

# 放射性核素半衰期测量 · 预习报告

唐延宇\* PB22030853

2025 年 4 月 11 日

## 1 实验目的

本实验旨在使我们系统地掌握对中等寿命放射性核素进行半衰期测定的方法。通过本实验,我们将学会利用闪烁探测器和多道分析器记录核素衰变过程中的计数率变化,并通过数据处理获得核素的衰变常数和半衰期。同时,本实验要求我们了解人工放射性核素的产生原理,并合理地选择辐照时间和冷却时间,以便获得理想的测量条件。最后,我们将熟练掌握多定标功能的使用方法,并能够在实验报告中对测量结果进行误差分析与讨论。

## 2 实验原理

放射性核素的半衰期  $T_{1/2}$  是描述其衰变速率的基本物理量,它与衰变常数  $\lambda$  满足关系式

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

对于单一放射性核素,其瞬时计数率  $n(t)$  随时间  $t$  呈指数衰减,其数学表达式为

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

其中  $n(0)$  表示测量开始时刻的计数率。通过对实验测得的计数率取自然对数后得到的直线斜率,我们可以反算出衰变常数  $\lambda$ ,进而计算出半衰期  $T_{1/2}$ 。

由于在实验中无法直接测得某一时刻的瞬时计数率,我们将记录在时间区间  $\Delta t = t_2 - t_1$  内的总计数  $N$ ,并以平均计数率

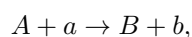
$$\bar{n} = \frac{N}{\Delta t}$$

代替瞬时计数率。只要满足  $\lambda \Delta t \ll 1$ ,就可以将  $\bar{n}$  近似视为发生在时间

$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

的瞬时计数率。基于此近似,我们仍可以对  $\ln \bar{n}$  与  $t'$  作线性拟合,从而获得衰变常数。

人工放射性核素的产生通常通过在中子源或粒子加速器中将稳定核素  $A$  置于高通量粒子流或中子通量中进行辐照来实现。在辐照过程中,靶核与入射粒子发生核反应



其中  $B$  即为所需的放射性核素。放射性核素  $B$  的活度  $A(t)$  随辐照时间  $t$  增长,其表达式为

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

---

\*近代物理系, 19942431972, [yanyutang@mail.ustc.edu.cn](mailto:yanyutang@mail.ustc.edu.cn)

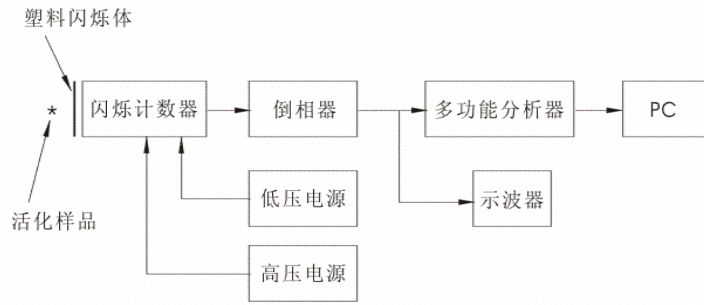


图 1: 实验装置示意图

其中  $\Phi$  为入射粒子通量,  $\sigma$  为活化截面,  $N_A$  为靶核总数。随着辐照时间的延长, 活度逐渐趋近于饱和值  $A(\infty) = \Phi \sigma N_A$ 。在本实验中, 我们需要根据目标核素的半衰期和所需活度, 合理选择辐照时间和冷却时间, 以确保测量时既有足够的计数统计量, 又能避免多组分衰变的干扰。

多道分析器(MCA)在多定标(MCS)模式下可以将测量时间轴划分为一系列等宽的时间道。每一道所记录的脉冲计数即对应该时间段内的衰变计数, 通过读取多道分析器的输出谱图, 我们可以直接获得计数随时间变化的衰变曲线。在设置时间道宽  $\Delta t$  时, 需要兼顾  $\lambda \Delta t \ll 1$  的近似条件与每道内足够计数以降低统计误差的要求。

### 3 实验装置与步骤

本实验所用装置主要包括 Am-Be 中子源、石蜡慢化筒、待测样品、塑料闪烁探测器、倒相器、前置放大器、多道分析器及计算机系统。实验步骤如下:

