

五. 放射性测量

1. 放射性测量

常用的核辐射探测器有气体探测器（包括电离室、正比计数器、G—M 计数管）、闪烁计数器和半导体探测器。

电离探测器是根据射线在气体或固体中的电离效应而制作的探测器，前者为气体探测器，后者为固体探测器，又称半导体探测器。

表 5-1 三种气体探测器的物理性能及其应用

探测器 性能	电离室	正比计数器	G—M—计数管
基本原理和特点	完全收集由带电粒子所引起的全部电离离子	能使由带电粒子所引起的初始总电离成比例放大	在一定电压下任何入射粒子，只要在灵敏区内产生一对离子，收集的电荷数是一常数
气体分子电离后的运动	不存在离子复合过程，也不存在气体放大过程	有气体放大作用 ($10^3 \sim 10^4$)，在一定的电压下，收集到的电荷与初始总电离成正比	有气体放大作用 (10^8)，收集到的电荷数与初始电离无关
输出信号幅度	其大小与入射粒子能量成正比，较小，对 α 粒子约为几 mV，对 β 粒子为几 μ V，需要高倍放大	其大小与入射粒子能量成正比，有放大作用 ($10^3 \sim 10^4$)，输出信号高达 50mV，只需要低放大倍数	其大小不反映粒子能量的大小，有很高的放大作用，一般可达几伏甚至几十伏，不需放大
对电源稳定度的要求	电压增大时，输出信号幅度不变，不得低于电离室工作区电压，对电源稳定度要求不高	电压增大时，输出信号幅度变大，对电源稳定度要求极高	电压增大时，输出信号幅度变大，但对各种能量粒子仍以同样幅度输出，对电源稳定度要求不高
电场强度	$\sim 10^2$ V/cm	$10^3 \sim 10^4$ V/cm	大于 10^4 V/cm
死时间(μ s)	1	1~2	100 ~300
能量分辨	对 α 粒子 0.4%	对 X 射线 10 keV 为 5%，对于 β 100 keV 1.8%	没有
探测效率	对于充气电离室可达 100%	用无窗计数器，对于 α 和 β 最好是 50%	对于 γ 1%，对于 β 可达到正比计数器水平
主要应用	α 和 β 粒子以及 γ 射线	α 和 β 粒子和 X 射线	β 粒子和 γ 射线
价格比(包括配套仪器)	较贵	贵	便宜

表 5-2 在气体中形成一个离子对所需平均能量

气体种类	电子所需要的值*	正电子所需要的值	α 粒子所需要的值
He	41.3 $\pm$ 1.0	45.2 $\pm$ 0.9(3.6)***	42.7(5)
Ne	35.4 $\pm$ 0.9	39.3 $\pm$ 0.8(3.6)	36.8(5)
Ar	26.4 $\pm$ 0.5	27 $\pm$ 1(0.01-4)	26.4(5)
Kr	24.4 $\pm$ 0.3	23.0 $\pm$ 0.5(3.6)	24.1(5)
Xe	22.1 $\pm$ 0.1	20.5 $\pm$ 1.2(3.6)	21.9(5)
H ₂	36.5 $\pm$ 0.3	—	36.43($\sim$ 5)
O ₂	34.8 $\pm$ 0.2	36.5 $\pm$ 1.5(0.02-4)	36.39 $\pm$ 0.23 (5.3)
空气	30.8 $\pm$ 0.4	—	32.24 ($\sim$ 5)
H ₂ O	33.97 $\pm$ 0.05	35.18(1.8)	35.08 ($\sim$ 50)
CH ₄	29.6 $\pm$ 0.3	—	—
CO ₂	27.3 $\pm$ 0.3	30.5 $\pm$ 1.0(0.0025-0.5)	29.11($\sim$ 5)
	33.0 $\pm$ 0.7	34.5 $\pm$ 1.5(0.03-2)	34.21($\sim$ 5)
		31.0 $\pm$ 1.5(0.02-3)	37 $\pm$ 1(0.1)
与组织等效的气体**			33 $\pm$ 1(1)
			31 $\pm$ 1(10)

*³⁵S 、⁹⁰Y β 射线，¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 次级电子

**组成 (%分压): CH₄ 64.4 , CO₂ 32.4 , N₂ 3.2

***括号内数值荷电粒子能量 (MeV)

闪烁计数器是利用射线与物质相互作用时产生发光效应进行测量的一种探测器。射线作用于闪烁晶体时，晶体分子受激，退激时发射荧光。如果让荧光射向具有光电放大作用的光电倍增的光阴极，通过光电效应在光阴极上打出光电子。光电子又通过倍加放大形成可探测的电脉冲讯号。

