

# 中子活化后放射性核素半衰期测量

## Part1 实验目的

1. 掌握中等寿命的放射性核素半衰期（天、时、分、秒数量级）的测定方法。
2. 了解产生人工放射性核素的基本知识。
3. 学会使用多功能数字多道的多定标功能。

## Part2 实验原理

### 实验原理

#### 1、半衰期的测定

半衰期是放射性原子核的一条重要的基本性质，每种核素都有它特有的半衰期，因此测定半衰期和测定原子核质量一样，可以用于鉴别原子核。半衰期对研究放射性原子核有重要意义，由半衰期可以确定跃迁级次或多级性。在生产和应用放射性核素时，也需要了解其半衰期对放射性生长或衰变的关系，才能适当的掌握照射时间和不失时机的使用放射性核素。

不同放射性核素半衰期差别很大（从 $10^{-11}$ 秒到 $10^{11}$ 年），不同范围的半衰期测量方法各不相同。ms 以下的短半衰期用核电子学的延迟符合等方法测量。10 年以上的长半衰期用比放射性的方法测量。中等半衰期则可以通过测量衰变曲线求得，本实验测量  $^{116m}\text{In}$  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

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

$n(0)$  (或  $n_0$ ) 为开始测量时的计数率， $n(t)$  为开始测量后  $t$  时刻的计数率， $\lambda$  为衰变常数， $n(0)$  (或  $n_0$ ) 为开始测量时的计数率， $n(t)$  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  $T_{1/2}$  的关系为

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

由计数率的指数衰变规律可得

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

计数率的对数和时间有如图 6-1 的直线关

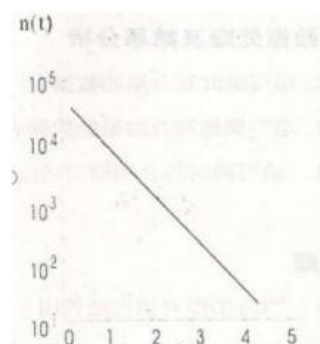


图 6-1 单一放射性核素衰变图

系，用目测作图或者最小二乘法拟合直线可得  $\lambda$ ，再算得  $T_{1/2}$ 。

由于实际上不能测到  $t$  时刻的计数率  $n(t)$ ，测到的只能是某一时间间隔  $\Delta t = t_2 - t_1$  的计数  $N$ ，再由  $N / \Delta t$  求得平均计数率  $\bar{n}$ ， $\bar{n}$  和  $n(t)$  的关系为

$$\bar{n} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt = \frac{n(0)}{\lambda(t_2 - t_1)} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})$$

可将  $\bar{n}$  看作  $t'$  时刻的计数率  $n(t')$ ，即

$$n(0)e^{-\lambda t'} = \bar{n} = \frac{n(0)e^{-\lambda t} [1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}]}{\lambda(t_2 - t_1)}$$

可得到  $t'$  和  $t_1$  的关系为

$$t' = t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{[1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}]}{\lambda(t_2 - t_1)}$$

在  $\lambda \Delta t = \lambda(t_1 - t_2) \ll 1$  的条件下展开  $e^{\lambda \Delta t}$ ，可得到

$$t' \approx t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln [1 - \frac{1}{2}(\lambda \Delta t) + \frac{1}{6}(\lambda \Delta t)^2]$$

进一步展开  $\ln(1-x)$  可得

$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{1}{24} \lambda \Delta t^2 \approx \bar{t} - 0.0289 \times \Delta t \times (\frac{\Delta t}{T_{1/2}})$$

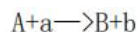
若测量过程控制得好，使

$$0.0289 \times \Delta t \times (\frac{\Delta t}{T_{1/2}}) \ll \bar{t}$$

就可以用  $\bar{n}$  来表示  $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$  时刻的计数率。在综合考虑上述简化原理和  $\Delta t$  测量时间中计数的统计误差后，选取适当的  $\Delta t$ ，可以用  $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$  代替  $t'$ 。

