

## 第五章 $\alpha$ 衰变

$\alpha$  衰变是原子核自发地放射出  $\alpha$  粒子而发生的转变。

$\alpha$  粒子是一个特别稳定的轻原子核。1903年发现  $\alpha$  射线。Rutherford 是研究和应用  $\alpha$  射线的最重要人物。

### § 5.1 $\alpha$ 衰变的能量

#### 1. $\alpha$ 粒子能量的测量——磁谱仪

$\alpha$  射线的能谱测量:

射程法:  $\frac{\Delta E}{E} \sim 10\%$

半导体探测器:  $\sim 0.2\%$

磁谱法:  $\sim 0.01\%$

$$\frac{mv^2}{\rho} = qvB$$

$$p = mv = qB\rho$$

谱：粒子数目随某一物理量的分布（概率分布）

$$\Delta x = 2\rho(1 - \cos\varphi)$$

$$\Delta x = \rho\varphi^2$$

动量分辨率  $R_p$   $R_p \equiv \frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta x}{2\rho} = \frac{1}{2}\varphi^2$

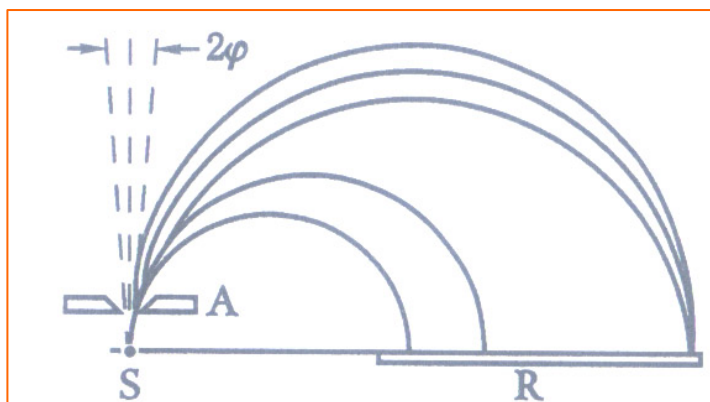


图 5-1 半圆谱仪的工作原理图

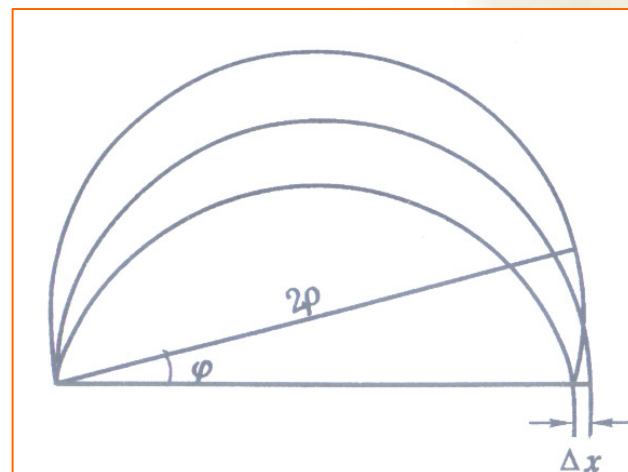


图 5-2 半圆谱仪的聚焦原理

## 2. $\alpha$ 能谱的精细结构

一般的，放射源出来的 $\alpha$  粒子有好几种能量和强度，表现为能谱上的多个峰位和峰面积。

在 $\alpha$  谱的精细结构中，一般只有一种能量的 $\alpha$  粒子的强度最大，其它几种能量的 $\alpha$  粒子的强度都较弱，它们的能量也比较低，亦即射程比较短，这种 $\alpha$  粒子称为短射程 $\alpha$  粒子。

另一方面，对于放射性核素 $\text{ThC}'(\text{Po})$ 和 $\text{RaC}'(\text{Po})$ 观察到了另一种现象，除了最强的 $\alpha$  粒子外，还发射出具有很大能量而强度很弱的 $\alpha$  粒子，这种 $\alpha$  粒子称为长射程 $\alpha$  粒子。

