



## 第二章

# 核转变



# 学习目标

- 1.掌握放射性核素的衰变类型，单一放射性核素的衰变规律
- 2.熟悉医学放射性核素的生产与制备方法及放射性核素的临床应用
- 3.了解放射性核素长期平衡与暂时平衡的区别

## The Nucleus and Radioactivity



# 教学内容:

---

- 第一节 放射性核素的衰变类型
  - 第二节 放射性核素的衰变规律
  - 第三节 医用放射性核素的生产与制备
  - 第四节 放射性核素在医学上的应用
-

## 我们身边的放射性



\*原子核放射性的应用： **考古学**——测定化石 ( $^{14}\text{C}$ ) 的地质年代。

**医学**——示踪原子、ECT、放疗、 $\gamma$ 刀等。



1903年，**贝克勒尔**与**皮埃·居里**和**居里夫人**因发现放射线荣获诺贝尔物理学奖。



皮埃尔·居里和居里夫人



贝克勒尔在实验室

1898年后，居里夫妇又花了4年时间，从几吨沥清铀矿渣中分离出0.12克纯氯化镭后，测出其发出射线比铀强200多万倍。**这项工作，使她获1911年诺贝尔化学奖。**



居里夫人在实验室



# 原子核 (nucleus) 的基本性质

## 一. 原子核的组成

### 1. 中子-质子模型:

1886年戈尔茨坦发现氢核, 即质子。  
1932年物理学家查德威克发现了其质量  
同质子相当的中性粒子, 即中子。他因  
此获1935年诺贝尔物理学奖。

1932年, 海森伯和伊凡宁柯各自独立  
地提出了原子核是由质子和中子组成的  
核结构模型。



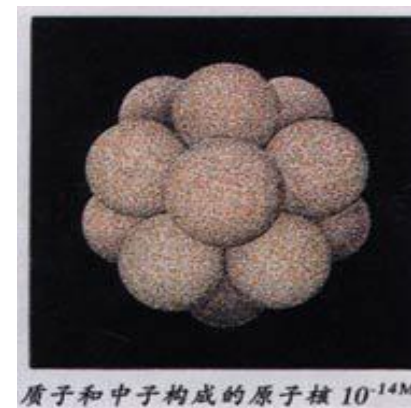
查德威克



海森伯

核子  
(nucleon) { 质子 (proton)  
                  中子 (neutron)

质子与中子可以互变。



原子核 { 质子 { 带单位正电荷。  $e=1.602 \times 10^{-19}\text{C}$   
                  质量数为1 ( $m_p=1.623 \times 10^{-27}\text{kg}=1836.1m_e$ )  
                  质子数=核外电子数=原子序数  
                  中子 { 不带电。  
                          质量数为1 ( $m_n=1.675 \times 10^{-27}\text{kg}=1838.6m_e$ )  
                          中子数=核质量数-质子数(原子序数)

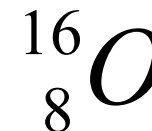
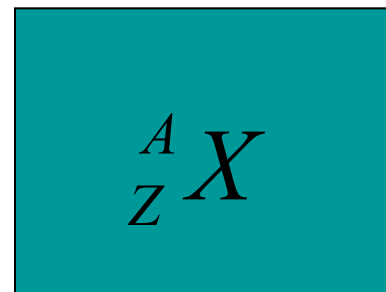


## 2. 原子核的符号:

原子核质量数

元素符号

原子序数



符号表达了原子核两大特征: **质量**和**电量**。



### 3. 核素、同位素、同量异位素、同质异能素

核素 (nuclide) : 具有确定的 $Z$ 值,  $A$ 值和能量状态的一类原子核称为一种核素。

比如:  ${}^{16}_8\text{O}$   ${}^4_2\text{He}$   ${}^{12}_6\text{C}$  (三种核素)

同位素 (isotope): 具有相同的 $Z$ 值而 $A$ 值不同的一类核素称为同位素。同位素具有相同的化学性质。

比如: 氧的三种同位素:  ${}^{16}_8\text{O}$   ${}^{17}_8\text{O}$   ${}^{18}_8\text{O}$

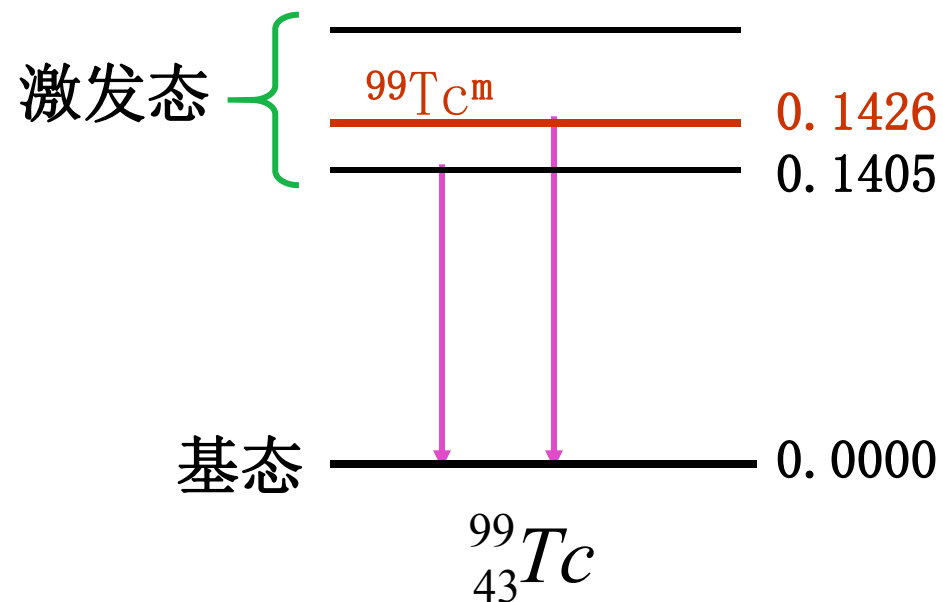
同位素丰度: 99.756% 0.205% 0.039%

氢的三种同位素:  ${}^1_1\text{H}$   ${}^2_1\text{H}$   ${}^3_1\text{H}$



**\*同质异能素：** 具有相同 $A$ 值和 $Z$ 值且处于亚稳态激发能级的核素。

表示： $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$   
(锝)



**\*同量异位素：** 具有相同 $A$ 值而 $Z$ 值不同的核素。

比如： $^{40}_{18}\text{Ar}$  (氩)       $^{40}_{20}\text{Ca}$  (钙)

## 4. 原子核的大小

- \*原子核近似为半径 $R$  的球体  
(重核呈椭球体)：

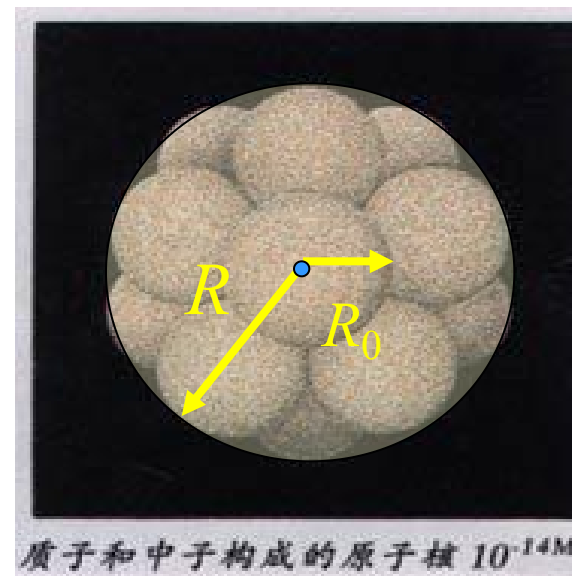
$$R=R_0A^{1/3}$$

(核子半径:  $R_0=1.2\times 10^{-15}\text{m}$ )

- \*原子核的平均密度:

$$\rho = \frac{M}{V} \approx \frac{m_p A}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} = \frac{1.67 \times 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi (1.2 \times 10^{-15})^3} = 2.3 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

地球平均密度:  $\rho \approx 6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$





## 5. 核 力

## Unclear force

\*核子间强相互作用力，称为核力。

（比电磁相互作用强130倍左右，比万有引力强 $10^{39}$ 倍）

\*核力的主要性质：

1. 核力是短程力，其作用范围： $10^{-15}$  m；紧邻核子之间。
2. 核力与电荷无关。
3. 核力具有饱和性，即一个核子仅与紧邻的核子作用。

## 6. 原子核的质量

\*原子质量单位（atomic mass unit）：

微观粒子的质量单位，以u 表示。规定：一个原子质量单位等于 $^{12}\text{C}$ 原子质量的 $1/12$ ；即  $1\text{u}=1.6605\times 10^{-27}$  kg

\*原子核的质量  $\approx$  原子量：以质量数A表示。



## 7. 原子核的结合能

### 1). 原子核的质量亏损 (mass defect)

原子核的静质量比组成它的核子的静质量总和小一些，这样减少的质量 ( $\Delta m$ ) 称为质量亏损。

\* 质量亏损 ( $\Delta m$ ) 的计算：

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

质量亏损=各个核子的静质量总和 - 原子核的静质量

$$\begin{aligned}\text{碳核的质量亏损: } \Delta m &= 6m_p + (12 - 6)m_n - A \\ &= 6 \times 1.007276 + 6 \times 1.008665 - 12 \\ &= 12.09565 - 12 = 0.09565(\text{amu})\end{aligned}$$