## 2、生产放射性核素的一般知识

将稳定核素 A 放在带电粒子或者中子流中辐照，产生核反应



剩余核素 B 可能是放射性的。若剩余核素的衰变常数为  $\lambda$ ，则在恒定的入射粒子通量  $\phi$  下，放射性核素 B 活度  $A(t)$  按

$$A(t) = \phi \sigma N_1 (1 - e^{-\lambda t})$$

规律生长，其中  $\sigma$  是该反应的反应截面（称为活化截面）， $N_1$  为样品中稳定核素 A 的总数， $A(\infty) = \phi \sigma N_1$  为饱和活度，表 1 给出了产生的活度和辐照时间  $t$  的关系。可以根据生产核素的半衰期和辐照条件权衡确定辐照时间。

表 1 A 随  $t$  的变化关系

$t = nT_{1/2}$	$0.5T_{1/2}$	$1T_{1/2}$	$2T_{1/2}$	$3T_{1/2}$	$4T_{1/2}$	$5T_{1/2}$	$6T_{1/2}$
$A(t)$	$0.293A(\infty)$	$0.5A(\infty)$	$0.75A(\infty)$	$0.875A(\infty)$	$0.938A(\infty)$	$0.969A(\infty)$	$0.985A(\infty)$

天然铟的同位素丰富度及活化反应有关的数据列于表 2。当被激活样品中存在着两种独立的放射性核素时，衰变曲线上的计数率是两种放射性核素的计数率之和

$$n(t) = n_1(t) + n_2(t) = n_1(0)e^{-\lambda_1 t} + n_2(0)e^{-\lambda_2 t}$$

如图 6-1 表示。由总衰变曲线定出较长半衰期  $(T_{1/2})_2$ ，然后从  $n(t)$  中扣除  $n_2(t)$ ，求出  $n_1(t)$ ，再得到  $(T_{1/2})_1$ 。铟活化后生成五种放射性核素和同质异能素，由于同质异能素  $^{116m}\text{In}$  的半衰期和其他四种放射性核素半衰期相差 1-2 个数量级以上，适当选择活化辐照时间和“冷却时间”（即从停止辐照到开始测量活性的时间），可以使其它四种放射性对  $^{116m}\text{In}$  半衰期测量的影响很小，故而可以用单一放射性半衰期的规律处理数据。

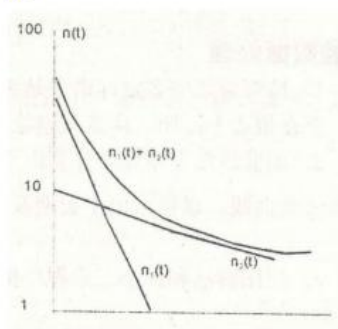


图 6-2 两个独立放射性核素混合衰变曲线

表 2 天然铟中子活化的各种参数

同位素丰度	$^{113}\text{In}$ 4.28%		$^{115}\text{In}$ 95.72%		
活化后剩余核	$^{114}\text{In}$	$^{114\text{m}}\text{In}$	$^{116}\text{In}$	$^{116\text{m}}\text{In}$	$^{116\text{m}}\text{In}$
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

## Part4 实验内容

1. 测量  $^{114}\text{In}$ 、 $^{114\text{m}}\text{In}$  放射性核素的半衰期及误差。
2. 掌握多功能数字多道的多定标功能。

