

近代物理实验报告 1.3: γ 射线的吸收

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 引言

γ 射线在穿透物质时, 会被物质吸收, 吸收作用的大小用吸收系数来表示。物质的吸收系数的值与 γ 射线的能量有关, 也与物质本身的性质有关。正确测定物质的吸收系数, 在核技术的应用与辐射防护设计中具有十分重要的意义。例如工业上广泛应用的料位计、密度计、厚度计, 医学上的 γ 照相技术等都是根据这一原理研究设计的。

2 实验目的

1. 了解 γ 射线在物质中的吸收规律。
2. 掌握测量 γ 吸收系数的基本方法。

3 实验仪器

γ 源、单道分析器等。

4 实验原理

4.1 窄束 γ 射线在物质中的吸收规律

射线在穿过物质时, 会与物质发生多种作用, 主要有光电效应, 康普顿效应和电子对效应, 作用的结果使 γ 射线的强度减弱。

准直成平行束的 γ 射线称为窄束 γ 射线, 单能窄束 γ 射线在穿过物质时, 其强度的减弱服从指数衰减规律, 即:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

其中 I_0 为入射 γ 射线强度, I_x 为透射 γ 射线强度, x 为 γ 射线穿透的样品厚度, μ 为线性吸收系数。用实验的方法测得透射率 $T = I_x/I_0$ 与厚度 x 的关系曲线, 便可根据 (1) 式求得线性吸收系数 μ 值。

为了减小测量误差, 提高测量结果精度, 实验上常先测得多组 I_x 与 x 的值, 再用曲线拟合来求解。即:

$$\ln(I_x) = \ln(I_0) - \mu x \quad (2)$$

由于 γ 射线与物质主要发生三种相互作用, 三种相互作用对线性吸收系数 μ 都有贡献, 可得:

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p \quad (3)$$

式中 μ_{ph} 为光电效应的贡献, μ_c 为康普顿效应的贡献, μ_p 为电子对效应的贡献。它们的值不但与 γ 光子的能量 E_γ 有关, 而且还与材料的原子序数、原子密度或分子密度有关。对于能量相同的 γ 射线不同的材料、 μ 也有不同的值。图 (1) 表示铅、锡、铜、铝材料对 γ 射线的线性吸收系数 μ 随能量 E_γ 变化关系。

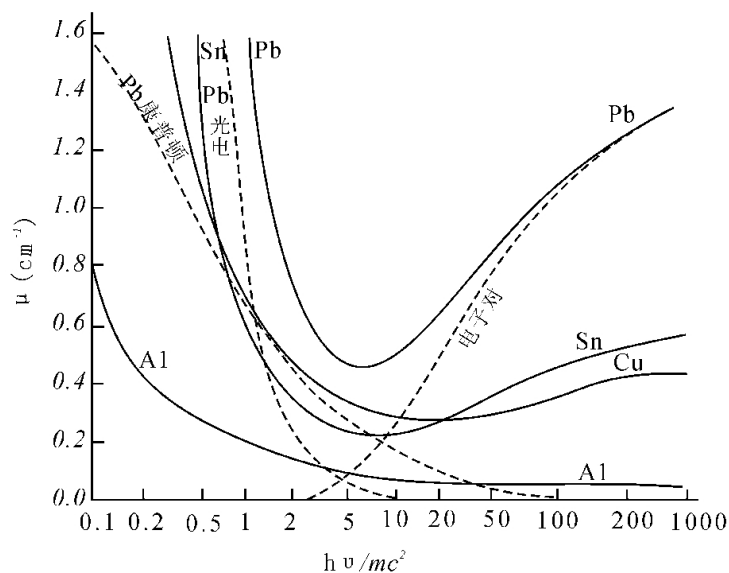


图 1: Pb、Sn、Cu、Al 对 γ 射线的吸收系数和能量的关系

图中横座标以 γ 光子的能量 $h\nu$ 与电子静止能量 $m_e c^2$ 的比值为单位, 由图可见, 对于铅低能 γ 射线只有光电效应和康普顿效应, 对高能 γ 射线, 以电子对效应为主。

