

原子核衰变放射强度测量及物质吸收

复旦大学物理学系 江群峰

摘要： 盖革-弥勒计数器（G-M 计数器）是射线气体探测器的一种，在放射性测量方面有广泛的应用。在本实验中，我们使用 G-M 计数器研究了 G-M 计数管的坪特性，并画出坪曲线，测得正常使用电压为 360V-480V。研究验证了每分钟显示的计数近似与时间呈线性关系，且核衰变满足指数衰减形式。实验还测定并绘制了铝片对 β 射线的吸收曲线。

一、 引言

盖革-弥勒计数器（G-M 计数器）是射线气体探测器的一种，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，主要用来测量 β 射线和 γ 射线的强度，是核物理实验中常用的测量仪器。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做出了重要的贡献。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。

二、 实验原理

1. G-M 计数器简介

G-M 计数器由 G-M 计数管、高压电源和定标器三部分组成，如图所示。用高压电源提供 G-M 计数管的工作电压，计数管在射线作用下可以产生电脉冲，而定标器则用来记录计数管所输出的脉冲数。

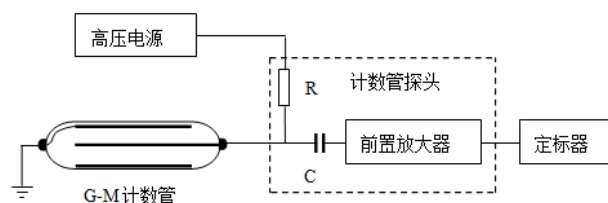


图 1 G-M 计数器

G-M 计数管按用途可分为 β 计数管和 γ 计数管。常见的有钟罩型 β 计数管和圆管形 γ 计数管。玻璃管壳内有圆筒状阴极（金属圆筒或涂于玻璃管内壁的导电物质），在阴极的对称轴上装有丝状阳极，先将管内抽成真空，然后再充以一定量的（压强 10cmHg 左右）惰性气体（如氩气、氖气）和少量猝灭气体（卤素或有机物）。两种计数管结构上的不同在于钟罩型 β 计数管的端面不是玻璃而是云母片，这是由于 β 射线穿透本领低，为使它容易穿过云母片窗口进入管内，提高探测效率而采取的措施。

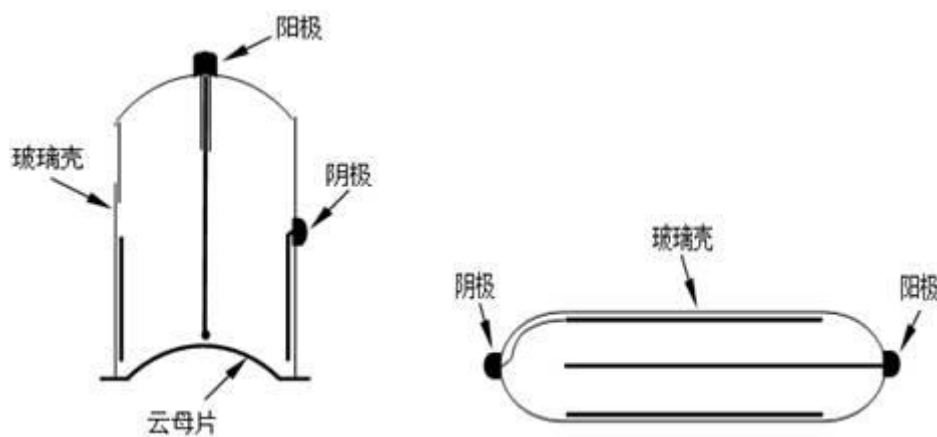


图 2 β 计数管、 γ 计数管

在用 G-M 计数器对射线进行测量时，计数管的两电极间要加几百伏至一千多伏的高压，在管内形成柱状轴对称电场，显然阳极附近电场最强。射线进入管内，一旦引起气体电离，所产生的电子就在电场作用下加速向阳极运动，在阳极附近与气体分子发生打出次级电子的碰撞，次级电子同样向阳极运动，也与气体分子碰撞，打出更多次级电子，这样，在阳极附近引起所谓“雪崩”放电。在雪崩过程中，由于受激原子的退激和正负离子复合将发射大量紫外光子，这些光子将使雪崩区沿阳极丝向两端扩展，从而导致全管放电。雪崩过程中产生的大量电子迅速运动到阳极并被中和。而大量的正离子，由于质量大，向阴极运动的速度慢，在阳极附近形成一层“正离子鞘”，正离子鞘较缓慢地移到阴极被中和掉。计数管可以看作一个电容器，上述迁移与中和过程中阳极电位降低，随之高压电源通过电阻 R（见图 G-M 计数器）向计数管充电，使阳极电位逐渐恢复，这样就在阳极上得到一个负电压脉冲，其波形如图所