## Part5 实验数据处理

1. 检查记录的多定标谱中是否有明显的外界干扰造成不合理的过高计数，若有将其删除，并在报告中注明。注意只删除计数，而不能去除时间，否则会产生拟合错误。

答：对于实验数据，进行计数的排序后，没有发现很明显的过高的计数，故不删除数据

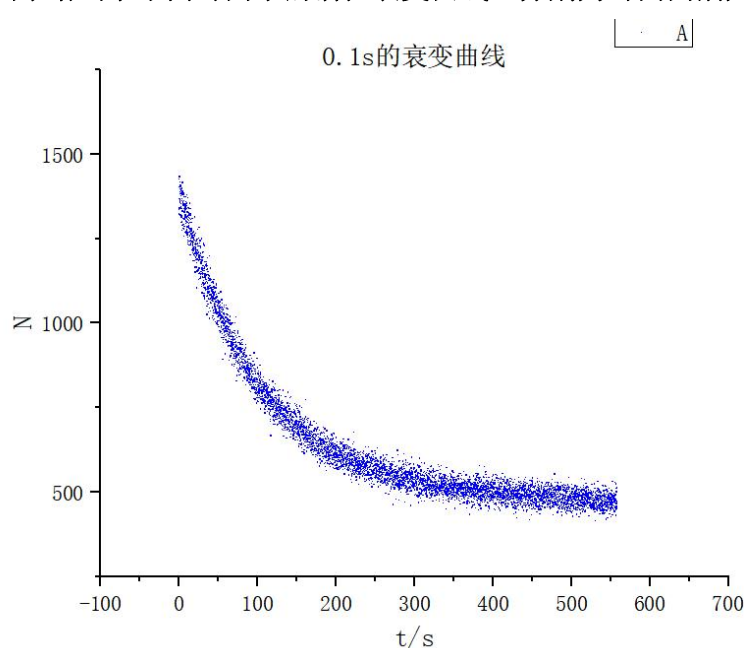
2. 由前后两个本底段计算出平均本底计数率，在衰变曲线中扣除本底后，

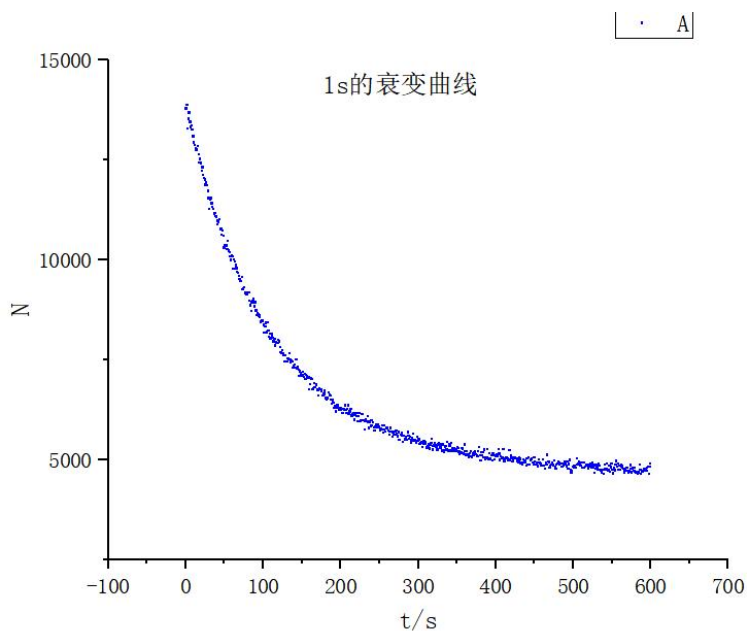
得到活性净计数衰变曲线，以供求出半衰期及其误差  $T_{1/2} + \Delta T_{1/2}$

由  $\bar{n} = \frac{N}{\Delta t}$  计算对于 0.1s 和 1s 我们结合两次本底的测量数据可得到平均计数率为：

0.1s	1s
1.9960	20.15

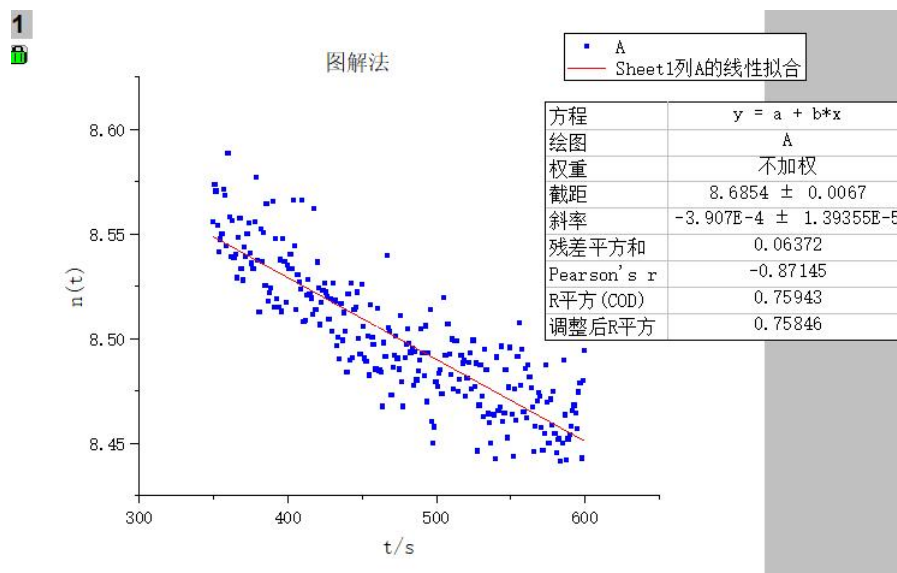
图中给出了不同时间下的活性衰变曲线（分别为时间间隔为 0.1s 以及时间间隔为 1s）