## 3. $\alpha$ 粒子能量与 $\alpha$ 衰变能的关系

衰变能： $\alpha$  衰变时放出的能量。

$$E_d = E_k + E_R = E_k + \frac{1}{2} m_Y v_Y^2$$

$$m_Y v_Y = m_\alpha v_\alpha$$

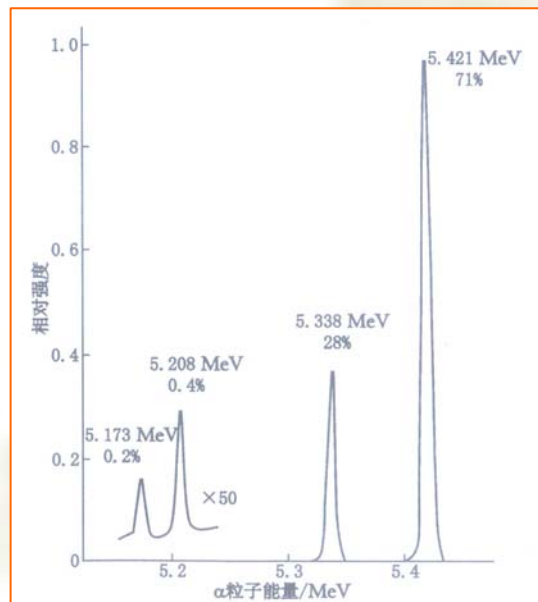


图 5-3  $^{228}\text{Th}$  的  $\alpha$  能谱

[引自 F Asaro et al., Phys. Rev., 92, 1495(1953).]

$$E_d = E_k + \frac{1}{2} m_Y \left( \frac{m_\alpha v_\varepsilon}{m_Y} \right)^2 = E_k + \frac{m_\alpha}{m_Y} E_k$$

$$= \left( 1 + \frac{m_\alpha}{m_Y} \right) E_k$$

$$\frac{m_\alpha}{m_Y} \approx \frac{4}{A-4}$$

$$E_d = \left( \frac{A}{A-4} \right) E_k \quad E_k = \left( \frac{A-4}{A} \right) E_d$$

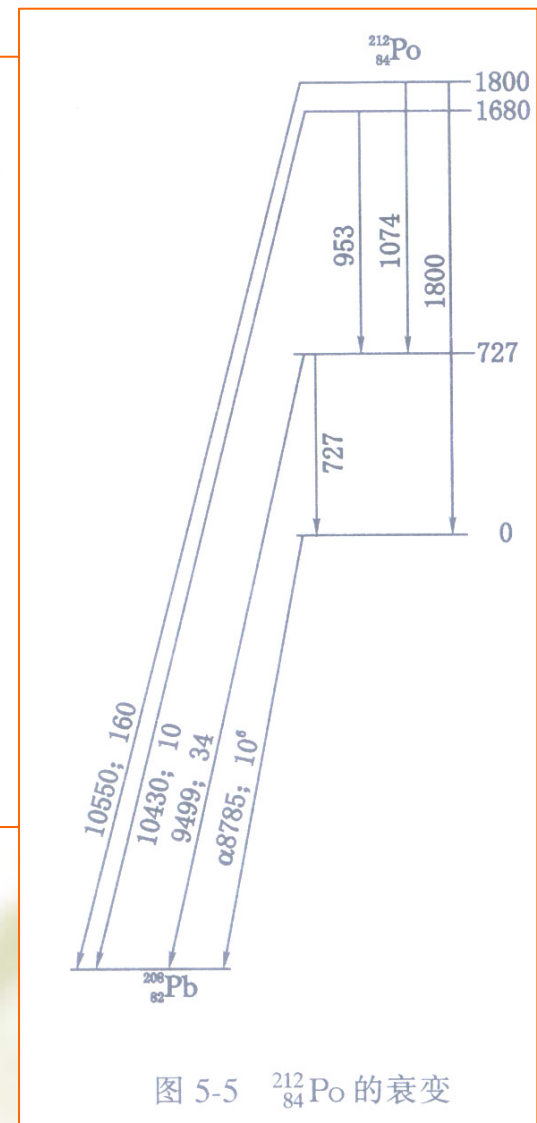
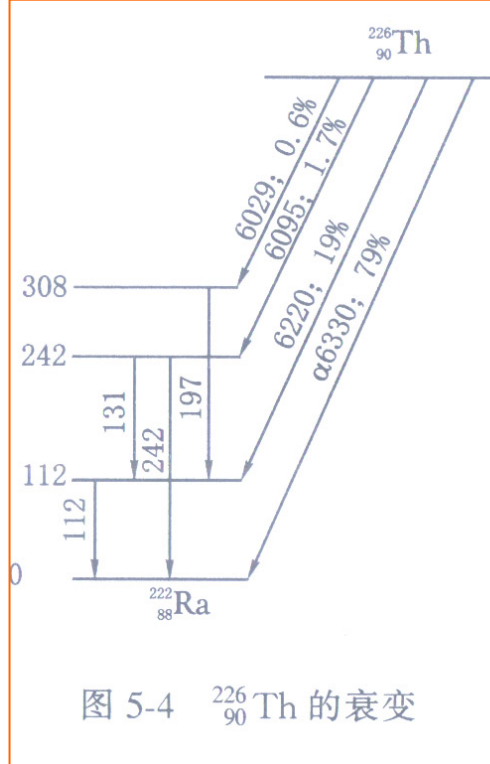
$$E_Y = E_d - E_k = \left( \frac{4}{A-4} \right) E_k = \frac{4}{A} E_d$$