示。脉冲波形与电源电压及电阻 R 有关，电源电压高，脉冲幅度大；电阻 R 大，脉冲比较宽，幅度也比较高。

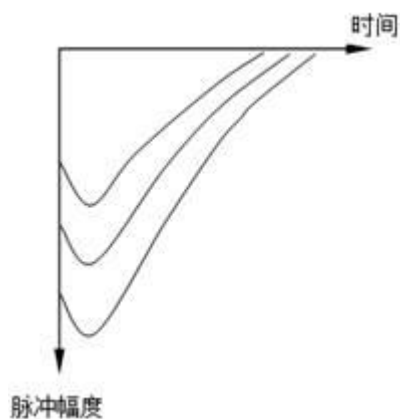


图 3 负电压脉冲

在雪崩放电过程中，有许多气体分子被激发，它们退激时发射的光子有可能在阴极表面打出光电子；正离子运动到阴极打在阴极上也有可能打出电子。这些电子的出现，又会重复上面讨论的过程，再次引起计数管放电。如此看来，只要引起计数管放电，它就会连续放电。要想通过计数管放电来测量射线强度，必须在计数管一次放电之后，猝灭跟之而来的连续放电。计数管中充以少量猝灭气体的目的正在于此。猝灭气体的分子能强烈地吸收光子，使光子不能再射到阴极上打出光电子。同时猝灭气体分子的电离电位低于惰性气体分子的电离电位，惰性气体的正离子通过与猝灭气体的分子的碰撞，逐渐被转换成了猝灭气体的正离子，这些正离子在到达阴极中和时，本身分解成小分子，而不再打出电子，从而猝灭气体起到了猝灭连续放电的作用。计数管中充入的猝灭气体分两类，一类是有机物，如酒精蒸汽乙醚蒸汽等，这类计数管称为有机计数管；另一类是卤素，如溴、氯，这类计数管称为卤素计数管。

1. 物质对 β 射线的吸收

当一定能量的 β 射线（即高速电子束）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。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。

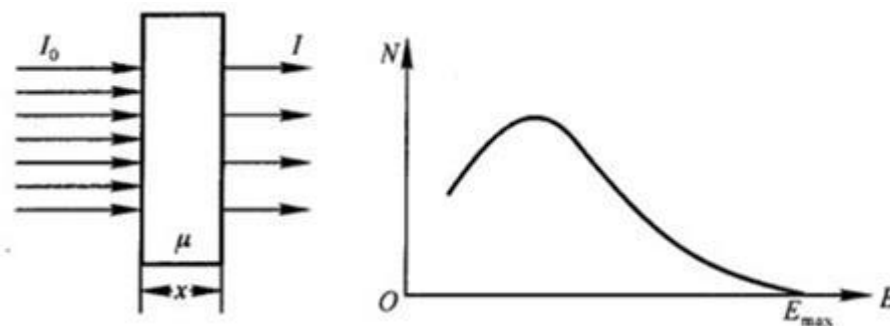


图 4 物质吸收 β 示意图、 β 能谱图

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 ，其示意图见图物质吸收 β 示意图。强度 I 随厚度 x 的增加而减小且服从

指数规律，可表示为：
$$I = I_0 e^{-\mu x}$$
 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（ ρ 是该物质的密度）却只是缓慢地变化，因而常用质量厚度来代替

线性厚度 x ，于是式变为

$$I = I_0 e^{-\mu_m d}$$

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 β 能谱图是典型的 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 。

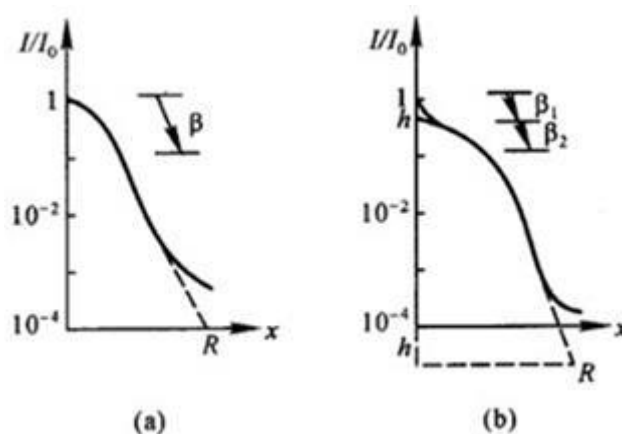


图 5 β 射线的射程 (a: 单级 β 衰变, b: 级联 β 衰变)

