原子核物理

主讲：龚学余　尹陈艳

开课单位：核科学技术学院

适用教材：原子核物理（修订版）

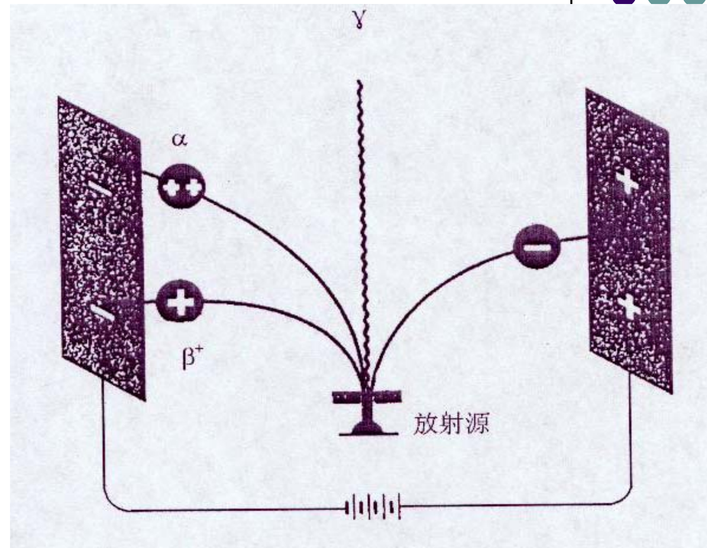
2010-9-17

第二章　放射性和核的稳定性

返回主界面

一、放射性的一般现象

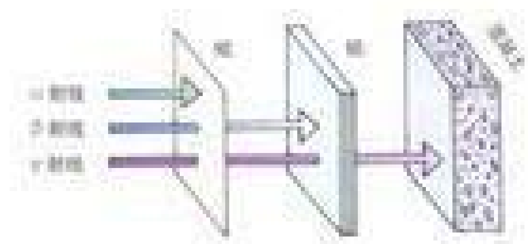
1、放射性的发现



1）α 射线：高速运动的He核组成，电离作用强，穿透本领低。

2）β 射线：高速运动的电子流，电离作用弱，穿透本领较强。

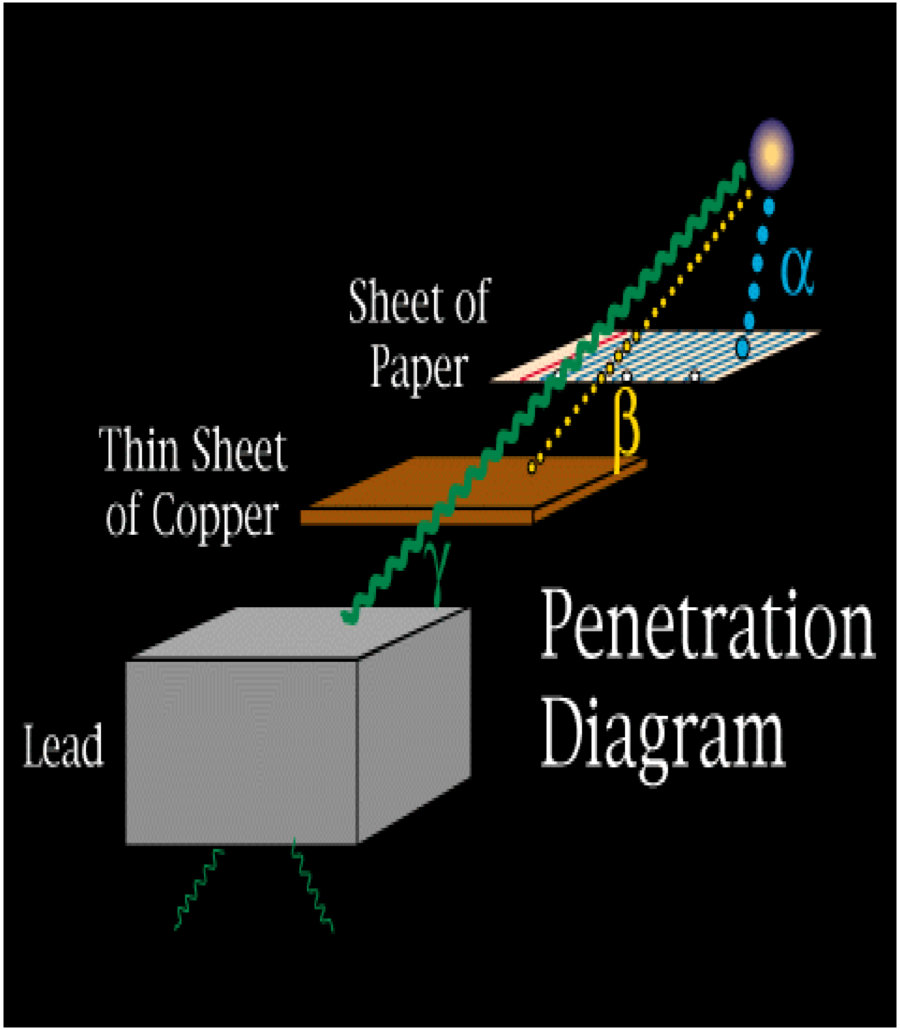
3）γ 射线：波长很短的电磁波，穿透能力最强，电离作用最弱。

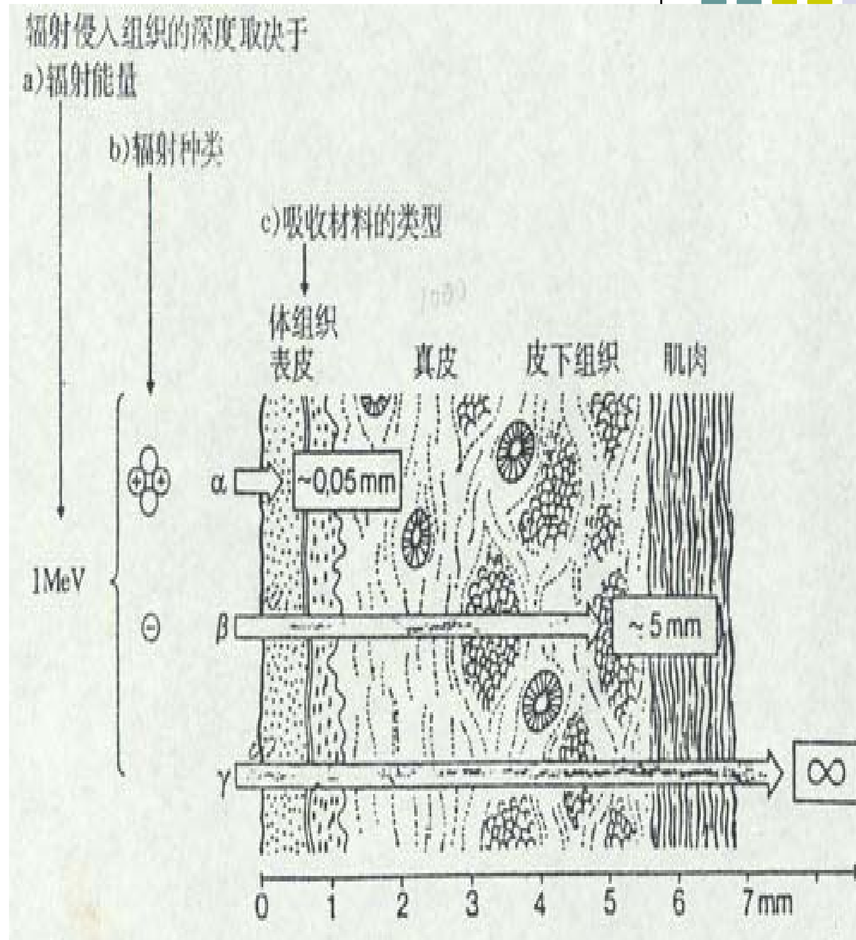


现在知道，有许多天然的和人工生产的核素都能自发地发射各种射线。如上述三种射线。还有一些核素发射正电子、质子、中子等其它粒子。

射线种类	组成	速度	贯穿本领	电离作用
α射线	α 粒子是氦原子核${}_2^4He$	约$\frac{1}{10}c$	很小一张薄纸就能挡住	很强
β射线	β粒子是高速电子流${}_{-1}^{0}e$	接近C	很大能穿过几毫米厚的铝板	较弱
γ射线	波长很短的电磁波	等于C	最大能穿过几厘米厚的铝板	很小

α β γ 射线穿透物质能力





α β γ 射线穿透
人体皮肤情况

2、放射性： 原子核自发地放射各种射线的现象。

放射性核素： 能自发地放射各种射线的核素。也叫不稳定的核素。

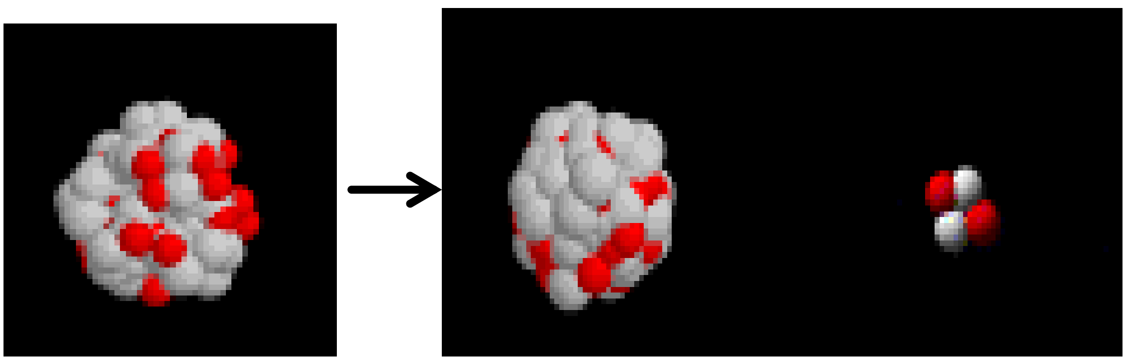
这一现象不是外界因素引起的，而是原子核本身固有的性质，只和它的内部状态有关。

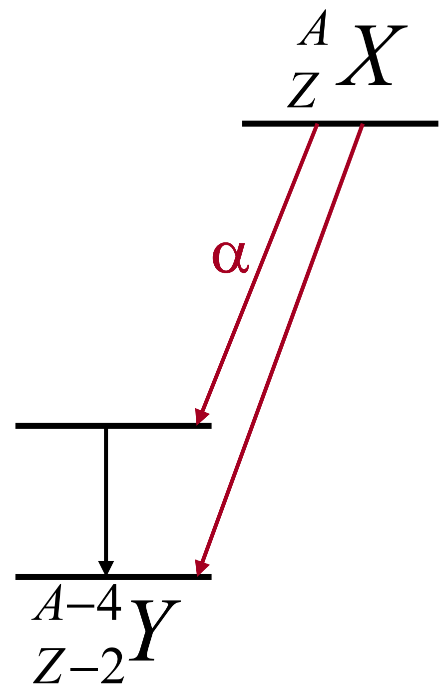
3、核衰变

原子核自发地放射出 α 或 β 等粒子而发生的转变称为核衰变。

α 衰变：

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + \alpha$$





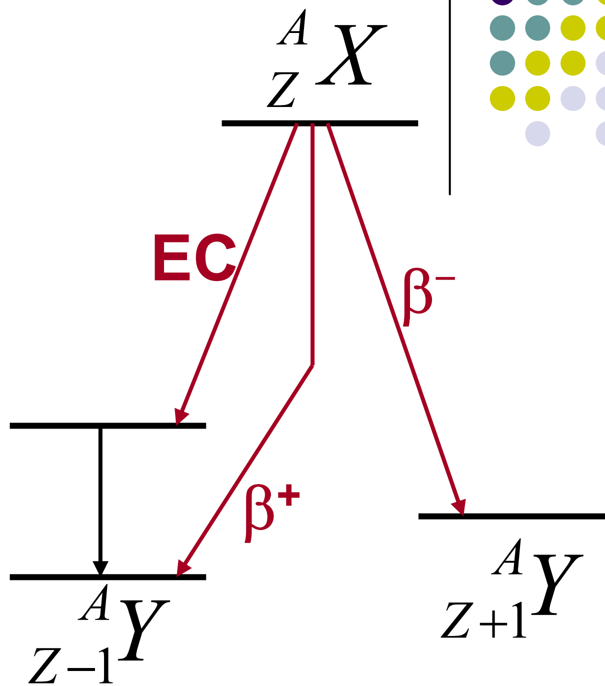
α 衰变纲图

β 衰变：

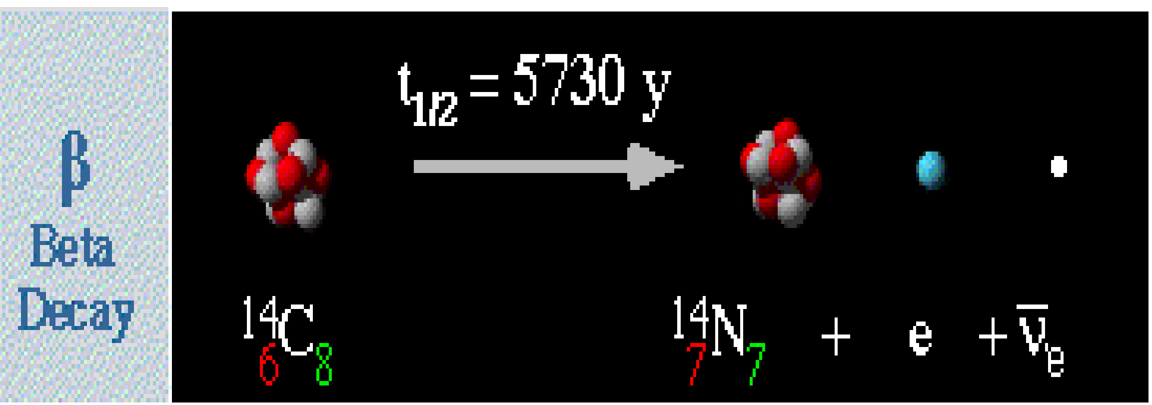
$$ {}_{Z}^{A}X \longrightarrow {}_{Z-1}^{A}Y + \beta^{+} \quad (\beta^{+}) $$

$$ {}_{Z}^{A}X \longrightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + \beta^{-} \quad (\beta^{-}) $$

$$ {}_{Z}^{A}X + e_{k}^{-} \longrightarrow {}_{Z-1}^{A}Y \quad (\mathrm{EC}) $$



β 衰变纲图



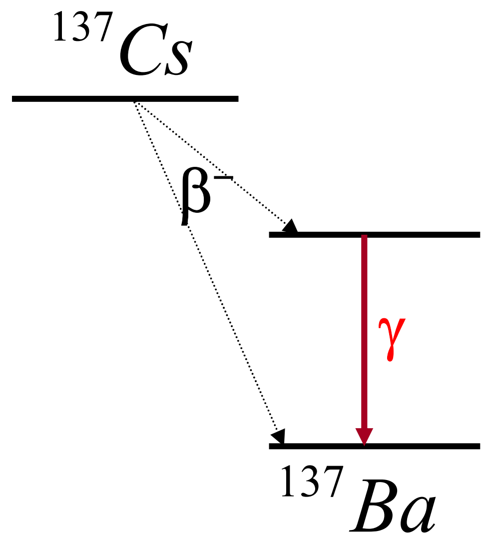
γ跃迁： 处于激发态的原子核向基态或较低激发态跃迁。 常伴随于α衰变和β衰变过程产生。