为了使用上的方便, 定义 $\mu_m = \mu/\rho$ 为质量吸收系数, ρ 为材料的质量密度。则 (1) 式可改写成如下的形式:

$$I_x = I_0 e^{-\mu_m x_m} \quad (4)$$

式中 $x_m = x\rho$ 称为质量厚度, 单位是 g/cm^2 。

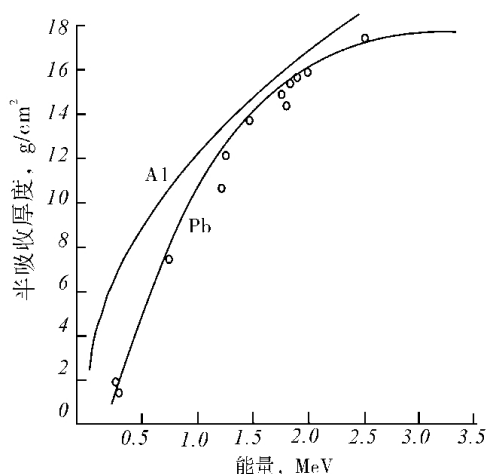


图 2: 半吸收厚度和 γ 射线能量的关系

4.2 半吸收厚度

物质对 γ 射线的吸收能力也常用半吸收厚度来表示，其定义为使入射 γ 射线强度减弱到一半所需要吸收物质的厚度。由 (1) 式可得

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (5)$$

显然，半吸收厚度 $x_{\frac{1}{2}}$ 与材料的性质和 γ 射线的能量都有关。图 (2) 表示铝、铅的半吸收厚度与 E_γ 的关系。若用实验方法测得 I_x 与 x 的变化关系，则可根据 (3) 式求得材料的线性吸收系数 μ 值，从而由 (5) 式求得 $x_{\frac{1}{2}}$ 。

测量装置如图 (3) 所示。

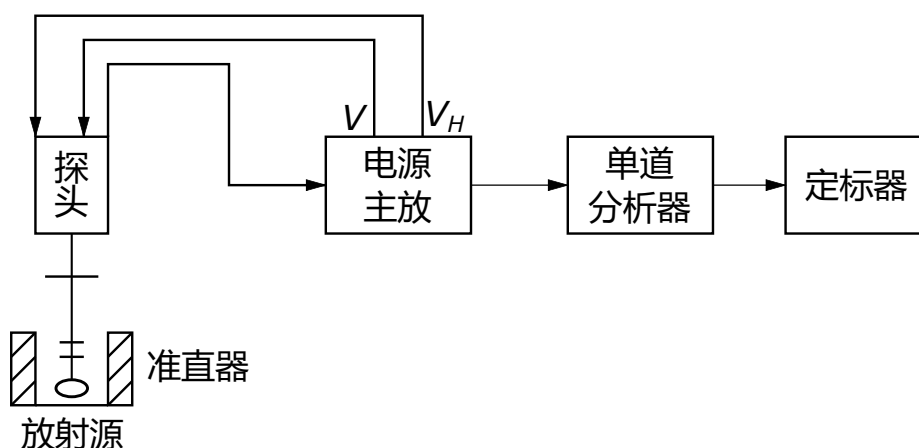


图 3: 测量装置

5 实验内容

1. 按图 (3) 检查测量装置，调整探测器位置，使放射源、准直孔、探测器具有同一条水平线上。
2. 打开系统电源，预热适当时间。
3. 选择合适的高压值，放大倍数，和计数时间并保持不变。
4. 测量不同吸收片厚度 x 时的计数 I_x 。
5. 取出放射源，在相同条件下，测量本底计数 I_b 。
6. 把高压降至最低值，关断电源。
7. 用最小二乘法求出 γ 吸收系数 μ 及半吸收厚度 $d_{\frac{1}{2}}$ 。

6 注意事项

测量前必须认真阅读 BH1224 微机多道 γ 谱仪使用说明书。

7 实验数据

7.1 数据

所用 ^{137}Cs 放射源编号: 26;

强度: $S = 66.6 \times 10^3 \text{Bq}$;