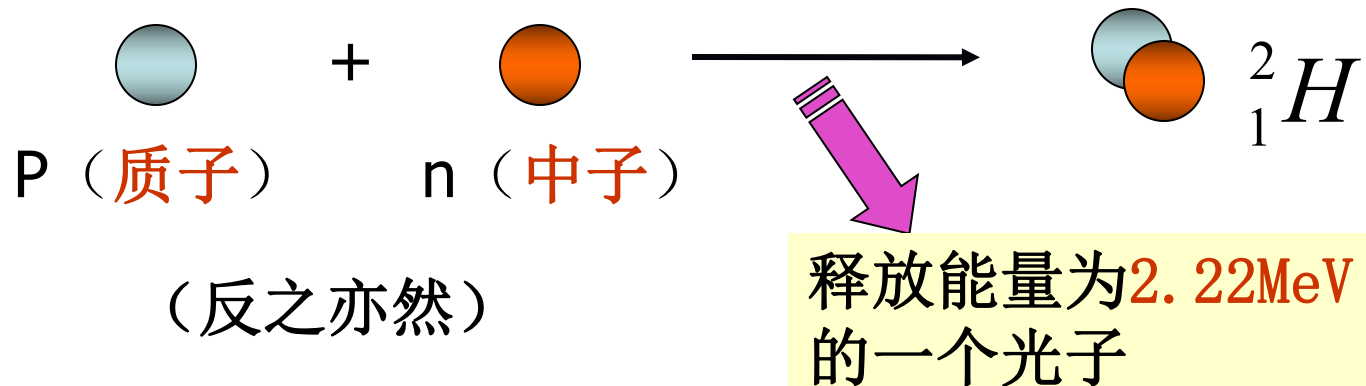


## 2). 原子核的结合能 (binding energy)

核子结合成原子核时释放能量称为原子核的结合能。

电子和原子核结合成原子  
原子结合成分子 } 释放能量，这些能量就是它们的结合能。

例子:  ${}^2_1H$  (氘核) 的结合能 (2.22MeV)



原子核的结合能越大，结合越紧密，原子核就越稳定。



由质能公式( $\Delta E=c^2\Delta m$ )知, 释放的能量变化 ( $\Delta E$ ) 相当于一定的质量变化( $\Delta m$ )。

\*用u为质量单位, 用MeV为能量单位表示的质能公式:

$$1\text{u} \xrightarrow{\times C^2} 931.5\text{MeV}$$

$$\Delta E (\text{MeV}) = 931.5 \Delta m$$

或

$$\Delta m (\text{u}) = 1.0735 \times 10^{-3} \Delta E$$

碳核的结合能:  $0.09565 \text{ aum} \times 931.5 = 89.1 \text{ MeV}.$

碳核的平均结合能:  $89.1/12 = 7.4 \text{ MeV}.$



## 二. 原子核的稳定性

\*平均结合能:  $\varepsilon = \Delta E/A$

\*平均结合能表示的松紧程度:

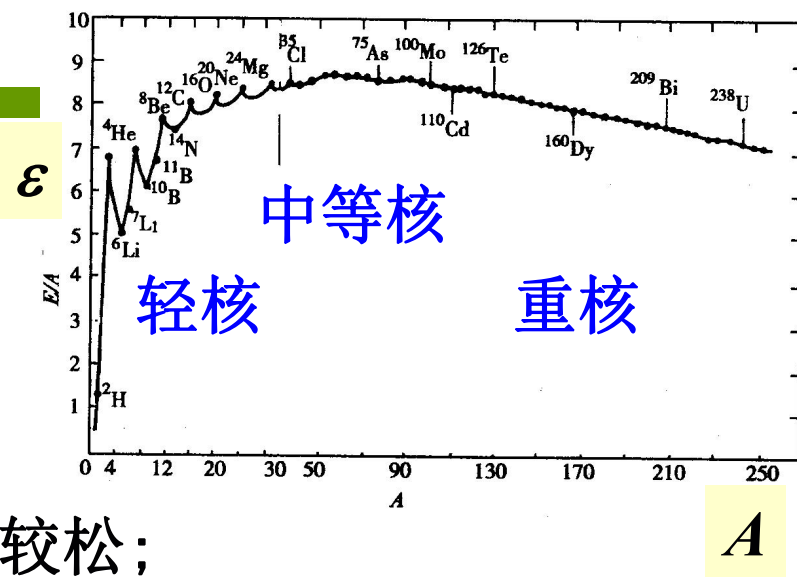
轻核 ( $A < 20$ ):  $\varepsilon$  较小, 原子核结合较松;  
(除偶偶核外)

中等核 ( $A$  为  $40 \sim 100$ ):  $\varepsilon$  较大, 原子核结合较紧。

重核 ( $A > 120$ ):  $\varepsilon$  较小, 原子核结合较松;  
其中  $A > 209$  的核都是放射性核素。

\*中等核比重核和轻核都稳定。

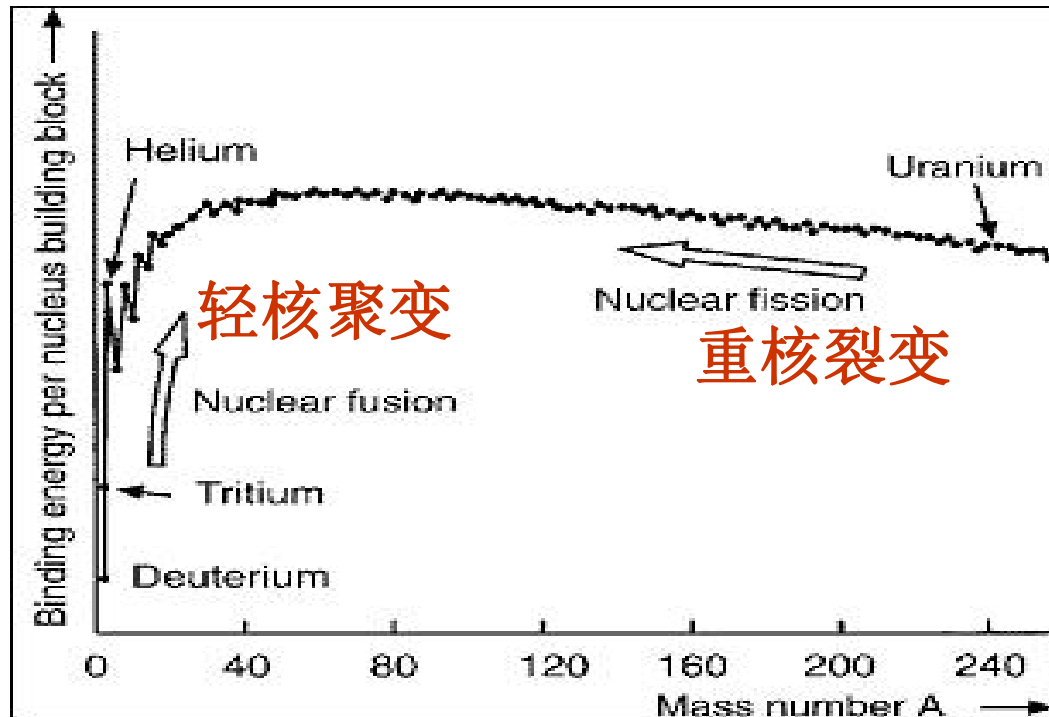
由此知道获得核能的两种途径: 轻核聚变和重核裂变。





# 重核裂变、轻核聚变

Nuclear fission and Nuclear fusion



单位质量氦核聚变释放能量是单位质量铀核裂变释放能量的4倍左右。

1kg:

The fission of 1 kg U-235 supplies about 23 million kWh, during the fusion of deuterium and tritium (DT-reaction) to 1 kg helium, energy of about 120 million kWh is released. In contrast, the combustion of 1 kg coal supplies only about 10 kWh.



