

# $\gamma$ 射线的吸收

Xuanyi, 复旦大学核科学与技术系

**摘要:** 本实验使用  $^{137}\text{Ce}$  放射源产生的  $\gamma$  射线, 验证了  $\gamma$  射线在物质中被吸收的规律, 并且测量了 Al 片和 Cu 片在  $^{137}\text{Ce}$  的  $\gamma$  射线中的质量吸收系数。

## 一、引言

$\gamma$  射线是一种高能电磁辐射, 具有很强的穿透能力, 常被用于材料分析和医学诊断。然而, 当  $\gamma$  射线穿过物质时, 其强度会因物质的吸收而减弱。这种吸收现象受到物质本身特性以及  $\gamma$  射线的能量和路径的影响。因此, 研究  $\gamma$  射线在物质中的吸收规律对于理解辐射与物质相互作用具有重要意义。

本实验利用  $^{137}\text{Ce}$  放射源产生的  $\gamma$  射线, 旨在验证  $\gamma$  射线在物质中被吸收的规律, 并测量两种不同材料——Al 片和 Cu 片对  $^{137}\text{Ce}$   $\gamma$  射线的质量吸收系数。这些测量数据可以为研究  $\gamma$  射线与物质相互作用提供实验依据, 并在核技术、医学影像等领域具有潜在的应用价值。

利用  $\gamma$  射线吸收的原理, 可以制作各种辐射测量设备, 如料位计、厚度计和密度计等。这些设备在工业生产、核能安全监测等领域发挥着重要作用, 为提高生产效率、确保安全性提供了有效手段。因此, 深入研究  $\gamma$  射线在不同物质中的传播与吸收特性, 对于推动相关技术的发展和应用具有重要意义。

## 二、实验目的

1. 了解  $\gamma$  射线在物质中的吸收规律;
2. 测量  $\gamma$  射线在不同物质中的吸收系数, 了解  $\gamma$  射线的防护知识。

## 三、实验原理

### 3.1 $\gamma$ 射线与物质的相互作用

$\gamma$  射线与物质的相互作用满足指数衰减规律 (强度损失与深度无关性的自然推论), 定量上, 根据吸收截面  $\sigma$  的定义, 有

$$-dI = \sigma N I dx$$

其中  $I$  是  $\gamma$  例子的通量,  $\sigma$  是物质的吸收截面,  $N$  是物质的原子数密度。简单整理并求解得到

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \mu = \sigma N \quad (1)$$

其中  $\mu = \sigma N$  是一种特殊的宏观截面, 称为物质的线性吸收系数, 具有位置的反量纲, 单位为  $\text{m}^{-1}$ 。

对于  $\gamma$  射线而言, 相互作用截面  $\sigma$  有光电效应  $\sigma_{\text{ph}}$ 、康普顿效应  $\sigma_{\text{c}}$  和电子对效应  $\sigma_{\text{p}}$  组成, 这三种截面和入射粒子能量以及被入射物质的原子序数有关, 有如下规律

$$\mu_{\text{ph}} \propto Z^5$$

$$\mu_{\text{c}} \propto Z$$

$$\mu_{\text{p}} \propto Z^2$$

### 3.2 刻画物质吸收能力的不同方式

刻画物质对射线的吸收能力的方式之一, 是前面提过的线性吸收系数  $\mu = \sigma N$ 。此外还有许多其他方式, 例如质量吸收系数  $\mu_{\text{m}}$

$$\mu_{\text{m}} = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma N}{\rho} = \frac{\sigma}{m_{\text{atom}}} = \frac{\sigma N_{\text{A}}}{M} \quad (2)$$

质量吸收系数去掉了材料密度的贡献, 而只和材料的本身的种类有关, 因此十分方便。式中  $m_{\text{atom}}$  是原子质量,  $N_{\text{A}}$  是阿伏伽德罗常数,  $M$  是原子的相对质量。质量吸收系数的单位是  $\text{cm}^2/\text{g}$ 。