表 5-3 某些重要闪烁体的特性

闪烁体	最大发射波长 A	衰 减 常 数(μ s)	密度 g/cm	相对脉冲幅度	α/β	特点及用途
NaI(Tl)	4100	0.25	3.67	210	0.5	能量分辨好，但易潮解，需密封，主要用于 γ 射线测量
CsI(Tl)	4200 $\sim$ 5700	1.1	4.51	55	0.8	能量分辨差，不需密封，主要用于 γ 射线及带电粒子测量
LiI(Eu)	4400	1.4	4.06	74	n/ β =0.93	吸水，易辐射损伤，用于中子测量
ZnS(Ag)	4500	10.0	4.09	200		透明性不好，用于 α 及裂变碎片测定 掺有 B 或 LiF 用于中子测量
蒽	4400	0.032	1.25	100	0.1	发光效率高，易碎，用于带电粒子测量
苣	4100	0.006	1.16	60	0.1	发光效率比蒽小，但衰变常数小，适宜于快速测量，易碎

塑料	3500~4500	0.003~0.005	1.06	28~48	0.09	易制成不同形状，价低，用于带电粒子测量
液体闪烁体	3500~4500	0.002~0.008	0.86	28~48	0.09	可将样品置于或溶于闪烁体中，适于 ^3H ， ^{14}C 等低能 β 射线和 α 粒子的测量

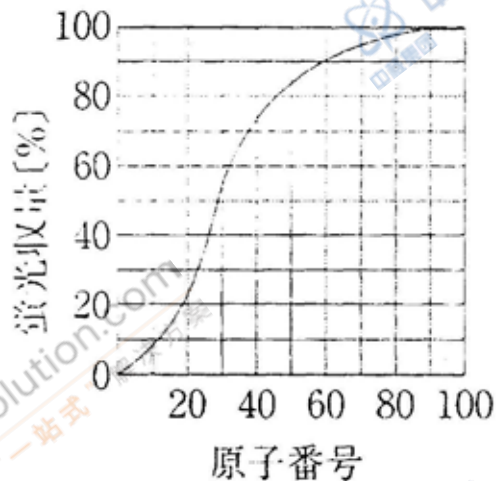


图 5-1 荧光产额与原子序数的关系

K 壳层荧光产额 Y_k 可以近似的表示为：

$$Y_k = 1 / [1 + (\frac{33.6}{Z})^{3.5}]$$

半导体探测器属于电离型探测器。在原理上可视为气体电离探测器的固体等效物。根据半导体材料的性质可分为本征型、化合物型和锂漂移型。

作为电离型核探测器必须满足三个条件：

- (1) 射线在介质中能产生载流子，即能携带电荷的电子和空穴，而且产生一对载流子所需的平均能量越小越好。
- (2) 载流子在介质中的漂移长度，必须大于电极之间的距离。
- (3) 探测器介质必须有足够的电阻率 ($>10^9 \Omega \cdot \text{cm}$)。
- (4)

表 5-4 在绝缘体和半导体中形成一电子空穴对所必须的平均能量

固体种类	E (eV)
金刚石(C)	18
Si	3.6
Ge	2.9
SiC	9.0
AgCl	7.6
GaAs	4.6
CdS	7.25
CdTe	4.65
PbO	8.0

表 5-5 几种主要半导体探测器的性能和特点

探测器名称	探测射线	能量分辨率 FWHM	工作温度, K	特点
砷化镓	低能 γ 和 X 射线	1.18keV (^{57}Co 122 keV)	130	用于低能 γ , X 射线测量, 可在室温下保存和使用
硅面垒	α , β 射线	13keV(Cs 661keV 内转换电子) 2.1keV(Cs 661keV 内转换电子) 13keV(^{241}Am 5.486MeV α 射线) <10keV(^{241}Am 5.486MeV α 射线)	室温 135 室温 135	能量分辨较高, 工艺简单, 应用方便, 但易受环境影响
Si(Li)	X 射线	160eV (5.9keV X 射线)	77	能量分辨率高
Ge(Li)	γ 射线	1keV Cs 661keV γ 射线)	77	能量分辨率高, 可制成较大体积的晶体, 提高效率, 工艺复杂, 周期长, 储存和使用需在 77K 低温下
高纯锗	γ , X 射线	160eV (5.9keV X 射线) 1.75keV(^{60}Co 1.33 MeV)	77	能量分辨率高, 工艺较简单, 周期短, 不使用时可在室温下存放