$^{137}Cs \longrightarrow {}^{137}Ba^*$ （激发态）

母核 β^-衰变 γ 衰变

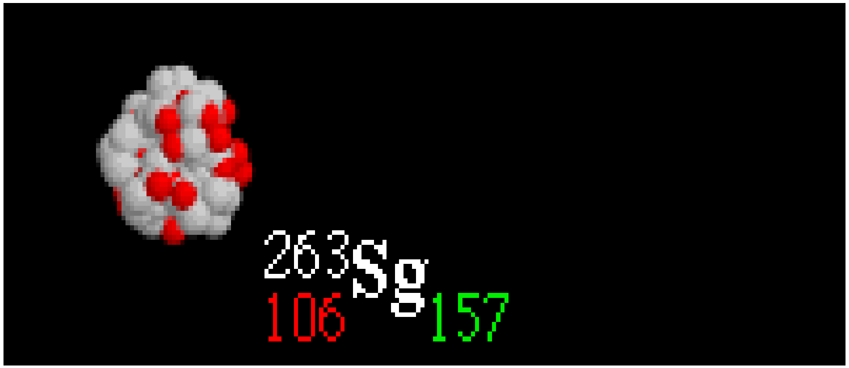
^{137}Ba + γ 射线（661.7 keV）

子核（基态） （0.0）



2.1 放射性衰变的基本规律

α 衰变



β⁻ 衰变

β⁺ 衰变

γ 衰变

4、天然放射性和人工放射性

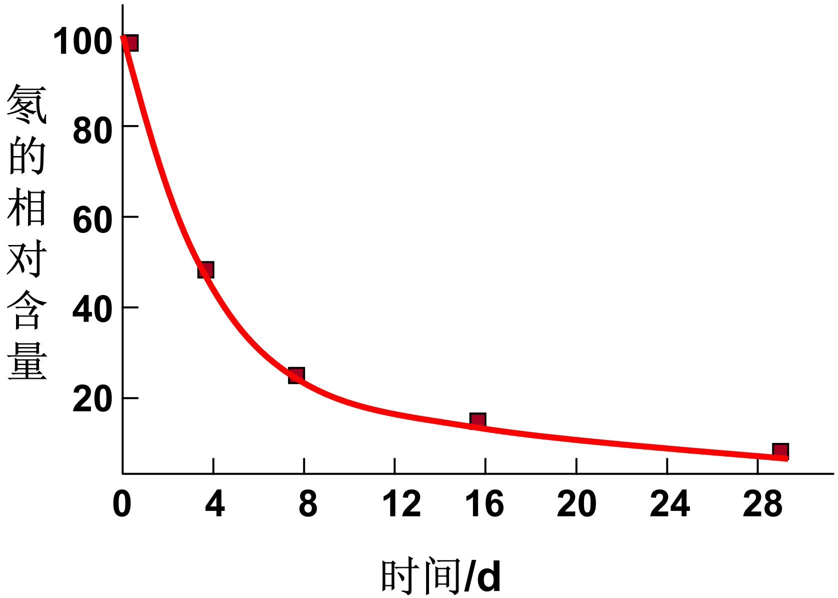
天然放射性： 天然存在的放射性核素所具有的放射性。它们大多属于由重元素组成的三个放射系（即钍系、铀系和锕系）。

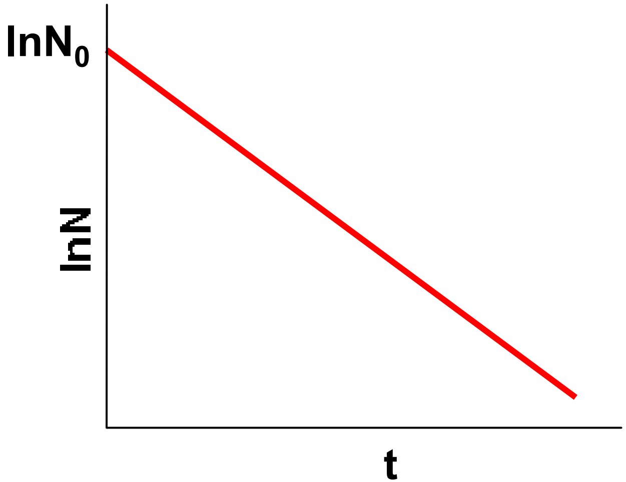
人工放射性： 用人工办法产生的放射性。一般利用反应堆或加速器来产生。

二、放射性衰变的指数衰减规律

1、指数衰减规律

实验：以 ${}^{222}_{86}Rn \longrightarrow {}^{218}_{84}Po + \alpha$ 为例，其变化规律为





则
$$\ln N(t) = \ln N_0 - \lambda t \qquad (2.1\text{-}3)$$

将（2.1-3）化为指数形式，则得

$$\boxed{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}} \qquad (2.1\text{-}4)$$

可见，氡的衰变服从指数衰减规律。实验表明，任何放射性物质在单独存在时都服从这样的衰减规律，不同的是λ不同。

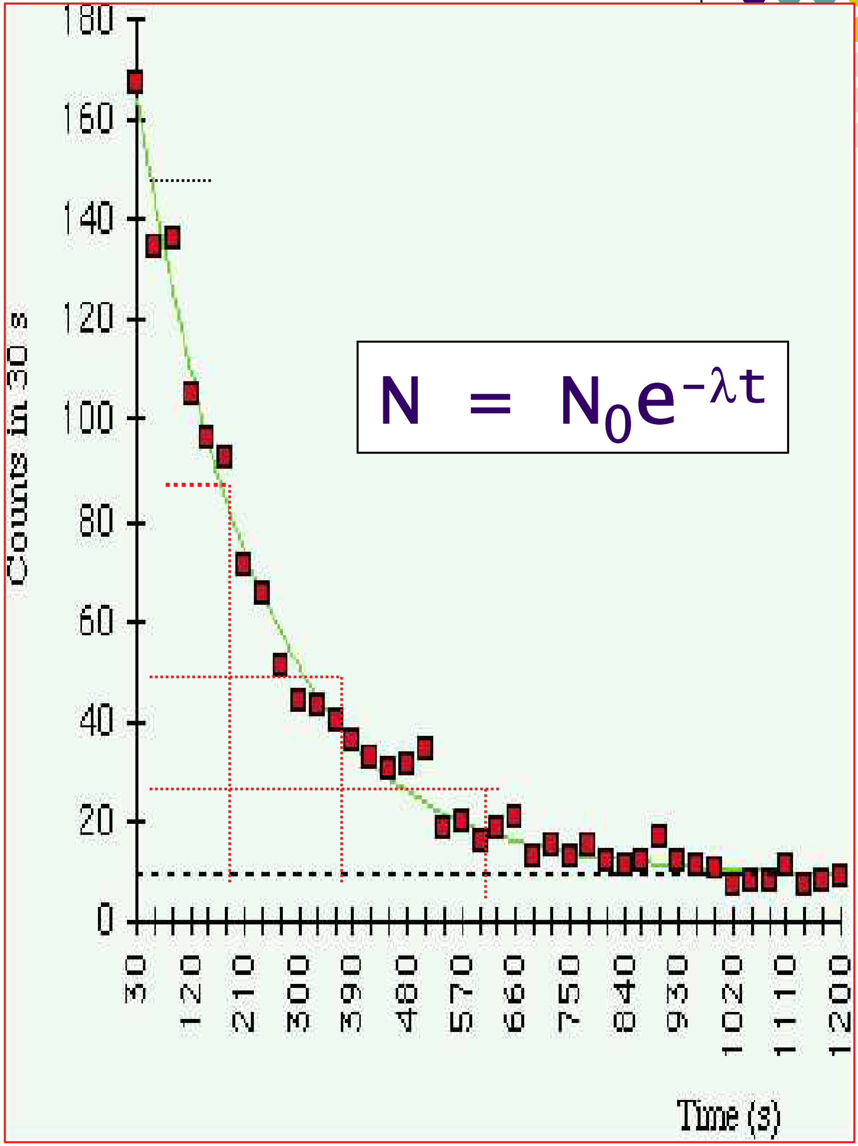
指数衰减规律

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

N_0: （t = 0）时放射性原子核的数目

N: 经过t时间后未发生衰变的放射性原子核数目

λ:放射性原子核衰变常数。大小只与原子核本身性质有关，与外界条件无关；数值越大衰变越快



2、衰变常数 λ 、半衰期$T_{1/2}$ 和平均寿命 τ

1）衰变常数λ

在时刻t→t+dt之间发生衰变的原子核数与N(t)成正比，也与时间间隔dt成正比，即

$$-dN \propto N(t)dt$$

引入比例常数λ，则 $-dN = \lambda N(t)dt$

即

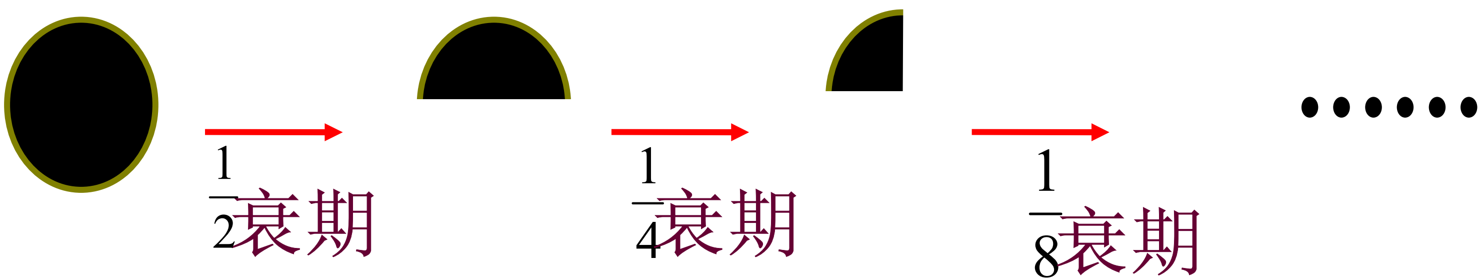
$$\boxed{\lambda = \frac{-dN/N}{dt}}$$

物理意义：表示每个原子核的衰变概率。λ 表示单位时间内每个原子核的衰变概率。

单位： s^{-1}

2）半衰期 $T_{1/2}$

定义：是放射性原子核的数量减少为原来的一半时所经过的时间。



经过$T_{1/2}$后 $$N=\frac{N_0}{2}=N_0e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\boxed{T_{1/2}=\frac{\ln 2}{\lambda}=\frac{0.693}{\lambda}}$$

单位：秒（s）、天（d）、年（y）等。

时间 t ($T_{1/2}$)	0	1	2	3	4	5	n
放射性原子核数目	N_0	$N_0/2$	$N_0/4$	$N_0/8$	$N_0/16$	$N_0/32$	$N_0/2^n$

经过n个半衰期后，未发生衰变的放射性原子核数目是原有的 **$1/2^n$**

3）平均寿命 τ

定义：放射性原子核平均生存的时间。

$t \to t+dt$ 内，有 $-dN=\lambda N dt$ 个核素衰变，可认为这 $-dN$ 个核的寿命是 t。

设 $t=0$ 时的原子核数是 N_0，则这 N_0 个核的总寿命是 $\int_0^\infty t\lambda N dt$ ，所以平均寿命

$$\tau=\frac{1}{N_0}\int_0^\infty t\lambda N dt=\frac{1}{N_0}\int_0^\infty t\lambda N_0 e^{-\lambda t}dt$$

$$=\int_0^\infty t\lambda e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}$$

则

$$\boxed{T_{1/2}=\frac{\ln 2}{\lambda}=\tau\ln 2=0.693\tau}$$

单位：秒（s）、天（d）、年（y）等。

例1 放射性同位素的放射性在**100**天内减少到**1/1.07**，试计算它的衰变常数、平均寿命和半衰期。

解：

$$N(t)=N_0e^{-\lambda t}$$

$$\frac{N(t)}{N_0}=e^{-\lambda\times100\times24\times3600}=\frac{1}{1.07}$$

$$\Rightarrow\quad \lambda=\frac{\ln 1.07}{100\times24\times3600}=7.83\times10^{-9}\left(s^{-1}\right)$$

$$T_{1/2}=\frac{\ln 2}{\lambda}=\frac{0.693}{7.83\times10^{-9}}=8.85\times10^{7}\left(s\right)=2.81\left(y\right)$$

$$\tau=\frac{1}{\lambda}=\frac{1}{7.83\times10^{-9}}=1.277\times10^{8}\left(s\right)=4.05\left(y\right)$$

或

$$\frac{N(t)}{N_0}=e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\times100}=\frac{1}{1.07}\quad\Rightarrow\quad T_{1/2}=\frac{100\cdot\ln 2}{\ln 1.07}=1024.3\left(d\right)=2.81\left(y\right)$$

3、放射性活度A

定义：一个放射源在单位时间内发生衰变的核数目。

$$A=\frac{-dN}{dt}=\lambda N=\lambda N_0 e^{-\lambda t}=A_0 e^{-\lambda t}$$

可见，放射性活度和放射性核数具有同样的指数衰减规律。

单位：**Ci**（居里）、**Bq**（贝克）

$$1Bq=1s^{-1}$$

$$1Ci=3.7\times10^{10}Bq$$

4、比活度和射线强度

比活度： 单位质量放射源所含的放射性活度。

射线强度： 单位时间内放出的射线数目。

<u>原子核的衰变数和发出的射线数成正比，但不一定相等</u>。

5、分支衰变与分支比

分支衰变：有些核素能同时按几种方式衰变，称这种现象为分支衰变。

$$\lambda = \sum \lambda_i$$

分支比：

$$R_i \equiv \frac{A_i}{A} = \frac{\lambda_i}{\lambda}$$

$$A_i = \lambda_i N_i = \lambda_i N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = \sum A_i = \sum \lambda_i N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

6、已知A和$T_{1/2}$，求N和m

$$N=\frac{A}{\lambda}=\frac{AT_{1/2}}{\ln 2}$$

$$m=\frac{M}{N_A}N=\frac{M}{N_A}\frac{AT_{1/2}}{\ln 2}$$

例：**P53 习题2-2**

例2-2 已知 ^{222}**Rn** 的半衰期**3.824 d**，问**1 μCi**和**10^3 Bq**的 ^{222}**Rn** 的质量分别是多少？

$$m = \frac{N}{N_A} \cdot M = \frac{A T_{1/2} M}{N_A \ln 2}$$

A = 1 μCi = 3.7× 10^4 Bq 时，算得 m = 6.505 × 10^{-12} g 。

A = 10^3 Bq 时，算得 m = 1.758 × 10^{-13} g 。

三、递次衰变规律

1、递次衰变

有许多放射性核素的衰变往往是一代又一代地进行，直至最后到达稳定为止，这种衰变称为递次衰变。也叫连续衰变。

$$^{232}Th \xrightarrow{\alpha} {}^{228}Ra \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}Ac(\text{锕}) \xrightarrow{\beta^-} {}^{228}Th \xrightarrow{\alpha} \cdots\cdots \longrightarrow {}^{208}Pb$$

连续衰变系列中的某一核素孤立存在时，其衰变规律按指数形式衰减，但作为连续衰变的一个环节，它不断衰变为下一代核素，而且还断地由上一个核素衰变而来，故其数量的变化规律较为复杂。

2、递次衰变规律

$$A \xrightarrow[\lambda_1]{} B \xrightarrow[\lambda_2]{} C \xrightarrow[\lambda_3]{} D \xrightarrow[\lambda_4]{} \cdots$$

t时刻	N_1	N_2	N_3	N_4	$\cdots$
$t=0$时	N_0	0	0	0	

单位时间核数目变化 = 单位时间内增加的数目 − 单位时间内减少的数目

对于A:

$$N_1 = N_0(0)e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

对于B:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_2}{dt} + \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

等式两边同乘以 $e^{\lambda_2 t}$ 可得

$$\frac{dN_2}{dt} e^{\lambda_2 t} + \lambda_2 N_2 e^{\lambda_2 t} = \lambda_1 N_1(0) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

$$\therefore \quad \frac{d}{dt}\left(N_2 e^{\lambda_2 t}\right) = \lambda_1 N_1(0) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t}$$

积分后，得

$$N_2 e^{\lambda_2 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t} + C$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_1 t} + C e^{-\lambda_2 t}$$

因为$t = 0$时，$N_2 = 0$

$$C = -\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2(t)$$

对于C:

1）如果C是稳定的，即$\lambda_3 = 0$，则

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2(t) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

积分，得

$$N_3(t) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left[\frac{1}{\lambda_1}\left(1 - e^{-\lambda_1 t}\right) - \frac{1}{\lambda_2}\left(1 - e^{-\lambda_2 t}\right)\right]$$

如果C不稳定，则

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_3}{dt} + \lambda_3 N_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

解得：

$$N_3(t) = N_1(0)\left(h_1 e^{-\lambda_1 t} + h_2 e^{-\lambda_2 t} + h_3 e^{-\lambda_3 t}\right)$$

$$h_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}$$

$$h_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

$$h_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$

用同样的方法可以求出第n个物质时间变化规律:

$$N_n(t)=N_1(0)\left(h_1e^{-\lambda_1 t}+h_2e^{-\lambda_2 t}+\cdots+h_ne^{-\lambda_n t}\right)$$

$$h_1=\frac{\lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_{n-1}}{(\lambda_2-\lambda_1)(\lambda_3-\lambda_1)\cdots(\lambda_n-\lambda_1)}$$

$$h_2=\frac{\lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_{n-1}}{(\lambda_1-\lambda_2)(\lambda_3-\lambda_2)\cdots(\lambda_n-\lambda_2)}$$

$\cdots$

$$h_n=\frac{\lambda_1\lambda_2\cdots\lambda_{n-1}}{(\lambda_1-\lambda_n)(\lambda_2-\lambda_n)\cdots(\lambda_{n-1}-\lambda_n)}$$

课外练习

在人体血液里注入微量溶液，溶液中放射性同位素^{24}Na的放射性活度$A＝2.0\times10^3Bq$。经过5小时后取出1厘米^{3}的血液，其放射性是$a＝16$分钟$^{-1}$·厘米$^{-3}$，试求人体血液的体积。