#### 4. 短射程、长射程 $\alpha$ 粒子与核能级的关系

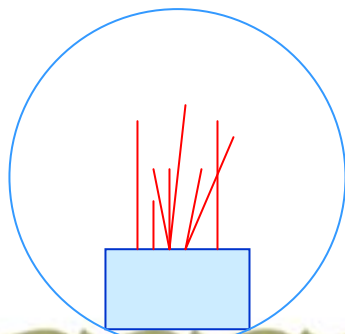
$$\Delta E_d = E^* = E_\gamma$$

短射程 $\alpha$ 粒子是从母核的基态衰变到子核的激发态时所发射的 $\alpha$ 粒子。

长射程 $\alpha$ 粒子是从母核的激发态衰变到子核的基态时所发射的 $\alpha$ 粒子。



从云室中观察



## § 5.2 $\alpha$ 衰变的实验规律

### 1. 衰变能随原子序数 $Z$ 和质量数 $A$ 的变化

$$E_d = (m_X - m_Y - m_\alpha) \times 931.5 \text{MeV}$$

$$m_X = Zm_p + (A - Z)m_n - \Delta m_X$$

$$\begin{cases} m_Y = (Z - 2)m_p + (A - Z - 2)m_n - \Delta m_Y \\ m_\alpha = 2m_p + 2m_n - \Delta m_\alpha \end{cases}$$

$$E_d = (\Delta m_Y + \Delta m_\alpha - \Delta m_X) \times 931.5 \text{MeV}$$

$$= B_Y + B_\alpha - B_X = (A - 4)(\varepsilon_Y - \varepsilon_X) - 4(\varepsilon_X - \varepsilon_\alpha)$$

如果结合能随 $Z$ ,  $A$ 的变化是平滑的。我们可以将式中的  $(B_Y - B_X)$  近似地表示为 $Z$ ,  $A$ 的微分, 即

$$E_d \approx \Delta B + B_\alpha = \frac{\partial B}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial B}{\partial A} \Delta A + B_\alpha$$

式中 $\Delta Z = -2$ ， $\Delta A = -4$ 。

根据结合能的半经验公式

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_a \left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 / A - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} + B_p$$

在 $\alpha$ 衰变中， $\left(\frac{A}{2} - Z\right)$  为常数； $B_p$ 在母核与子核间的变化很小，可以近似地看作常量。

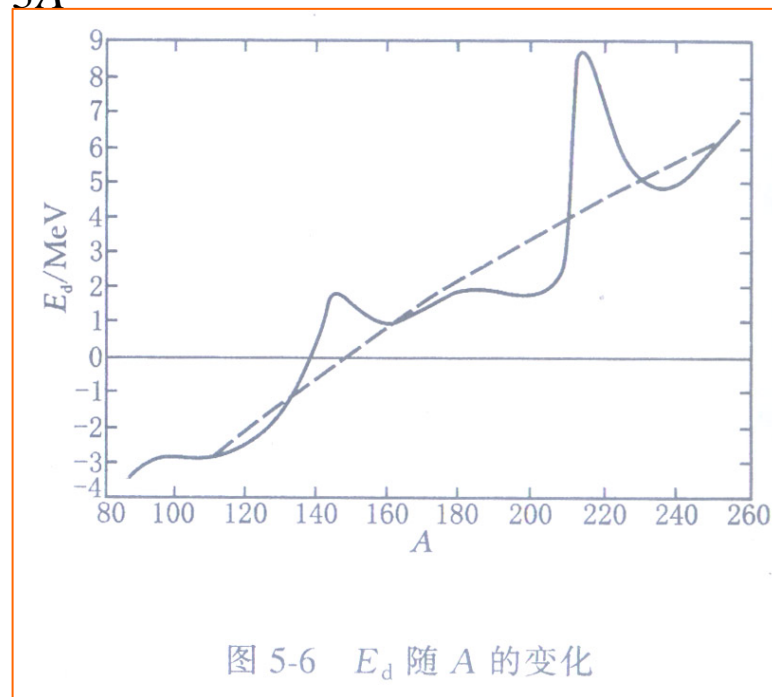
$$E_d = B_\alpha - 4a_v + \frac{8a_s}{3} \frac{1}{A^{1/3}} - a_a \left(1 - \frac{2Z}{A}\right)^2 + 4a_c \frac{Z}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{Z}{3A}\right)$$