低能光子源的能谱和光子输出率的测量比较复杂, 各种探测器在不同能区, 响应是不一样的。

表 5-6 探测器对低能光子的有效工作区

探测器	最有效的能量响应废物。keV
氡-甲烷正比计数器	3~10
Si(Li) 半导体探测器	1~100
薄碘化钠晶体探测器	10~100
3x3" 厚碘化钠探测器	50~3000
Ge(Li) 半导体探测器	50~3000

放射性活度直接测量方法在整个测量过程中, 无需借助任何中间手段和中间测量装置, 在一定准确度范围内能直接给出待测样品的放射性活度。直接测量法有: 量热方法; 小立体角方法; 4π 测量方法等。直接测量法所用装置和测量过程均比较复杂, 一般是在专门实验室内进行。

放射性活度间接测量方法是利用一个或一组已知活度的放射性标准样品, 在相同条件下, 直接或间接与待测样品进行比较, 从而给出样品的活度。直接比较是在测量样品时, 在相同条件下测标准源和样品, 两计数相比得出样品活度值; 间接比较是先对仪器用标准源进行效率刻度, 样品测量值用已知的探测效率系数校正, 得出样品活度值。

能谱测量。金硅面垒探测器适于测量 α 粒子能谱, Si(Li) 探测器可以测量 α 和 β 粒子的能谱。Na(Tl) 晶体、Ge(Li) 半导体和高纯 Ge 探测器适于测量 γ 射线。

放射性核素鉴定。放射性核素鉴定是通过测量分析核素在衰变过程发射的粒子或光子的能量, 和核素衰变的半衰期。

中子测量。中子测量是先通过慢化过程, 使快中子变为慢中子, 慢中子与探测器中物质如硼和锂等反应, 生成带电粒子, 而被探测。常用的探测器有三氟化硼计数管, LiI 闪烁探测器等。

2. 年代测定

通过测量岩石矿物的放射性或衰变生成物，可以确定其年代。

表 5-7 测定物质年代的基本方法

测定方法	测定物质	所测定的时间	适用的时间范围
碳-14 法	木料、泥炭、木炭 骨头、贝壳类	植物死亡时刻 动物死亡前不久	10^3 — 5×10^4 年 2×10^3 — 3.5×10^4 年
钾—氩法	云母、某些全岩样品 角闪石、透长石	岩石最后冷却至约 300°C 时间 岩石最后冷却至约 500°C 时间	$\geq 10^5$ 年 $\geq 10^6$ 年
铷—锶法	云母 钾长石 全岩样品	岩石最后冷却至约 300°C 时间 岩石最后冷却至约 500°C 时间 岩石形成封闭单元时间	$\geq 10^5$ 年 $\geq 10^6$ 年 $\geq 10^7$ 年
铀—铅法	锆石等	晶体形成时间	$\geq 2 \times 10^6$ 年
铀裂变径迹法	多种物质	岩石最后冷却时间	10^2 — 10^9 年（视物质而定）

铷—锶法测定地质年龄的原理是根据自然界的 ^{87}Rb 经过一次 β 衰变生成稳定核素 ^{87}Sr 。岩石或矿物结晶时铷进入矿物。由于衰变， ^{87}Rb 的数量不断减少，子体 ^{87}Sr 在矿物中不断聚集，并且它们都很好的保存在所形成的岩石或矿物中。

^{87}Rb 的衰变遵从下述规律

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_0 、 N 分别为矿物结晶时刻和现今矿物中 ^{87}Rb 的原子数； λ 为 ^{87}Rb 衰变常数； t 为自矿物或岩石形成至今所经历的时间，即矿物的地质年龄。

在封闭体系中，已经衰变的 ^{87}Rb 原子变成子体 ^{87}Sr ，并保留在矿物中，故 $N_0 = N + D$ 。 D 为自矿物结晶以来由 ^{87}Rb 原子衰变生成的 ^{87}Sr 原子数。于是， $N = (N + D) e^{-\lambda t}$ 。由此得出

$t = \frac{1}{\lambda} \ln(1 + \frac{D}{N})$ 。因此，只要测得 ^{87}Rb (N) 和 ^{87}Sr (D) 的含量，就可以计算出该样品的年龄。