返回本章目录

本节讨论在递次衰变系列中，当时间足够长时的一种重要现象——放射性平衡。考虑：

$$A \xrightarrow[T_1]{\lambda_1} B \xrightarrow[T_2]{\lambda_2} C$$

子体**B**的变化规律：

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)$$

在初始只有母体A的条件下，由于λ_1、λ_2的关系不同，在t很大时，会出现不同的现象。

一、暂时平衡（$\lambda_1 < \lambda_2$）

表示：母体衰变比子体慢。

这时，当 t 足够长时 $e^{-\lambda_1 t} >> e^{-\lambda_2 t}$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) N_1(t)$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(t)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \qquad \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

结论：当时间足够长时，母体和子体的相对数量保持恒定比例，不随时间变化。

子体、母体的活度变化曲线见图2-2。

子体的放射性活度达到极大值的时间为：

$$\left.\frac{dA_2}{dt}\right|_{t=t_m} = 0$$

$$t_m = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

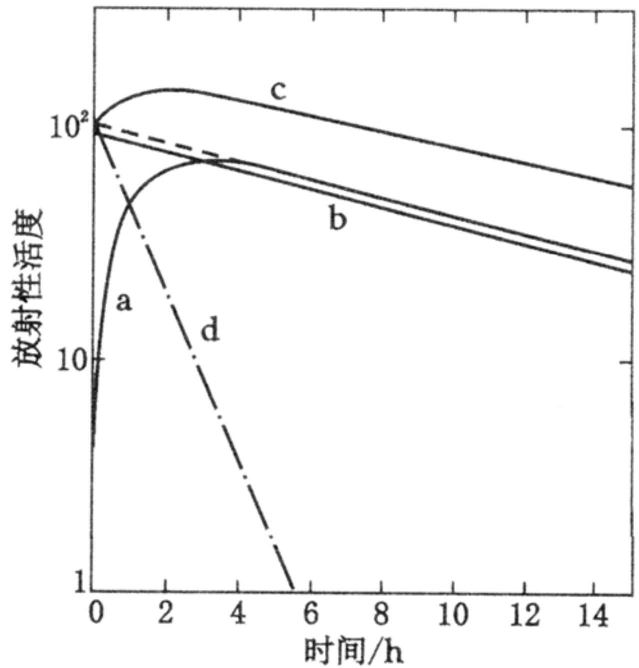


图 2-2 暂时平衡($\lambda_1 < \lambda_2$)

对于多代子体衰变系列：

$$A \xrightarrow{\lambda_1} B \xrightarrow{\lambda_2} C \xrightarrow{\lambda_3} D \xrightarrow{\lambda_4} \cdots$$

只要$\lambda_1 < \lambda_2$、λ_3、λ_4、…，t足够大时，整个系列将达到暂时平衡。

二、长期平衡（$\lambda_1 << \lambda_2$）

表示：母体衰变极慢。

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0)(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

由于$\lambda_1 \approx 0$，因此$\lambda_2 - \lambda_1 \approx \lambda_2$， $e^{-\lambda_1 t} \approx 1$， $N_1 \approx N_1(0)$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0)(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

当 t 足够长时， $e^{-\lambda_2 t} << 1$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0)$$

B 的活度:

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1(0) \qquad \text{即} \qquad A_2 = A_1$$

结论：当时间足够长时，子体的核数目和放射性活度达到饱和，并且子母体的放射性活度相等。

长期平衡子、母体的活度变化曲线如图2-3：

对于多代子体的放射生系列，只要母体A是长寿的，当足够长的时间后，各代子体的数量在观察时间内看不到变化，放射性活度彼此相等。

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \cdots$$

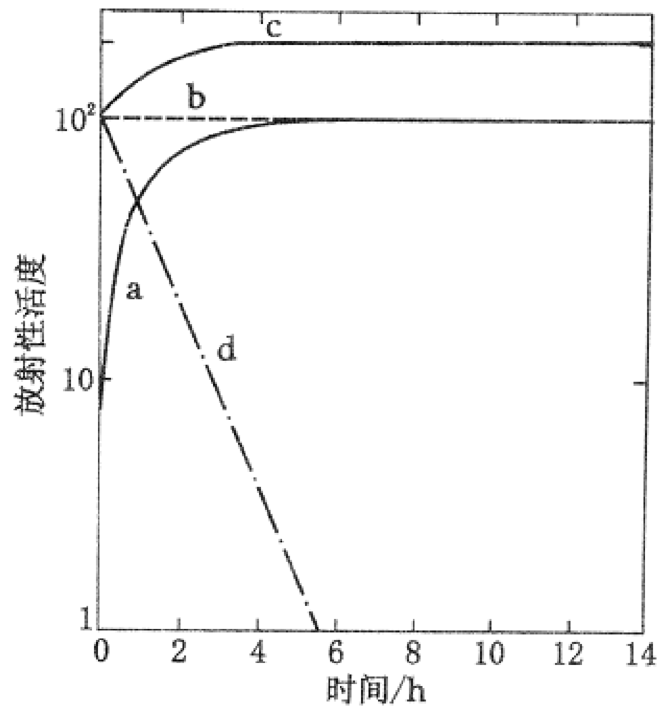


图 2-3 长期平衡($\lambda_1 \ll \lambda_2$)

三、不成平衡（$\lambda_1 > \lambda_2$）

表示：母体比子体衰变得快。

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1(0)\left(e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}\right)$$

当 t 足够大时，由于$\lambda_1 > \lambda_2$，所以 $e^{-\lambda_2 t} >> e^{-\lambda_1 t}$

故有

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1(0) e^{-\lambda_2 t}$$

$$A_2 = \lambda_2 N_2(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1(0) e^{-\lambda_2 t}$$

A_2的变化曲线如图2-4所示。

结论：母体按指数规律较快衰减；子体的原子核数开始随时间增加，达到极大值后较慢衰减，服从指数规律，其速率决定于λ_2。

这种情况，不可能出现子体与母体的任何平衡。

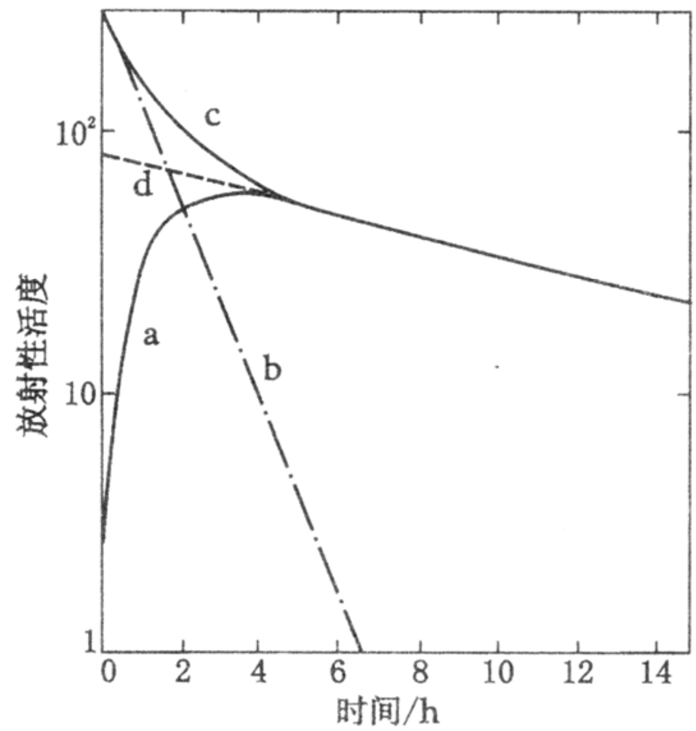


图 2-4 不成平衡($\lambda_1 > \lambda_2$)

四、放射系

递次衰变时原子核所构成的系列统称为放射系。

1、钍系

$$ {}^{232}_{90}Th \xrightarrow[1.41\times10^{10}\,y]{\alpha} \cdots \xrightarrow{\beta^-} \cdots\cdots\cdots \xrightarrow{\beta^-} {}^{208}_{82}Pb $$

钍系各核素的$\boldsymbol{A=4n}$，$\boldsymbol{n}$ 为整数，故为 **4*n*** 系。

2、铀系

$$ {}^{238}_{92}U \xrightarrow[T_{1/2}=4.47\times10^{9}\,y]{\alpha} \cdots \xrightarrow{\beta^-} \cdots \longrightarrow {}^{206}_{82}Pb $$

$\boldsymbol{A=4n+2}$， $\boldsymbol{n}$ 为整数，故为 **4*n* +2** 系。

3、锕系

$$^{235}_{92}U \xrightarrow{\alpha} \cdots \xrightarrow{\beta^-} \cdots \longrightarrow {}^{207}_{82}Pb$$

$A = 4n + 3$，故称$4n+3$系。

4、镎系（人工制造出来的系，称人工放射系）

$$^{241}_{94}Pu \xrightarrow[14.4y]{\beta^-} {}^{241}_{95}Am(镅) \xrightarrow[433y]{\alpha} {}^{237}_{93}Np(镎) \xrightarrow[2.14\times10^6 y]{\alpha} {}^{233}Pa \longrightarrow \cdots \longrightarrow {}^{209}_{83}Bi$$