能量: $E_\gamma = 0.66 \text{MeV}$;

计数时间: 60s。

下列数据均为平均值。本底计数 $I_B = 3563$ 。

7.1.1 Pb 样品

编号	1	1+2	1+2+3	1+2+3+4	1+2+3+4+5
厚度 x/mm	2.07	4.79	6.75	9.21	11.34
平均计数 $I_x/\text{次}$	6864	6208	5700	5235	4833
减去本底的计数 I_x/mm	3301	2645	2137	1672	1270

表 1: Pb 的实验数据

7.1.2 Cu 样品

编号	1	2	3	4	1+4
厚度 x/mm	10.08	14.56	20	24.2	34.42
平均计数 $I_x/\text{次}$	7774	5505	5075	4622	4038
减去本底的计数 I_x/mm	4211	1942	1512	1059	475

表 2: Cu 的实验数据

7.1.3 Al 样品

编号	1	2	3	4	1+4
厚度 x/mm	10.3	14.8	19.58	24.58	34.9
平均计数 $I_x/\text{次}$	7008	6922	6652	6448	5918
减去本底的计数 I_x/mm	3445	3359	3089	2885	2355

表 3: Al 的实验数据

7.2 处理

将表 (1)~(3) 中的厚度 x 作为横坐标, 减去本底的计数 I_x 的自然对数作为纵坐标, 画图, 并用最小二乘法进行线性拟合, 求出拟合系数, 如图 (4) 所示:

从图 (4) 中可以得出各样品的 γ 吸收系数和半吸收厚度 $d_{\frac{1}{2}}$, 罗列如下:

1. $\mu_{\text{Pb}} = 0.103 \text{mm}^{-1} = 1.03 \text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Pb}) = 6.74 \text{mm}$ 。

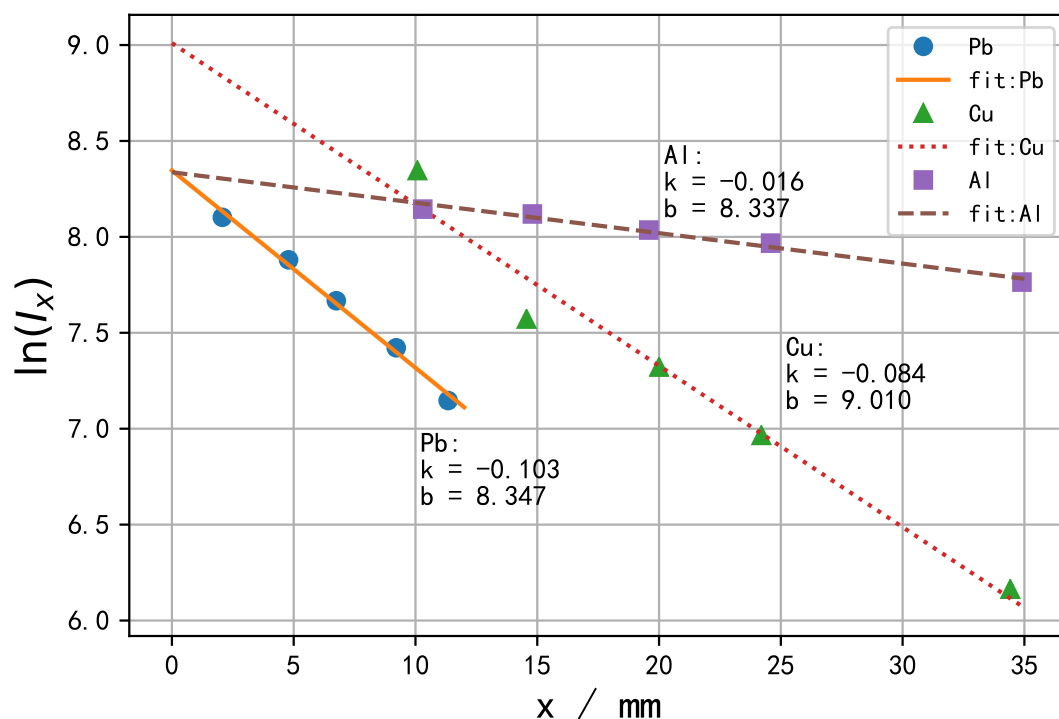


图 4: 数据及拟合曲线

2. $\mu_{\text{Cu}} = 0.084\text{mm}^{-1} = 0.84\text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Cu}) = 8.24\text{mm}$ 。