于是, 将几何厚度  $x$  变为质量厚度  $t = x\rho$ , 可以重写吸收曲线的指数衰减规律式(1)为

$$I = I_0 \exp(-\mu_{\text{m}} t) \quad (3)$$

顺便提及, 实验中, 通过计数率来间接测量通量

$$n \propto I \Rightarrow n = n_0 \exp(-\mu_{\text{m}} t) \quad (4)$$

另外由于吸收物质的物理过程具有射程无关性, 这和原子核衰变的历史无关性推出核辐射统计规律非常相似, 只不过之前讨论的是时间, 这里讨论的是空间。既然刻画原子核衰变的一个重要参数是半衰期, 对应地对射线的吸收能力的刻画方式之一是半吸收厚度  $d_{1/2}$ , 即射线强度降低一半时的厚度。不难推出

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

### 3.3 线性吸收系数的测量以及带误差的线性拟合

当误差出现在测量数据中时, 我们需要通过误差给数据确权。设  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  是对同一固定量  $\mu$  的  $N$  个具有不同精度的观测值,  $x_i$  应服从期待值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma_i^2$  的正

态分布，即

$$p(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma_i} \right)^2 \right]$$

则，样本  $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  的似然函数应为

$$\begin{aligned} L(\underline{x} | \mu) &= p(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ &= \prod_{i=1}^N p(x_i; \mu, \sigma_i^2) \\ &= \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma_i} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

我们使用极大似然法寻求这样一个  $\mu$  的估计值。即使得固定样本值为观测值  $(x_1, \dots, x_N)$ ，上式取最大值的  $\mu$  作为当前样本下对  $\mu$  的估计值，常用  $\ln L(\underline{x}|\mu)$  代替  $L(\underline{x}|\mu)$  作为似然函数，不难求得  $\ln L(\underline{x}|\mu)$  取得极值的条件是

$$\sum_{i=1}^N \frac{x_i - \mu}{\sigma_i^2} = 0$$

得到平均值的极大似然估计公式，这是一个加权平均值，而权重  $w_i$  正比于  $\sigma_i^{-2}$

$$\hat{\mu}(x_1, \dots, x_N) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i / \sigma_i^2}{1/\sigma_i^2} \quad (5)$$

所以在带误差的线性拟合中，观测值  $y_i$  的测量常常带有误差，和通常的线性拟合（不带误差或等精度）相比，只需要将  $y_i$  替换为其权重值  $w_i y_i$  即可导出带误差情形下的所有公式<sup>1</sup>。

## 四、实验装置

### 试验台号：2-1

- <sup>137</sup>Cs 放射源，微居，1 个
- 高压电源 BH1283N 1 个
- 线性脉冲放大器 BH1218 1 个
- 单道脉冲幅度分析器 BH1299A 1 个
- 定标器 BH1220N 1 个
- 插件机箱以及低压电源 FH0001 BH1222 各 1 个

<sup>1</sup>实际上带误差的线性拟合的最小二乘的目标函数中，需要以带权的  $y_i$  代入，而最小二乘的基本出发点就是这个目标函数取最小值，所以后面的系数公式以及误差公式都替换为  $y_i$  的带权值即可。这一点也可以从 Sympy 数据处理包的技术文档中看出，[https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve\\_fit.html](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html)

- 双踪示波器 TDS1001B-SC 1 台
- 导线若干、BNC 同轴电缆若干

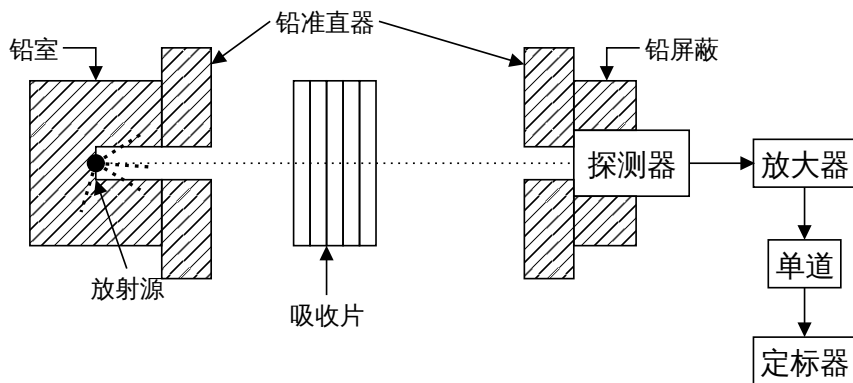


图 1 实验装置图

## 五、实验内容概要和预习思考题

### 5.1 实验内容

1. 测量 $^{137}\text{Cs}$ 的 $\gamma$ 射线在Cu、Al物质中的吸收曲线，求出质量吸收系数；
2. 用最小二乘直线拟合的方法求出质量吸收系数，用数据处理软件对曲线进行拟合给出质量吸收系数及其误差；
3. 对良好几何条件下的一组数据，用最小二乘法直线拟合计算出质量吸收系数的误差，并与软件拟合结果比较；
4. 比较铜、铝和铅对 $\gamma$ 射线的屏蔽效果。