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 $R > 0.3g/cm^2$ 时，

$$E = 1.85R + 0.245$$

式中 E 为 β 射线的最大能量，单位为 MeV。

三、实验装置及过程

1、实验装置

华为 Matebook 14 一台，“原子核衰变放射强度测量及物质吸收虚拟仿真实验”虚拟仿真软件

虚拟仪器：G-M 计数管实验装置包括：自动定标器、计数管、电离隔离箱、放射源、铝片盒及铝片、塑料板。

2、实验过程

(一) G-M 计数管实验

1. 测量 G-M 计数管的坪特性，画出坪曲线，求出坪长度、坪坡度，确定合适的工作电压范围。
2. 观察测量次数对计数率标准误差的影响
3. 观察本底对净计数率的影响。
4. 验证核衰变所遵从的统计规律。

(二) 物质对 β 射线的吸收

1. 了解 G-M 计数管的结构和工作原理，测量其坪曲线。
2. 测量铝片对 β 射线的吸收曲线，求出 β 射线的射程和最大能量。

四、实验结果及分析

(一) G-M 计数管实验

1. 测量 G-M 计数管的坪特性

坪曲线如图 6 所示，工作电压范围可取 360V-480V.

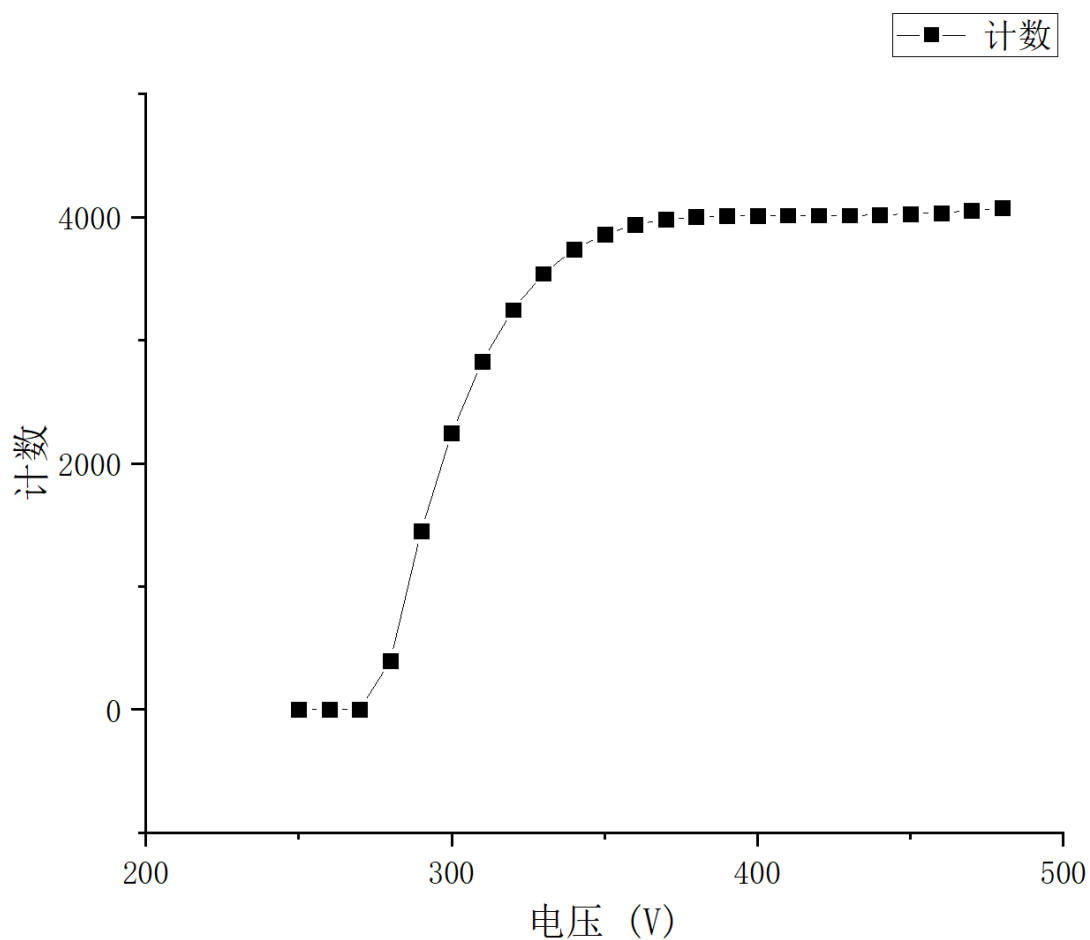


图 6 测量 G-M 计数管的坪特性

2. 测量次数对计数率标准误差的影响

进行五次测量如表 1 所示。

计数	26	22	21	15	22
----	----	----	----	----	----

表 1 五次测量的平均计数

3. 测量本底对净计数率的影响

如图 7 所示，测量 300s 内每分钟显示的计数大致呈线性关系。

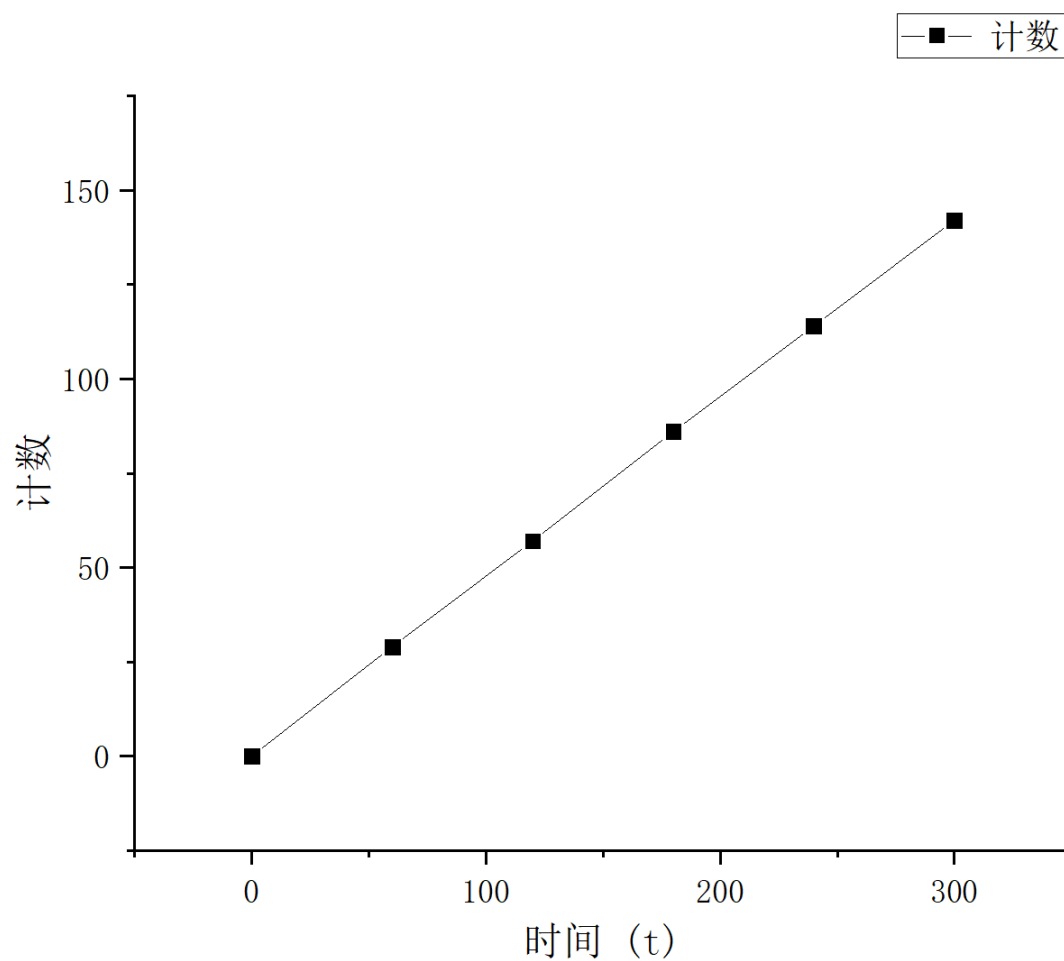


图 7 测量次数对计数率标准误差的影响

4. 验证核衰变所遵从的统计规律

根据本底计数率的大小，选择合适的时间，使得该平均计数在 $3 \sim 5$ 之间，重复测量 300 次。由于软件界面出现 bug，我们截取了测量结果的图片如图 8 所