原子能：原子核的裂变和聚变所放出的能量。



已被密封的切尔诺贝利核电站



聚变

全超导人造太阳



裂变

秦山核电站反应堆

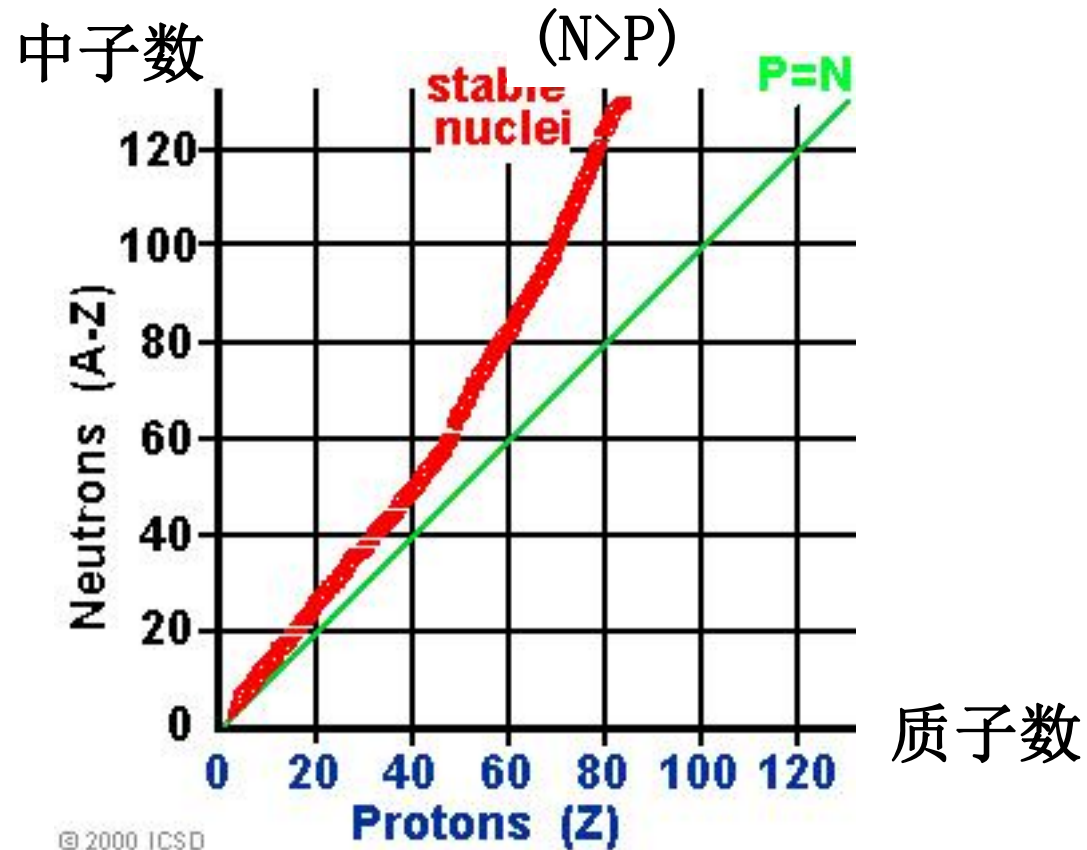


原子反应堆



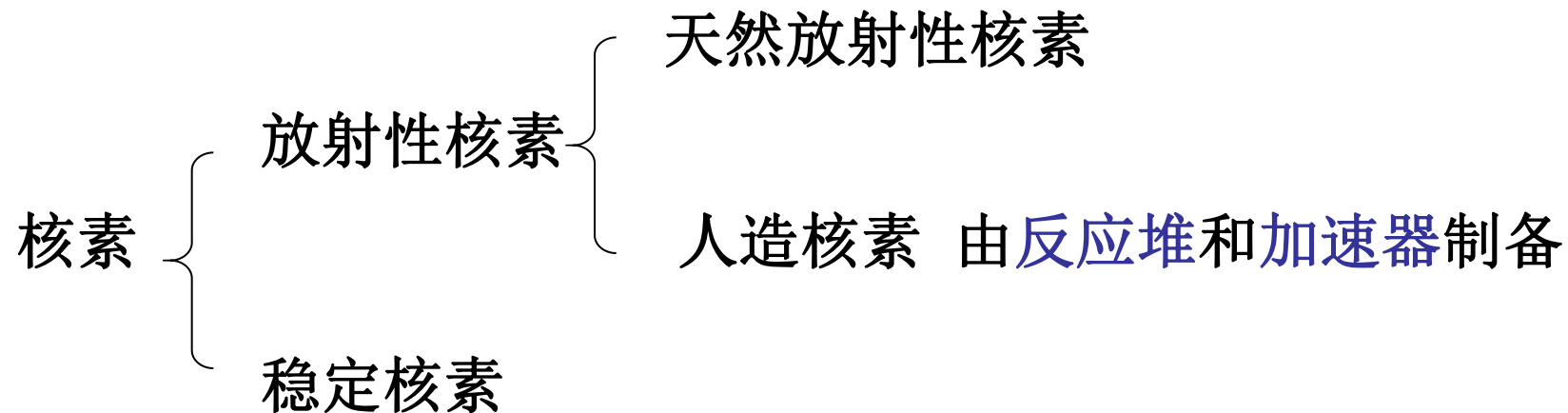
# 第一节 放射性核素衰变类型

自然界约有280种稳定同位素, 2600多种放射性同位素(其中仅有50种天然放射性同位素)。





## 分类



自然界约有280种稳定同位素, 2600多种放射性同位素(其中仅有50种天然放射性同位素)。



\* **核衰变**：放射性核素的原子核自发地放出**射线**而转变为另一种核素的现象，称为核衰变

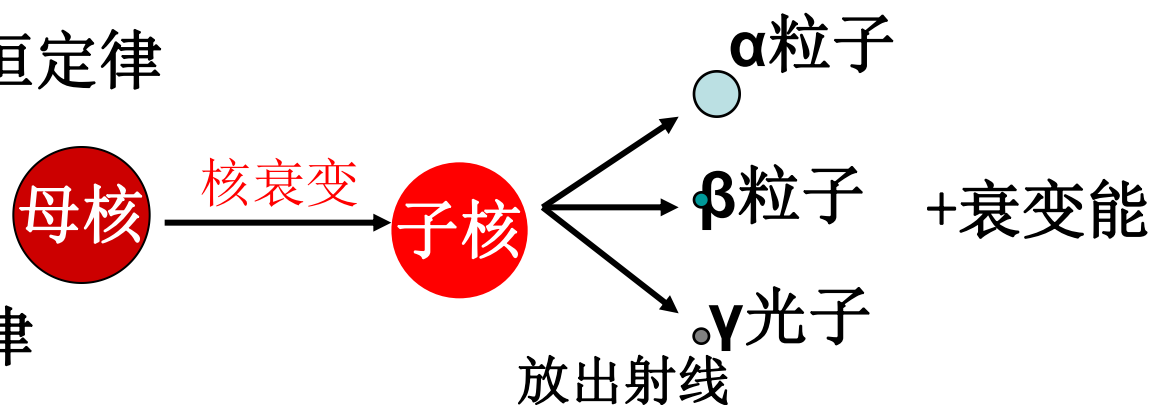
• 核衰变过程严格遵守如下守恒定律：

质量和能量守恒定律

动量守恒定律

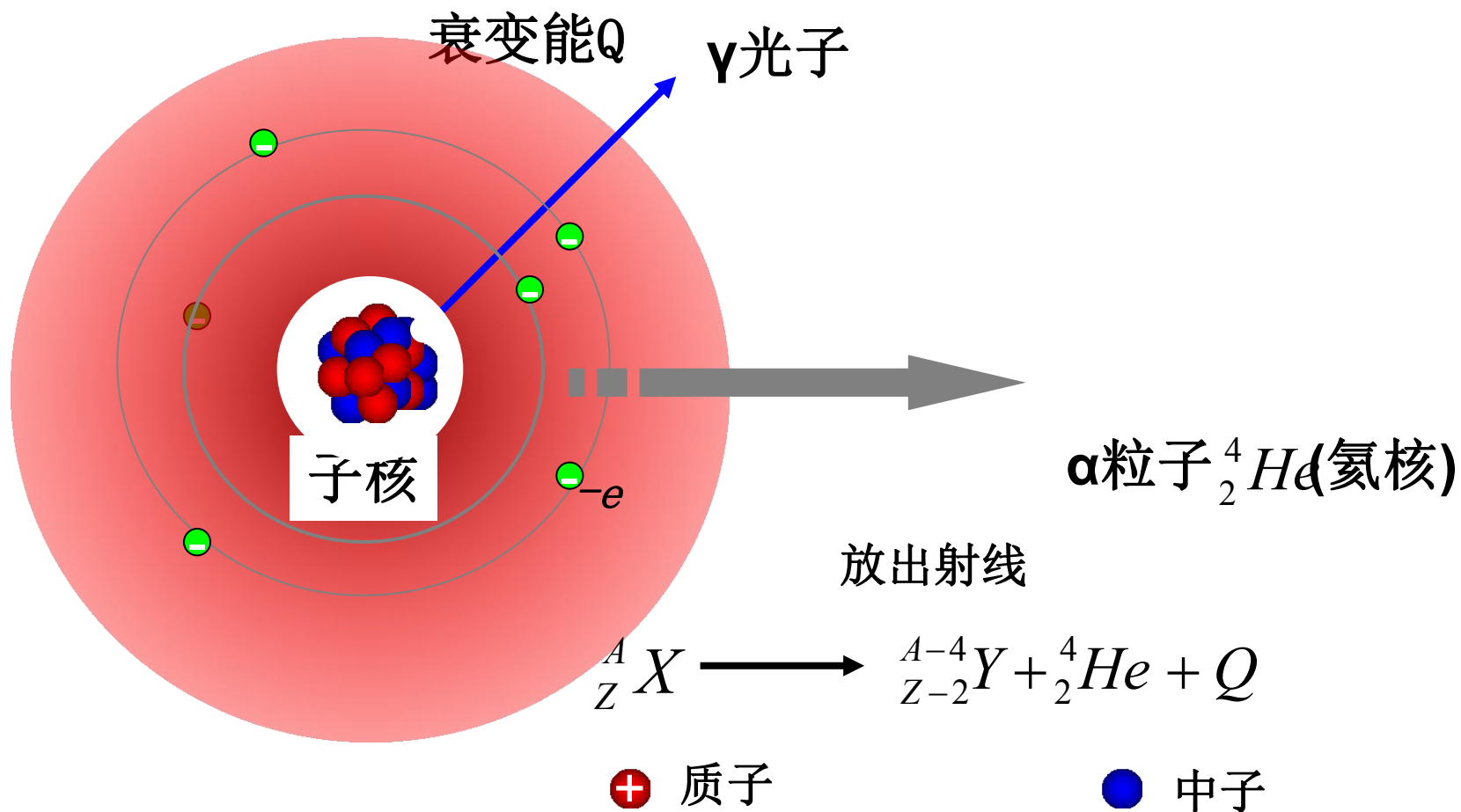
电荷守恒定律

核子数守恒定律



\* **衰变能**：按照质能关系，核衰变前后的静止质量的差值，转变为核衰变时释放的能量，称为衰变能（decay energy），记为 $Q$

# 核衰变





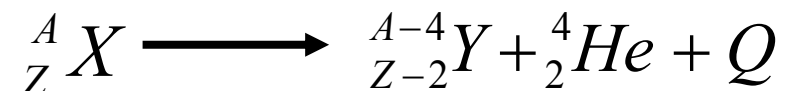
## 一. $\alpha$ 衰变 ( $\alpha$ decay)

在某些情况下，原子核从激发态向较低能级跃迁时不一定放出  $\gamma$  光子，而是把这部分能量直接交给核外电子，使其脱离原子的束缚而成为自由电子，这称为**内转换** (internal conversion, IC)，释放的电子称为**内转换电子** (internal conversion electron)

### \* $\alpha$ 衰变:

$A$  值超过209的重核放射  $\alpha$  粒子 (即氦核  ${}^4_2\text{He}$ ) 而衰变为另一种原子核, 称为  $\alpha$  衰变.