3. 用图解法和最小二乘程序拟合两种方法求出半衰期及其误差  $T_{1/2} + \Delta T_{1/2}$
4. 图解法是在标出活性及其统计误差范围-时间的半对数标绘上，用目测法作出直线，进而求出  $_{1/2}T$  可以只给  $_{1/2}T$ ，而不给  $_{1/2}\Delta T$

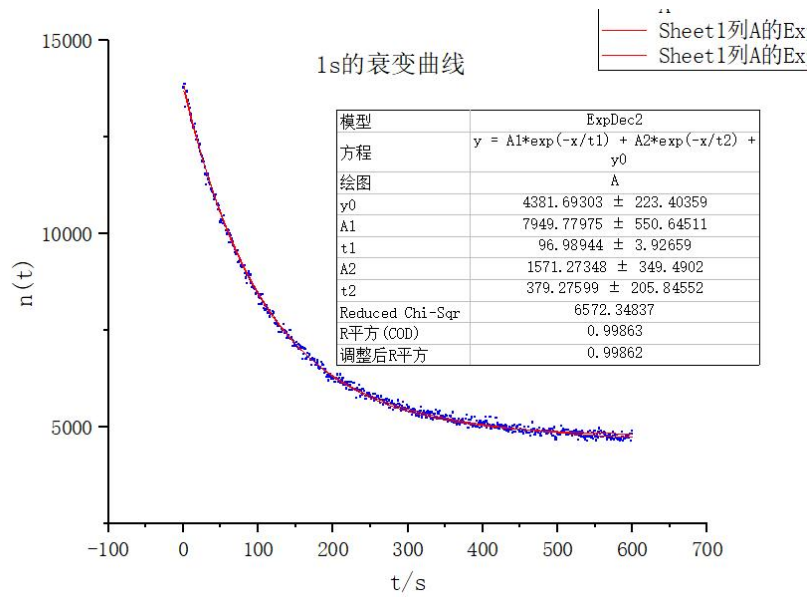
图解法求其半衰期；从衰变曲线中知道，取 350s 以后的数据较为合理；由数据拟合可以得到半衰期为：



则  $T_{1/2} = \ln 2 \div (3.907 \times 10^{-4}) = 29.57 \text{ min}$



下面用最小二乘法拟合求半衰期



由拟合所得数据可知对于  $^{116m}\text{In}$  :  $T_{1/2} = \ln 2 \times 379.28 \times 6 = 26.29\text{min}$

$$\Delta T_{1/2} = \ln 2 \times 205.84 \times 6 = 14.27\text{min}$$

对于  $^{114}\text{In}$   $T_{1/2} = \ln 2 \times 96.99 = 67.22\text{s}$

$$\Delta T_{1/2} = \ln 2 \times 3.93 = 2.72\text{s}$$

**PS:** 本次实验中实验时间偏短，所以误差相对较大

## Part6 思考题

- 1、用表 2 中给出的数据，取活化时间为 3 个  $^{116m}\text{In}$  半衰期、冷却时间为 10 分钟、共测量 2 个  $^{116m}\text{In}$  衰期的情况下，计算出钢片中其它四种半衰期活性与  $^{116m}\text{In}$  活性的比例。以说明用单一半衰期处理  $^{116m}\text{In}$  半衰期的可靠性。

答： 活化时间为  $54.1\text{min} \times 3 = 162.3\text{min}$

由：  $A(\infty) = \Phi \sigma N$  计算，且  $\sigma$  可通过查表获取

核素	$^{116\text{m}}\text{In}$ (65)	$^{114}\text{In}$	$^{116}\text{In}$	$^{114\text{m}}\text{In}$	$^{116\text{m}}\text{In}$ (92b) )
A	54.44	3.34	43.07	0.026	88.06

2、结合本实验的具体装置和安排说明本实验采取了哪些具体措施，以降低统计误差而提高测量精度的？采取了哪些措施使本底统计误差的影响可以忽略？

答：本实验中若有不合理的数据及时删除，以及采用精确的函数等减少了相关的误差。另外，选择合适的拟合函数，以及选择区间合适的数据也是较为重要的。