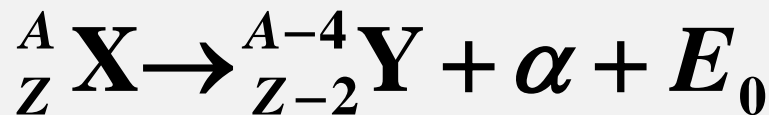


### §7 $\alpha$ 衰变



放射性原子核自发地放射出 $\alpha$ 粒子而转变成另一种原子核的过程称为 $\alpha$ 衰变。

衰变能

### 1. $\alpha$ 衰变的条件

质能守恒 (假设衰变前母核静止)

$$m_X(Z, A)c^2 = m_Y(Z-2, A-4)c^2 + m_\alpha c^2 + E_\alpha + E_r$$

$$\begin{aligned} E_0 \equiv E_\alpha + E_r &= [m_X(Z, A) - m_Y(Z-2, A-4) - m_\alpha]c^2 \\ &= [M_X(Z, A) - M_Y(Z-2, A-4) - M_{He}(2, 4)]c^2 \\ &= B_Y(Z-2, A-4) + B_{He}(2, 4) - B_X(Z, A) \end{aligned}$$

$\alpha$ 衰变的条件:  $E_0 > 0$

$$M_X(Z, A) > M_Y(Z-2, A-4) + M_{He}(4, 2)$$

定义

2.  $\alpha$  衰变能与核能级图

$\alpha$  能谱 (动能)  $E_\alpha \Rightarrow \alpha$  衰变能  $E_0 \Rightarrow$  能级结构 (图)

$$m_Y v_y = m_\alpha v_\alpha$$

动量守恒 (假设衰变前母核静止)

$$E_r = \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \frac{m_\alpha}{m_Y} = \frac{m_\alpha}{m_Y} E_a$$

$$E_0 = \left( \frac{m_\alpha}{m_Y} + 1 \right) E_a \approx \left( \frac{4}{A-4} + 1 \right) E_a = \frac{A}{A-4} E_a$$

此处用核的质量数之比代替核质量之比, 易证明, 这样做的误差甚微。据此式可用各种能谱仪测定  $E_\alpha$ , 直接确定衰变能  $E_0$ 。

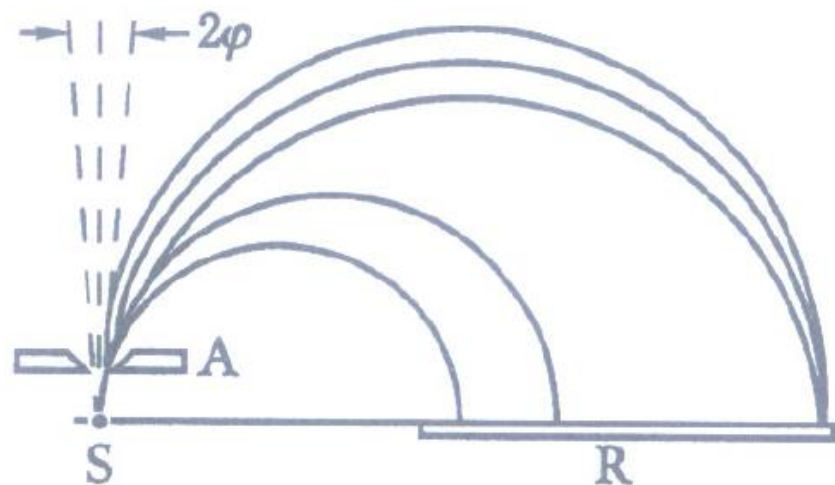
## $\alpha$ 粒子能量（动能）的测量—磁谱仪：

在 $\alpha$ 衰变过程中，出射的 $\alpha$ 粒子具有一定的速度，亦即 $\alpha$ 粒子具有一定的初能量，而 $\alpha$ 粒子具有2个单位的正电荷，所以可用如下图的方法测量 $\alpha$ 粒子的能量（谱）。

$$qBv = \frac{m_{\alpha}v^2}{R} \Rightarrow p_{\alpha} = m_{\alpha}v = qBR$$

$$E_{\alpha} = \frac{p_{\alpha}^2}{2m_{\alpha}} = \frac{q^2}{2m_{\alpha}} B^2 R^2$$