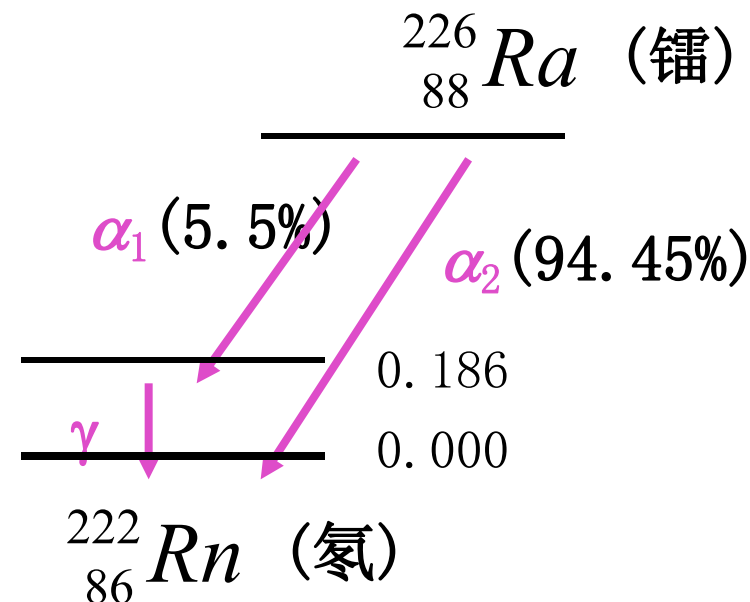
### \* 衰变式:



### \* $\alpha$ 衰变的位移法则。

子核在元素周期表中的位置比母核**前移两位**。

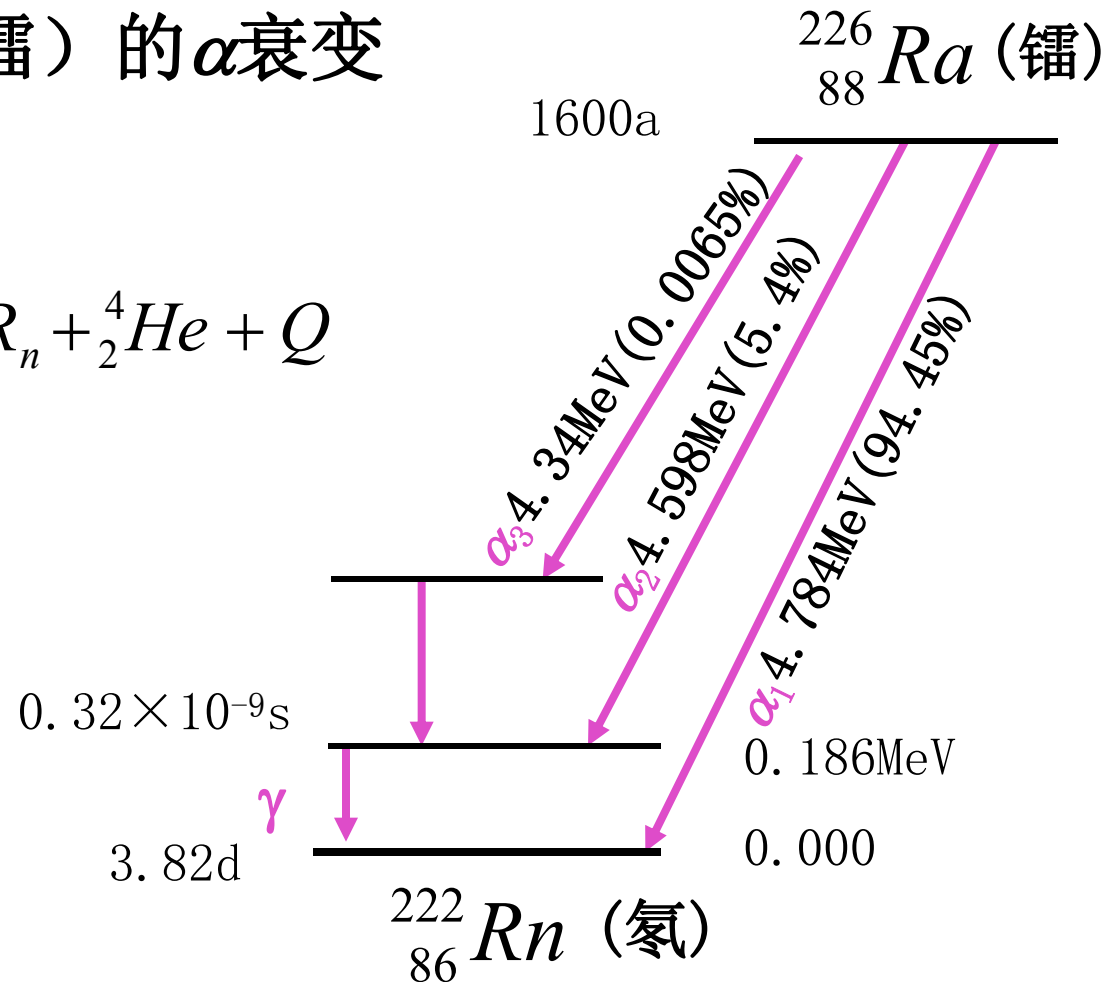
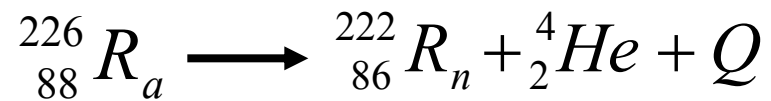
\* 子核可处于**激发态**, 所以有  $\gamma$  射线和**内转换电子**伴随  $\alpha$  射线发射出来。





\* 例:  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  (镭) 的  $\alpha$  衰变

\* 衰变式:



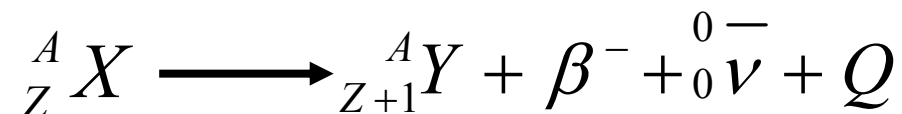


## 二. $\beta$ 衰变 ( $\beta$ decay)

### 1. $\beta$ -衰变 ( $\beta$ -decay)

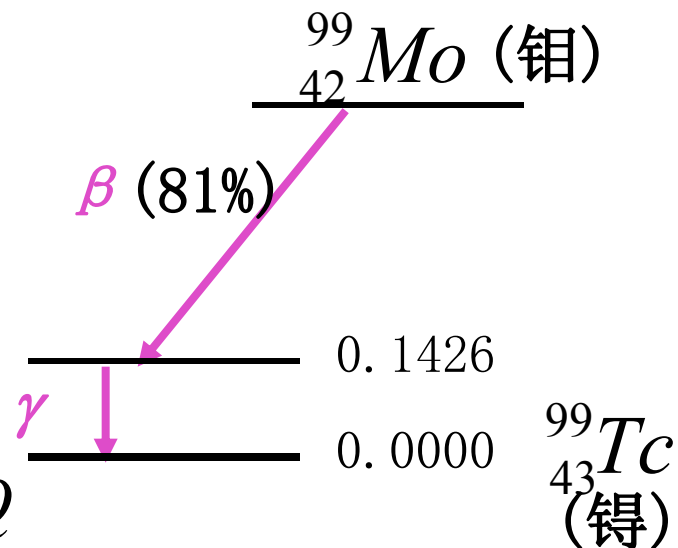
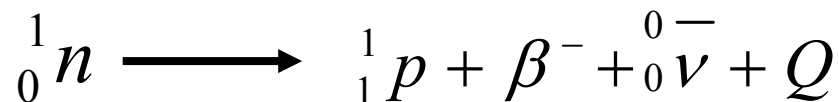
中子过多的原子核放射一个  $\beta$  粒子 (即电子  ${}_{-1}^0e$ ) 和一个反中微子 ( ${}_{0}^{0-\bar{\nu}}$ ) 而衰变为另一种原子核。

\* 衰变式:



\*  $\beta$ -衰变的位移法则 后移一位

\* 衰变的实质:



\* 子核可以处于激发态, 有  $\gamma$  射线和反中微子射线伴随  $\beta$  射线发射出来。



## 2. $\beta^+$ 衰变

\* 有些中子过少的原子核放射一个  $\beta^+$ 粒子 (即正电子  ${}_{+1}^0e$ ) 和一个中微子 ( ${}_0^0\nu$ ) 而衰变为另一种原子核。

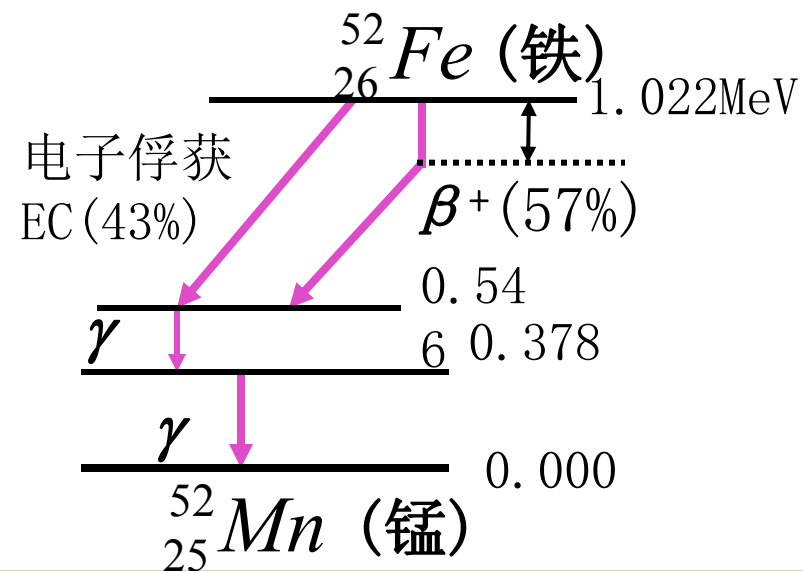
\* 衰变式:  ${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-1}^AY + \beta^+ + {}_0^0\nu + Q$

