正负离子对的复合，都会产生大量紫外光子，这些光子可在阴极上打出光电子，这些光电子在电场中又被加速导致新的电离。

不断的电离过程使离子数目急剧增加，形成自激雪崩放电现象，一般在 10^{-7}s 之内会使雪崩放电遍及计数管整个灵敏体积内。在这段时间内正离子移动很少，仍然包围在阳极附近，构成正离子鞘，使阳极周围电场大为减弱，抑制了次级电离。此外，对充有不同类型猝灭气体的计数管，其猝灭机制是不同的。对于有机管而言，其猝灭气体是多原子分子如酒精或石油醚等，它们能强烈地吸收紫外光子，可把惰性气体电离或激发后在退激过程中产生的大量光子吸收掉。这些光子不能产生次级雪崩放电，使由入射粒子引起的一次雪崩式放电过程终止，起到使放电自猝灭的作用。

表 1 G-M 计数管中几种常见气体的电离电位

表 4.3.1-1 几种气体的电离电位			
原(分)子	第一电离能/eV	原(分)子	第一电离能/eV
Ar	15.76	Br	11.76
Ne	21.56(16.5 亚稳态)	Cl	12.90
Kr	14.00	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	约 11.3

可见一次放电+猝灭过程可在输出电阻上产生一个电压脉冲信号，其数目与进入计数管的粒子数相对应。

2.2、G-M 计数管的高压坪曲线

正常的 G-M 计数管在强度不变的放射源的照射下，测量计数率随极间电压的关系，得到如下图所示的曲线，称为坪曲线。由图中看出，在外加电压低于 V_0 时，粒子虽然进入计数管但不能引起计数，这是因为此时所形成的电压脉冲高

度不足以触发定标器的阈值。随着外加电压的升高，计数管开始有计数，此时对应的外加电压 V_0 ，称为起始电压或阈值电压。随着外加电压的继续升高，计数率也迅速增加，但外加电压从 V_1 到 V_2 这一范围内，计数率却几乎不变，这一段外加电压的范围称为坪区， $V_2 - V_1$ 的电压值称为坪长。计数管的工作电压就应选择在此范围的中心附近。一般卤素管的坪长约 100V，工作电压约在 350V。不过计数管的坪区也并非完全平坦，随着外加电压的进一步升高，计数率也稍有增加。其原因主要是猝灭不够完全，即猝灭气体的正离子到达计数管阴极时有少数也还可能产生次级电子，引起假计数。这些假计数是随外加电压的升高而增加的。为了表示这一特性，定义坪斜 T 为：

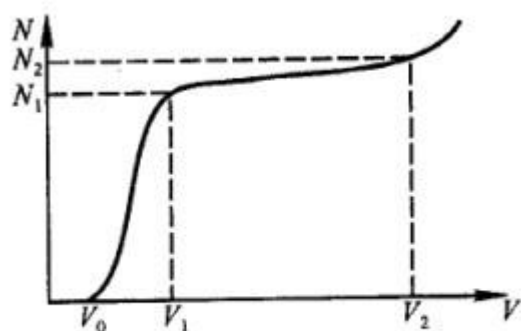


图 4.3.1-2 G-M 计数管的坪曲线

选择在此范围的中心附近。一般卤素管的坪长约 100V，工作电压约在 350V。不过计数管的坪区也并非完全平坦，随着外加电压的进一步升高，计数率也稍有增加。其原因主要是猝灭不够完全，即猝灭气体的正离子到达计数管阴极时有少数也还可能产生次级电子，引起假计数。这些假计数是随外加电压的升高而增加的。为了表示这一特性，定义坪斜 T 为：

$$T = \frac{N_2 - N_1}{N_1(V_2 - V_1)} \times 100\% \quad (1)$$

式中各量的意义在上图中已标出。坪斜 T 的意义为：当坪长每增加 1V 时，引起计数率增加的百分率。

当计数管两极上所加电压超过 V_2 时，计数率会明显上升，这说明已进入连续放电区，猝灭气体已失去作用。此时计数管不能正常使用且很容易损坏，实验中应尽量避免外加电压超过坪区。

