



# 物理学专业基础实验——放射性核素半衰期测量

刘元沔 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2024 年 5 月 10 日

**摘要：**半衰期是放射性原子核的一条基本性质，每种核素都有其特有的半衰期，可以用于鉴别原子核。不同放射性核素的半衰期差别很大（ $10^{-14}$ s 到  $10^{14}$  年），不同范围的半衰期测量方法也不同。本实验中我们通过测定衰变曲线的方法，测定放射性元素的半衰期，借此掌握核物理实验相关的技术方法。

**关键词：**放射性元素，半衰期，衰变曲线，粒子物理

## 1 实验原理 [1]

### 1.1 半衰期及其测定

半衰期是放射性原子核的一条基本性质，每种核素都有其特有的半衰期，可以用于鉴别原子核。不同放射性核素的半衰期差别很大（ $10^{-14}$ s- $10^{14}$  年），不同范围的半衰期测量方法也不同。ms 以下的短半衰期可以用核电子学的延迟符合等方法测量，10 年以上的长半衰期可以用比放射性的方法测量，中等半衰期可以用测量衰变曲线求得。

本实验中测量  $^{116}\text{In}$  和  $^{108}\text{Ag}$ 、 $^{110}\text{Ag}$  的半衰期就是这一范围的放射性核素半衰期。对于单一放射性核素，仪器得到的计数率随时间的变化为：

$$n(t) = n(0)e^{-\lambda t} \quad (1)$$

其中  $n(0)$  为开始时的计数率， $n(t)$  为开始测量后  $t$  时刻的计数率， $\lambda$  为衰变常数，衰变常数和半衰期之间的关系为：

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (2)$$

由 (1) 式，取对数可以得到：

$$\ln n(t) = \ln n(0) - \lambda t \quad (3)$$

对于测量的数据，进行线性拟合得到  $\lambda$ ，再利用 (2) 式就可以得到半衰期。

而实际上并不能得到  $t$  时刻的计数率，而只能是某一个时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$  的计数  $N$ ，由此得到该时间段内的平均计数率  $\bar{n}$ ，其中有：

$$\bar{n} = \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt = \frac{n(0)}{\lambda(t_2 - t_1)} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (4)$$

将  $\bar{n}$  看作  $t'$  时刻的计数率，因此有：

$$n(0)e^{-\lambda t'} = \bar{n} = \frac{n(0)}{\lambda(t_2 - t_1)} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (5)$$

因此可以得到：

$$t' = t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1 - e^{-\lambda \Delta t}}{\lambda \Delta t} \quad (6)$$

假设  $\lambda \Delta t \ll 1$ ，进行 Taylor 展开：

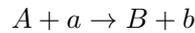
$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{1}{24} \lambda (\Delta t)^2 \quad (7)$$

若可以很好控制测量过程，可以使得第二项远小于第一项，则  $t' \approx \bar{t}$ 。



## 1.2 放射性核素产生

将稳定核素 A 放在带电粒子或中子流中辐照，产生核反应：



剩余核素 B 即可能是放射性的。在恒定的入射粒子通量  $\Phi$  下，放射性核素 B 的活度按照

$$A(t) = \Phi\sigma N_t(1 - e^{-\lambda t})$$

规律生长， $\lambda$  即为衰变常数， $\sigma$  为反应截面（活化截面）， $N_t$  为样品中稳定核素 A 的总数， $A(\infty) = \Phi\sigma N_t$  为饱和活度。本实验中用 Am - Be 中子源经石蜡慢化得到热中子，用慢中子活化天然铟（或者天然银）产生放射性核素。若被激活的样品中存在两种独立的放射性核素时，衰变曲线上的计数率就是两种放射性核素的计数率之和。由总衰变曲线定出较长的一个半衰期，然后从总计数率中扣除该半衰期对应的计数率，就可以得到较短的一个半衰期。

本实验中，铟活化后生成五种放射性核素和同质异能素，不过同质异能素  $^{116m}\text{In}$  的半衰期与其他四种相差 1-2 个数量级，适当选择活化辐照时间和“冷却”时间，可以使其他四种放射性对其半衰期测量影响较小，因此可以用单一放射性半衰期的规律处理数据。

## 1.3 多道分析器的工作原理

多道分析器可以用于做脉冲幅度分析，还可以用于多定标。前者图谱的道址  $x$  轴表示确定的脉冲幅度段间隔  $V \rightarrow V + \Delta V$ ，后者则表示确定的时间段间隔  $t \rightarrow t + \Delta t$ ，图谱的  $y$  轴都表示相应的脉冲计数。显然多定标状态下每一道都相当于一个定标器，整个记录谱反映了一条随时间准连续变化的计数变化曲线；每一道的时间间隔都可以在很大的范围中由多道分析器的内部设置选择设定。