\* 衰变的实质:  ${}_1^1p \longrightarrow {}_0^1n + \beta^+ + {}_0^0\nu + Q$

\* 子核可以处于激发态  
有  $\gamma$  射线伴随  $\beta^+$  射线发射出来。

正负电子对湮没:

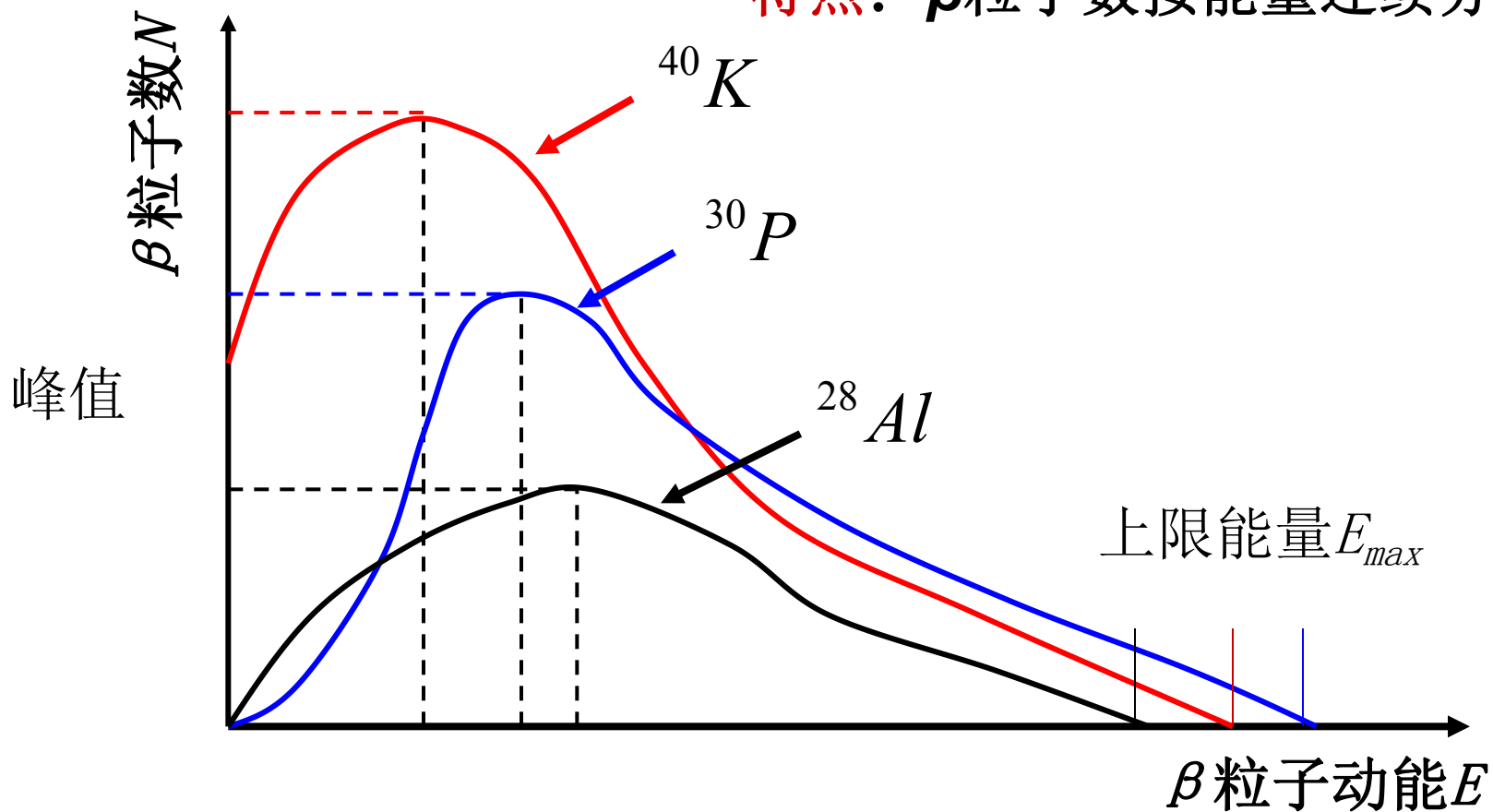
正电子与电子结合转变为双光子 (能量各为  $0.511\text{MeV}$ ) 发出





衰变放出的能量为子核、 $\beta$ 粒子和中微子共有，  
而 $\beta$ 粒子的能量是连续的

特点： $\beta$ 粒子数按能量连续分布



放射性核素的 $\beta$ 能谱图



### 3. 电子俘获(electron capture, EC)

一个内层电子被原子核俘获后，外层电子会立即填补这一空位，同时放出能量。这个能量可以以发射**标识x射线**(光子)的形式放出，也可以使另一外层电子电离成自由电子。这种被电离出的电子称为**俄歇电子**(Auger electron)

\*中子过少的原子核从核外电子壳层中**俘获**一个**电子**使一个**质子转变为**一个**中子**，同时**放出**一个**中微子**而衰变为另一种原子核的过程。

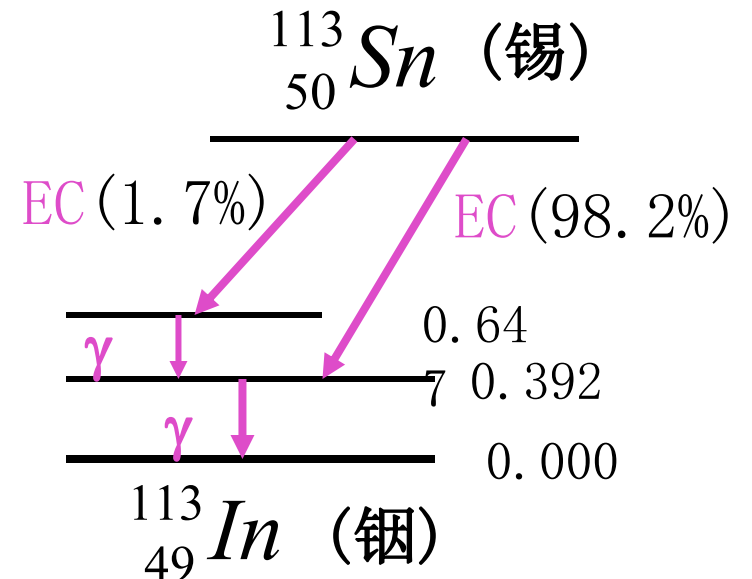
\* 衰变式:  ${}_Z^AX + \beta^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_0^0\nu + Q$

\* 衰变的实质:  ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \longrightarrow {}_0^1n + {}_0^0\nu + Q$

\* 子核发出**标识X射线**或**俄歇电子**  
探测电子俘获的基础

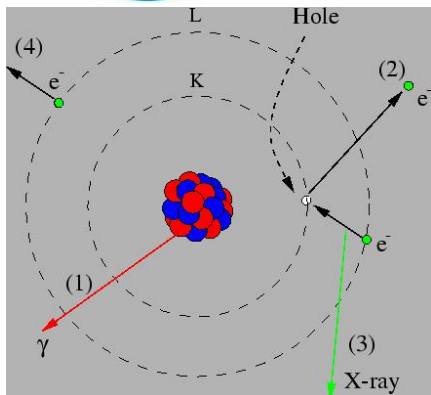
**正负电子对湮没:**

正电子与电子结合转变为双光子  
(能量各为0.511MeV、传播方向相反的  $\gamma$  光子)发出。



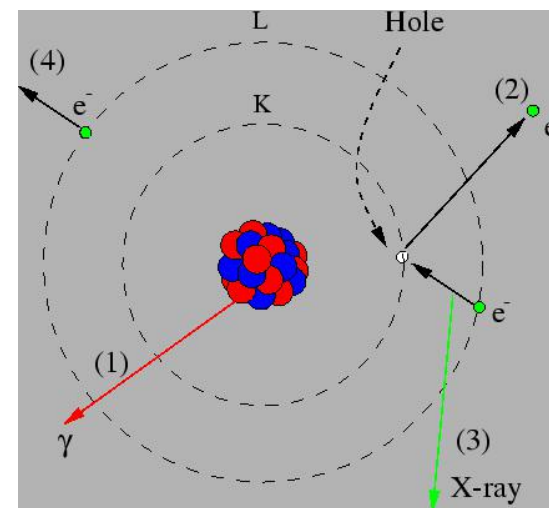
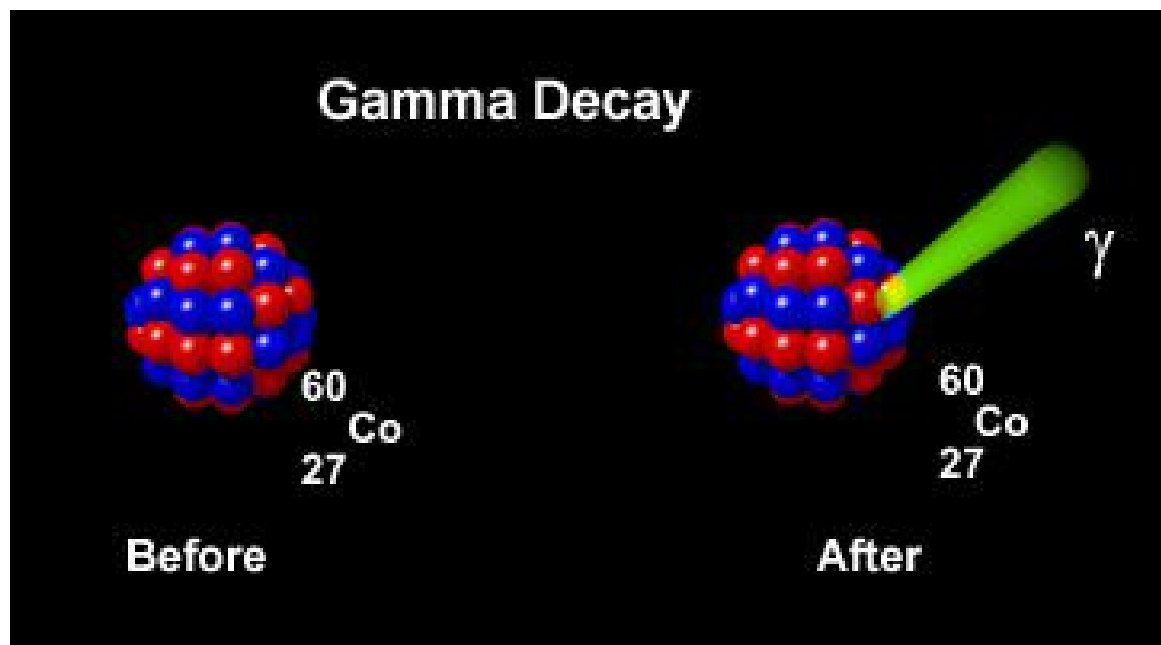
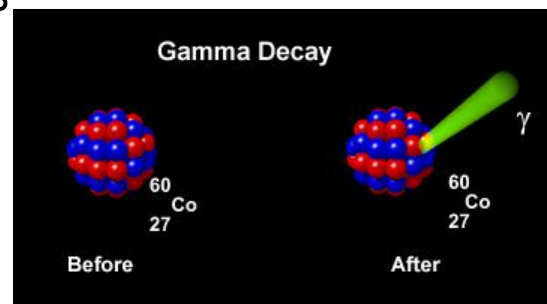