通过测量计数管的坪曲线，可以得出计数管的起始电压、坪长、坪斜等参数，并可选择正确的工作电压。

3、物质对 β 射线的吸收

当一定能量的 β 射线通过物质时，与该物质原子或原子核相互作用而损失能量，强度会逐渐减弱，即在物质中被吸收。电子与物质相互作用导致强度减弱的机制主要有三种：

第一，电子与物质原子的核外电子发生非弹性碰撞，使原子激发或电离，电子以此种方式损失能量称为电离损失。电离损失的能量与入射电子的速度、物

质的原子序数、原子的平均激发能等因素有关。

第二，电子受物质原子核库仑场的作用而被加速，根据电磁理论作加速运动的带电粒子会发射电磁辐射，称为轫致辐射，使电子的部分能量以 x 射线的形式放出，称为辐射损失。这主要在能量较高的电子与物质相互作用时发生。辐射损失与物质的 Z^2 成正比，与入射电子的能量成正比。

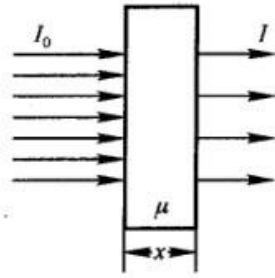


图 4.3.2-1 物质吸收 β 射线示意图

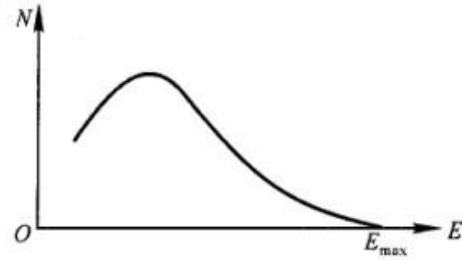


图 4.3.2-2 β 能谱图

图 5

第三，β 射线在物质中与原子核的库仑场发生弹性散射，使 β 粒子改变运动方向，因电子质量小，可能发生比较大角度的散射，还可能发生多次散射，因而偏离原射束方向，使入射方向上的射线强度减弱，这种机制称为多次散射。如果散射角超过 90° ，称为反散射。

考虑一束初始强度为 I_0 的单能电子束，当穿过厚度为 x 的物质时，强度减弱为 I ，其示意图见图 5。强度 I 随厚度 x 的增加而减小且服从指数规律，可表示为：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

式中 μ 是该物质的线性吸收系数。实验指出，不同物质的线性吸收系数有很大的差别，但随原子序数 Z 的增加，质量吸收系数 $\mu_m = \mu / \rho$ (ρ 是该物质的密度) 却只是缓慢地变化，特别是很多时候不容易精确测量吸收片的厚度，因而常用质量厚度 $d = \rho \cdot x$ 来代替线性厚度 x ，单位通常为 g/cm^2 。于是式 (2) 变为：

$$I = I_0 e^{-\mu_m d} \quad (3)$$

需要指出的是，原子核 β 衰变放出高速电子的同时，还放出中微子，因此放出的电子并不是单一能量的，而是具有各种能量分布的连续能谱，因此 β 射线的吸收曲线并不精确地服从指数规律，图 4.3.2-2 是典型的 β 衰变的能谱图。从图

中可以看出，有一最大能量 E_{\max} ，不同的核发生 β 衰变时，放出的电子能谱的 E_{\max} 值不同，常以 E_{\max} 代表 β 射线的特征能量。某些放射性核素会同时发射几种最大能量不同的 β 射线，这就会使实验得到的吸收曲线更为复杂，一般如下图 6 所示。具有一定最大能量的 β 射线，在具有一定吸收系数的物质中所能穿过的最大厚度，称为 β 射线在该物质中的最大射程。通常定义通过吸收物质后，射线强度降低到 $I/I_0 = 10^{-4}$ 时，所对应的吸收物质厚度 d 即为 β 射线的射程 R 。

