

γ 射线的吸收

李昊润*

北京大学物理学院 学号: 2200011477

(实验日期: 2025 年 11 月 11 日)

I. 理论原理

γ 射线与物质发生相互作用时, 主要有三种效应: 光电效应、康普顿效应和电子对效应(当 γ 射线能量大于 1.02 MeV 时, 才有可能产生电子对效应). 准直成平行束的 γ 射线, 通常称为窄束 γ 射线. 单能窄束 γ 射线在穿过物质时, 其强度会减弱, 这种现象称为 γ 射线的吸收. γ 射线的强度的衰变服从指数规律, 即

$$I = I_0 e^{-\sigma N x} = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1)$$

其中 I_0 和 I 分别是穿过物质前、后的 γ 射线强度, x 是 γ 射线穿过的物质的厚度(单位为 cm), σ 是三种效应截面之和, N 是吸收物质单位体积中的原子数, μ 是物质的线性吸收系数, 单位为 cm^{-1} . 显然 μ 的大小反映了物质吸收 γ 射线能力.

γ 射线与物质发生相互作用时的三种效应的截面可以表示如下:

$$\sigma = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{p}}, \quad (2)$$

式中 σ_{ph} , σ_{c} , σ_{p} 分别为光电效应、康普顿效应和电子对效应的截面(截面与 γ 射线能量和吸收物质的 Z 相关). 其中

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{ph}} &\propto Z^5, \\ \sigma_{\text{c}} &\propto Z, \\ \sigma_{\text{p}} &\propto Z^2.\end{aligned}$$

物质对 γ 射线的线性吸收系数也可以用质量吸收系数 μ_m 来表示. 此时指数衰减规律可表示为

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

其中 μ_m 表示物质的质量吸收系数, 单位为 cm^2/g . $\mu_m = \mu/\rho$, ρ 是物质的密度, 单位为 g/cm^3 . x_m 表示质量厚度, $x_m = x \cdot \rho$, 单位为 g/cm^2 . 因为

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma N}{\rho} = \frac{N_A}{A} (\sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{p}}), \quad (4)$$

式中 N_A 是阿佛加德罗常数, A 是原子质量数. 所以质量吸收系数 μ_m 与物质的密度和物理状态无关, 因此使用质量吸收系数比线性吸收系数要更加方便些.

* lhr@stu.pku.edu.cn; (86)15645049990

由于在相同的实验条件下，某一时刻的计数率 n 总是与该时刻的射线强度成正比，因此 I 与 x_m 的关系也可以用 n 与 x_m 的关系来代替。由式(3)我们可以得到

$$n = n_0 e^{-\mu_m x_m},$$

$$\ln n = \ln n_0 - \mu_m x_m.$$

那么令 $y = \ln n$ ，则有

$$y = ax + b.$$

可以通过应用最小二乘法将一系列测量值线性拟合得到一条直线，该直线斜率的绝对值就是质量吸收系数 μ_m 。

其中，斜率 a （即为 $-\mu$ ）与截距 b 的计算公式为

$$a = \frac{[W][W_x \ln n] - [W_x][W \ln n]}{[W][W_x^2] - [W_x]^2}, \quad (5)$$

$$b = \frac{[W_x^2][W \ln n] - [W][W_x \ln n]}{[W][W_x^2] - [W_x]^2}, \quad (6)$$

式子中的 $[W_x] = \sum_{i=1}^k W_i x_i$ (W_i 表示 $y_i = \ln n_i$ 的权重)，其他类似。 W_i 的计算如下（假定本底不大和本底误差可以忽略）

$$\sigma_{y_i} = \sigma_{\ln n_i} = \frac{\sigma_{n_i}}{n_i} = \frac{1}{\sqrt{N_i}}$$

$$W_i \propto \frac{1}{\sigma_{y_i}^2} = \frac{1}{\sigma_{\ln n_i}^2} = N_i$$

a 和 b 的误差为

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{[W]}{[W][W_x^2] - [W_x]^2} \sigma_y}, \quad (7)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{[W_x^2]}{[W][W_x^2] - [W_x]^2} \sigma_y} \quad (8)$$

式中的 $\sigma_y = \sqrt{[W_i v_i^2]/(k-2)}$ ， $v_i = y_i - \hat{y}_i$ ， y_i 是实验测量值， \hat{y}_i 是拟合值。

II. 实验条件

如图1所示为本实验的实验装置图，本实验是由 ^{60}Co 放射源放射出 γ 射线，经过铅准直器准直由探测器进行计数，通过改变两个铅准直器中插入的吸收片的位置和数量，处理数据拟合计算得到不同物质的质量吸收系数及误差。