### 三. $\gamma$ 衰变 ( $\gamma$ decay) 和内转换



\*  $\gamma$ 衰变: 原子核从激发态向较低能态或基态跃迁 (同质异能跃迁) 时放射 $\gamma$ 光子的过程。

例子:  $^{60}\text{Co}$ (钴)、 $^{99}\text{Tc}$ (锝)的 $\gamma$ 衰变

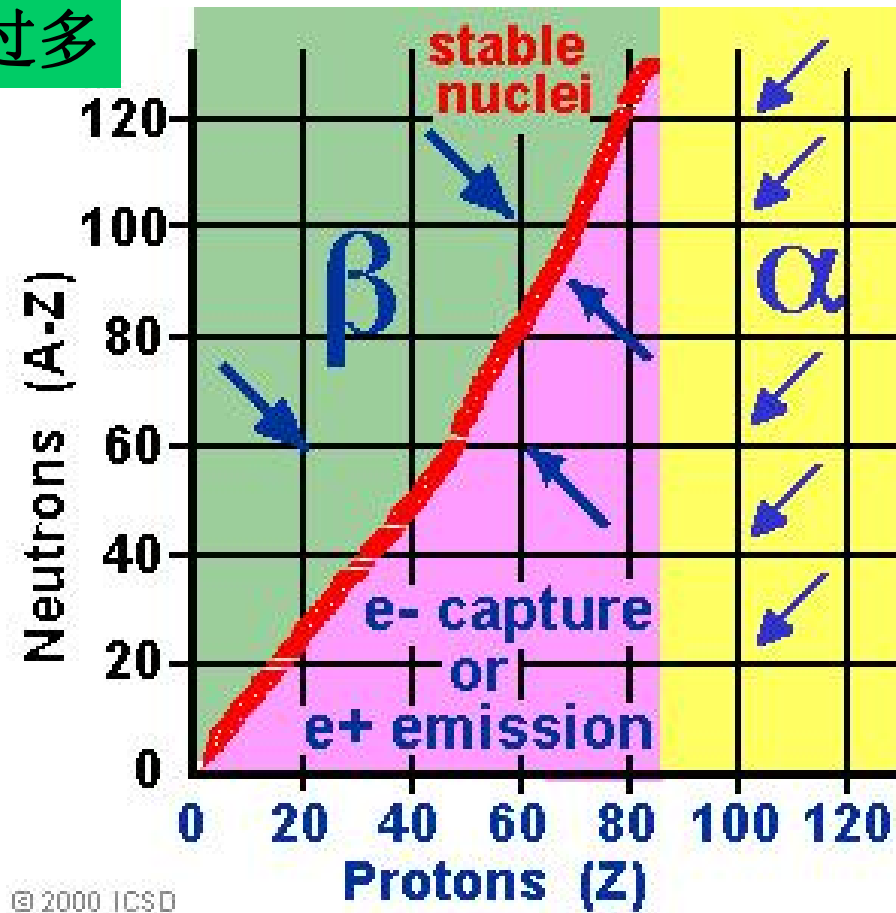




小结:

This graph shows all the trends of decay and the band of stable nuclei.

中子过多



© 2000 ICSD

中子过少



## 第二节 放射性核素的衰变规律 Decay law

\* 对一个特定的放射性核素，其衰变的精确时间是无法预测的；但对足够多的放射性核素集合，其随时间衰变的规律是确定的，服从统计规律。

### 一. 衰变规律：

对某种放射性核素，在  $t \rightarrow t+dt$  时间内，衰变的原子核数  $dN$  与当时存在的母核总数  $N$  成正比

$$-dN = \lambda N dt \quad \text{即} \quad -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{微分方程})$$

利用初始条件： $t=0$  时， $N=N_0$ ；对上式积分得到：

衰变规律：

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

(衰变常数  $\lambda$ ：

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

放射性原子核的数目随时间按指数规律衰减。



## 二. 半衰期 $T$ (half-life)

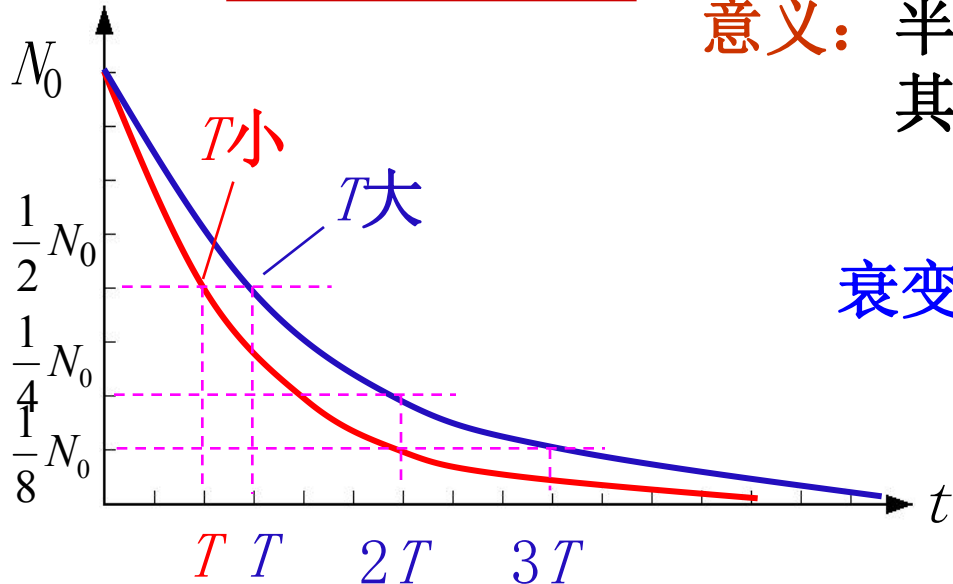
**定义：**原有的母核总数衰变一半所需的时间。

$$\text{当 } N = \frac{N_0}{2} \text{ 时, } t = T; \quad \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T}$$

**表达式：**  $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$

**单位：**年y, 天d, 小时h, 分min, 秒S等。

**意义：**半衰期越短的放射性核素，其衰变越快。



**衰变定律另一表式：**

$$N = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$



## 一些放射性核素的衰变类型和半衰期

核素	衰变类型	半衰期
${}^{11}_{6}\text{C}$	$\beta^{+}$ (99.75%) EC (0.24%)	20.4min
${}^{14}_{6}\text{C}$	$\beta^{-}$	5730y
${}^{32}_{15}\text{P}$	$\beta^{-}$	14.3d
${}^{60}_{27}\text{Co}$	$\beta^{-}$ , $\gamma$	5.27y
${}^{131}_{53}\text{I}$	$\beta^{-}$ , $\gamma$	8.04d
${}^{238}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$4.5 \times 10^9 \text{y}$



## 有效半衰期和平均寿命

有效衰变常数: effective decay constant

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_b$$

生物衰变常数  $\lambda_b$ : 单位时间内由于人体代谢而减少的概率。

有效半衰期:  $\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T} + \frac{1}{T_b}$  ( $T_b$ 为生物半衰期)

$T_b$  (钚) = 200年, 说明人体吸收钚后很难排出。  
 $T_s$  (硒) = 11天, 说明硒的代谢比较快。

平均寿命  $\tau$ : 指某种放射性核素平均生存的时间。

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{N_0} t \cdot (-dN) = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = \frac{T}{0.693} = 1.44 T$$



