

中子活化后放射性核素半衰期测量

赵宇航

摘要: 本实验测定了 In 中子活化后放射的粒子数, 从而确定其半衰期, 并就研究合理性进行了讨论。

1 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。

$n(0)$ (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, λ 为衰变常数, 衰变常数和半衰期 $T_{1/2}$ 的关系为

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

由计数率的指数衰变规律可得

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

2 实验原理

计数率的对数和时间有如图 6-1的直线关系, 用目测作图或者最小二乘法拟合直线可得 $-\lambda$, 再算得 $T_{1/2}$ 。

2.1 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}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

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

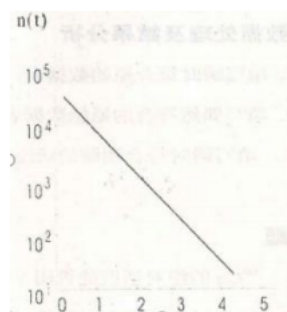


图 6-1 单一放射性核素衰变图

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

$$\bar{n} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} n(t) dt = \frac{n(0)}{\lambda(t_2 - t_1)} (e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}) \quad (4)$$

可将 \bar{n} 看作 t' 时刻的计数率 $n(t')$, 即

$$n(0)e^{-\lambda t'} = \bar{n} = \frac{n(0)e^{-\lambda t_1} [1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}]}{\lambda(t_2 - t_1)} \quad (5)$$

可得到 t' 和 t_1 的关系为

$$t' = t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1 - e^{-\lambda(t_2 - t_1)}}{\lambda(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

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

$$t' = t_1 - \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 - \frac{1}{2}(\lambda \Delta t) + \frac{1}{6}(\lambda \Delta t)^2 \right] \quad (7)$$

进一步展开 $\ln(1 - x)$ 可得

$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2} - \frac{1}{24} \lambda \Delta t^2 \approx \bar{t} - 0.0289 \times \Delta t \times \left(\frac{\Delta t}{T_{1/2}} \right) \quad (8)$$

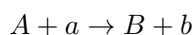
若测量过程控制得好, 使

$$0.0289 \times \Delta t \times \left(\frac{\Delta t}{T_{1/2}} \right) \gg \bar{t} \quad (9)$$

就可以用 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 Δt 测量时间中计数的统计误差后, 选取适当的 Δt , 可以用 $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ 代替 t' 。

2.2 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 ϕ 下, 放射性核素 B 活度 A(t)按

$$A(t) = \phi \sigma N_1 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (10)$$

规律生长, 其中 σ 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

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

天然钨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

$$n(t) = n_1(t) + n_2(t) = n_1(0)e^{-\lambda_1 t} + n_2(0)e^{-\lambda_2 t} \quad (11)$$

如图 6-1 表示。由总衰变曲线定出较长半衰期 $\Phi(T_{1/2})_2$, 然后从 $n(t)$ 中扣除 $n_2(t)$, 求出 $n_1(t)$, 再得到 $\Phi(T_{1/2})_1$ 。钨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}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}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。

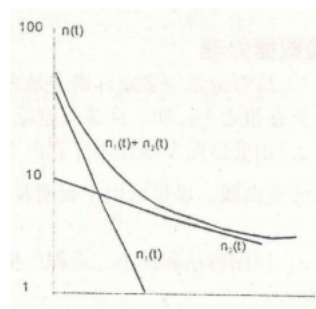


图 6-2 两个独立放射性核素混合衰变曲线

表 2 天然钨中子活化的各种参数

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

3 实验结果

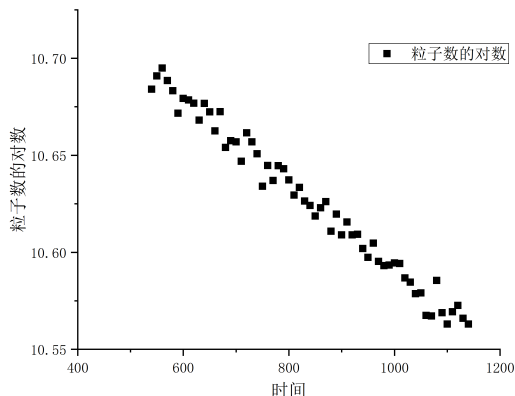
前后两个本底段计算出平均本底计数分别为 19.83, 20.33。总平均 20.08, 取 20。