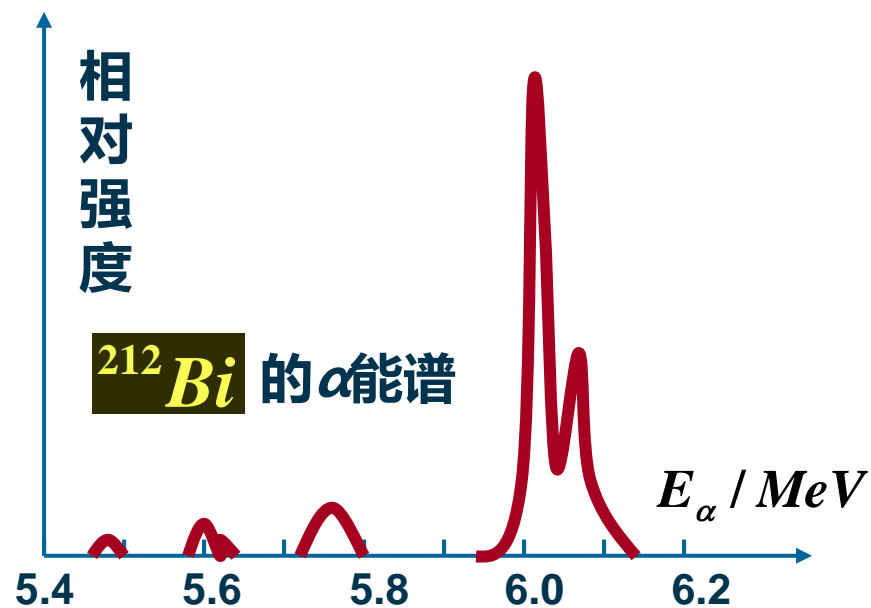
$$\frac{\Delta p_{\alpha}}{p_{\alpha}} = \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2\varphi}$$



磁谱仪拍摄的感光底片上得到的并不是一条感光线，而是一组分立的感光线。由此可见，从放射源出来的 $\alpha$ 粒子能量是不连续的一些分立数值。这些分立的数值，构成了 $\alpha$ 能谱。预示着子核有分立的能态。

$^{212}\text{Bi}$  (Thc) 的 $\alpha$ 粒子能谱

组	$\alpha$ 粒子能量MeV	$\alpha$ 粒子衰变能MeV	强度 %
$\alpha_0$	6.084	6.201	27.2
$\alpha_1$	6.044	6.161	69.9
$\alpha_2$	5.763	5.874	1.7
$\alpha_3$	5.621	5.730	0.15
$\alpha_4$	5.601	5.709	1.1
$\alpha_5$	5.480	5.585	0.016



$^{212}_{83}\text{Bi}$

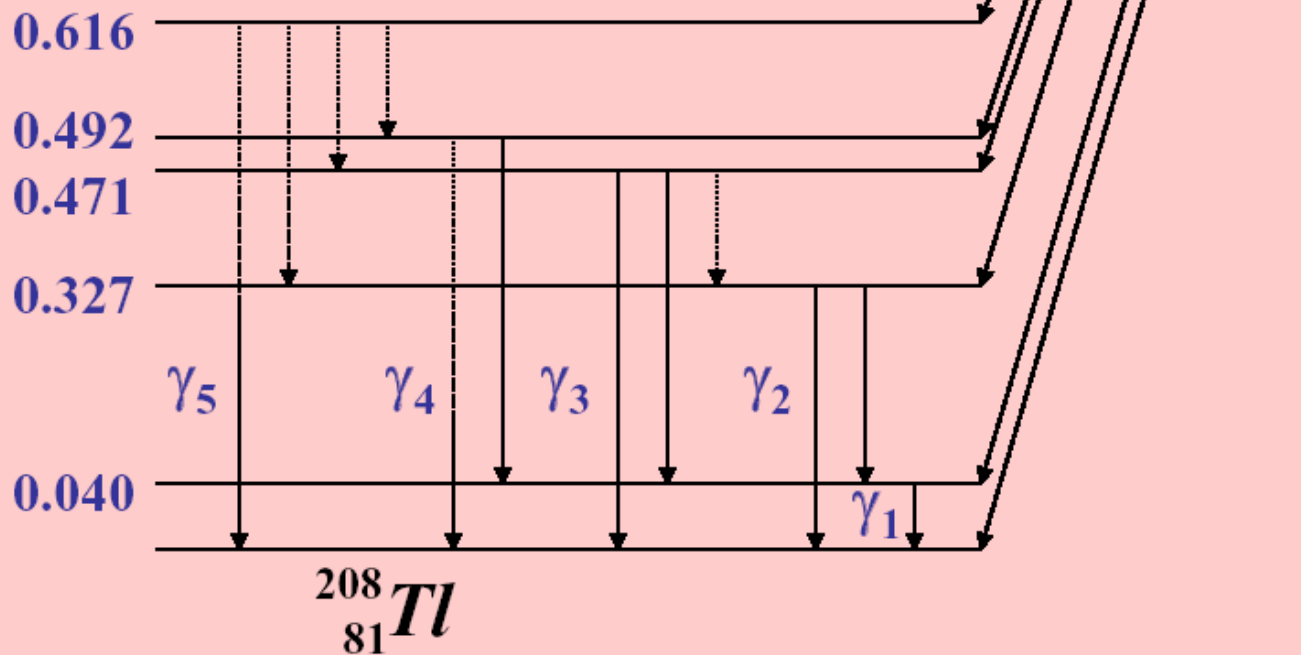
$$E_{00} - E_{01} = 0.040 \text{ MeV} (\gamma_1)$$