### 5.2 预习思考题

**预习思考题 1.** 在 Na(Tl) 慢计数系统中，放大器的成形时间该如何选择？

**答.** 本实验不做幅度分析，放大器不起滤波作用，微分时间选择 max，积分时间选择 0 即可。

**预习思考题 2.** 如何确定探头所需高压和放大器的放大倍数？

**答.** 使得在放射源信号的放大器的输出幅度为合适值即可。本实验中选择让前置放大器输出信号约为  $-500\text{ mV}$ ，主放大器的输出信号约为  $4\text{ V}$ 。

**预习思考题 3.** 单道的作用是什么？该如何选择其工作方式和设置单道的值？

**答.** 本实验中单道让 $\gamma$ 模拟脉冲信号转化为数字脉冲信号，无需对特定幅度的 $\gamma$ 信号进行筛选。所以在观察到 $\gamma$ 信号的情况下，设置合适的阈值避免掉一些噪声即可。

**预习思考题 4.** 什么样的几何条件是良好的几何条件? 吸收片应当放在靠近放射源还是靠近探测器的地方?

**答.** 从实验结果上讲, 良好的几何体条件是使得指数衰减规律更明显, 质量吸收系数的测量值和理论值更接近的几何条件。

**预习思考题 5.** 如何合理地选择每次添加的吸收片片数, 使测量结果既迅速, 结果又比较准确?

**答.** 先添加多片, 根据测量结果计算出每片使得计数的衰减倍数, 然后根据实验要求判断所需要的片数, 根据实验数据个数推断每次添加几片。

## 六、实验过程

1. 连接电路, 利用示波器观察前置放大器和主放大器的输出信号, 调整设备参数;
2. 通过放置不同数量的 Al 片, 在两种几何条件 (分别是屏蔽层紧靠探测器以及屏蔽层紧靠放射源) 下, 测量  $^{137}\text{Cs}$  的  $\gamma$  射线在 Al 屏蔽层中的吸收曲线;
3. 对净计数率取对数, 用最小二乘直线拟合的方法求出质量吸收系数;
4. 观察比较结果和理论值以及拟合的决定系数, 判断出那种几何条件更符合实验目的 (符合指数衰减规律);
5. 在良好的几何条件下, 测量 Cu 的吸收曲线, 并作相应的数据处理。

其中第一步调整好的设备参数以及前置放大器和主放大器的输入输出信号如表1和图2所示。

表 1 仪器参数表

仪器名称	参数名称	参数值
高压电源	高压参数	3.83 圈
主放大器	微分时间	max
	积分时间	0
	粗调增益	20
	细调增益	0.00
单道	模式	积分
	阈值	1.00 V
定标器	阈值	1.00 V

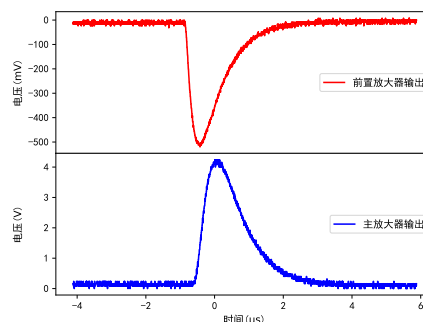


图 2 前置放大器输出和主放大器输出

## 七、实验结果和分析

### 7.1 Al 吸收曲线的测量与良好几何条件的确定

对 Al 吸收曲线的测量结果如表2和3所示。其中净计数率是总计数减去本底后除以测量时间得到，误差是利用公式

$$\sigma_n = \frac{\sigma_N}{T} = \frac{\sqrt{N}}{T} = \sqrt{\frac{n}{T}}$$

得到，公式中  $T$  是测量时间。

表 2 Al 吸收曲线：几何条件为靠近探测器，本底计数为 3341，本底和总计数测量时间均为 200s

质量厚度 (g/cm <sup>2</sup> )	总计数	净计数率 (Bq)	误差 (Bq)
0.000	169574	831.2	2.0
2.035	144764	707.1	1.9
4.078	122997	598.3	1.7
6.129	105339	510.0	1.6
8.172	89889	432.7	1.5
10.201	76784	367.2	1.4
12.252	66151	314.1	1.3
14.303	48928	227.9	1.1
16.278	41862	192.6	1.0