示，软件绘制的曲线未能完全显示，但从有限的部分我们可以看出呈指数衰减。

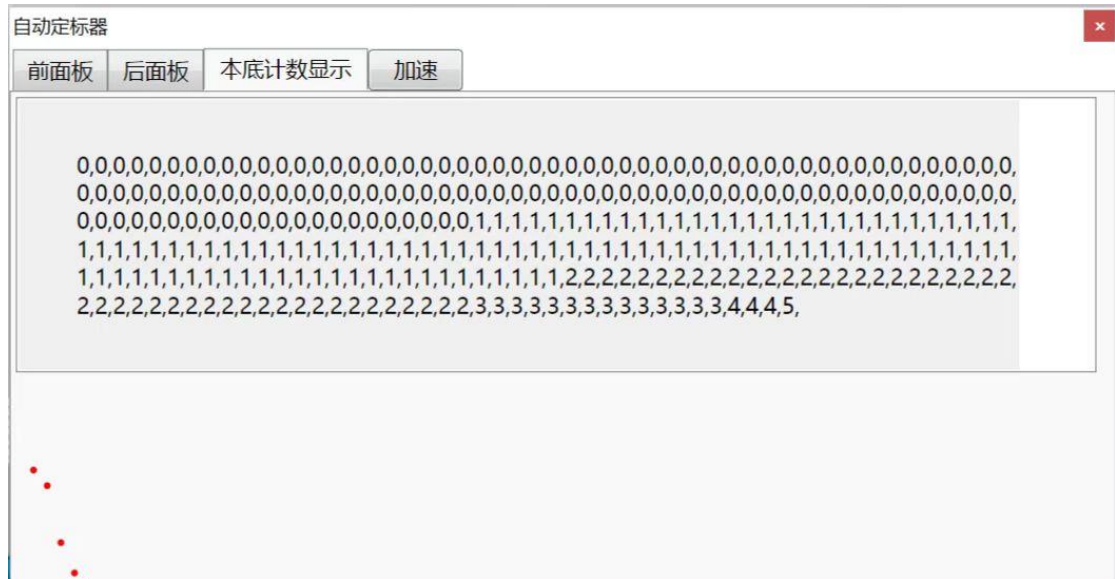


图 8 验证核衰变所遵从的统计规律

5. 测量 G-M 计数管的坪特性

测量结果如图 9 所示，合适工作范围为 360V-450V。

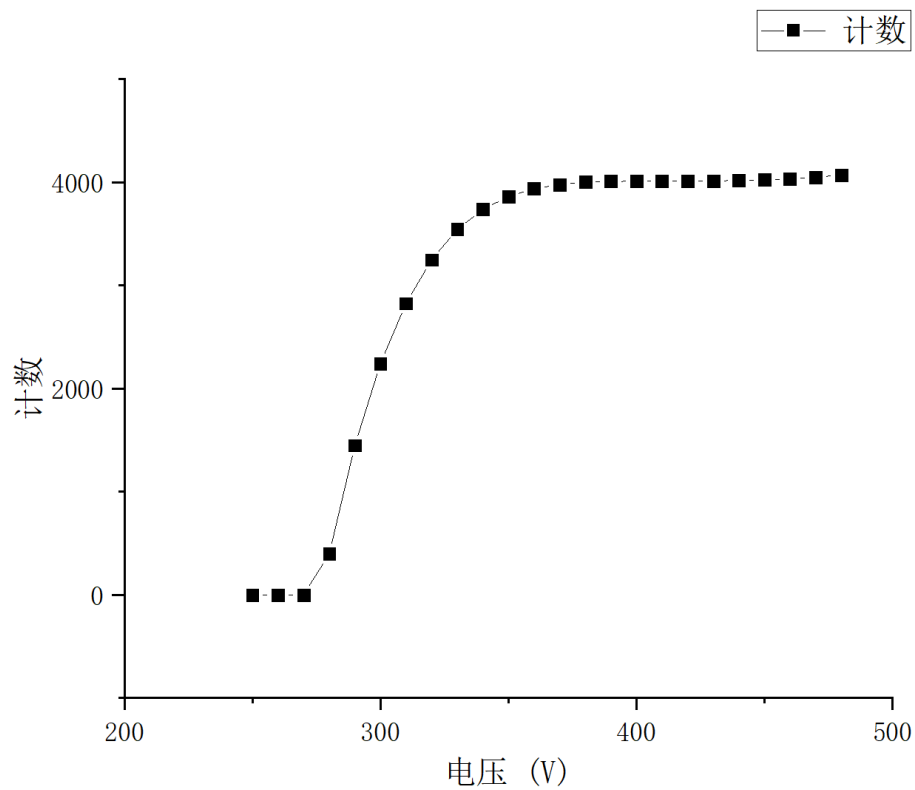
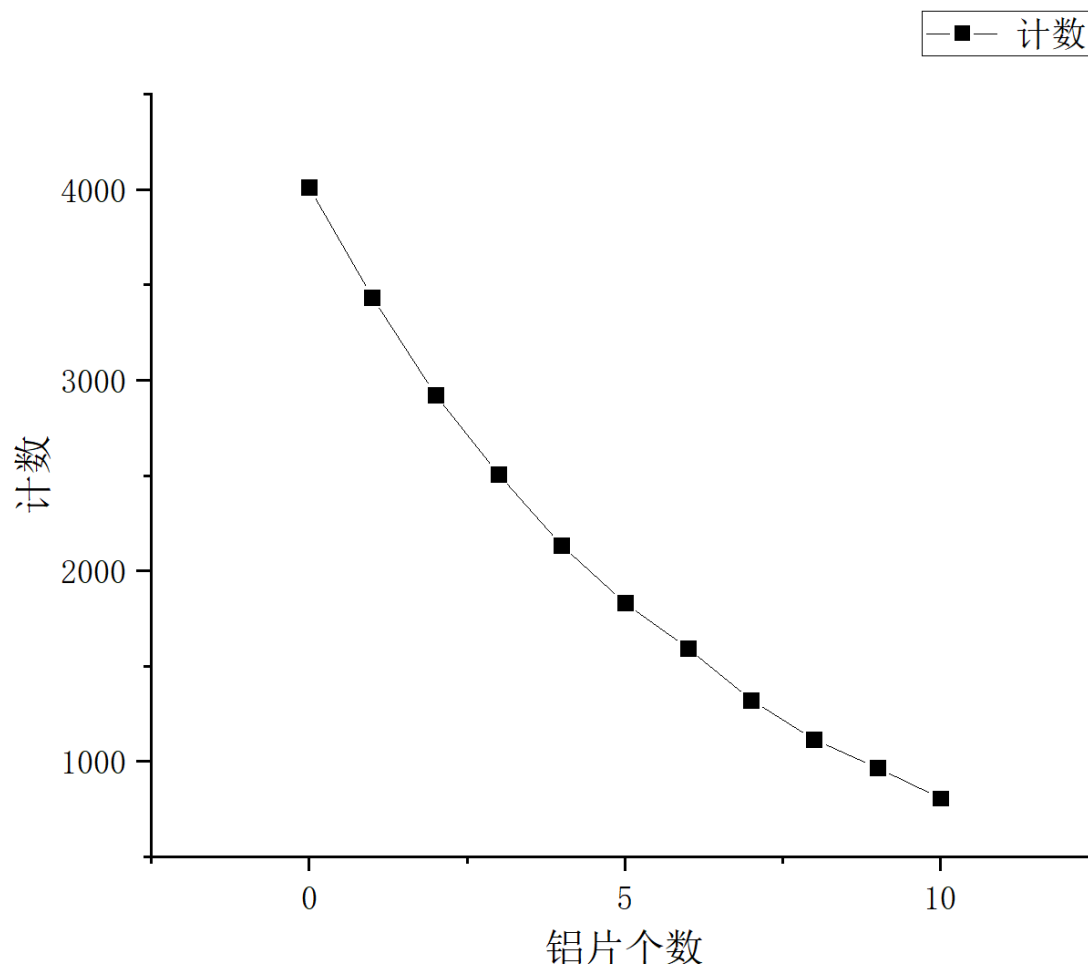


图 9 测量 G-M 计数管的坪特性

6. 测量铝片对 β 射线的吸收曲线

400V, 20s 下测得曲线结果如图 10 所示。

图 10 测量铝片对 β 射线的吸收曲线

五、 实验结论

本实验我们使用 G-M 计数器研究了 G-M 计数管的坪特性，并画出坪曲线，测得正常使用电压为 360V-480V。研究验证了每分钟显示的计数近似与时间呈线性关系，且核衰变满足指数衰减形式。实验还测定并绘制了铝片对 β 射线的吸收曲线。

六、 参考文献

[1] 复旦大学，原子核物理实验方法，第四章，北京：原子能出版社，1985-1986.

[2] 梅镇岳, 原子核物理学, 第一章, 科学出版社, 1983.