在宇宙射线的作用下可以生成某些放射性核素，又以其固有的半衰期衰变，在自然界中处于平衡状态。这些核素有 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 、 ^{22}Na 等。其中 ^{14}C 半衰期长 (5730 年) 又可以参与动植物的代谢过程。当动植物体死亡，不再进行代谢过程， ^{14}C 不再进入这些动植物体内，而存在于动植物体内的 ^{14}C 按固有半衰期继续衰变，其体内含量与环境量不一致。经过几千年，其含量的差别越来越大。通过测量古化石的 ^{14}C 比放射性和现在环境下样品 ^{14}C 的比

放射性差值，可以确定古生物化石的年代。可以用下式计算 $t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A}$ 。

式中， t 为所求年代； λ 为 ^{14}C 衰变常数； A 为样品中 ^{14}C 的比放射性活度； A_0 为处于交换运动中 ^{14}C 比放射性活度。

3. 测量数据处理

(1) **平均值**。有多种处理方法取测量数据的平均值。设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 代表各次观测值， n 代表观测次数，则

算数平均值：
$$a = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$
，算数平均值最常用。

均方根平均值：
$$u = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n}}$$

加权平均值：
$$W = \frac{W_1 X_1 + W_2 X_2 + \dots + W_n X_n}{W_1 + W_2 + \dots + W_n}$$

几何平均值：
$$X = \sqrt[n]{X \cdot X \cdot \dots \cdot X_n}$$

中位值：中位值是将一组观测值按一定大小次序排列时的中间值。

(2) **误差**。误差是指观测值与真值之差。根据误差产生的原因，可以将误差分为**系统误差**，**偶然误差**，**过失误差**三类。

系统误差可能因仪器刻度不良，环境影响或读数习惯等原因造成的。

偶然误差则时大时小，产生的原因一般不详，因而也无法控制。如果对同一物理量进行足够多次测量，则可发现偶然误差服从统计规律。

过失误差是一种显然与事实不符合的误差。它主要是由操作不正确引起的。

误差表示方法有三种：**范围误差**，**算数平均误差**，**标准误差**。

范围误差是指一组测量值中最高值与最低值之差，以此作为误差的变化范围。

算数平均误差是表示误差比较好的方法，其定义为 $\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$ ， $i=1,2,3,\dots,n$ 。

式中， n 为观测次数， d_i 观测值与平均值的偏差。

标准误差也称为均方根误差，其定义为 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$

在有限的次数中，标准误差常用下式表示 $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$ 。标准误差是表示精确度较好的方法。

原子核衰变放出射线的过程是一个随机过程。同时射线与探测器物质之间的相互作用的效应也是一种随机现象。所以当进行多次测量时，所得计数不是一致的，而是围绕着平均值形成一个分布曲线（泊松分布或高斯分布）。通常进行计数测量时，只测量一次，其计数为 N 。可以设想这个计数 N 就是的理想分布曲线的平均数。

标准误差如用百分数表示，则称为相对标准误差，可以写成

$$N \pm \sqrt{N} = N(1 \pm \frac{\sqrt{N}}{N}) = N(1 \pm \frac{1}{\sqrt{N}})。$$

计数越大相对标准误差越小；测量时间越长误差越小；重复测量次数越多误差越小，准确度越高。

$$\text{计数率} = \left(\frac{N}{t} - \frac{N_b}{t_b} \right) \pm \sqrt{\frac{N}{t^2} + \frac{N_b}{t_b^2}}$$

式中：N 为总计数（含本底计数）；N_b 为本底计数；t 为样品测量时间；t_b 为本底测量时间。

(3) 误差的演算。按下列公式进行误差演算。设两个数 $A \pm \sigma_A$ 和 $B \pm \sigma_B$ ，则它们之间的加减乘除按下式进行：

$$(A \pm \sigma_A) + (B \pm \sigma_B) = (A + B) \pm \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

$$(A \pm \sigma_A) - (B \pm \sigma_B) = (A - B) \pm \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

$$(A \pm \sigma_A) \times (B \pm \sigma_B) = (A \times B) \pm (A \times B) \left[\frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_B^2}{B^2} \right]^{1/2}$$

$$(A \pm \sigma_A) / (B \pm \sigma_B) = (A/B) \pm (A/B) \left[\frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_B^2}{B^2} \right]^{1/2}$$

式中， σ_A 和 σ_B 分别是 A 和 B 的标准误差。