从实际的实验条件来看，探测器记录下来的脉冲数可能有五个来源，

1. 透过吸收物质的 γ 射线；
2. 由周围物质散射而进入的 γ 射线；

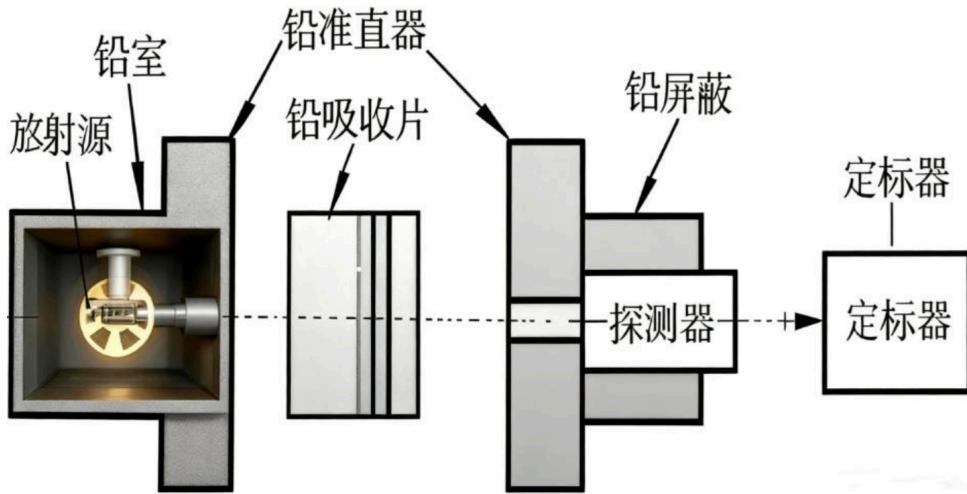


图 1. γ 射线的吸收实验装置图

3. 与吸收物质发生小角度散射而进入的次级 γ 射线；
4. 在探测器对源所张立体角以外的 γ 射线被吸收而进入；
5. 本底，

但是其中只有第一类射线是我们的透射强度。所以我们通过测量并去除本地与合理地选择吸收片和放射源，吸收片和探测器之间的相对位置以获得良好的实验结果，从理论上来说，吸收片的位置应当放在靠近放射源的地方，我们讲通过接下来的实验验证这是更好的几何条件。

III. 实验结果及讨论

表 I. 本底计数

测量次数 i	实验前	实验后
1	4296	4359
2	4379	4412
3	4482	4416

通过将表 I 中实验前与实验后各测量了三次 $t = 500$ s 的本底计数平均，得到本实验的本底计数约为 4391.

将铅材料吸收片分别放置在靠近放射源和探测器的两种不同条件下，分别收集不同吸收片数目时的探测器计数并分别去本底后如表 II 所示。

如图 2a 所示，给出了当铅吸收片靠近放射源时的拟合直线，根据式 (5)，式 (6)，

表 II. 铅吸收片的 γ 射线计数

吸收片数目 (片)	吸收片质量密度 (g/cm^2)	靠近放射源		靠近探测器	
		探测器计数	去本底计数	探测器计数	去本底计数
2	7.1	7537	3146	7461	3070
4	14.2	6589	2198	6570	2179
6	21.3	5858	1467	5813	1422
8	28.4	5412	1021	5567	176
10	35.5	4972	581	5196	805

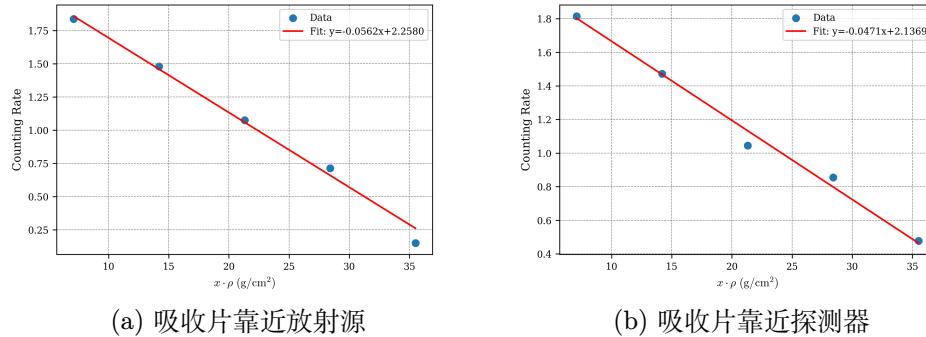


图 2. Pb 吸收片的不同位置

式 (7) , 式 (8) 计算得到:

$$a = -0.0562,$$

$$b = 2.2580,$$

$$\sigma_a = 0.0025,$$

$$\sigma_b = 0.0457,$$

误差均不超过 5%，且得到相应的质量吸收系数 $\mu_m = 0.0562 \text{ g}/\text{cm}^2$ ，基本符合 $\mu_m = 0.0566 \text{ g}/\text{cm}^2$ 的标准值。而如图 2b 所示，给出了当铅吸收片靠近放射源时的拟合直线，根据式 (5) , 式 (6) , 式 (7) , 式 (8) 计算得到：

$$a = -0.0471,$$

$$b = 2.1369,$$

$$\sigma_a = 0.0026,$$

$$\sigma_b = 0.0496,$$

斜率误差超过 5%，且得到相应的质量吸收系数 $\mu_m = 0.0471 \text{ g}/\text{cm}^2$ 与 $\mu_m = 0.0566 \text{ g}/\text{cm}^2$ 的标准值相差过大。通过对比，我们能够验证吸收片靠近放射源时是更良好的几何条件。