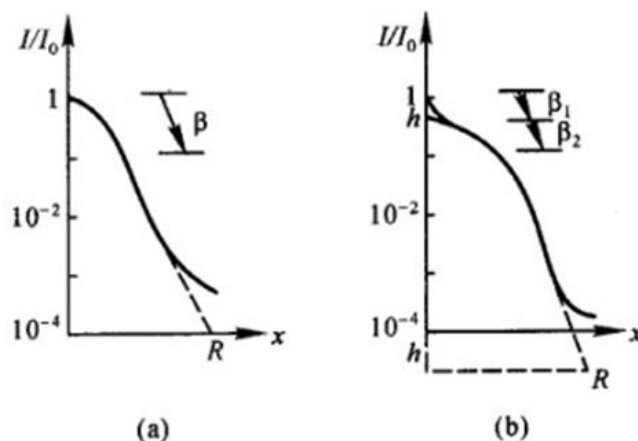


图 6 β 射线的射程 (a: 单级 β 衰变, b: 级联 β 衰变)

β 射线的射程与 β 射线的最大能量之间，有经验公式相联系，如吸收物质是铝，则当射程 $R > 0.3 \text{ g/cm}^2$ 时，

$$E = 1.85R + 0.245 \quad (4)$$

式中 E 为 β 射线的最大能量，单位为 MeV。

目前物质对 β 射线的吸收规律广泛应用于监测膜厚、监测 PM2.5&PM10、辐射防护等许多领域。

4、验证放射性计数服从统计规律

原子核衰变过程属随机事件，应服从统计规律，因此多次测量相同时间间隔内的放射性计数，也应服从统计分布，如泊松分布 (Poisson distribution) 或高斯分布 (Gauss distribution)。设在时间间隔 t 内核蜕变产生的放射性平均计数为 \bar{n} ，在此实验时间内核衰变产生的放射性计数为 n 的概率 $p(n)$ 服从统计分布。当 \bar{n} 较小 (如 10 以下) 时，服从泊松分布，如果 \bar{n} 比较大 (如 20 以上) 时，则服从

高斯分布。

4.1、平均计数较小时服从泊松分布

泊松分布可写为

$$p(n) = \frac{(\bar{n})^n}{n!} e^{-\bar{n}} \quad (5)$$

式中 n 为每次计数的值，其平均值为 \bar{n} ，而出现计数为 n 的概率 $p(n)$ 由式 (5)

表示，一般将 \bar{n} 取在 3~7 范围内。

具体实验安排是，使用比较弱的放射源（放射源离计数管稍远些）或直接用本底计数，选择适当的测量时间间隔，使在此时间内平均计数在 10 以下。重复测量此时间间隔的计数至少 400 次以上。计算 \bar{n} 值，根据式 (5) 给出 $p(n)$ 的理论曲线，将实验数据统计结果也标示在图上，以比较之。讨论实验结果。

4.2、平均计数较大时服从高斯分布

高斯分布可写为

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

式中 $\sigma^2 = \bar{n}$ 称为方差。

实验时只需选择稍强些的放射源（放射源离计数管近些），或时间间隔稍长些，都可满足 $\bar{n} > 20$ ，作法与验证泊松分布相同，但重复次数要求 500 次以上。测量所得数据可作出计数与其出现次数的直方图，与理论曲线相比较。

5、放射性衰变的统计误差

如上所述，在放射性衰变中，粒子计数服从统计分布规律，当平均计数较小时服从泊松分布，当平均计数较大时服从高斯分布。定义粒子计数的统计误差为它的统计分布的相对标准不确定度。对泊松分布和高斯分布，若计数为 N ，则统计误差等于 $\frac{\sqrt{N}}{N}$ ，即 $\frac{1}{\sqrt{N}}$ 。在粒子计数中，统计误差实际上反映了总计数 N