## 2 实验装置

- Am - Be 中子源及石蜡筒：石蜡筒充分慢化 Am - Be 中子源的中子能量，将被活化样品放在石蜡筒中热中子通量最大的位置，以保证尽可能高的活化样品中的活性的产生。
- 铟片（和银片）
- 活性测量探测器
- 多道分析器及计算机
- 示波器

## 3 实验步骤

1. 根据实验原理，选定适当的辐照时间和辐照位置，将铟片（或银片）放入中子源石蜡筒中照射。
2. 将仪器连接好，使闪烁探测器正常工作。根据必须去除电子学和探测器噪声的原则选取甄别阈，且需要根据活化样片信号脉冲幅度分布范围选取脉冲幅度道宽。采取示波器观察无放射源的脉冲波形，并结合定标器计数率-甄别阈变化关系两种方法确定甄别阈。
3. 根据  $\lambda\Delta t \ll 1$  的原则，以及时间道宽  $\Delta t$  内统计误差（与活化片的活化相关）的要求，选取多定标的每道时间道宽  $\Delta t$ 。



- 衰变曲线测量：根据实验室要求，先放入活化钢片，测量放射性衰变曲线约一个半衰期，最后取出活化钢片再测量 10min 以上的本底。
- 记录衰变曲线多定标谱图以供图解法和加权最小二乘法求出半衰期及误差。