3.1 图解法

由于实验中中子活化后立即开始了测量, 我们去前九分钟的数据。考虑到外界干扰, 已删除不合理的过高计数。对所测粒子数取对数作图如下所示

使用下式进行拟合

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1} + A_2 e^{-x/t_2} \quad (13)$$



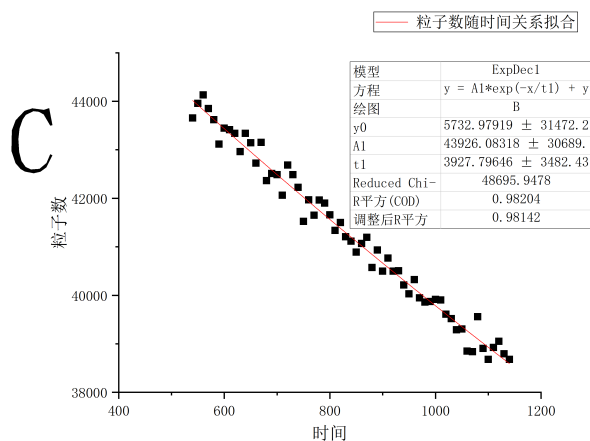
通过目测，可知其斜率大约是 2.2×10^{-4} ，利用式(2)可知其半衰期为52.5分钟。

3.2 最小二乘法

运用公式

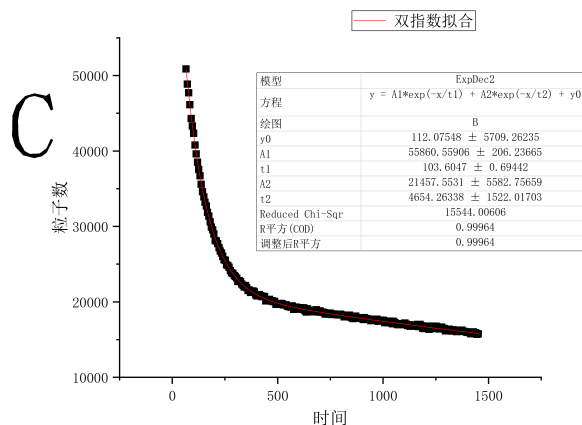
$$y = y_0 + Ae^{-x/t_0} \quad (12)$$

其中，半衰期 $T_{1/2} = t_0 \ln 2$ 。用Origin拟合结果如下图所示



可以算出半衰期及其误差 $T_{1/2} \pm \Delta T_{1/2} = 45 \pm 40$ 分钟。

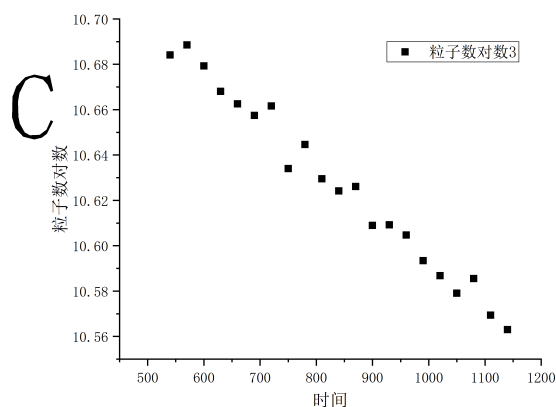
可见其误差过大，考虑到实验设备涨落太大而所选实验数据太少。我们结合 In 的衰变原理，只去除前一分钟的数据，把 ^{114}In 的放射也考虑进来，

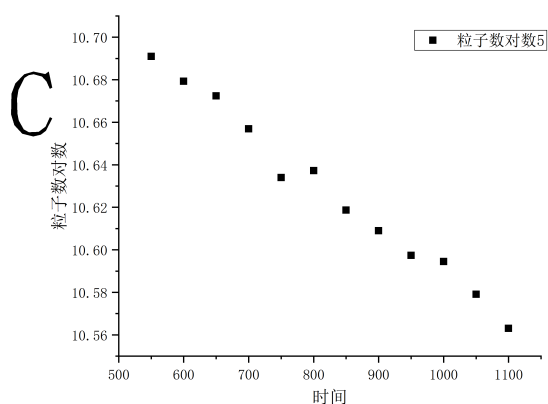


如上图所示，可知 In 半衰期及其误差 $T_{1/2} \pm \Delta T_{1/2} = 54 \pm 18$ 分钟。本底的误差相对这个值很小，我们忽略不计。