的大小。若要求统计误差小于 1%，则有： $\frac{1}{\sqrt{N}} < 1\% \Rightarrow N > 10000$ 。

实验仪器

本实验使用的仪器有 G-M 计数管、定标器、 β 放射源 ^{90}Sr - ^{90}Y (活度约 10^5Bq)、铝吸收片、电子秤、直尺、镊子等。



图 7 β 吸收 (一) 实验装置

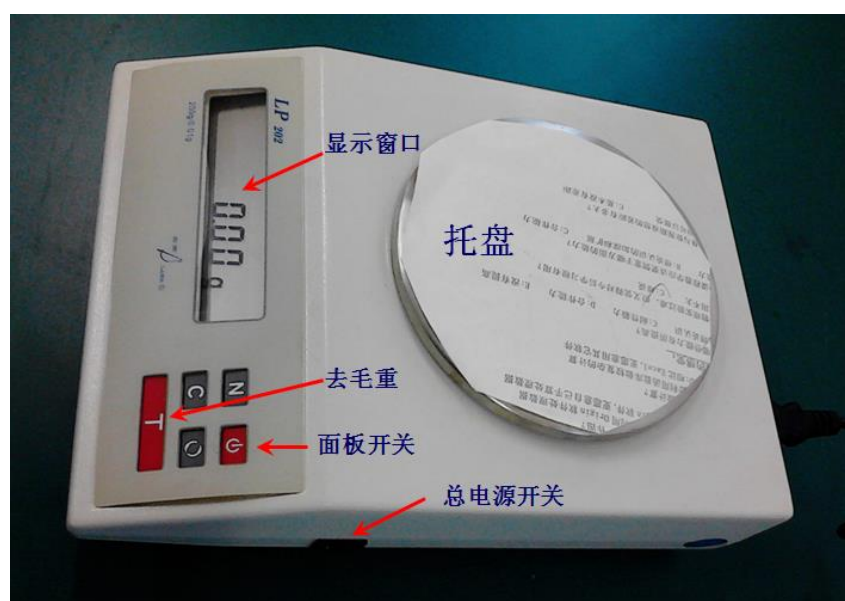


图 8 电子秤

实验内容

1、测量 G-M 计数管的坪曲线，确定其工作电压

根据坪曲线定义，在放射源强度不变的条件下，测量计数率随外加电压变化的关系，即得到坪曲线。G-M 计数管的工作电压取坪区中心电压，确定了工作电压后，在实验过程中计数管就一直在此电压下工作。

（注：先拧开 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 放射源的盖子，再将其送入铅罐之中。）

表 2 测 G-M 计数管坪曲线的数据表格：

电压(V)									
计数 (N)									

实验要求：

- 1) 从 260V 开始找阈电压 V_0 ；
- 2) 从阈电压 V_0 开始，以 10V 为步长测坪曲线，测 15 个数据点，每点测 30 秒；
- 3) 在坐标纸上绘出坪曲线，并在图上标出 G-M 计数管的工作电压；

3、测量铝片的质量厚度

测 5 片铝片的质量厚度，取平均值，保留 3 位有效数字。

表 3 铝片的质量厚度

质量 (g)					
长度 (cm)					
宽度 (cm)					
质量厚度(g/cm ²)					

4、测量铝片对 β 射线的吸收曲线

β 射线的穿透能力较小，因此选用端窗式钟罩型 G-M 计数管，其窗材料为约 5 μ m 厚的云母薄膜，对射线吸收很少，实验装置参考右图 4.3.2-5。该计数管的窗口很灵敏，应将其放在屏蔽铅室内以

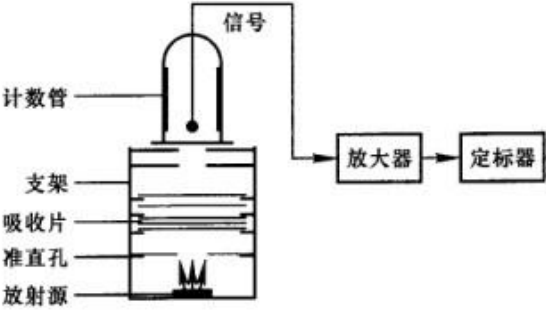


图 4.3.2-5 实验设计示意图

减少周围环境射线对计数的干扰，配合通常的定标器即可记录射线强度。

表 4 测量穿过不同厚度铝片的 β 射线的强度。

铝片数								
质量厚度 g/cm^2								
计数 N								
时间 (s)								
本底计数								
强度 $\log_{10} I/I_0$								

实验要求：

- 1) 测 18~20 片铝片的吸收数据，其中铝片质量厚度小于 $200\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，要求统计误差小于 2%，质量厚度介于 $200\sim 600\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，统计误差小于 3%，质量厚度大于 $600\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，要求统计误差小于 4%；

- 2) 测吸收曲线结束后取出放射源，测量本底计数 300s；

在半对数作标纸上绘出射线相对强度 I/I_0 与铝箔厚度的关系曲线。

5、验证放射性计数服从统计规律，至少 400 个计数（选作内容）；

6、降高压，关闭电源，归还放射源，实验结束。