将铁材料吸收片放置在靠近放射源的良好的几何条件下，收集不同吸收片数目时的探测器计数并分别去本底后如表 III 所示。

表 III. 铁吸收片的 γ 射线计数

吸收片数目 (片)	吸收片质量密度 (g/cm^2)	探测器计数	去本底计数
2	4.86	8013	3622
4	9.72	7405	3014
6	14.58	6681	2290
8	19.44	6177	1786
10	24.3	5800	1409

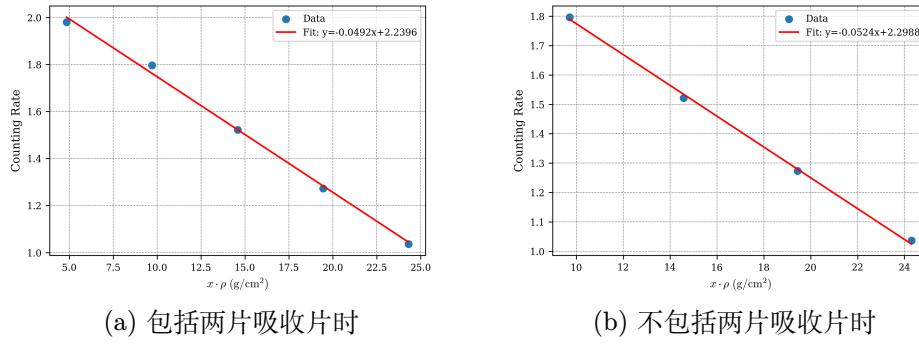


图 3. Fe 吸收片情况

如图 3a 所示, 给出了当铁吸收片靠近放射源时的拟合直线, 根据式 (5), 式 (6), 式 (7), 式 (8) 计算得到:

$$a = -0.0492,$$

$$b = 2.2396,$$

$$\sigma_a = 0.0019,$$

$$\sigma_b = 0.0260,$$

误差均不超过 5%, 但得到相应的质量吸收系数 $\mu_m = 0.0492 \text{ g}/\text{cm}^2$ 与 $\mu_m = 0.0519 \text{ g}/\text{cm}^2$ 的标准值相差超过 5%. 考虑到在实验过程中, 测量两片铁材料吸收片的时间与其他数目吸收片的时间具有一定的间隔, 可能本底等因素存在漂移等较大影响, 所以尝试取不包括两片吸收片时的四个数据点进行拟合, 得到的结果如图 3b 所示, 根据式 (5), 式 (6), 式 (7), 式 (8) 计算得到:

$$a = -0.0524$$

$$b = 2.2988,$$

$$\sigma_a = 0.0010,$$

$$\sigma_b = 0.0170,$$

误差均不超过 5%, 且得到相应的质量吸收系数 $\mu_m = 0.0524 \text{ g}/\text{cm}^2$, 基本符合 $\mu_m = 0.0519 \text{ g}/\text{cm}^2$ 的标准值.

致谢

感谢潘悦同学协力完成了本实验，感谢林~~F~~阳老师在实验中的讲解和指导.

附录 A: 思考题

1. 试分析在不好的几何条件下，测出的半吸收厚度是偏大还是偏小？为什么？

偏大，因为在不好的几何条件下，探测器能够收集到更多的散射光子，使得 γ 射线强度随吸收物质的厚度的衰减较慢，所以需要更厚的吸收物质的厚度才能够使 γ 射线强度衰减到一半。

2. 试叙述本实验中的本底应如何测量？有本底的误差如何考虑？

在放射源关闭并利用铅准直器作铅砖屏蔽的条件下，保持铅准直器与放射源和探测器的相对几何位置不变，保持与主实验单次计数时长相同的时长进行测量。并分别在实验前后多次测量取平均值减小误差。

通过数学计算推到对于净计数率的误差传递，并考虑对于半吸收厚度的影响。

3. 如果事先并不知道 γ 射线的能量，怎样才能合理地选择每次添加地吸收片厚度，使得测量结果既迅速，结果也比较准确。

可以首先取一个估计超过半吸收厚度的最大吸收片厚度，若发现仍未超过按照实验数据的组数更大步长地选取一个最大吸收片厚度，然后再根据选取的最大吸收片厚度根据实验组数分别取相应的小吸收片厚度进行测量。