## 4 实验数据处理

实验过程中，根据要求进行了 600s 的本底测量，测量时每 10s 监测一次。求平均得到：

$$n_0 \approx 13(/10s)$$

平均后保留到整数，每 10s 一次监测的本底约为 13 个信号，在后续计算过程中扣除此本底。然后，我们进行衰变曲线的描绘：

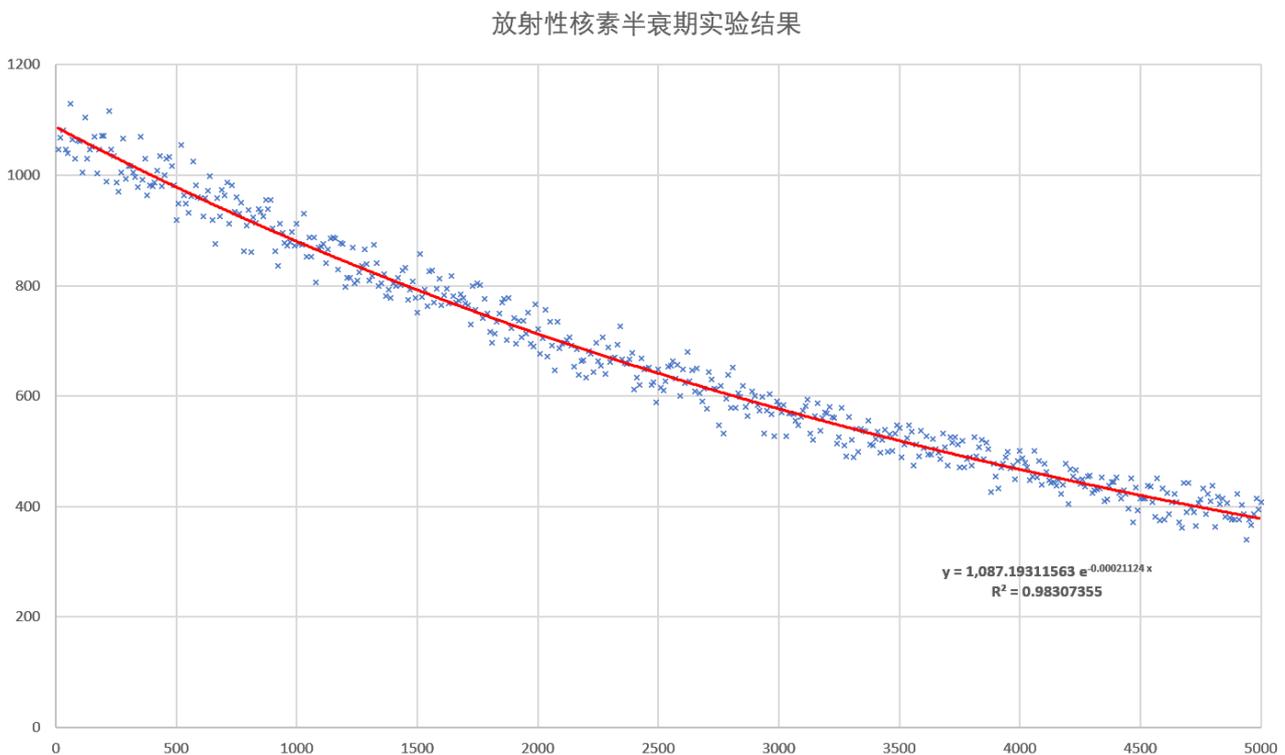


图 1:  $N - t$  图像

同时对其进行指数拟合（实验数据的散点图片绘制采用 Excel，拟合曲线采用 Python-scipy 软件包进行计算得到），这个拟合给出的解析式为：

$$N \approx 1087.19e^{-0.000211t}$$

拟合的相关系数平方为  $r^2 \approx 0.9831$ ，说明拟合效果较好。根据半衰期的意义，我们知道：

$$\lambda = 0.000211 \implies T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx 3285.06s$$

即半衰期约为 3285.06s，大约在 54.75min 左右。查阅数据可以知道，所使用的放射源半衰期为  $t_{1/2} \approx 54.1min$ ，可以知道我们的实验结果和真实结果是非常接近的。



## 误差原因分析

本实验中我们所使用的放射源是  $^{90}\text{Sr}$  放射源，该放射源强度较弱，这使得实验容易受到的本底干扰较大。

另外，实验中发现，旁边的仪器开启、人通过仪器侧边时都会对同一条件的实验结果产生可见的影响；另外放置/移除放射源时，放射强度改变需要弛豫时间，这也可能对实验测量产生影响，并且对相对较弱的放射源影响较大，这也是数据偏离直线的可能原因。

## 5 思考题

### 5.1 活性比较和半衰期数据处理合理性

我们知道放射性活度定义为：

$$A(t) = \Phi\sigma N_t(1 - e^{-\lambda t})$$

查表可知各个半衰期的参数为：

表 1: 部分核素半衰期参数表

同位素丰度	$^{113}\text{In}$	4.28%		$^{115}\text{In}$	95.72%
活化后剩余核	$^{114}\text{In}$	$^{114m}\text{In}$	$^{116}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$
热中子活化截面	3.9b	4.4b	45b	65b	92b
剩余核半衰期	71.9s	50 天	14.2s	54.1min	2.16s

因此活化时间选为：

$$t_0 = 54.1 \times 3 = 162.3\text{min} = 9738\text{s}$$

半衰期与衰减常数的关系为：

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

因此活度可以改为：

$$A(t) = \Phi\sigma N_t(1 - 2^{-\frac{t}{T}})$$

据此可以计算出经过活化之后五种核素的剩余活度为：

表 2: 剩余活度

核素	$^{114}\text{In}$	$^{114m}\text{In}$	$^{116}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$
活度	0.167	$2.94 \times 10^{-4}$	43.07	54.44	88.06

在冷却过程中

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

可以计算出冷却后的活度为：

上面的计算可以得出， $^{116m}\text{In}$  的活度要远高于其他核素所以可以略去其他核素的影响；另外经过两个半衰期后活度仍有 11.2，因此使用单一半衰期处理是很可靠的。



表 3: 剩余活度

核素	$^{114}\text{In}$	$^{114m}\text{In}$	$^{116}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$	$^{116m}\text{In}$
活度	$5.1 \times 10^{-4}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$8.2 \times 10^{-12}$	47.8	$2.1 \times 10^{-84}$

## 5.2 误差控制方法

1. 实验中信号采集时设置一定的触发阈值，只有检测到的强度高于一定数值才会记录，避免了系统误差和其他噪声干扰。
2. 实验测量时间较长，选取  $5000\text{s}$ ，选取合适的测量步长为  $10\text{s}$ ，这样既方便测量，也一定程度上减小了  $\Delta T$  带来的误差；测量本底辐射时，测量时间  $600\text{s}$ ，测量步长为  $10\text{s}$ ，相当于进行了多次测量，降低本底测量时的误差。
3. 根据思考题 1，我们选取了合适的活化辐照时间、冷却时间和测量半衰期的时间，这样既能减小了其他核素影响，又能保证待测核素的放射活度处在合适范围内，可以进行可靠的测量。

## 参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 放射性核素半衰期测量实验讲义. Mar. 30, 2023. URL: <http://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20230330/0eb57d621924a85b9713a54ee6c69fda.pdf> (visited on 04/20/2024).