将各系数值 $a_v$ ， $a_s$ ， $a_a$ ， $a_c$ ，以及 $\alpha$ 粒子的结合能 $B_\alpha = 28.3$ 代入

$$E_d = 28.3 - 63.34 + 48.88 \frac{1}{A^{1/3}} - 92.80 \left(1 - \frac{2Z}{A}\right)^2 + 2.856 \frac{Z}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{Z}{3A}\right)$$

$$= 48.88 \frac{1}{A^{1/3}} - 92.80 \left(1 - \frac{2Z}{A}\right)^2 + 2.856 \frac{Z}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{Z}{3A}\right) - 35.04$$

对于处于 $\beta$ 稳定线的原子核，利用稳定线的 $A(Z)$ 关系，可以算出 $E_d$ 随 $A$ 的变化关系。对于 $A \geq 150$ 的原子核， $E_d$ 才大于零，而且 $E_d$ 随 $A$ 的增加而增大。这就解释了为什么主要是重核才观察到 $\alpha$ 放射性。





## 2. 衰变能随同位素的变化

$$\frac{\partial E_d}{\partial A} = -16.29 \frac{1}{A^{4/3}} - 371.20 \frac{Z}{A^2} \left(1 - \frac{2Z}{A}\right) - 0.952 \frac{Z}{A^{4/3}} \left(1 - \frac{4Z}{3A}\right)$$