$$E_{00} - E_{02} = 0.327 \text{ MeV} (\gamma_2)$$

$$E_{00} - E_{03} = 0.471 \text{ MeV} (\gamma_3)$$

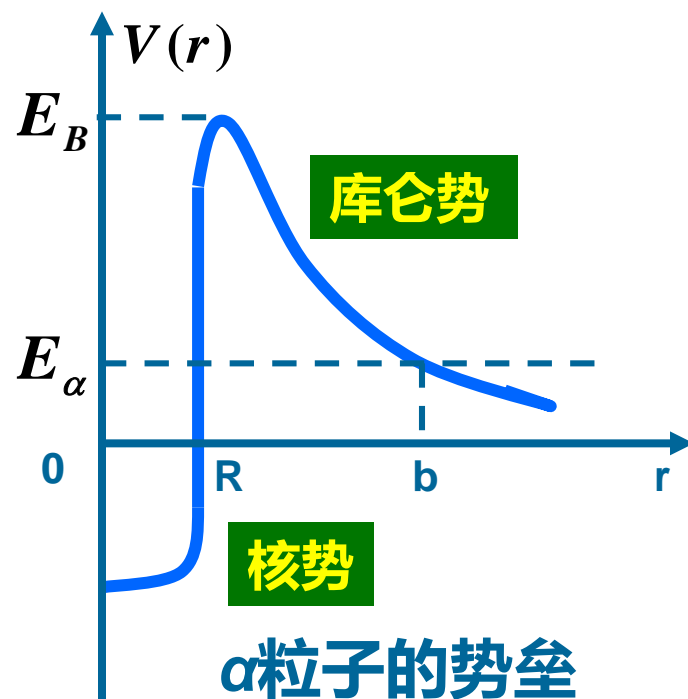
$$E_{00} - E_{04} = 0.492 \text{ MeV} (\gamma_4)$$

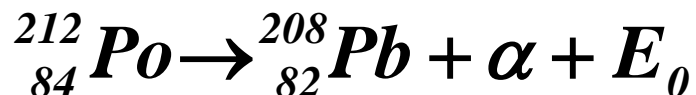
$$E_{00} - E_{05} = 0.616 \text{ MeV} (\gamma_5)$$



### 3. $\alpha$ 衰变的机制与寿命

原子核内并无 $\alpha$ 粒子集团存在，放出的 $\alpha$ 粒子是临时形成的。 $\alpha$ 粒子的形成及 $\alpha$ 粒子如何跑出原子核，用经典理论很难解释。核内的 $\alpha$ 粒子受核力吸引(负势能)，在核外粒子受到库仑力的排斥，这样在核的表面形成一个势垒（如右图）。



以 $^{212}\text{Po}$ 为例计算库仑势垒的高度

$$E_B = \frac{2(z-2)e^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{2(z-2)e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0 [(A-4)^{1/3} + 4^{1/3}]} \approx 26 \text{ MeV}$$

$$E_0 = [M(^{212}\text{Po}) - M(^{208}\text{Pb}) - M(^4\text{He})]c^2 = 9.033 \text{ MeV}$$