$A = 4n + 1$，故称$4n+1$系。

5、反应堆的裂变产物中也能产生一系列的衰变，形成递次衰变的放射系。

在自然界存在的放射性核素大多具有多代母子体衰变关系．母体放射性核素经多代子体放射性核素最后衰变生成稳定核素．

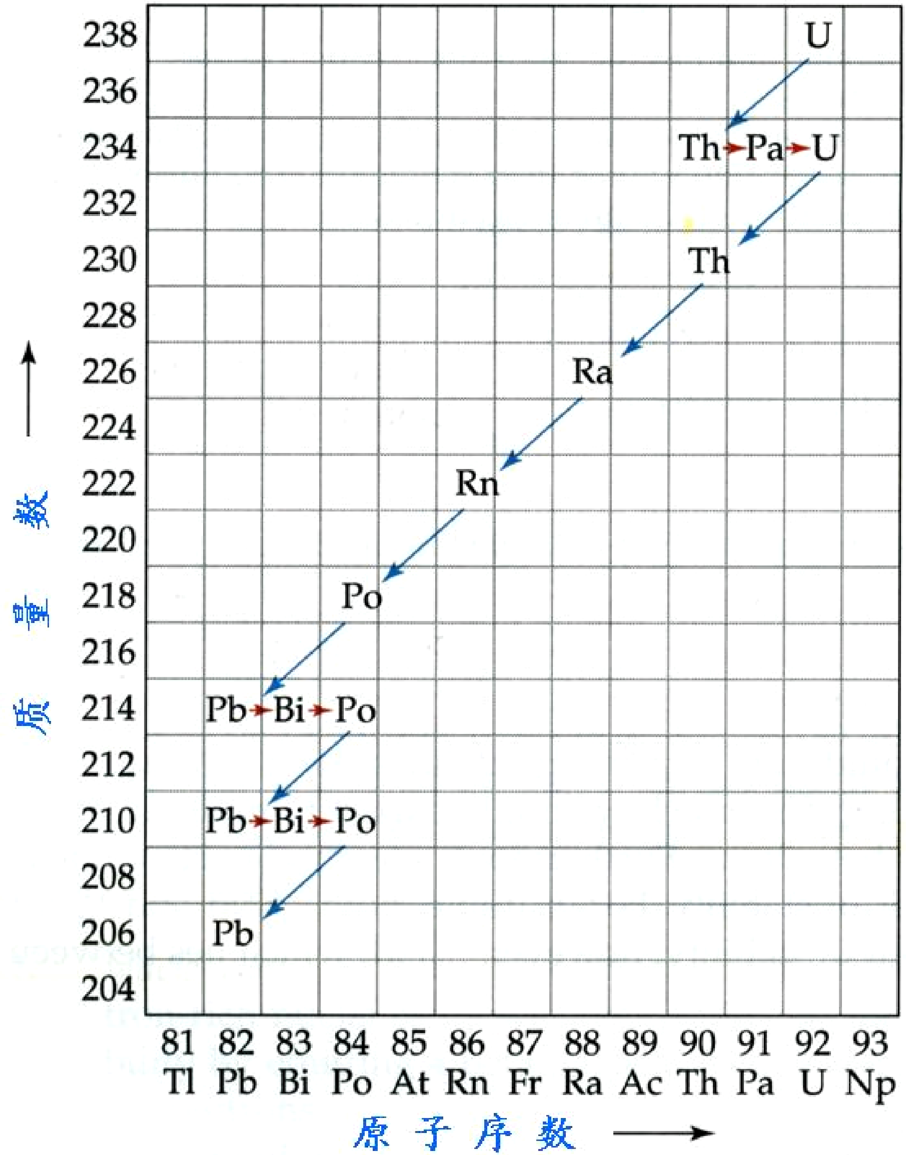
放 射 系

钍 系

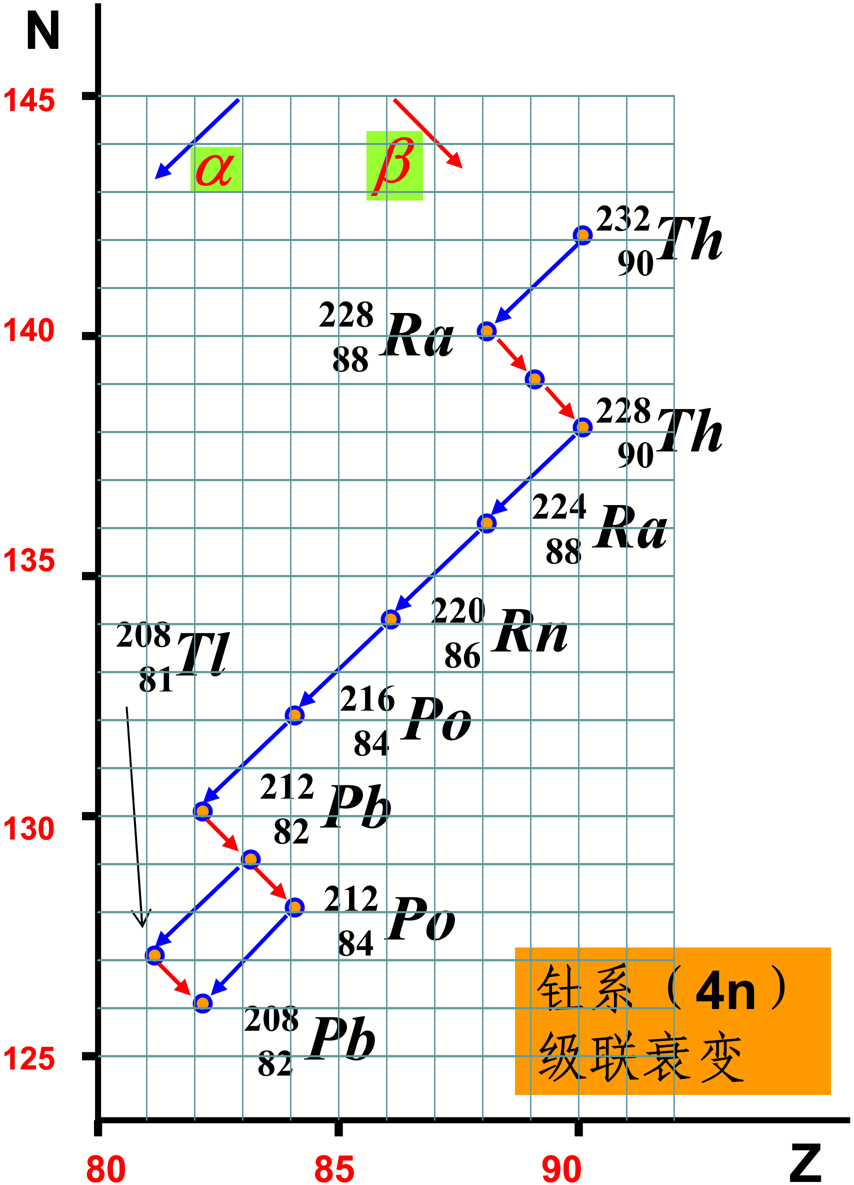
镎 系

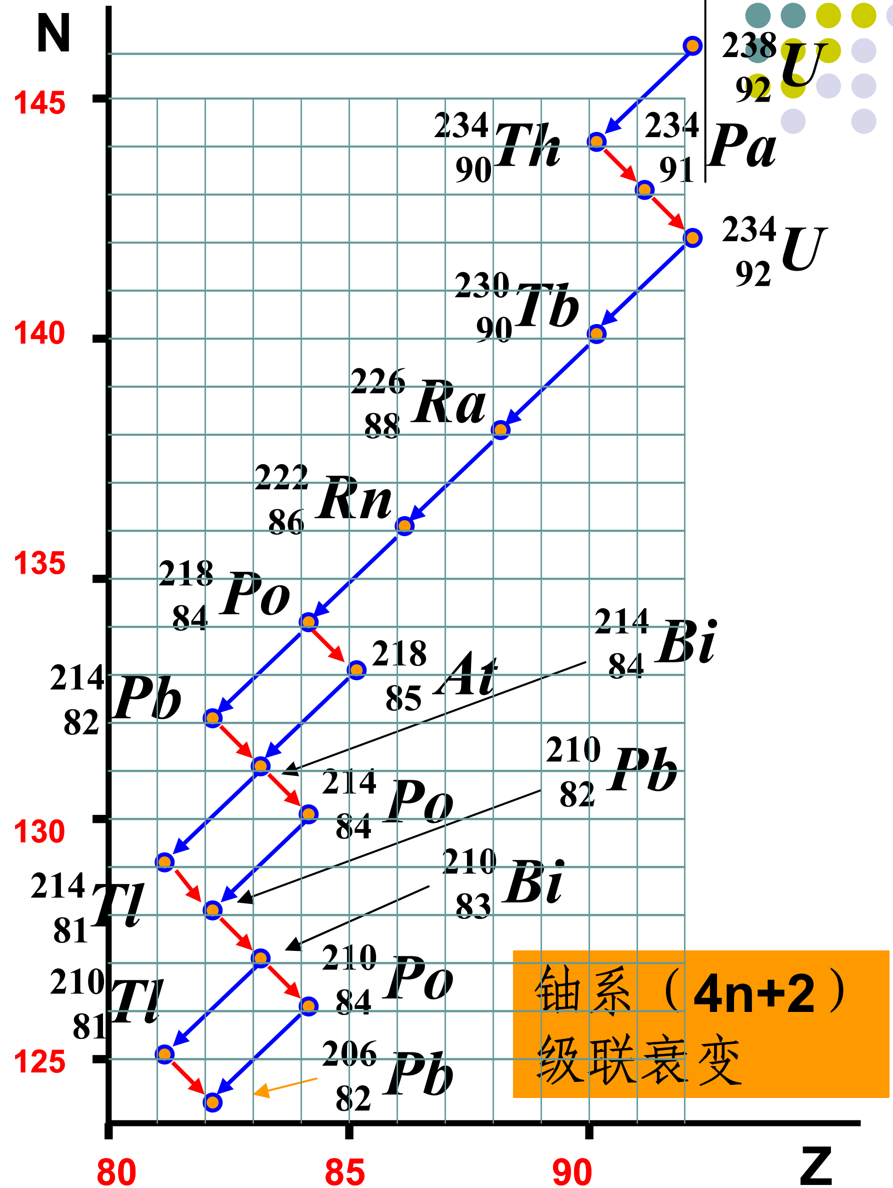
铀 系

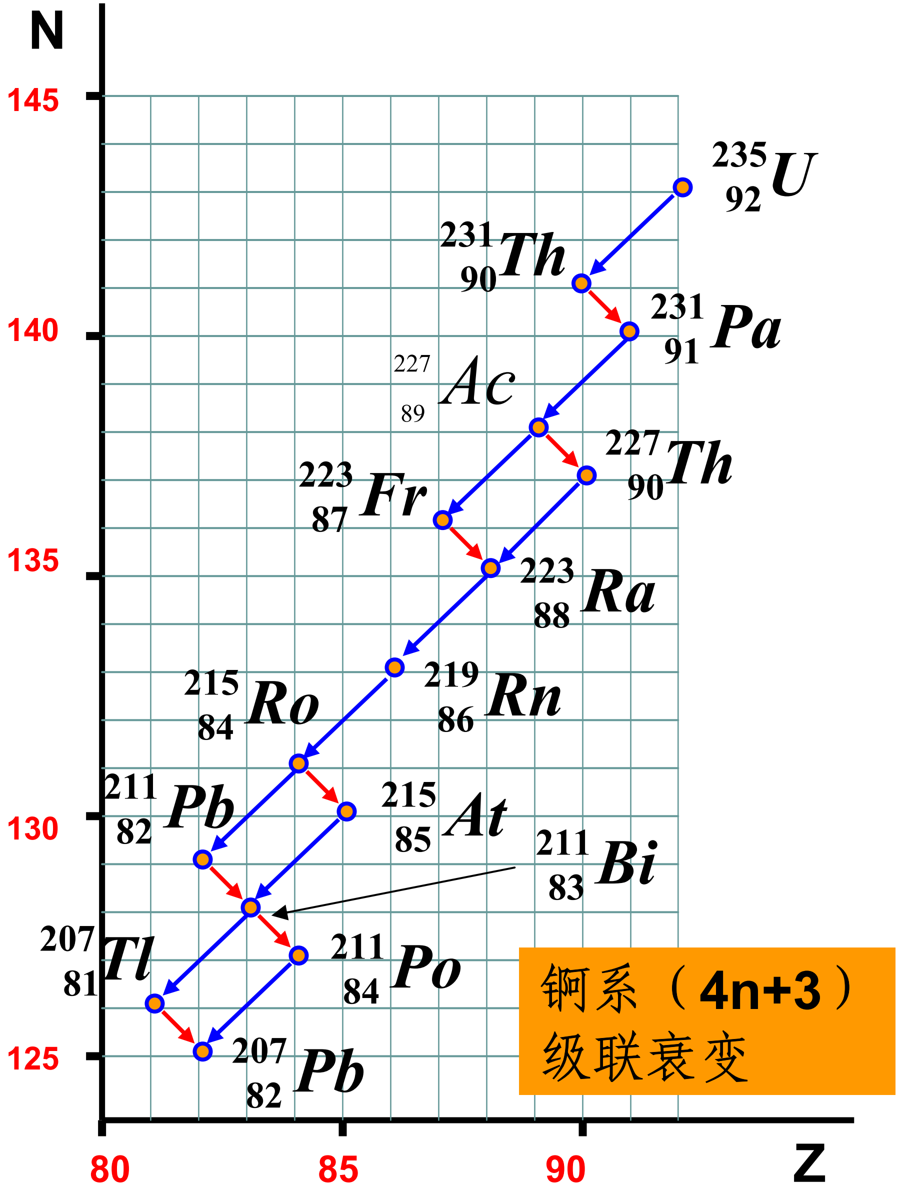
锕 系

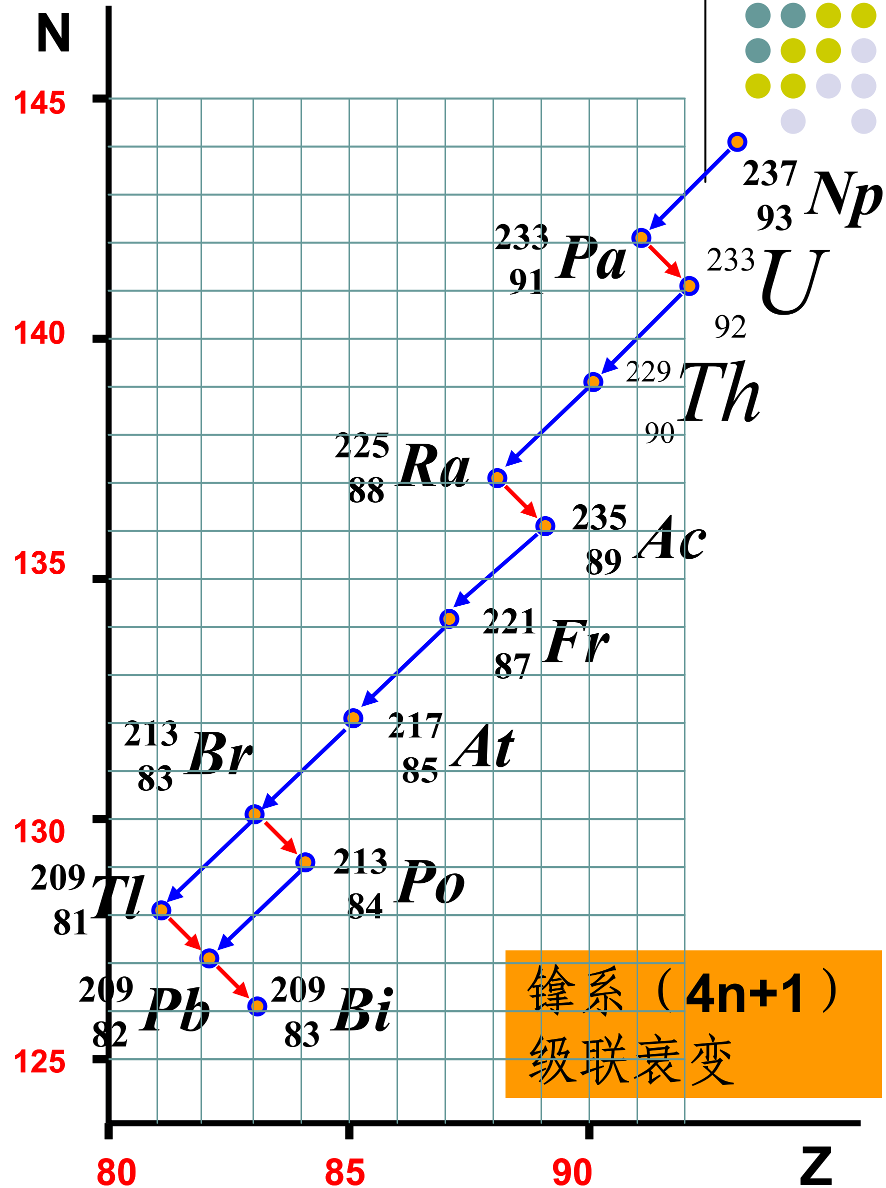


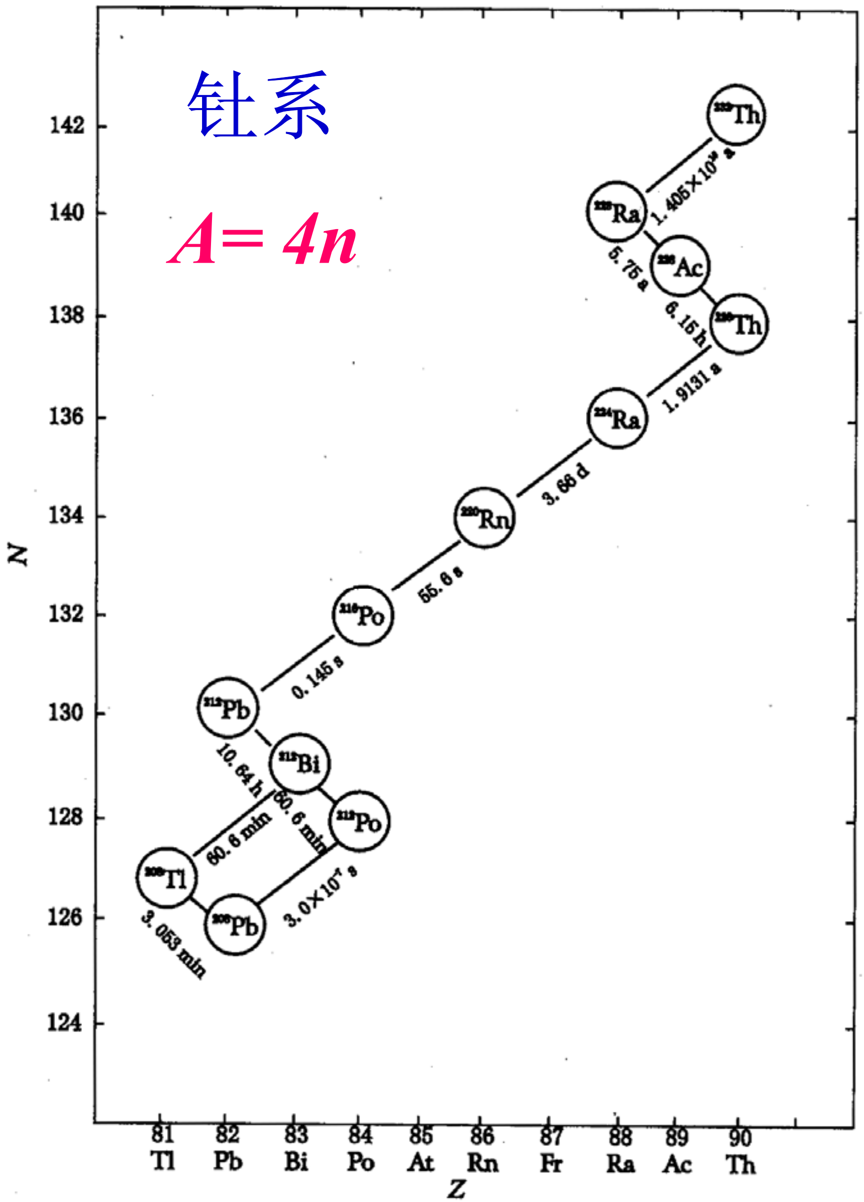
自然界存在四个天然衰变链：钍系、镎系、铀系、锕系
(图中均为自然界存在的放射过程).