1. 根据所选放射性核素的半衰期和活化截面, 我们首先在 Am-Be 中子源与石蜡慢化筒中选择合适的辐照时间和样品位置, 对稳定核素靶材进行中子活化, 以产生所需的放射性核素。
2. 活化完成后, 我们迅速将样品转移至闪烁探测器前方, 并通过倒相器将探测器输出的负极性脉冲转换为正极性脉冲, 然后将信号送入前置放大器以提高信噪比。
3. 在多道分析器上设置多定标功能, 并选择合适的时间道宽  $\Delta t$ 。时间道宽应兼顾统计精度与衰变速率近似不变的要求, 通常取为目标核素半衰期的 5% 至 10%。
4. 在正式测量之前, 我们需要先进行至少 10 分钟的本底测量, 以获取环境本底计数率。随后立即放入活化样品, 连续记录衰变曲线, 直至测量时间超过样品半衰期的两倍以上。测量结束后, 再次进行本底测量以确认环境背景的稳定性。
5. 最后, 我们将记录的多定标谱导入计算机, 扣除前后本底平均值后, 计算每道的平均计数率, 并记录对应的中心时刻  $t'$ 。对  $\ln \bar{n}$  与  $t'$  作图并进行线性拟合, 从拟合斜率得到衰变常数  $\lambda$ , 进而计算半衰期  $T_{1/2}$ 。

### 4 数据处理与误差分析

在数据处理过程中, 我们首先需要对原始计数数据进行本底扣除, 并将扣除本底后的平均计数率  $\bar{n}$  转换为自然对数形式  $\ln \bar{n}$ 。随后, 以  $t'$  为横坐标, 以  $\ln \bar{n}$  为纵坐标, 利用最小二乘法进行线性拟合。拟合得到的斜率  $k$  与衰变常数  $\lambda$  满足  $k = -\lambda$ , 从而计算出半衰期  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ 。

误差来源主要包括计数的泊松统计波动和拟合过程中的系统误差。计数的统计不确定度为  $\sigma_N = \sqrt{N}$ , 对应平均计数率的不确定度为  $\sigma_{\bar{n}} = \sqrt{N} / \Delta t$ 。在进行对数变换时, 需要采用误差传播公式计算

$\ln \bar{n}$  的不确定度。拟合误差可由最小二乘法给出的斜率标准误差获得。为保证结果的可靠性, 我们应选择合适的  $\Delta t$ , 使得每道计数  $N$  不低于几十次, 以将统计相对误差控制在 10% 以内。

## 5 领域前沿调研

近年来, 随着电子学和计算技术的迅猛发展, 数字化脉冲处理 (DPP) 技术已经成为放射性衰变测量领域的重要趋势。该技术利用高速模数转换器 (ADC) 对闪烁探测器输出的脉冲进行数字化采样, 并在现场可编程门阵列 (FPGA) 中实时完成基线恢复、数字滤波和脉冲形状分析, 从而显著提高了时间分辨率和能量分辨率。

与此同时, 机器学习方法在衰变曲线分析中也展现出巨大潜力。研究者利用神经网络和贝叶斯推断模型, 对低统计条件下的衰变数据进行去噪和参数估计, 从而在计数较少的情况下依然能够获得精确的半衰期测量结果。

在探测材料方面, 新型无机闪烁体如  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  和  $\text{CeBr}_3$  因其高光产率和短衰减时间被广泛应用于放射性测量。此外, 宽禁带半导体材料如碳化硅 ( $\text{SiC}$ ) 和氮化镓 ( $\text{GaN}$ ) 也正逐步进入核测量领域, 它们能够在高温和高辐射环境下保持稳定性能, 为野外或工业现场测量提供了新的解决方案。

在核医学应用中, 对短寿命  $\beta^+$  和  $\beta^-$  核素的精确半衰期测量对于剂量学计算和治疗方案优化具有重要意义。最新研究采用多探测器阵列和数据融合技术, 将衰变事件的空间和时间信息结合, 通过数值模拟和实验校准, 将半衰期测量不确定度降低至  $10^{-4}$  级别, 为精确治疗和诊断提供了坚实基础。

# 放射性核素半衰期测量

唐延宇\* PB22030853

2025 年 4 月 22 日

## 摘要

本实验通过使用中子源对钢样品进行辐照活化, 然后测量样品的计数, 实现了对放射性核素半衰期的测量. 实验中, 我们使用了闪烁探测器和多道分析器记录核素衰变过程中的计数率变化, 并通过数据处理获得核素的衰变常数和半衰期. 实验结果表明, 测得的半衰期为  $T_{1/2} = (3287 \pm 19) \text{ s}$ , 与资料中给出的理论值  $54.1 \text{ min}$  相当接近, 表明实验数据较为可信.

关键词: 放射性核素; 半衰期; 多道分析仪; 衰变常数

## 1 实验目的

本实验旨在使我们系统地掌握对中等寿命放射性核素进行半衰期测定的方法. 在本实验中, 我们利用闪烁探测器和多道分析器记录核素衰变过程中的计数率变化, 并通过数据处理获得核素的衰变常数和半衰期. 同时, 本实验要求我们了解人工放射性核素的产生原理, 并合理地选择辐照时间和冷却时间, 以便获得理想的测量条件.