表 3 Al 吸收曲线：几何条件为靠近放射源，本底计数为 3341，本底和总计数测量时间均为 200s

质量厚度 (g/cm <sup>2</sup> )	总计数	净计数率 (Bq)	误差 (Bq)
0.000	169574	831.2	2.0
2.035	145679	711.7	1.9
4.078	125088	608.7	1.7
6.129	110330	534.9	1.6
8.172	95759	462.1	1.5
10.201	82236	394.5	1.4
12.252	71228	339.4	1.3
14.303	60638	286.5	1.2
16.278	53949	253.0	1.1
18.305	40598	186.3	1.0

根据吸收曲线的指数衰减规律(4)，对净计数率  $n$  取对数后，吸收曲线的规律变为  $\ln n$  和厚度  $t$  的线性关系

$$\ln n = \ln n_0 - \mu_m t, \quad (6)$$

于是只需做线性拟合即可。注意误差也需要转化：

$$\sigma_{\ln n} = \frac{\partial \ln n}{\partial n} \sigma_n = \frac{\sigma_n}{n} = \nu_n \quad (7)$$

式中， $\nu_n$  是相对误差。

两种几何条件下，线性拟合的结果如图3和4所示，注意到在靠近放射源的几何条件下，相比靠近探测器的几何条件多测了一组（表2和表3），这是因为在实验测量探测器的几何条件的顺序靠后，而在之前的几何条件所确定的最后一组条件下，无法达到 1/4 吸收厚度。

将靠近放射源的几何条件中的最后一组数据舍弃：一方面是为了对比两种几何条件下结果；另一方面也是该数据明显偏离其他数据，可能的原因是新加的 Al 片此时已经不能很好的满足当前的几何条件。

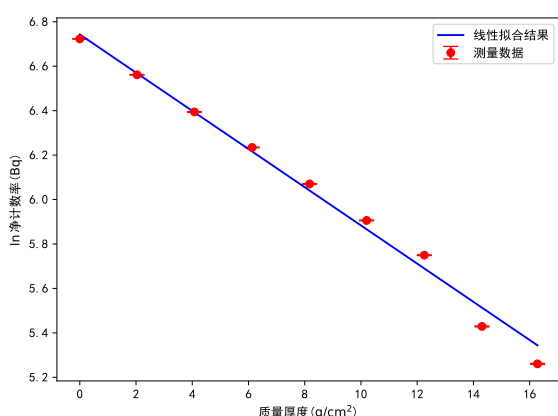


图3 Al 吸收曲线：靠近探测器

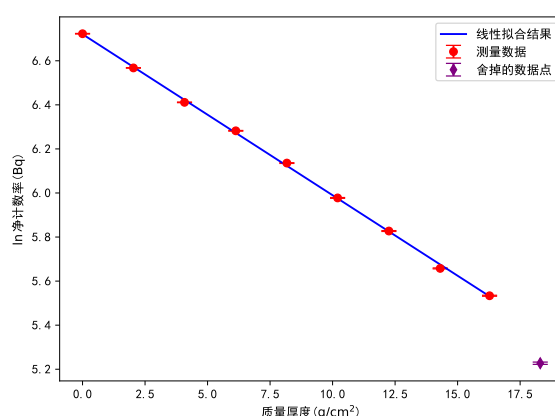


图4 Al 吸收曲线：靠近放射源

表4 Al 吸收曲线对数拟合结果，几何条件为靠近探测器

拟合参数	拟合结果
$-\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	$(-0.086 \pm 0.003)$
$\ln n_0$	$(6.74 \pm 0.02)$
决定系数 $R^2$	0.991

表5 Al 吸收曲线对数拟合结果，几何条件为靠近放射源

拟合参数	拟合结果
$-\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	$(-0.0731 \pm 0.0006)$
$\ln n_0$	$(6.721 \pm 0.005)$
决定系数 $R^2$	0.9995

不难发现，在靠近放射源的几何条件下，测量结果更符合指数衰减的规律，拟合效果优于靠近探测器的几何条件。而且质量吸收系数更接近 NIST 网站上所给的参考值<sup>2</sup>。可以确定靠近放射源的是“良好的几何条件”。