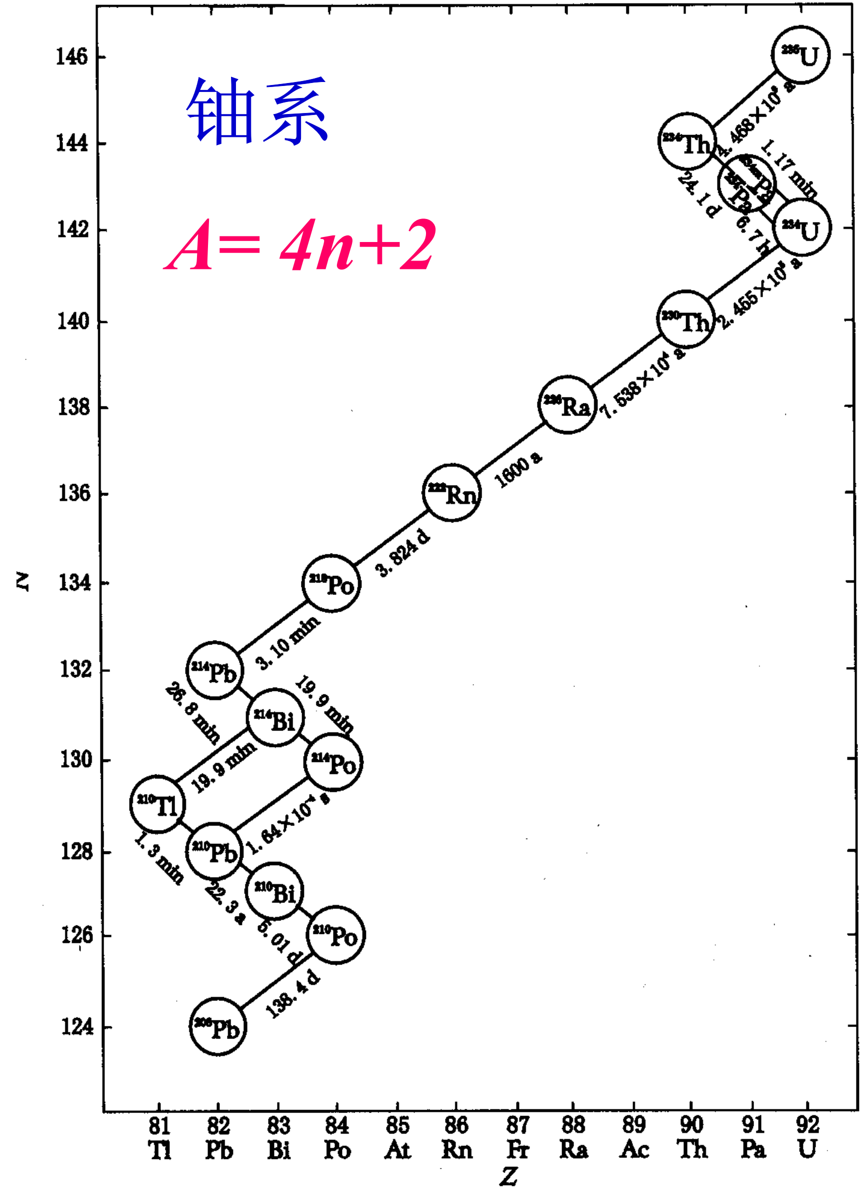


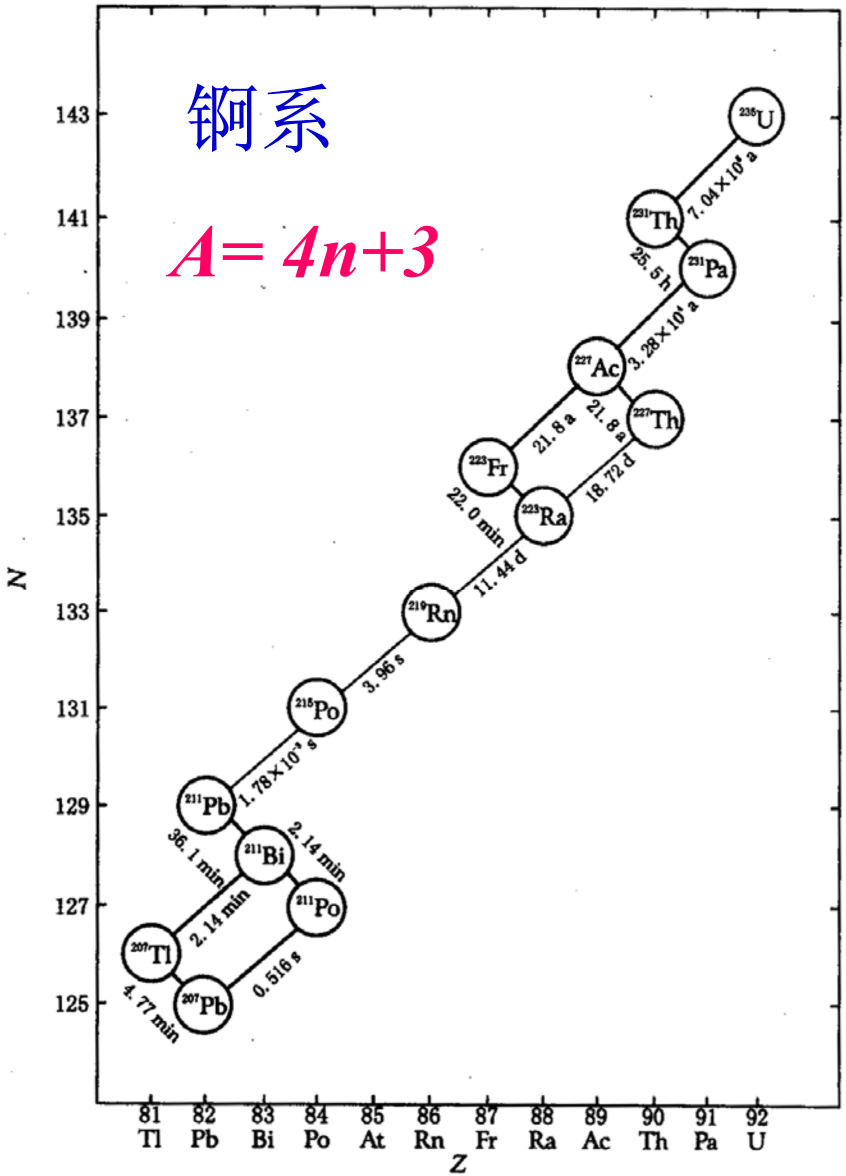


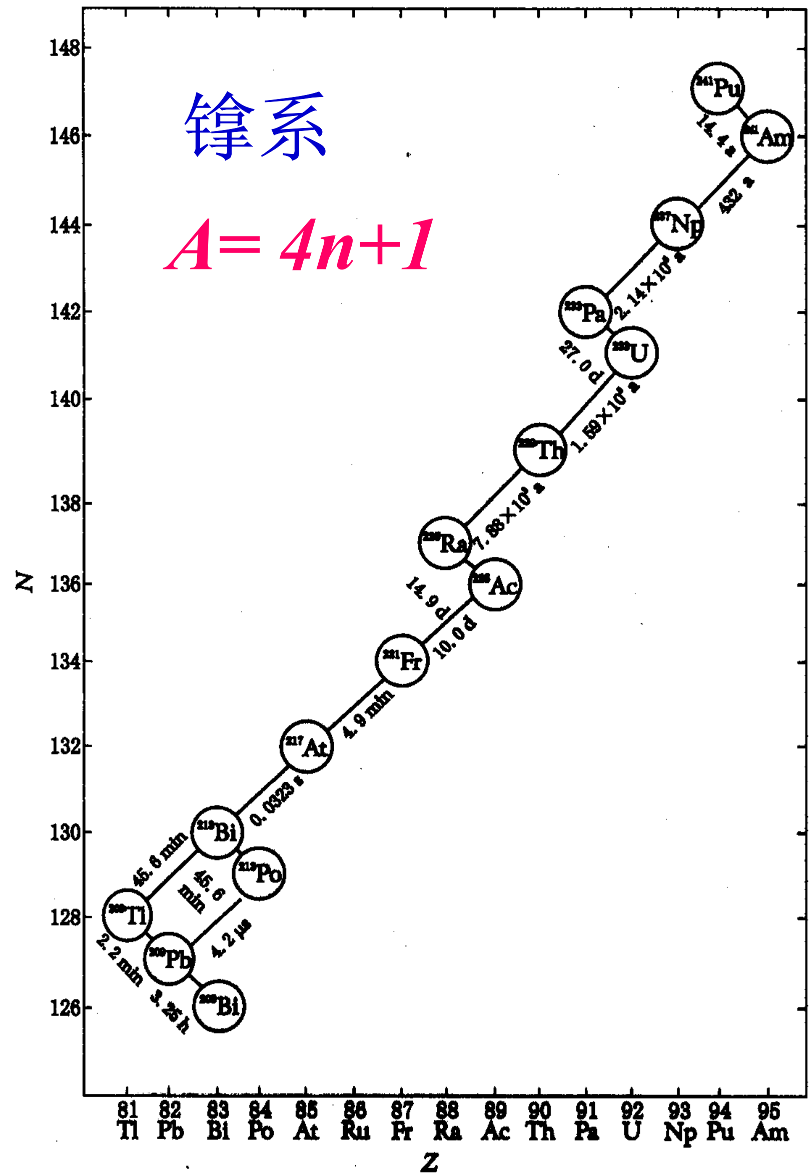

N
145
140
135
130
125
80
85
90
Z
235 92 U
231 90 Th
231 91 Pa
227 89 Ac
227 90 Th
223 87 Fr
223 88 Ra
219 86 Rn
215 84 Ro
215 85 At
211 82 Pb
211 83 Bi
211 84 Po
207 81 Tl
207 82 Pb
锕系（4n+3）
级联衰变


N
145
140
135
130
125
80
85
90
Z
237 93 Np
233 91 Pa
233 92 U
229 90 Th
225 88 Ra
235 89 Ac
221 87 Fr
217 85 At
213 83 Br
213 84 Po
209 81 Tl
209 82 Pb
209 83 Bi
镎系（4n+1）
级联衰变


钍系
A= 4n
N
Z
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Rn
87 Fr
88 Ra
89 Ac
90 Th


铀系
A= 4n+2
N
Z
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Rn
87 Fr
88 Ra
89 Ac
90 Th
91 Pa
92 U


锕系
A= 4n+3
N
Z
235U
7.04×10⁸ a
231Th
25.5 h
231Pa
3.28×10⁴ a
227Ac
21.8 a
227Th
18.72 d
223Fr
22.0 min
223Ra
11.44 d
219Rn
3.96 s
215Po
1.78×10⁻³ s
211Pb
36.1 min
211Bi
2.14 min
211Po
0.516 s
207Tl
4.77 min
207Pb
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Rn
87 Fr
88 Ra
89 Ac
90 Th
91 Pa
92 U


镎系
A= 4n+1
N
Z
241Pu
14.4 a
241Am
432 a
237Np
2.14×10⁶ a
233Pa
27.0 d
233U
1.59×10⁵ a
229Th
7.88×10³ a
225Ra
14.9 d
225Ac
10.0 d
221Fr
4.9 min
217At
0.0323 s
213Bi
45.6 min
213Po
4.2 μs
209Tl
2.2 min
209Pb
3.25 h
209Bi
81 Tl
82 Pb
83 Bi
84 Po
85 At
86 Ru
87 Fr
88 Ra
89 Ac
90 Th
91 Pa
92 U
93 Np
94 Pu
95 Am

返回上级菜单

五、应用

1、天然放射系：利用长期平衡

2、短寿命核素发生器：主要用于生产医用放射性核素。

原理：将寿命较长的核素吸附在某种吸附剂上，它不断衰变，生成短寿命子体；由于母子体在吸附剂上的吸附能力不同，采用适当的化学方法可将子体淋洗下来，而母体仍留在吸附剂上。母体不断衰变生长出子体，因而每隔一定时间就可以淋洗一次。

所以，短寿命核素发生器常称为“母牛”。

例如：^{99m}Tc 发生器：

将母体^{99}Mo 以钼酸铵[$(NH_4)_2\,^{99}MoO_4$]状态吸附在Al_2O_3的玻璃交换柱上。使用时用无菌无热源生理盐水淋洗交换柱，得到过锝酸钠（$Na_2\,^{99m}Tc\,O_4$）溶液。

$$^{99}_{42}Mo \xrightarrow[66.02h]{\beta^-} {}^{99m}_{43}Tc \xrightarrow[6.02h]{IT} {}^{99}_{43}Tc \xrightarrow[2.11\times10^5 y]{\beta^-}$$

由于$T_{1/2}\left({}^{99}_{42}Mo\right) > T_{1/2}\left({}^{99}_{42}Mo\right)$，体系可以建立暂时平衡。

子体活度到达最大时间：$t_m = \dfrac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}\ln\dfrac{\lambda_2}{\lambda_1} = 23(h)$

也就是说，每经过23小时就可以提取一次最多量的^{99m}Tc。由于^{99}Mo不断衰减，因而所得到的^{99m}Tc将一次比一次少。

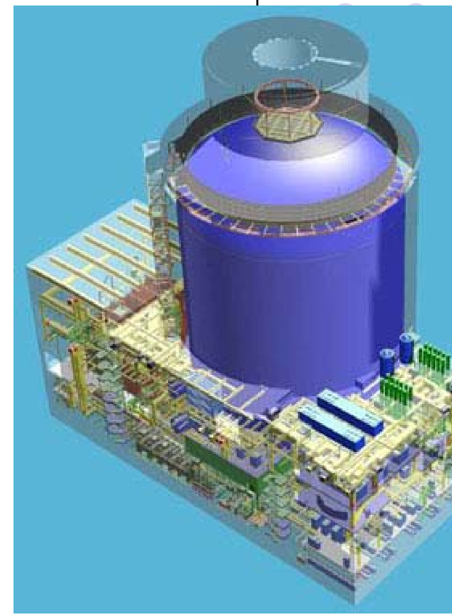
短寿命核素发生器本质上是一些暂时平衡或长期平衡体系。根据需要，短寿命核素发生器的种类很多。

再如：

$$^{113}_{50}Sn \xrightarrow[115.1d]{EC} {}^{113m}_{49}In \xrightarrow[99.5\min]{IT} {}^{113}_{49}In(\text{稳定})$$

这是一个长期平衡体系。子体约经**12**小时活度到达最大值。

人造放射性核素有两种方法：反应堆和加速器。

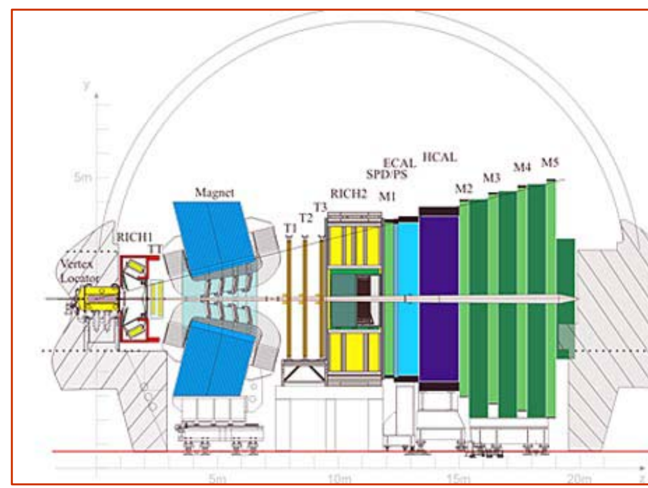


- 反应堆:

一是利用反应堆中强中子流辐照靶核，靶核俘获中子而生成放射性核素（中子活化法）；

二是利用中子引起重核裂变，从裂变碎片中提取放射性核素。

- 加速器：主要通过加速器加速带电粒子来轰击靶核，引起核反应而获得放射性核素。

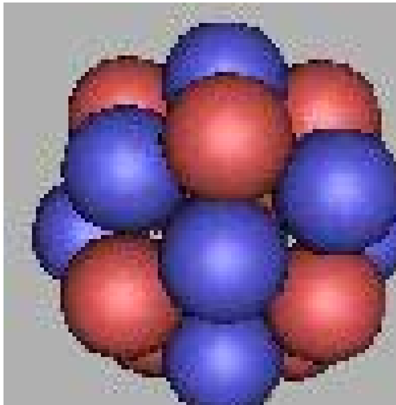


下面讨论人工放射性随时间的生长情况。

设带电粒子束或中子束的强度一定，则单位时间内产生的核素一定，设为P；另一方面，生成的核素要衰变一部分，其衰变常数为λ，$N(t)$表示照射后t时刻的放射性核素数目；则N的变化率为：

$$\frac{dN}{dt} = P - \lambda N$$

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = P$$



$$N(t)=\frac{P}{\lambda}(1-e^{-\lambda t}) \qquad (2.3\text{-}1)$$

放射性活度随时间的变化为:

$$A(t)=\lambda N(t)=P(1-e^{-\lambda t}) \qquad (2.3\text{-}2)$$

$$N_2(t)=\frac{\lambda_1}{\lambda_2}N_1(0)(1-e^{-\lambda_2 t}) \qquad (2.2\text{-}7)$$

P相当于式（**2.2-7**）中的$\lambda_1 N_1(0)$，$N(t)$则相当于公式中的$N_2(t)$。

利用关系 $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ，上式化为：

$$A(t) = P(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}t}) = P(1 - 2^{-t/T_{1/2}})$$

若设$t = nT_{1/2}$，则

$$A(t) = P(1 - 2^{-n})$$

A 随时间的变化关系图为：

当t足够大时，A达到饱和值P。

一般情况下，$t = 5T_{1/2}$时，再增加t，并不会提高活度A。

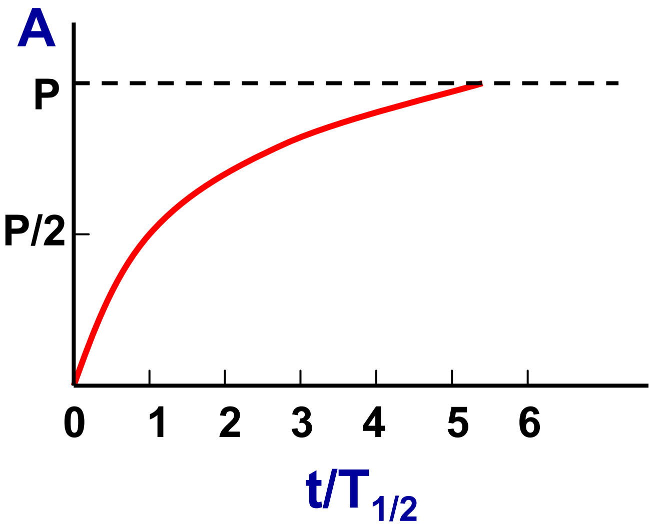


图2-9 人工放射性的生长曲线

利用放射性衰变规律测量地质年代是放射性应用的重要组成部分，这方面已取得巨大的成功。常用的方法有两种：

1、利用长寿命核素的衰变

2、^{14}C鉴年法

1、利用长寿命核素的衰变

假定岩石生成时，放射性母核的数目为$N_P(0)$，则根据放射性指数衰减规律，母体在t时刻的核数目为

$$N_P(t) = N_P(0)e^{-\lambda t} \qquad （2.5-1）$$

假设在初始时刻不存在子核，则在t时刻生成的子核数为$N_d(t)$，则有

$$N_P(0) = N_p(t) + N_d(t) \qquad （2.5-2）$$

由（2.5-1）和（2.5-2）可得

$$N_d(t) = N_P(t)\left(e^{\lambda t} - 1\right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda}\ln\left[1 + \frac{N_d(t)}{N_p(t)}\right] \qquad (2.5\text{-}3)$$

由此可见，只要知道衰变常量 λ，实验测得目前的子核数与母核数之比，即可求得样品的年代。

注意：1）在推导公式时，已经假定初始时刻子核不存在，即$N_d(0)=0$，使用公式（2.5-3）时应注意这一条件是否满足。2）在公式（2.5-3）中的$N_d(t)$表示在测量时的子核累计原子核数，因此，在选取什么样的核素为母核时，应当注意其子核必须保留在岩石样品中，不能逸出。

2、^{14}C鉴年法

这种方法主要用于考古学的年代测定。

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{7}^{14}N \rightarrow {}_{6}^{14}C + p $$

$$ N\left({}^{12}\mathrm{C}\right) : N\left({}^{14}\mathrm{C}\right) = 1 : 1.2\times10^{-12} $$

算得1g有生命机体的碳中含^{14}C的数目约为

$$ N\left({}^{14}C\right) = \frac{1}{12}\times6.02\times10^{23}\times\frac{1.2\times10^{-12}}{1+1.2\times10^{-12}} \approx 6\times10^{10} \qquad (\text{个}/g) $$