问题：  
衰变能随Z的变化  
(A不变)？

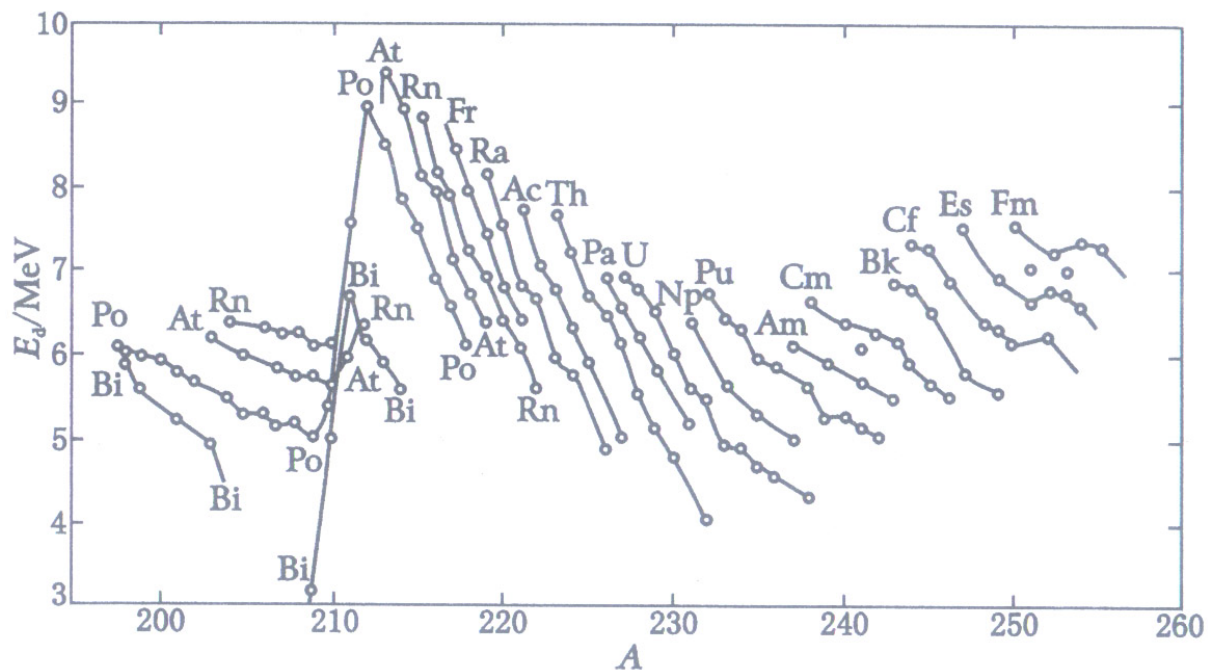


图 5-7  $E_d$  随同位素的变化

### 3. 衰变能和衰变常量的关系

同一元素的半衰期和衰变能的关系可写成下面的经验公式

$$\log T_{1/2} = bE_d^{-1/2} - a \quad \log \lambda = A - BE_d^{-1/2}$$

式中 $a$ ,  $b$ 或 $A$ ,  $B$ 对同一元素是常量, 但对不同元素则不同。

表 5-3 一些  $\alpha$  放射核的数据

$\alpha$ 放射核	$E_d/ \text{MeV}$	$T_{1/2}$	$\lambda/\text{s}^{-1}$
$^{238}\text{U}$	4.27	$4.468 \times 10^9 \text{ a}$	$4.9 \times 10^{-18}$
$^{226}\text{Ra}$	4.86	$1.60 \times 10^3 \text{ a}$	$1.4 \times 10^{-11}$
$^{210}\text{Po}$	5.40	$1.384 \times 10^2 \text{ d}$	$5.8 \times 10^{-8}$
$^{222}\text{Rn}$	5.58	3.824 d	$2.1 \times 10^{-6}$
$^{214}\text{Po}$	7.83	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$	$4.2 \times 10^3$
$^{212}\text{Po}$	8.95	$3.0 \times 10^{-7} \text{ s}$	$2.3 \times 10^6$

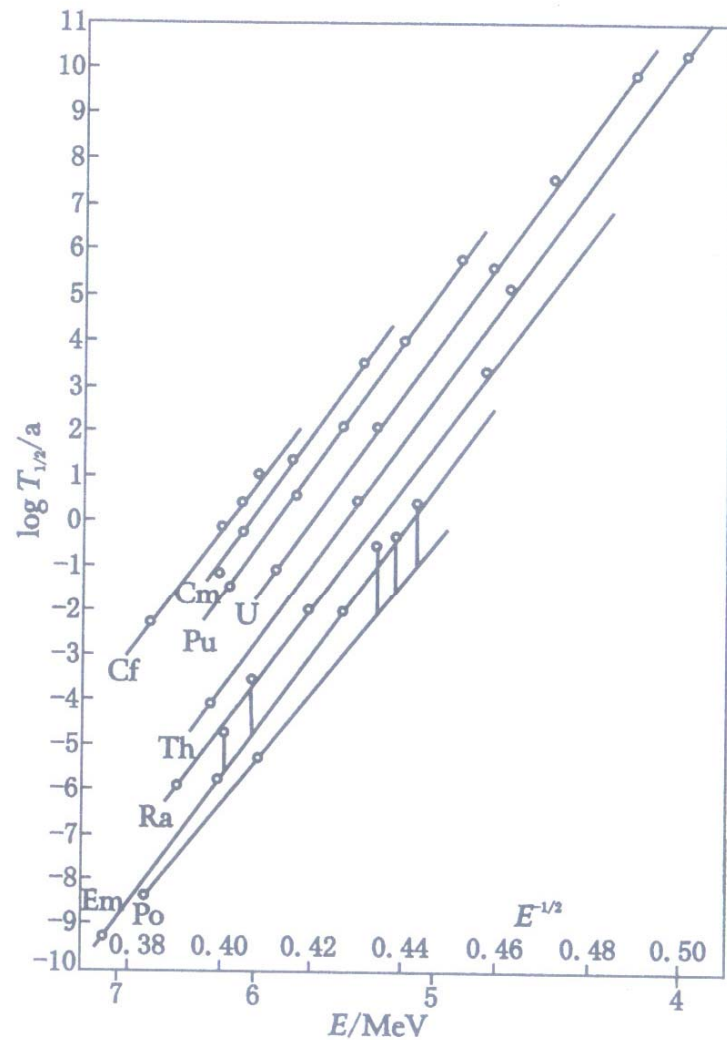


图 5-8 半衰期和  $\alpha$  粒子能量的关系  
(参见[12]511 页)