所以取靠近放射源的几何条件的测量结果，得到在  $^{137}\text{Ce}$  的 0.662 MeV- $\gamma$  射线，Al 的质量吸收系数为

$$\mu_m(\text{Al}, 0.662 \text{ MeV}) = 0.0731 \pm 0.0006 \text{ cm}^2/\text{g} \quad (8)$$

<sup>2</sup><https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElemTab/z13.html>

7.2 Cu 吸收曲线的测量

在前面所确定到“良好的几何条件”，既靠近放射源的条件下，测量 Cu 的质量吸收曲线。测量结果如表6所示。

表 6 Cu 吸收曲线：几何条件为靠近放射源，本底计数为 3040，本底和总计数测量时间均为 200s

质量厚度 (g/cm <sup>2</sup> )	总计数	净计数率 (Bq)	误差 (Bq)
0.00	156385	766.7	2.0
3.43	122634	598.0	1.7
6.86	95122	460.4	1.5
10.29	74248	356.0	1.3
13.72	58420	276.9	1.2
17.15	45429	211.9	1.0
20.58	39165	180.6	1.0
24.01	28578	127.7	0.8
27.44	22833	99.0	0.7
30.87	18365	76.6	0.6

对计数率取对数，用同样的方法处理数据，所得到的结果如图5和表7所示。

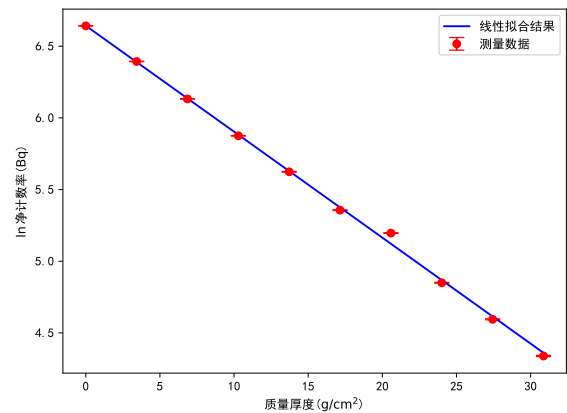


表 7 Cu 吸收曲线对数拟合结果，几何条件为靠近放射源

拟合参数	拟合结果
$-\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	$(-0.0739 \pm 0.0008)$
$\ln n_0$	$(6.643 \pm 0.010)$
决定系数 $R^2$	0.9991

图 5 Cu 的吸收曲线

于是得到 Cu 的质量吸收曲线为

$$\mu_m(\text{Cu}, 0.662 \text{ MeV}) = 0.0739 \pm 0.0008 \text{ cm}^2/\text{g} \tag{9}$$

八、实验结论

- 1. 通过测量Al 片在不同几何条件下的吸收曲线，确定了靠近放射源是“良好的几何条件”，即更符合理论规律的吸收曲线；
- 2. 通过吸收曲线,测得 Al 在 0.662 MeV 条件下的质量吸收系数为  $0.0731\pm0.0006 \text{ cm}^2/\text{g}$ ;



---

3. 通过吸收曲线,测得 Cu 在 0.662 MeV 条件下的质量吸收系数为  $0.0739 \pm 0.0008 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。

## 九、实验拓展——铅 Pb 的防护能力

铅 Pb 对于 0.662 MeV 的  $\gamma$  射线的线性吸收系数为  $\mu(\text{Pb}, 0.662 \text{ MeV}) = 1.213 \text{ cm}^{-1}$ 。

查询<sup>3</sup>到 Al 和 Cu 的密度分别为  $2.6989 \text{ g/cm}^3$  和  $8.93 \text{ g/cm}^3$ 。利用公式  $\mu = \mu_m \rho$ ，计算出线性吸收系数，并由此计算 1/10 吸收厚度，结果如8表所示

表 8 三种屏蔽材料的防护能力对比

屏蔽层材料	线性吸收系数 ( $\text{cm}^{-1}$ )	1/10 吸收厚度 (cm)
Al	0.1972	11.674
Cu	0.6601	3.488
Pb	1.2130	1.898

可以看到，让  $\gamma$  射线强度降低一个量级所需的材料厚度，Pb 要远低于其它材料，这就是要使用 Pb 作为防护材料的原因。

---

<sup>3</sup>Matweb: <https://www.matweb.com/index.aspx>