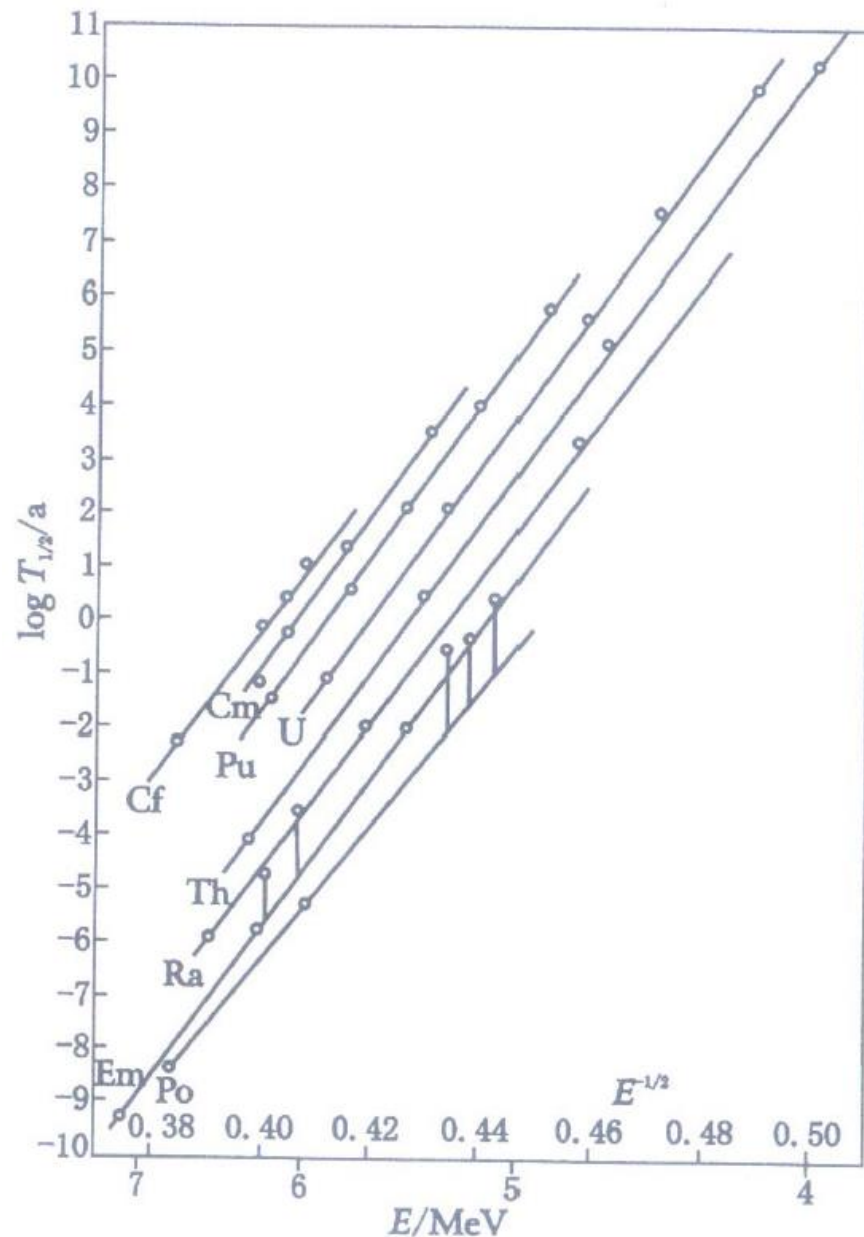
$$E_\alpha \approx (1 - \frac{4}{A})E_0 = 8.862 \text{ MeV} \ll E_B \approx 26 \text{ MeV}$$

由于 $\alpha$ 粒子在核内的总能量以及发射后的动能都比库仑能小很多，根据经典力学，这样一个 $\alpha$ 粒子不可能超出表面飞出来，而应被表面反回核内，经典力学解释 $\alpha$ 衰变遇到了困难。

根据量子力学中的“隧道效应”，由于微观粒子的波动性，能量小于势垒高度的 $\alpha$ 粒子也有一定的几率穿过势垒而从核内逸出，1928年G.Gamow（美籍俄，1904~1968）等人指出， $\alpha$ 粒子就是因量子隧道效应穿过势垒跑到核外的。并证明： $\alpha$ 粒子每秒穿过势垒的几率等于它的衰变常数 $\lambda$ 。

$$\ln \tau = A E_{\alpha}^{-1/2} + B$$

$$\ln T_{1/2} = a E_{\alpha}^{-1/2} + b$$





例:  ${}_{90}^A\text{Th}$  的  $\alpha$  衰变

$A$	$E_d(\text{MeV})$	$T_{1/2}(\text{s})$	
		测 量	计 算
220	8.95	$10^{-5}$	$3.3 \times 10^{-7}$
222	8.13	$2.8 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-5}$
224	7.31	1.04	$3.3 \times 10^{-2}$
226	6.45	1854	$6.0 \times 10$
228	5.52	$6.0 \times 10^7$	$2.4 \times 10^6$
230	4.77	$2.5 \times 10^{12}$	$1.0 \times 10^{11}$
232 (稳定)	4.08	$4.4 \times 10^{17}$	$2.6 \times 10^{16}$

在  $10^{20}$  变化范围内, 计算的不准确度在  $10^2$  范围。