3. $\mu_{\text{Al}} = 0.016\text{mm}^{-1} = 0.16\text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Al}) = 43.67\text{mm}$ 。

作为参考, 查阅网络资料^[1]得知 3 种材料对 ^{137}Cs 的 660keV 的 γ 光子的吸收系数 (及计算得到的半吸收厚度) 的文献值分别为:

1. $\mu_{\text{Pb}} = 1.19\text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Pb}) = 5.82\text{mm}$ 。

2. $\mu_{\text{Cu}} = 0.94\text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Cu}) = 7.37\text{mm}$ 。

3. $\mu_{\text{Al}} = 0.28\text{cm}^{-1}$; $d_{\frac{1}{2}}(\text{Al}) = 24.76\text{mm}$ 。

8 误差分析

对比文献值和测量值, 我们发现铅和铜的数据较为符合, 但是铝的实验结果偏差较大。

而实验过程中我们也观察到铝的测量数据不稳定的现象, 有时加了辐射源的计数结果甚至比本底计数还低, 因此测量了相当多次, 取平均值。对于这一异常现象, 我们暂时没有很好的解释。

9 思考题

9.1 设铅的 $\mu = 1.0/\text{cm}$, 铝的 $\mu = 0.2/\text{cm}$, 为了使 γ 辐射强度将为原来的 $1/10$, 所需防护层厚度各为多少厘米?

由 (1) 式代入题设条件可得

$$x = \frac{\ln 10}{\mu} \quad (6)$$

对于铅: $x = 2.302\text{cm}$ 。

对于铝: $x = 11.513\text{cm}$ 。

9.2 待测的 γ 光子的能量与入射光子的能量是否相同? 为什么?

不相同。主要有三种作用吸收 γ 光子: 光电效应、康普顿效应、电子对效应。其中康普顿效应由于光子将一部分能量传递给电子, 所以放出的光子能量小于入射光子的能量, 而光电效应不会再放出光子。

9.3 实验布置中, 为什么要把放射源、准直孔、探测器的中心保持在同一直线上?

当三者处于同一直线上时探测器收到的射线都近似是垂直穿过吸收片, 在吸收片内部穿过的距离与吸收片厚度近似相同。如果三者不再同一直线上那么探测器接收到的信号所对应的吸收片厚度也就不是游标卡尺的测量值了。

9.4 何为半吸收厚度? 其值与哪些因素有关?

物质对 γ 射线的吸收能力常用半吸收厚度来表示, 其定义为使入射 γ 射线强度减弱到一半所需要吸收物质的厚度。

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (7)$$

半吸收厚度主要与材料的吸收系数有关。查阅网络资源 [2] 可知 $\mu = n\sigma$, 其中 n 为物质的原子数密度, σ 为物质原子对 γ 射线的吸收散射截面。因此材料的吸收系数主要与材料本身的物质种类、分子密度、原子密度有关, 此外, 还与 γ 光子的能量 E_γ 有关。

9.5 为何铜、铝的吸收系数测量结果误差较大?

测量本底计数时的情形应与测量放射源被吸收时的情形相同, 也就是每次测量放射源的吸收情况时, 只应该取下放射源, 但保持吸收片不动, 测量本底计数。而本实验中采取的去掉所有吸收片和放射源测量本底计数的方法是不科学的。而由于铅板较薄, 铝、铜块较厚, 本实验测量出的本底计数与有铅板时的本底计数接近, 而与有铝、铜时的本底计数相差较大。这就导致计算出的相应的 γ 射线吸收系数误差较大。

参考文献

[1] <http://pleclair.ua.edu/PH255/templates/formal/formal.pdf>.

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_ray.

[3] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.