3.3 间断多定标谱

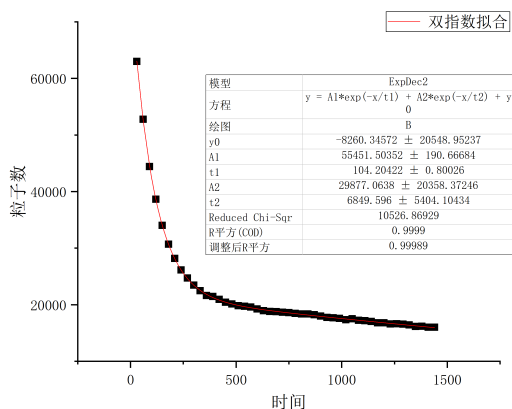
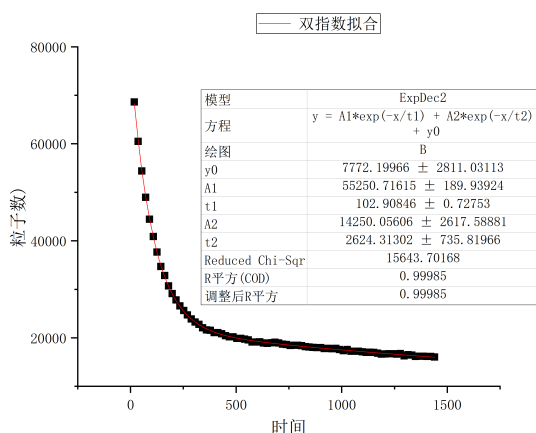
活性测量间隔为 3 道，二次活性测量时间间隔为 5 道，起始测量时间为 80 道。两次测量图解法如图





两次斜率分别为 2.17×10^{-4} , 2×10^{-4} 。利用式(2)分别求其半衰期为53.3分钟、57.8分钟。

活性测量间隔为3道，二次活性测量时间间隔为5道，起始测量时间为10道。双指数拟合如下图所示



可以算出半衰期及其误差 $T_{1/2} \pm \Delta T_{1/2} = 43 \pm 12$ 分钟和 79 ± 62 分钟。属实不能随便删点，虽然54仍然在区间之内，但误差太大。

第一道和最后一道不取是因为开始测量可能产生干扰场，对数据影响较大。

4 讨论

4.1 单一半衰期处理的可靠性

取活化时间为3个 ^{116m}In 半衰期，即162.3min。由表1及式(11)分别计算 In 活性，注意到 ^{114}In 近乎完全激活，设其活性为 $3.9 \times 0.0428 = 0.16692$ 。依次得 ^{114m}In 活性0.010， ^{116}In 活性43.074， ^{116m}In 活性54.4408和88.0624。

由表2，我们直接以相对活性求差， $t \in (10\text{min}, 118.2\text{min})$ 。

$$A = 2^{-\frac{t_2}{T_{1/2}}} - 2^{-\frac{t_1}{T_{1/2}}} \quad (14)$$

依次求得： ^{114}In 所占活性为 5.1×10^{-4} ， ^{114m}In 所占活性为 1.0×10^{-5} ， ^{116}In 所占活性为 8.2×10^{-12} ， ^{116m}In 所占活性为35.88979和 2.1×10^{-82} 。

那么实验所测 ^{116m}In 活性占比为99.9985%。

4.2 具体措施

增加了铅片，屏蔽了一些外界干扰。测量多道，减少统计误差。 $\lambda \Delta t = \lambda(t_1 - t_2) \gg 1$ 的条件下，可以用 $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2}$ 代替 t' 。

测量了两次本底取平均值，减少误差。在衰变曲线中扣除了本底。本身误差比较大，所以本底误差没那么重要。