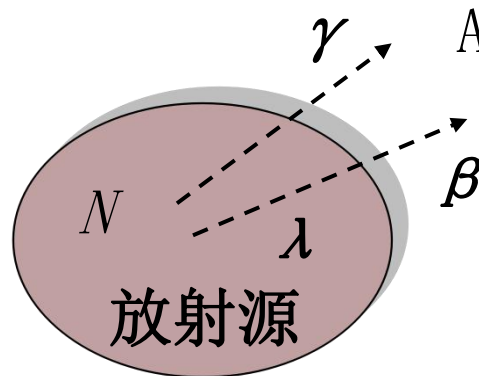
### 三. 放射性活度 (radioactivity, A) 放射性强度

**定义：**用单位时间内衰变的原子核个数 ( $dN/dt$ )  
表示某放射性物体的放射性活度A。

$$\text{即 } A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

放射性活度A随时间衰减的规律：

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$



**国际单位：**贝可，记为Bq。 1Bq=1次核衰变/秒

**旧单位：**居里，用Ci表示。

$$1\text{Ci}=3.7 \times 10^{10}\text{Bq}。 \quad 1\text{mCi}=3.7 \times 10^7\text{Bq}$$



**放射性比活度(放射性质量活度)**：指单位质量放射源的放射性活度。

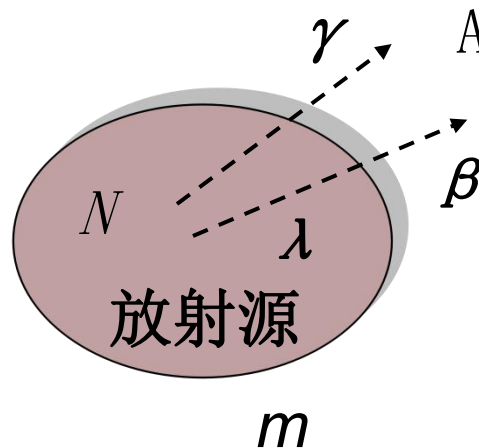
即 
$$\frac{A}{m} = \frac{\lambda N}{m}$$

放射性质量活度A随时间衰减的规律：

$$\frac{A}{m} = \frac{A_0}{m} \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

衡量放射性物质纯度

国际单位：贝可·克<sup>-1</sup>，记为Bq·g<sup>-1</sup>。





由此得到下列三点推论：
$$A = \lambda N = \frac{N}{\tau}$$

1. 当  $\lambda$  不变时，放射性活度  $A$  正比于当时的母核数量  $N$ 。  
这是核素显像的基本原理之一。
2. 当  $N$  不变时，放射性活度  $A$  正比于衰变常数  $\lambda$ 。所以采用短寿命的放射性核素有利于核素显像。
3. 当  $A$  不变时，核素的数量  $N$  反比于衰变常数  $\lambda$ 。所以采用短寿命的放射性核素有利于患者本人。

这就是核素显像为什么要使用短寿命的放射性核素的主要原因之一。



**例题：**已知地球上生物活体中的C-14的放射性质量活度是  $25.5 \times 10^{-2} \text{ Bq}$  . 现测得某树木遗骸中的C-14的放射性质量活度是  $5.6 \times 10^{-2} \text{ Bq}$ . 请计算该树木遗骸的年代. (已知C-14的半衰期是5730年)

解：  $\because A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

$$\therefore 5.6 \times 10^{-2} = 25.5 \times 10^{-2} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}}$$
$$\frac{t}{5730} \approx 2.2 \quad t \approx 12606 \text{ 年}$$

放射性质量活度：  
指单位质量放射源的  
放射性活度。

测定C-14的放射性活度确定年代的限制：四万年以内。



## 例题:

已知  $^{226}\text{Ra}$  的半衰期为  $1.6 \times 10^3 \text{y}$ ; 求 1 克  $^{226}\text{Ra}$  的放射性活度。

解:

$$\begin{aligned} A &= \lambda N = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m}{m_{\text{mol}}} \cdot N_0 \\ &= \frac{\ln 2}{1.6 \times 10^3 \times 3600 \times 24 \times 365} \times \frac{1}{226} \times 6.022 \times 10^{23} \\ &= 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \end{aligned}$$

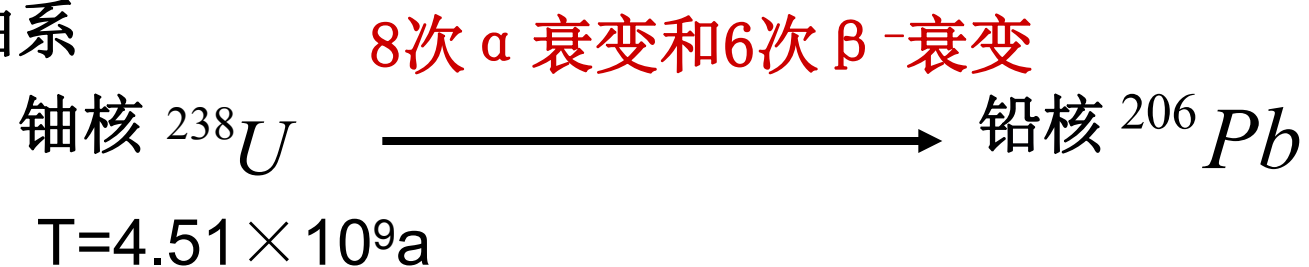


## 二. 放射性平衡

### 1. 放射系

放射性核素的衰变属于递次衰变, 由放射性核素递次衰变而产生一系列放射性核素, 形成放射族或放射系。

如: 铀系



系中各放射性核素的质量数 $A=4n+2$ , 所以也叫 $(4n+2)$ 系



如：钍系

6次  $\alpha$  衰变和4次  $\beta$  -衰变



$$T=1.4 \times 10^{10}\text{a}$$

系中各放射性核素的质量数 $A=4n$ ，所以也叫4n系

如：铀系

7次  $\alpha$  衰变和4次  $\beta$  -衰变



$$T=7.04 \times 10^8\text{a}$$

系中各放射性核素的质量数 $A=4n+3$ ，所以也叫(4n+3)系

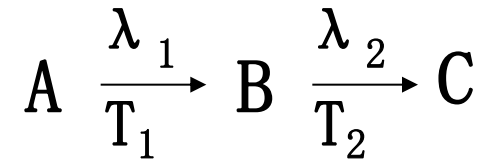


## 二. 放射性平衡

### 2. 放射性平衡:

在递次衰变中, 当满足一定条件时各代核的**数量之比**会出现与时间无关的多种衰变现象。统称这些衰变现象为放射平衡。

三代递次衰变:



在 $t$ 时刻,  $N_1(t), N_2(t), N_3(t)$

设 $t = 0$ 时刻, 只有母核  $A$  存在, 即  $N_1(0) = N_0, N_2(0) = N_3(0) = 0$

故有: 
$$N_1(t) = N_1(0)e^{-\lambda_1 t} = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1)$$



# 讨论递次衰变时母核与子核的衰变规律

## (1) 第一代子核B:

它的数目改变率  $\frac{dN_2(t)}{dt}$  ,

一方面以速度  $\lambda_1 N_1$  从A中产生而增大 , 另一方面又同时以  $\lambda_2 N_2$  的速度衰变为 C 而减少 , 故

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式, 求解这一微分方程, 并考虑初始条件, 则得

$$\begin{aligned} N_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_0 \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{aligned} \quad (3)$$



## 讨论递次衰变时母核与子核的衰变规律

### (2) 第二代子核C:

1)如果它是稳定的 即 $\lambda_3 = 0$  , 则

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) \quad (4)$$

将 (3) 式代入 (4) 式, 求其通解, 并考虑初始条件, 则得

$$N_3(t) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_1} (1 - e^{-\lambda_1 t}) - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right] \quad (5)$$

分析上式可见 , 当 $t \rightarrow \infty$ 时 ,  $N_3(t) \rightarrow N_1(0) = N_0$  ,  
即母核A全转变为第二代子核 C。



## 讨论递次衰变时母核与子核的衰变规律

2)如果第二代子核  $C$  是不稳定的, 即  $\lambda_3 \neq 0$ , 则

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t) \quad (6)$$

可求得方程满足初始条件的解为

$$N_3(t) = N_1(0) \cdot (k_1 e^{-\lambda_1 t} + k_2 e^{-\lambda_2 t} + k_3 e^{-\lambda_3 t}) \quad (7)$$

$$\text{式中: } k_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)}$$

$$k_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)}$$

$$k_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)}$$



## 讨论递次衰变时母核与子核的衰变规律

2. $n$ 代递次衰变：若开始时只有第一代母核，即 $N_1(0) = N_0$

则第 $i$ 代衰变规律为

$$N_i(t) = N_1(0) \cdot (k_1 e^{-\lambda_1 t} + k_2 e^{-\lambda_2 t} + \cdots + k_i e^{-\lambda_i t}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } k_1 &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \cdots \lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \cdots (\lambda_i - \lambda_1)} \\ k_2 &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \cdots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \cdots (\lambda_i - \lambda_2)} \\ &\vdots \\ k_i &= \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \cdots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \cdots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \end{aligned}$$

结论：递次衰变只有母核是指数衰减；而子核的衰变规律不仅与自身的衰变常数 $\lambda_2$ 有关，还与母核的衰变常数 $\lambda_1$ 有关，衰变规律不是简单的指数规律。



## (一) 长期平衡：母体半衰期远大于子体半衰期的情况

在足够长的时间内（比如： $t=7T_2$ ），子核放射性强度将与母核的相等，达到饱和状态。此现象称为长期平衡。

实现条件： $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ,  $T_1 \gg T_2$  且时间足够长  $t \geq 7T_2$

由 
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_0 \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$
 得

$$\begin{aligned} N_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_0 e^{-\lambda_1 t} \left(1 - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{e^{-\lambda_1 t}}\right) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(t) [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \end{aligned}$$

$$\because \lambda_1 \ll \lambda_2, \quad \therefore N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(t) (1 - e^{-\lambda_2 t})$$



当时间足够长时，上式中  $e^{-\lambda_2 t} \ll 1$

例如当  $t=7T_2$  时  $e^{-\lambda_2 7T_2} = e^{-\lambda_2 \cdot 7 \cdot \frac{0.69}{\lambda_2}} = e^{-7 \times 0.69} = 7.8 \times 10^{-3} \ll 1$