## 2 实验原理

放射性核素的半衰期  $T_{1/2}$  是描述其衰变速率的基本物理量, 它与衰变常数  $\lambda$  满足关系式

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

对于单一放射性核素, 其瞬时计数率  $n(t)$  随时间  $t$  呈指数衰减, 其数学表达式为

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

其中  $n(0)$  表示测量开始时刻的计数率. 通过对实验测得的计数率取自然对数后得到的直线斜率, 我们可以反算出衰变常数  $\lambda$ , 进而计算出半衰期  $T_{1/2}$ .

由于在实验中无法直接测得某一时刻的瞬时计数率, 我们将记录在时间区间  $\Delta t = t_2 - t_1$  内的总计数  $N$ , 并以平均计数率

$$\bar{n} = \frac{N}{\Delta t}$$

代替瞬时计数率. 只要满足  $\lambda \Delta t \ll 1$ , 就可以将  $\bar{n}$  近似视为发生在时间

$$t' = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

的瞬时计数率. 基于此近似, 我们仍可以对  $\ln \bar{n}$  与  $t'$  作线性拟合, 从而获得衰变常数.

---

\*近代物理系, 19942431972, [yanyutang@mail.ustc.edu.cn](mailto:yanyutang@mail.ustc.edu.cn)

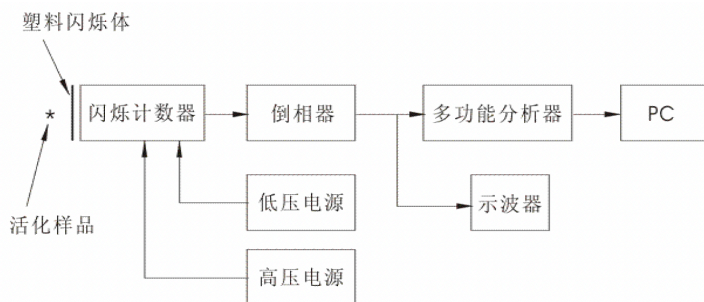
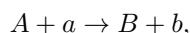


图 1: 实验装置示意图

人工放射性核素的产生通常通过在中子源或粒子加速器中将稳定核素  $A$  置于高通量粒子流或中子通量中进行辐照来实现。在辐照过程中，靶核与入射粒子发生核反应



其中  $B$  即为所需的放射性核素。放射性核素  $B$  的活度  $A(t)$  随辐照时间  $t$  增长，其表达式为

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

其中  $\Phi$  为入射粒子通量， $\sigma$  为活化截面， $N_t$  为靶核总数。随着辐照时间的延长，活度逐渐趋近于饱和值  $A(\infty) = \Phi \sigma N_t$ 。在本实验中，我们需要根据目标核素的半衰期和所需活度，合理选择辐照时间和冷却时间，以确保测量时既有足够的计数统计量，又能避免多组分衰变的干扰。

多道分析器(MCA)在多定标(MCS)模式下可以将测量时间轴划分为一系列等宽的时间道。每一道所记录的脉冲计数即对应该时间段内的衰变计数，通过读取多道分析器的输出谱图，我们可以直接获得计数随时间变化的衰变曲线。在设置时间道宽  $\Delta t$  时，需要兼顾  $\lambda \Delta t \ll 1$  的近似条件与每道内足够计数以降低统计误差的要求。

### 3 实验装置与步骤

本实验所用装置主要包括 Am-Be 中子源、石蜡慢化筒、待测样品、塑料闪烁探测器、倒相器、前置放大器、多道分析器及计算机系统。实验步骤如下：

1. 根据所选放射性核素的半衰期和活化截面，我们首先在 Am-Be 中子源与石蜡慢化筒中选择合适的辐照时间和样品位置，对稳定核素靶材进行中子活化，以产生所需的放射性核素。
2. 活化完成后，我们迅速将样品转移至闪烁探测器前方，并通过倒相器将探测器输出的负极性脉冲转换为正极性脉冲，然后将信号送入前置放大器以提高信噪比。
3. 在多道分析器上设置多定标功能，并选择合适的时间道宽  $\Delta t$ 。时间道宽应兼顾统计精度与衰变速率近似不变的要求，通常取为目标核素半衰期的 5% 至 10%，在本实验中，我们选择  $\Delta t$  为 10s。
4. 在正式测量之前，我们需要先进行至少 10 分钟的本底测量，以获取环境本底计数率。随后立即放入活化样品，连续记录衰变曲线，直至测量时间超过样品半衰期的两倍以上。测量结束后，再次进行本底测量以确认环境背景的稳定性。
5. 最后，我们将记录的多定标谱导入计算机，扣除前后本底平均值后，计算每道的平均计数率，并记录对应的中心时刻  $t'$ 。对  $\ln \bar{n}$  与  $t'$  作图并进行线性拟合，从拟合斜率得到衰变常数  $\lambda$ ，进而计算半衰期  $T_{1/2}$ 。

## 4 实验结果与数据处理

根据实验得到的结果, 600 s 内测量得到的本底计数平均值为

$$n_0 = 10.79/(10\text{ s}),$$

之后用所测得到的数据减去本底计数, 对得到的纯计数进行指数拟合, 得到的结果如图所示, 其中拟合使用了 Python-scipy 软件包, 图线绘制使用了 Python-matplotlib 软件包, 拟合参数已标注在图中.