1g有生命机体每分钟发生^{14}C衰变的数目约为

$$ A = \lambda N\left({}^{14}C\right) = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}N = \frac{\ln 2}{5730\times365\times24\times60}\times6\times10^{10} \approx 14 \qquad \left(\mathrm{min}^{-1}\right) $$

2.5 放射性鉴年法

当生物体死亡后，不再与大气交换CO_2，生物残骸中的^{14}C 不能补充，以 $T_{1/2}$ = 5730年的速率减少。所以，由生物残骸中的^{14}C 放射性强度$\boldsymbol{n}$（衰变数/克·分），可以鉴定古生物的年代。

$$t = 1.9\times 10^{4}\log\left(14/n\right) \qquad (年)$$

注意：放射

推导：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{\lambda}\ln\frac{A_0}{A}$$

1）工作效 … 探测效率为

100%，若 … 约**12h**。

2）样品的 … 了对某些珍

贵古物的

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}\frac{\log\dfrac{A_0}{A}}{\log e} = 1.9\times 10^{4}\log\frac{14}{n}$$

加速器质谱技术（简称AMS）：

AMS方法测量的不是核素的放射性，而是核素本身原子的数目。

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{N_0}{N}$$

优点：**1**）大大缩短测量时间（缩短近**100**倍），

2）节省样品的量（约**3-4**个量级）。

例：古代木制物件中^{14}C的比放射性，是刚砍伐的树木中此种同位素比放射性的3/5，试确定物件的年龄。

$$t = 1.9\times10^4 \lg\left(14/n\right) \qquad \left(\text{年}\right)$$

$$= 1.9\times10^4 \lg\left(5/3\right) = 4200\left(\text{年}\right)$$

返回本章目录

例：$^{4}\boldsymbol{He}$ 核由两个$\boldsymbol{p}$和两个$\boldsymbol{n}$组成，它们的质量和是

$$2m_p + 2m_n = (2\times 1.007825u + 2\times 1.008665u) - 2m_e$$

$$= 4.032980u - 2m_e$$

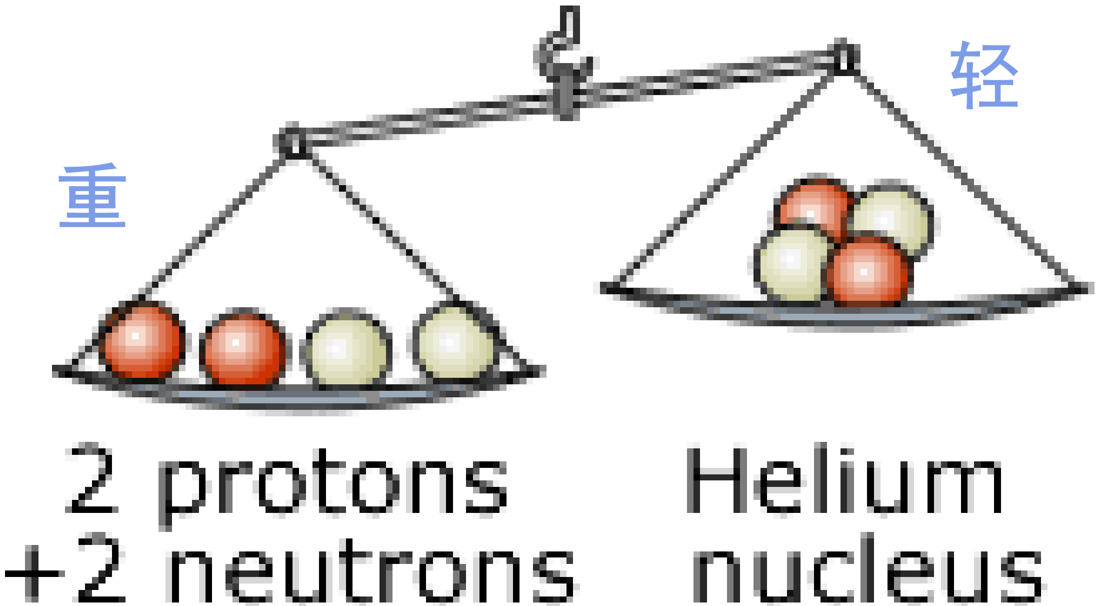
但是$^{4}\boldsymbol{He}$核的质量为 $m_{He} = 4.002603u - 2m_e$

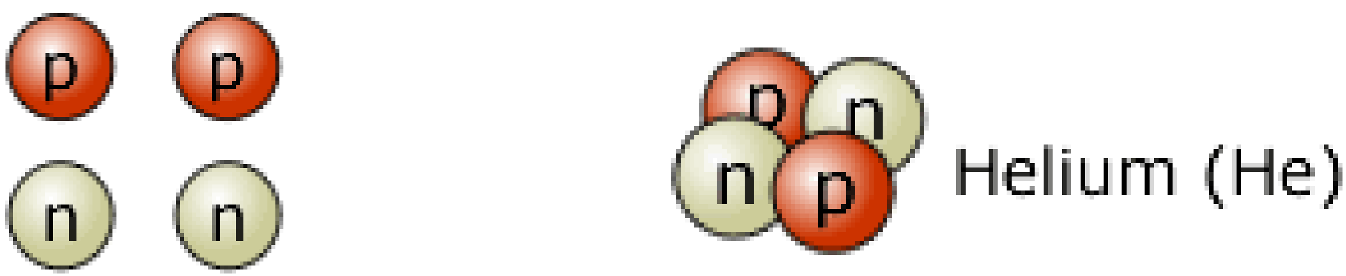
$$\Delta m = (2m_p + 2m_n) - m_{He}$$

$$= 0.030377u$$

为什么 $\Delta m \neq 0?$

天平为何倾斜?





一、能量和质量的一般关系

1、质能关系式

$$E = mc^2$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

$$P = mv$$

$$E^2 = m^2c^4 = \frac{m_0^{\ 2}c^4}{1-v^2/c^2}$$

$$P^2 = m^2v^2 = \frac{m_0^{\ 2}v^2}{1-v^2/c^2} \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = \frac{p^2}{m_0^{\ 2}c^2+p^2}$$

$$\boxed{E^2 = c^2P^2 + m_0^{\ 2}c^4}$$

$$1-v^2/c^2 = 1-\frac{p^2}{m_0^{\ 2}c^2+p^2} = \frac{m_0^{\ 2}c^2}{p^2+m_0^{\ 2}c^2}$$

$$E^2 = \frac{m_0^{\ 2}c^4}{m_0^{\ 2}c^2}\left(P^2+m_0^{\ 2}c^2\right) = c^2P^2 + m_0^{\ 2}c^4$$

一物体质量改变△*m*，相应的能量改变量为△*E*：

$$\boxed{\Delta E = \Delta mc^2}$$

运动物体的动能:

$$E_K = E - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - m_0c^2$$

将 $\sqrt{1-v^2/c^2}$ 按傅立叶级数展开，当 $v << c$ 时，忽略高阶小量，得

$$E_K \approx m_0c^2\left(1+\frac{1}{2}\cdot\frac{v^2}{c^2}-1\right)=\frac{1}{2}m_0v^2$$

对于光子，静止质量为零

$$E_K = E = cP$$

对于高能电子，$v \approx c$，$E >> m_0c^2$，则有

$$E_K \approx E \approx cP$$

2、能量单位

原子核物理学中，常用**电子伏特（eV）**作为能量单位。1eV是一个电子在真空中通过1V电位差所获得的动能。

$$1eV = 1.60217646\times 10^{-19}J$$

此外，还有keV、MeV和GeV。

$$1uc^2 = \frac{1.660566\times 10^{-27}kg\times\left(2.9979\times 10^{8}m/s\right)^2}{1.6022\times 10^{-19}J} = 931.5\left(MeV\right)$$

对于电子，它的静止质量能

$$E_0 = m_e c^2 = 0.511MeV$$

二、质量亏损（mass defect）

1、原子核的质量总小于组成它的核子质量之和。则组成某一原子核的核子质量和与该原子核的质量之差称为原子核的质量亏损。

$$\Delta m(Z,A) \equiv Zm_p + (A-Z)m_n - m(Z,A)$$

忽略电子的结合能，以原子质量代替核的质量。

$$\Delta m(Z,A) = \Delta M(Z,A) = ZM(^1H) + (A-Z)m_n - M(Z,A)$$

所有的核都存在正的质量亏损，即:

$$\Delta M(Z,A) > 0$$

2、广义质量亏损

定义：一个系统变化前后的静止质量的改变量△M。

$$\Delta M=\sum M_i-\sum M_f$$

$$\Delta E=\sum E_f-\sum E_i$$

3、质量过剩（质量盈余）（mass excesses）

$$\Delta(Z,A)\equiv\left[M(Z,A)-A\right]c^2$$

$$M\left(Z,A\right)=A+\frac{\Delta\left(Z,A\right)}{931.5}$$

三、原子核的结合能

1、定义：自由核子结合成原子核时所放出的能量称为结合能**B(Z,A)**

$$B(Z,A)\equiv\Delta M(Z,A)c^2$$

$$B(Z,A)\equiv\left[ZM\left({}^{1}H\right)+\left(A-Z\right)m_n-M\left(Z,A\right)\right]c^2$$

如：对于^4**He**，　$B(^4He)=\Delta M(^4He)c^2=28.30MeV$

也就是说，两个质子、两个中子结合成一个氦核，要放出**28.30MeV**的能量。或者说，要将^4**He**核拆成自由的核子，为了克服核子之间的作用力，要用**28.30MeV**的能量对体系做功。

用质量过剩表示结合能:

$$B(Z,A)=Z\Delta(^{1}H)+(A-Z)\Delta(n)-\Delta(Z,A)$$

$$B(Z,A)=\left[ZM(^{1}H)+(A-Z)m_n-M(Z,A)\right]c^2$$

$$=\left\{Z\left[1+\frac{\Delta(^{1}H)}{c^2}\right]+(A-Z)\left[1+\frac{\Delta(n)}{c^2}\right]-\left[A+\frac{\Delta(Z,A)}{c^2}\right]\right\}c^2$$

$$=Z\Delta(^{1}H)+(A-Z)\Delta(n)-\Delta(Z,A)$$

前面例题中，查表得

$\Delta(^{1}H)=7.289MeV$, $\Delta(n)=8.071MeV$, $\Delta(2,4)=2.425MeV$

则 ^{4}**He**的结合能为:

$$B(2,4)=2\Delta(^{1}H)+2\Delta(n)-\Delta(2,4)$$

$$=2\times7.289+2\times8.071-2.425$$

$$=28.295MeV$$

2、平均结合能（也称比结合能）

定义：原子核平均每个核子的结合能。

$$\varepsilon(Z,A) \equiv B(Z,A)/A$$

意义：把质量数为**A**，电荷数为**Z**的核打碎成自由核子时，平均要对每个核子所作的功。（或核子结合成原子核时，平均一个核子所释放出的能量）

ε 的大小表征了原子核结合的松紧程度。ε 越大的原子核结合得越紧。

例如：对^{4}He

$$\Delta m = (2m_p + 2m_n) - m_{He} = 0.030377u$$

$$B(^4He) = \Delta M(^4He)c^2 = 28.3MeV$$

$$\varepsilon\left(^4He\right) \equiv B\left(^4He\right)/A = 7.074\left(MeV\right)$$

对^{2}H

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_H = 0.002388u$$

$$B(^2H) = \Delta M(^2H)c^2 = 2.224MeV$$

$$\varepsilon\left(^2H\right) \equiv B\left(^2H\right)/A = 1.112\left(MeV\right)$$

结论：^{4}He核比^{2}H核结合更紧密，也更稳定。

3、比结合能曲线

以ε为纵坐标，A为横坐标作图，得到的曲线为比结合能曲线。

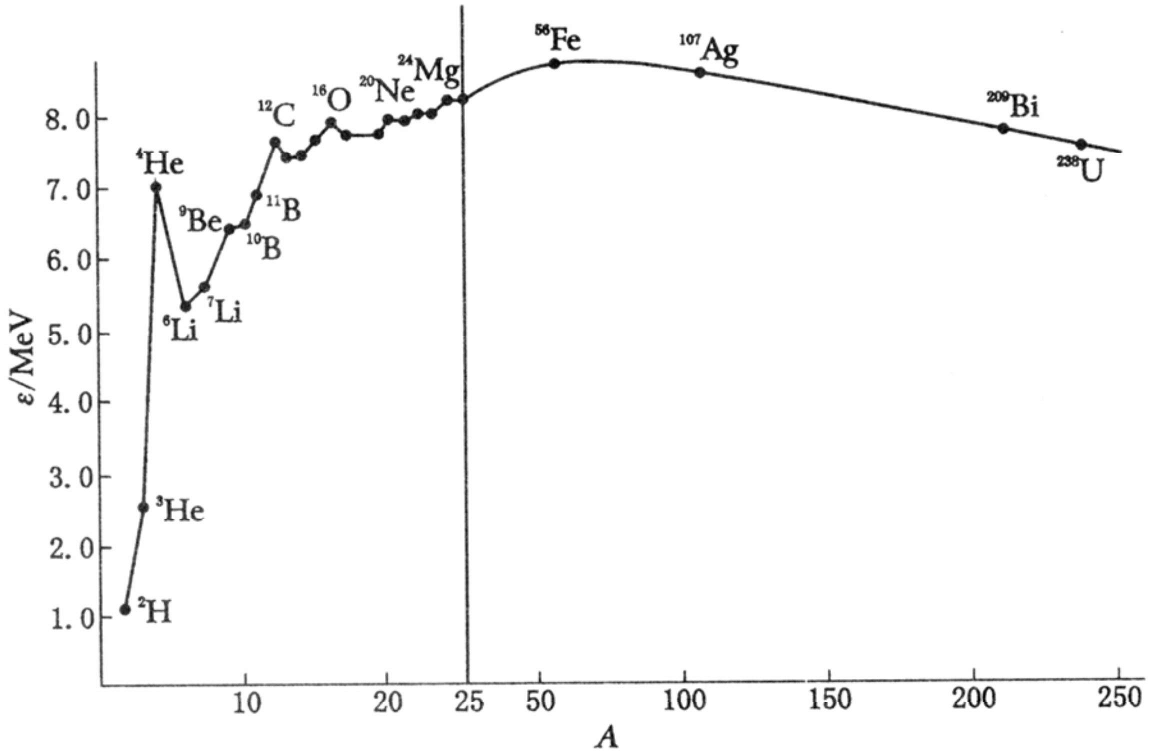


图 2-10　比结合能曲线

由曲线可以得到如下规律：

1）A<30，曲线的趋势是上升的，但起伏较大，在$A=4n$时曲线有峰值。偶偶核并且$N=Z$处的比结合能极大，暗示核内有某种集团（α集团）存在。

2）30<A<200，曲线平滑，近似有

$$\varepsilon = B/A \sim 8MeV/N_u, \qquad B \propto A$$

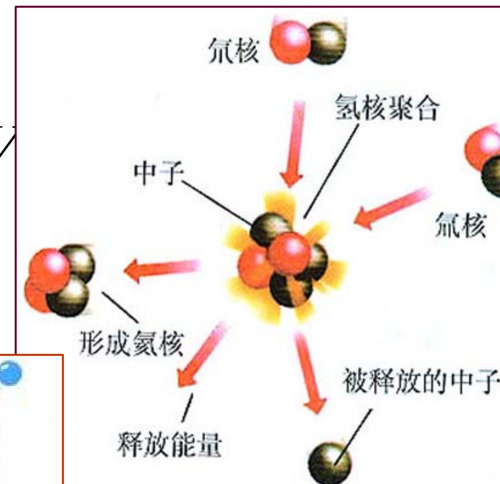
3）A>200，ε值快速下降，这些核多数是不稳定的，会发射粒子或自发裂变。A>240的天然核素不存在。

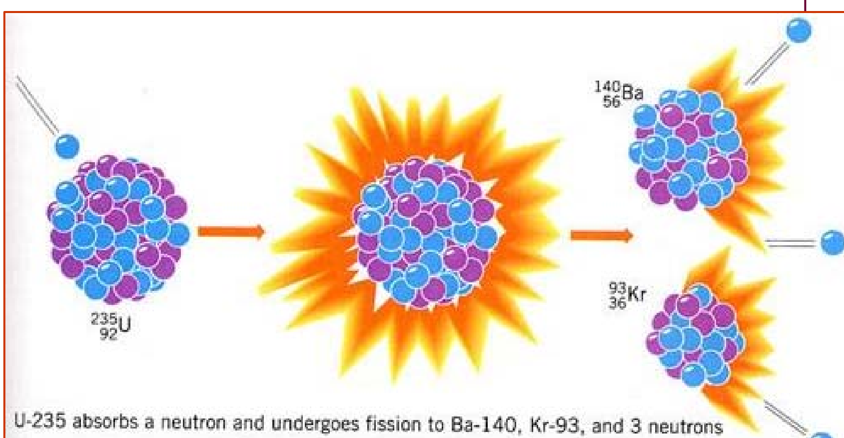
结论：中间高，两端低，说明轻、重核结合比较松，中等质量核结合比较紧。

正是根据这样的比结合能曲线，物理学家预言了原子能的利用。一种是重核的裂变；另一种是轻核的聚变。

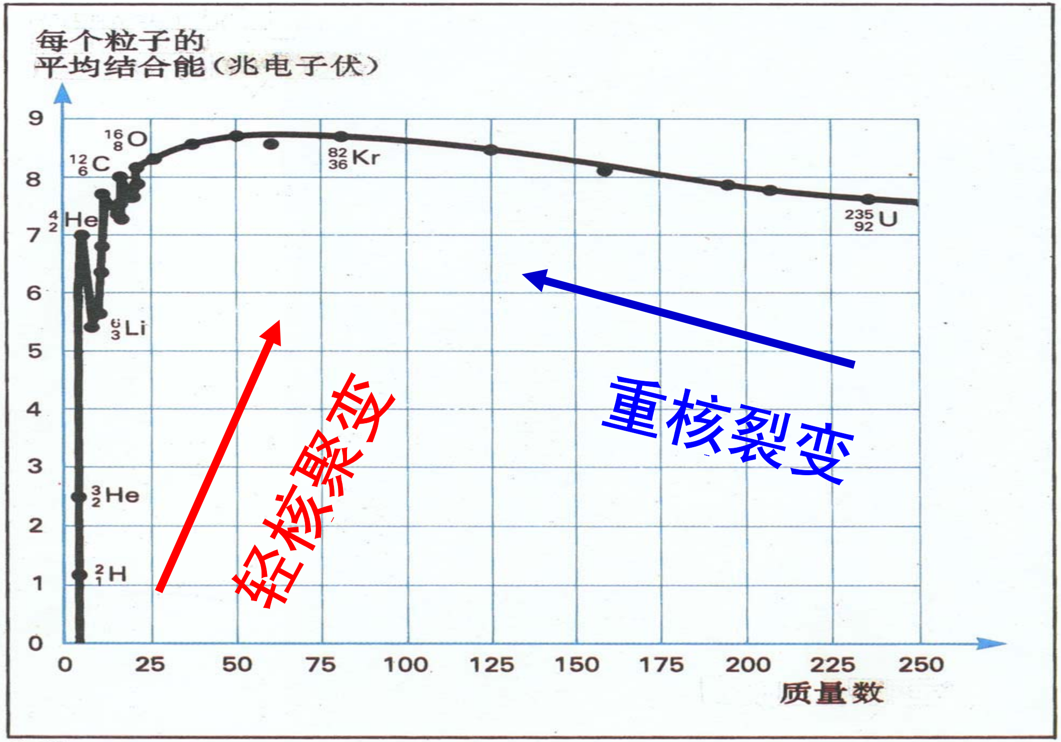
$$n+{}^{235}U \longrightarrow {}^{236}U^{*} \longrightarrow f_1+f_2+2.5n+200MeV$$

$$D+T \longrightarrow {}^{4}He+n+17.6MeV$$





U-235 absorbs a neutron and undergoes fission to Ba-140, Kr-93, and 3 neutrons



1 各原子核中，每个核子的平均结合能随质量数而变化

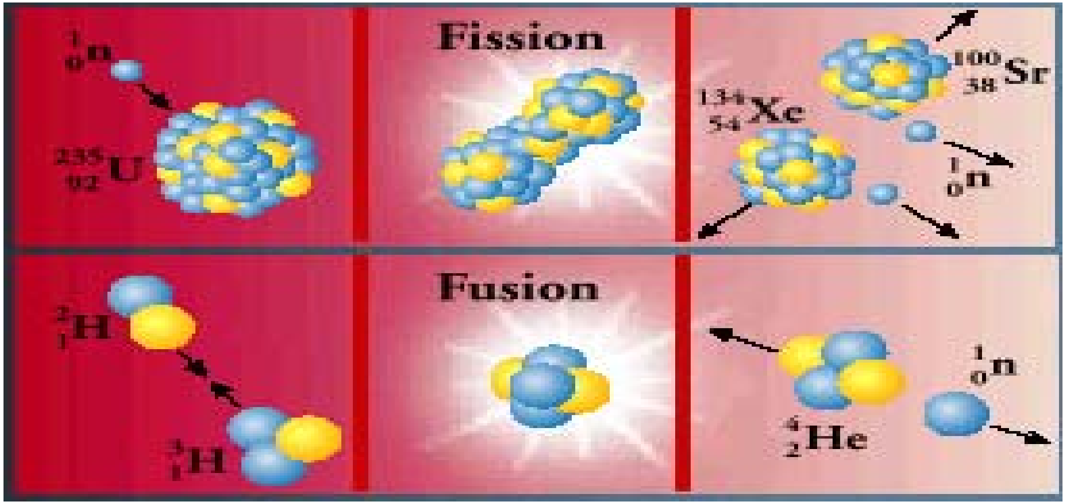
6-9 MeV

2 中等重量的原子核的比结合能较大

- 释放能量途径：

1）重核裂变

2）轻核聚合成原子核



例：估算裂变释放的能量

$$n + {}^{235}U \rightarrow ({}^{236}U) \rightarrow X + Y + 2n + \Delta E$$

假设裂变成质量相等的两块，质量数各约为117

${}^{235}U$ 核子平均结合能 7.6 MeV

质量数为118的原子核平均结合能 8.6 MeV

两者平均结合能差 ~1 MeV

230多个核子 总的 ΔE = 200 MeV!

比较：裂变能 $n + 235U \rightarrow X + Y + \Delta E$ 200 MeV

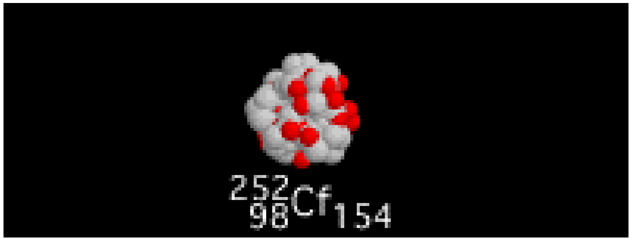
化学能 $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta E$ 4 eV

汽油与氧的爆炸，一个分子释放 40-50 eV

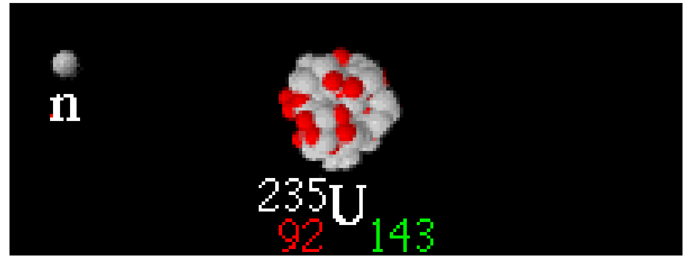
TNT 爆炸自身释放能量，每个分子 30 eV

• 释放能量举例

$^{252}C_f$ α 自发裂变



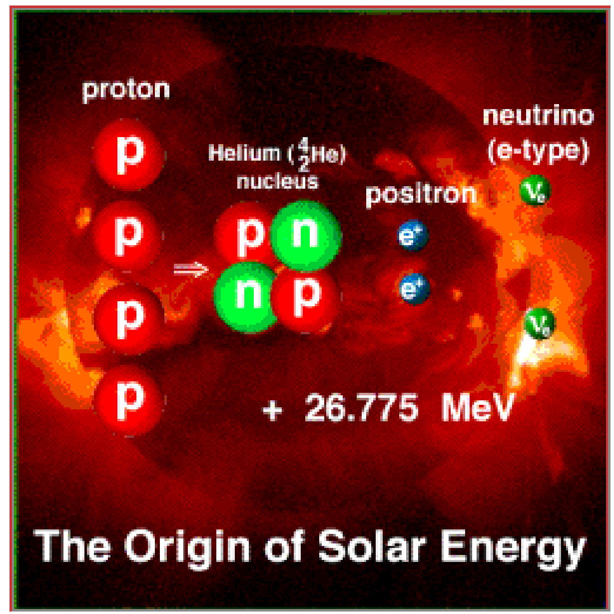
中子引起 ^{235}U 裂变



$$E=mc^2$$

H 原子核聚合

H 的燃烧



太阳能

四、最后一个核子的结合能

1、定义：一个自由核子与核的其余部分结合成一个原子核时所释放出来的能量。

也就是从原子核中分离出一个核子所需要的分离能。

2、最后一个质子的结合能

$$S_p(Z,A)=\Delta mc^2$$

$$=\left[m\left({}^1H\right)+m(Z-1,A-1)-m(Z,A)\right]c^2$$

$$=\left[\frac{\Delta(1,1)}{c^2}+1+\frac{\Delta(Z-1,A-1)}{c^2}+(A-1)-\frac{\Delta(Z,A)}{c^2}-A\right]c^2$$

$$=\Delta(1,1)+\Delta(Z-1,A-1)-\Delta(Z,A)$$

或者:

$$S_p(Z,A)=B(Z,A)-B(Z-1,A-1)$$

3、最后一个中子的结合能

$$S_n(Z,A) \equiv [M(Z,A-1)+m_n-M(Z,A)]c^2$$
$$=\Delta(Z,A-1)+\Delta(n)-\Delta(Z,A)$$

或者:

$$S_n(Z,A)=B(Z,A)-B(Z,A-1)$$

意义：通过最后一个核子的结合能的比较，可以比较该原子核与邻近的原子核的稳定性。

例：

$$S_p(^{16}O)=12.12MeV$$

$$S_p(^{17}F)=0.61MeV$$

$$S_n(^{16}O)=15.66MeV$$

$$S_n(^{17}O)=4.15MeV$$

这表明，最后一个核子结合能对不同核素可以差别很大，**^{16}O比^{17}O，^{17}F稳定得多**。

返回本章目录

一、液滴模型

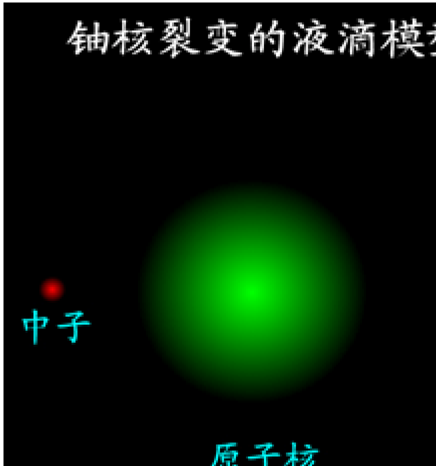
研究核结构的困难：

1）对核力的作用形式还不是很清楚；

2）核是多粒子体系，数学运算上存在困难。

唯象方法——模型法：

以实验事实为根据，用某种熟悉的事物来比喻，提出原子核结构或核反应机制的某种模型。通过理论和更多的实验结果比较，以检验模型的正确性，并确定其适用范围。



液滴模型： 将原子核比作一个带电液滴，将核子比作液体中的分子。

实验根据：

（1）原子核的结合能正比于A。这说明了核子间的相互作用力具有饱和性，否则 $B \propto A^2$ 。这与液体中分子力的饱和性类似。

（2）核体积正比于核子数，ρ_N 为常数，表示核不可压缩，与液体的不可压缩类似。不过核是带电荷的液滴。

二、体积能、表面能和库仑能等

1、体积能 B_V ----结合能的主要项

$$V = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A$$

$$B_V \propto V \propto A$$

所以，

$$B_V = a_V A$$

2、表面能 B_S

表面能 $B_S \propto$ 核表面积　　$S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$

$$B_s = -a_s A^{2/3}$$

3、库仑能B_C

质子间的静电相互作用对于结合能的贡献，称为库仑能。

$$\rho=\begin{cases}\dfrac{Ze}{\frac{4}{3}\pi R^3}=\dfrac{3Ze}{4\pi R^3} & r\le R\\ 0 & r>R\end{cases}$$

$$B_c=-\int_0^R dW=-\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{3}{5}\frac{Z^2e^2}{R}$$

$$B_c=-\frac{3}{20\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r_0}Z^2A^{-1/3}=-a_cZ^2A^{-1/3}$$

$$\therefore\qquad B_c=-a_cZ^2A^{-1/3}$$

4、对称能B_a

当原子核中质子数与中子数相等时，核比较稳定。因此结合能公式中应包括表征质子和中子对称相处趋势的项，通常称为对称能B_a。

$$B_a = -a_a\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2 A^{-1}$$

5、对能B_p

质子、中子分别有成对相处的趋势，这种效应对结合能的贡献称为对能B_p。

$$B_p = \delta a_p A^{-1/2}$$

其中，$\delta = \begin{cases} 1 & \text{偶偶核} \\ 0 & \text{奇}A\text{核} \\ -1 & \text{奇奇核} \end{cases}$

三、结合能的半经验公式

$$B(Z,A)=B_V+B_S+B_C+B_a+B_p$$

$$=a_V A-a_s A^{2/3}-a_c Z^2 A^{-1/3}-a_a\left(\frac{A}{2}-Z\right)^2 A^{-1}+\delta a_p A^{-1/}$$

（2.9-4）

其中，

$$a_V=15.835MeV$$

$$a_s=18.33MeV$$

$$a_c=0.714MeV$$

$$a_a=92.80MeV$$

$$a_p=11.2MeV$$

四、比结合能半经验公式

将结合能半经验公式（**2.9-4**）除以*A* 得比结合能公式:

$$\varepsilon(Z,A)=\varepsilon_V+\varepsilon_S+\varepsilon_C+\varepsilon_a+\varepsilon_p$$

$$=a_V-a_sA^{-1/3}-a_cZ^2A^{-4/3}-a_a\left(\frac{A}{2}-Z\right)^2A^{-2}+\delta a_pA^{-3/2}$$

五、应用举例

1、核素的质量

由核素的结合能和质量的关系可以得到核素的原子质量

$$M(Z,A)\equiv ZM\left({}^{1}H\right)+(A-Z)m_n-B(Z,A)/c^2$$

将（2.9-4）式代入得

$$M(Z,A)=ZM\left({}^{1}H\right)+(A-Z)m_n-a_V'A+a_s'A^{2/3}+a_c'Z^2A^{-1/3}$$

$$+a_a'\left(\frac{A}{2}-Z\right)^2A^{-1}-\delta a_p'A^{-1/2}$$

式中参量 $a'=a/c^2$

返回

计算结果与实验值的比较表明，在总体上两者是符合得很好的。

但是，对于很轻的核以及在某些区域如Z或N为50，82等“幻数”附近，计算结果与实验值的差别较大。这是由于液滴模型只能给出统计结果，只能给出平均结果，不能精细地反映核素个体的特性。这表明，液滴模型有它的局限性。

2、比结合能曲线

由比结合能半经验公式作出ε-A 曲线，如图2-12。

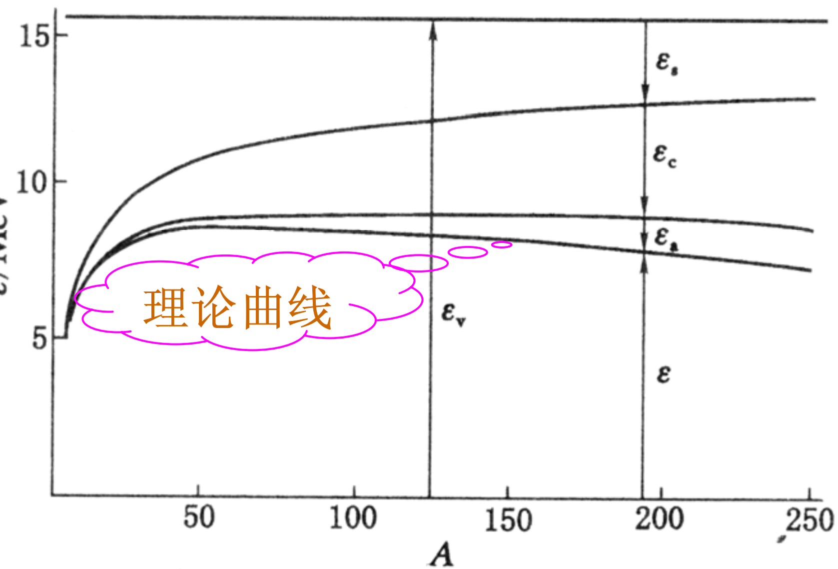


图 2-12　比结合能中各项的贡献

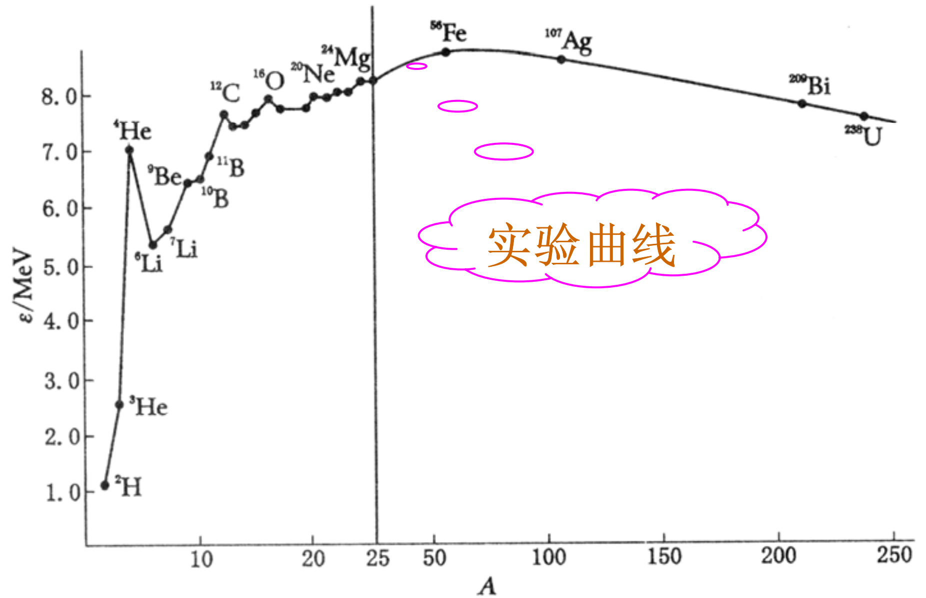


图 2-10　比结合能曲线

图2-12中的另几条曲线形象地表示了结合能公式中各项随质量数A 变化时比结合能的变化趋势。其中，

体积能项是常量，这是液滴模型的主要特征;