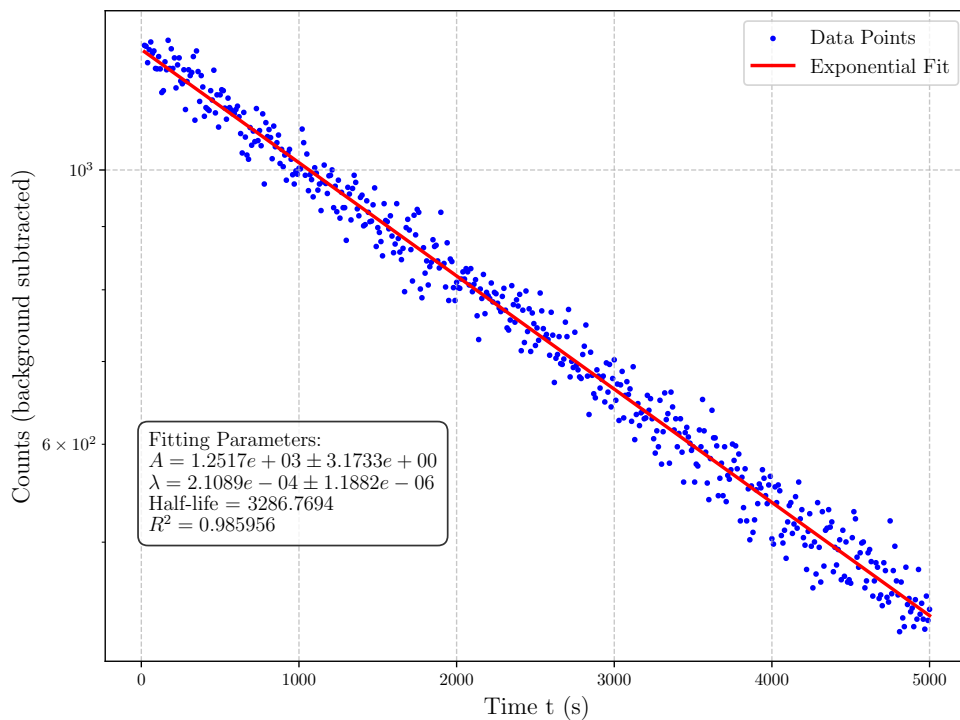


图 2: 半衰期拟合:  $N = A \exp(-\lambda t)$

则根据图中数据可得,

$$N = 1251.7 \exp(-0.00021t),$$

半衰期的误差为

$$\Delta T_{1/2} = \frac{\ln 2 \Delta \lambda}{\lambda^2} = 19\text{ s},$$

拟合优度参数  $R^2 = 0.99860$ , 表明拟合效果较好, 从而测得的放射源半衰期

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{0.00021} = (3287 \pm 19)\text{ s}.$$

即实验测得的半衰期大约为 54.78 min, 这与资料中给出的理论值 54.1 min 相当接近, 表明实验数据较为可信. 本实验可能的误差来源主要为放射源中剩余混杂的  $^{114m}\text{In}$  带来的干扰, 以及本底及电路中存在的噪声.

## 5 实验讨论（思考题）

### 5.1 活性比较与半衰期数据处理合理性分析

根据放射性同位素活度公式

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

查阅表格可得铟各个同位素衰变数据如表1所示。由此，可选择活化时间为

表 1: 铟同位素的活化参数表

同位素丰度	<sup>113</sup> In 4.28%		<sup>115</sup> In 95.72%		
活化后剩余核	<sup>114</sup> In	<sup>114m</sup> In	<sup>116</sup> In	<sup>116m</sup> In	<sup>116m</sup> 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

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

活度公式可根据半衰期定义改写为

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

故经过活化后的各核素活度如表2所示 冷却过程中，放射性随时间按指数衰减规律变化

表 2: 核素活度对比(活化后)

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

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t},$$

从而经过约 10 min 的冷却后，剩余活度如表3所示。由此可得此时 <sup>116m</sup>In 的同位素活度远高于其他

表 3: 核素活度对比(冷却后)

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

同位素，故可视为单一衰变处理，并直接忽略其他核素的影响。

### 5.2 误差控制措施

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 5000s，选取合适的测量步长为 10s，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 600s，测量步长为 10s，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. 2023.03.30. url:  
<http://pems.ustc.edu.cn/>