表面能项的数值随A 减小，这是由于球体越大，表面核子所占的比例就越小的缘故;

库仑能项的数值随A 增大，这是因为β稳定线上的核素粗略地有$Z \propto A$，则有$\varepsilon_C \propto A^{2/3}$。

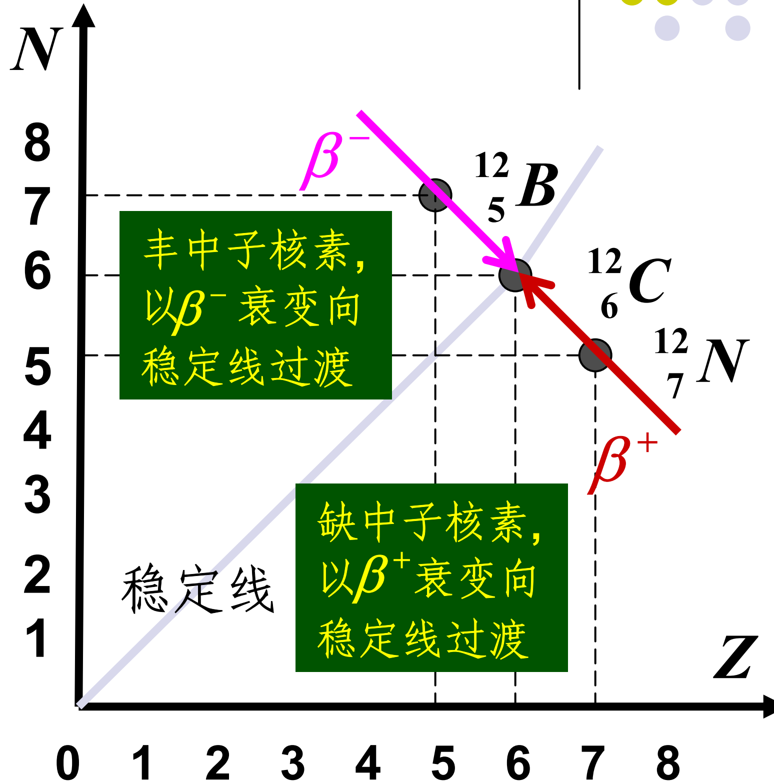
对称能项的数值随A 也增大，这是由于β稳定线上的核素的N/Z 随A 增加。

图中没有标出对能的贡献。

返回

3、β 稳定线

实验上发现的核素有2000多种，其中只有近300种是稳定的。把具有β稳定性的核素，标绘在Z-N平面上，发现这些原子核都集中在一条狭长的区域内，如图2-11所示。通过这个β稳定区的中心可以作一条曲线，称之为β稳定线。



对于*A*＜40的原子核，β稳定线近似为直线，*N*=*Z*，即中质比*N*/*Z*=1。对于*A*＞40的原子核，β稳定线的中质比*N*/*Z*＞1，其经验关系式是

$$Z=\frac{A}{1.98+0.0155A^{2/3}}$$

此外，根据液滴模型，由质量半经验公式，可以讨论稳定核素的Z和A的关系。

设A一定，则满足

$$\frac{\partial M(Z,A)}{\partial Z}=0$$

的核素是β稳定的。β稳定的核素其电荷数用$\mathrm{Z_S}$表示，则

$$Z_S=\frac{\left[a'_a+m_n-M\left({}^1H\right)\right]A}{2\left(a'_a+a'_C A^{2/3}\right)}\approx\frac{A}{2+0.0155A^{2/3}}$$

4、同量异位素质量抛物线

β 衰变是相邻的同量异位素之间的转变。一般地说，β 衰变是调节核内中质比使核达到稳定的主要途径。

将△(*Z*，*A*)随*Z*，*N* 的变化关系描绘在*Z*，*N*，△(*Z*，*A*)三维坐标中，得到了核素的质量曲面图，图3.6所示（徐四大书）。质量过剩△(*Z*，*A*)小的核形成了一条峡谷，这些核比较稳定。

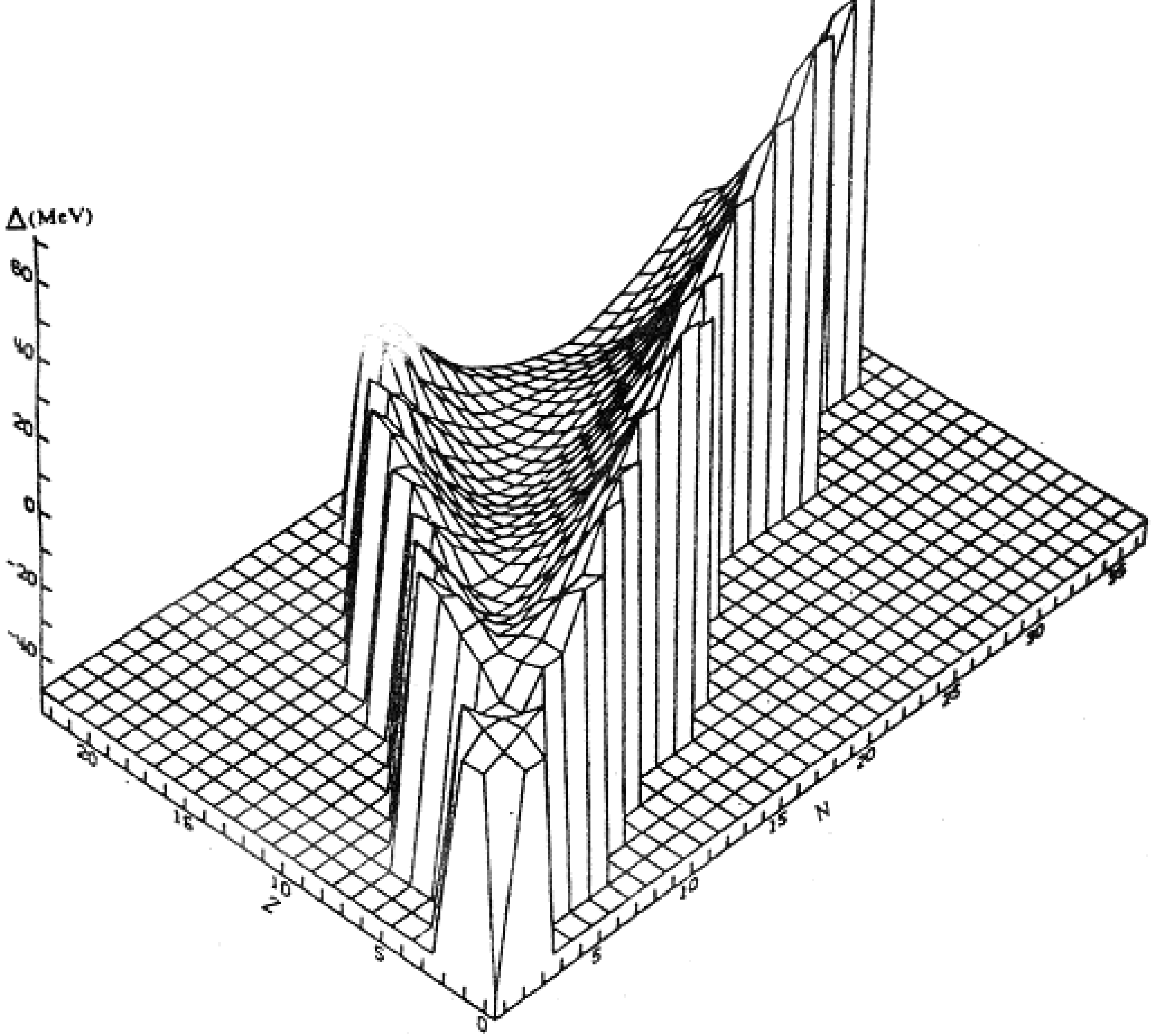


图 3. 6　质量曲面图

[取自 Scientific American, Vol. 238, No. 6, 63(1978)]

处于峡谷上的原子核不稳定，通过衰变向底谷靠近，β稳定线处于峡谷中。对于*A*一定的同量异位素，***M-Z*关系曲线为一抛物线**，实际就是质量曲面图上的一条断面线，由质量半经验公式知：

$$M\left(Z,A\right)=K_1+K_2Z+K_3Z^2-K_\delta$$

其中

$$K_1=\left[m_n-\left(a_V'-\frac{1}{4}a_a'-a_s'A^{-1/3}\right)\right]A$$

$$K_2=-\left[m_n-M\left({}^1H\right)+a_a'\right]$$

$$K_3=\left(a_a'+a_c'A^{2/3}\right)A^{-1}$$

$$K_\delta=\delta a_p'A^{-1/2}$$

当A一定时，$M(Z,A)$与Z的关系为一条顶点在下的抛物线。曲线上的核素可以通过β^-或β^+衰变（或EC）趋向抛物线的顶点。

（1）对于奇A核：$K_\delta = 0$，只有一条抛物线，顶点在$Z=Z_S$处，最小质量的核素就是A一定时同量异位素中唯一的β稳定核素。曲线左支上的核素是丰中子的，发生β^-衰变逐步趋向β稳定。曲线右支上的核素是缺中子的，发生β^+衰变（或EC）趋向β稳定。

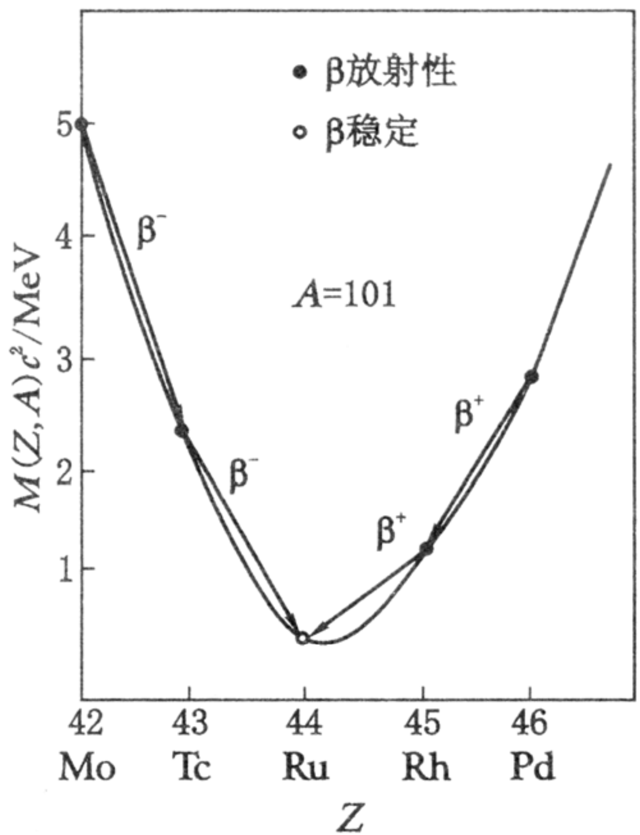


图 2-13 $A=101$ 的质能抛物线

（2）对于偶A核：δ 可以取正值，也可以取负值，*A*一定的同量异位素质量抛物线有两条：奇奇核的抛物线在上，偶偶核的在下，两抛物线的形状相同，但顶点相距$2K_\delta$，β 衰变在两抛物线间交替进行。β 稳定核素可以有两个，也可以有三个，而且一般是偶偶核。从图中还可看出，有的奇奇核能同时具有β^- 和β^+ 放射性。

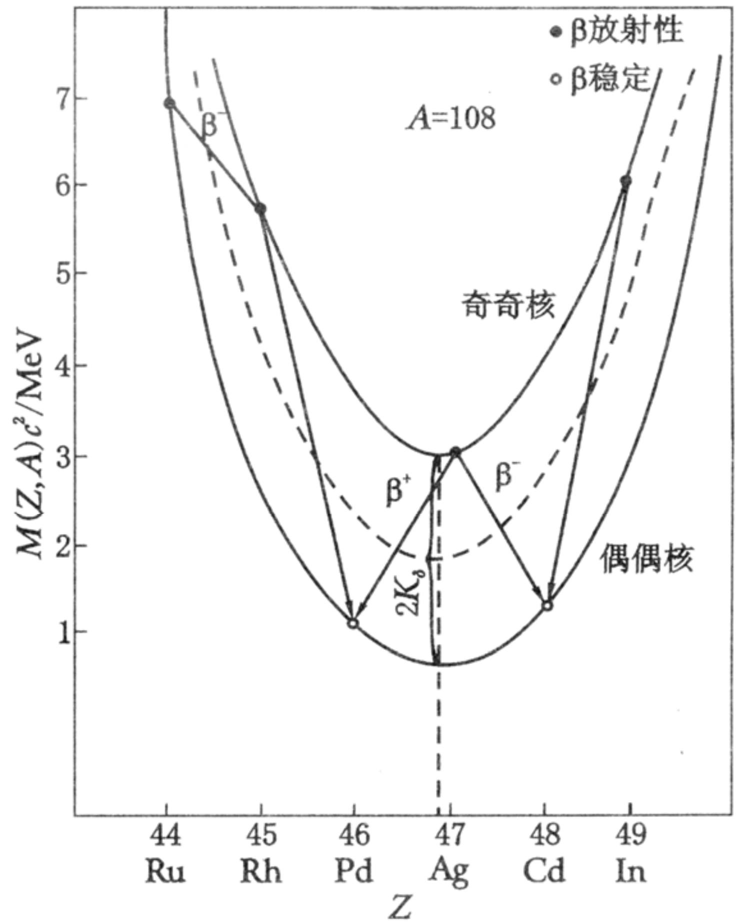


图 2-14　A = 108 的质能抛物线

5、重核的不稳定性

实验发现，能发生α衰变的天然放射性核素都是一些重核，其中最轻的是^{142}Ce（丰度为11.08%），很重的核几乎都具有α放射性。

液滴模型预言的结果为:

$A>90$: 可能会发射α粒子，天然中A最小的是^{144}Nd，丰度为23.8%，$T_{1/2}=2.29\times10^{15}a$;

$A>230$: 可自发裂变。原因是库仑斥力与Z^2成正比，A大，Z就高，强烈的库仑斥力在重核中存在，使重核内核子间结合变松。

小　结

液滴模型公式能够成功地计算原子核基态的结合能和质量，是现有计算公式中和实验结果符合得最好的。

液滴模型很简单，但抓住了核子间相互作用的主要点——核力饱和性，因而取得了成功，使人们对原子核的认识深入了一大步，为利用核能源奠定了理论基础。但它对核的内部结构没有任何说明，存在很大的局限性。

液滴模型至今仍在发展中。还可以将液滴考虑得更深入一些。用液滴形变解释原子核裂变是液滴模型又一重要成功之处。

返回本章目录

本章重点：

1、放射性

1）基本概念：放射性、核衰变、衰变常数、

半衰期、平均寿命、放射性活度、

比活度、射线强度；

2）基本规律：指数衰减规律；连续衰变规律；

3）人工放射性的生长；^{14}C鉴年；

2、原子核的稳定性

1）质量亏损，质量过剩，结合能，比结合能

2）液滴模型；原子核稳定性的经验规律。

作业：

4、6、8、10、11、12、18

注意：

作业题2-10中体重按自己的实际体重代入。作业题2-12中用质量过剩计算。