于是就有 
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(t)$$

或 
$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad \text{或} \quad A_1 = A_2$$

只要母核的衰变常数比子核的小得多 ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ) 即母核的半衰期比子核的长得多 ( $T_1 \gg T_2$ )，且观察时间足够长 ( $t \geq 7T_2$ ) 时，则子核数目及放射性活度会达到饱和，而且子核与母核的放射性活度相等，这就叫做**长期平衡**。



对于多代的情况，只要母核半衰期远大于子核，则子会出现这种**长期平衡**。整个系列达到长期平衡时，各代放射性活度均相等

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \cdots = \lambda_n N_n = A$$

利用该式和  $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$  可求出长寿命核素的半衰期。

只要其中有一代的半衰期及其所求一代的数目比已知即可

$$\because \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad \therefore T_2 N_1 = T_1 N_2 \quad T_1 = \frac{N_1}{N_2} T_2$$

例如： ${}_{91}^{231}\text{Pa} \rightarrow {}_{89}^{227}\text{Ac}$   
镤 锕

已知： ${}_{89}^{227}\text{Ac}$  的半衰期  $T_2 = 21.8a$

实验测出长期平衡时，原子数目比  $\frac{N({}_{91}^{231}\text{Pa})}{N({}_{89}^{227}\text{Ac})} = 1505$

则  ${}_{91}^{231}\text{Pa}$  的半衰期  $T_1 = 1505 \times 21.8a = 3.28 \times 10^4 a$



## (二) 暂时平衡：母体半衰期只比子体半衰期大几倍

如果母核的半衰期只比子核的半衰期大几倍，那么子核将按照母核的衰变规律进行衰减，虽然母核和子核的数目都在不断减小，但是经过足够长的时间后，母核和子核的数目之比将保持一个与 $t$ 无关的暂时固定的常数，这就叫暂时平衡。



实现条件:  $\lambda_1 < \lambda_2$ ,  $T_1 > T_2$  且当  $t \rightarrow \infty$  时,  $e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \ll 1$

由  $N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_0 \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$  得

$$\begin{aligned} N_2(t) &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_0 e^{-\lambda_1 t} \left(1 - \frac{e^{-\lambda_2 t}}{e^{-\lambda_1 t}}\right) \\ &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(t) [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}] \end{aligned} \quad (2)$$

$\because \lambda_1 < \lambda_2$ , 且  $e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \ll 1$

$$\therefore \text{上式近似为 } N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$\text{或 } \frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3)$$

此时, 子核的数目变化将按照母核的衰变规律变化, 它们之间保持与  $t$  无关的暂时固定的比例, 这就叫做暂时平衡



$$\because A = \lambda N$$

$$\therefore \text{达到平衡时} \quad \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2 N_2(t)}{\lambda_1 N_1(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$\text{即此时} \quad A_2 > A_1$$

开始时，子核**B**数目为零，然后经过母核**A**衰变为子核**B**时，使子核数目增多。在暂时平衡时，子核**B**和母核**A**将以同样规律减小，可见，子核**B**的数目**N<sub>2</sub>**在某时刻必有一最大值。

设子核**B**的数目达到最大会值**N<sub>2m</sub>**时间为**t<sub>m</sub>**，可以从式(2)中由数学条件  $\frac{dN_2}{dt} = 0$  求出，从而求出**N<sub>2m</sub>**

$$\text{即} \quad t_m = \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (4)$$

$$N_{2m} = N_1(0) \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}} \quad (5)$$



## 在医学临床上

每隔一定时间就可以从母体中分离出具有一定活度的短半衰期的子体，随时供临床使用。



### （三）不成平衡：母体半衰期小于子体半衰期

若母核半衰期远小于各代子核，经过一定时间后，母核将几乎全部转变为子核。之后，子核将按自己的方式衰变，这就是不成平衡。



## 第三节 医用放射性核素的生产与制备

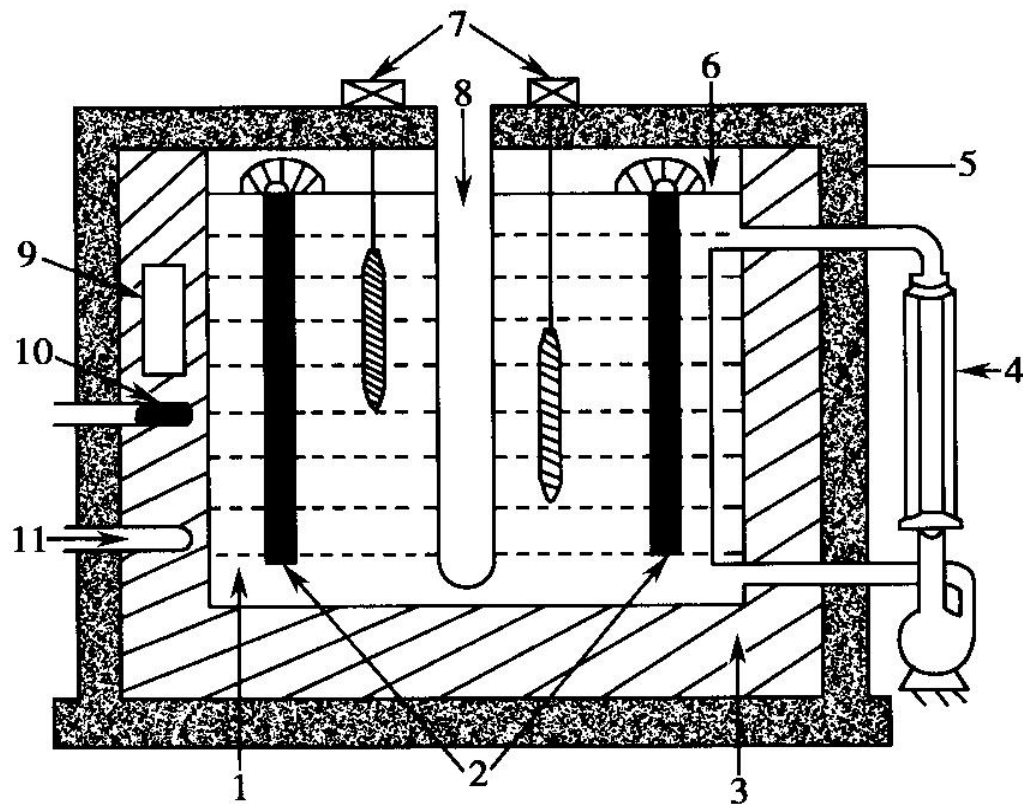
### 一、放射治疗常用放射性核素及其生产

#### 1. 核反应堆中子照射生产

临床上应用的放射性核素，可以来源于核反应(中子治疗)、加速器(PET)和放射性核素发生器(ECT、碘治疗等)

用核反应堆的中子轰击稳定性核素是获取人工放射性核素的主要方法

## 重水型反应堆结构示意图



1. 重水（慢化剂和冷却剂） 2. 铀棒 3. 石墨反射层 4. 热交换器 5. 防护层  
6. 上部屏蔽塞 7. 控制棒 8. 垂直实验孔道 9. 中子探测器 10. 被照射物质  
11. 水平实验孔道



(n,  $\gamma$ ) 反应



(n, p) 反应



(n,  $\alpha$ ) 反应





# 反应堆生产的医用放射性核素

放射性核素	半衰期	核反应
$^{51}\text{Cr}$	27.7d	$^{50}\text{Cr}(\text{n}, \gamma) ^{51}\text{Cr}$
$^{99}\text{Mo}$	66.02h	$^{98}\text{Mo}(\text{n}, \gamma) ^{99}\text{Mo}$
$^{125}\text{I}$	60.2d	$^{124}\text{Xe}(\text{n}, \gamma) ^{125}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$
$^{131}\text{I}$	8.04d	$^{130}\text{Te}(\text{n}, \gamma) ^{131\text{m}}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$
$^{133}\text{Xe}$	5.25d	$^{132}\text{Xe}(\text{n}, \gamma) ^{133}\text{Xe}$
$^{153}\text{Sm}$	46.8h	$^{152}\text{Sm}(\text{n}, \gamma) ^{153}\text{Sm}$
$^3\text{H}$	12.33a	$^6\text{Li}(\text{n}, \alpha) ^3\text{H}$
$^{14}\text{C}$	5730a	$^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p}) ^{14}\text{C}$
$^{32}\text{P}$	14.3d	$^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p}) ^{32}\text{P}$



## 2. 从裂变产物中分离和提取

由裂变产物中提取的放射性核素有 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{133}\text{Xe}$ 等



## 二、核医学常用放射性核素及其产生

### 1. 放射性核素发生器 (radioaction nuclide generator)

是一种从长半衰期母体核素中分离出短半衰期子体核素的分离装置。俗称“母牛”（cow）。



(目前各医院普遍使用)





# 常用的放射性核素发生器

母体核素	母体核素半衰期	子体核素	子体核素半衰期	子体核素主要光子能量 (keV)
<sup>99</sup> Mo	66.02h	<sup>99m</sup> Tc	6.02h	140
<sup>113</sup> Sn	115d	<sup>113m</sup> In	99.5min	392
<sup>68</sup> Ce	271d	<sup>68</sup> Ga	68min	511
<sup>62</sup> Zn	9.3h	<sup>62</sup> Cu	9.7min	511
<sup>81</sup> Rb	4.6h	<sup>81m</sup> Kr	13s	190
<sup>82</sup> Sr	25.5d	<sup>82</sup> Rb	75s	511
<sup>87</sup> Y	80h	<sup>87m</sup> Sr	2.8h	388
<sup>132</sup> Tc	78h	<sup>132</sup> I	2.28h	668
<sup>188</sup> W	69.4d	<sup>188</sup> Re	16.9h	155

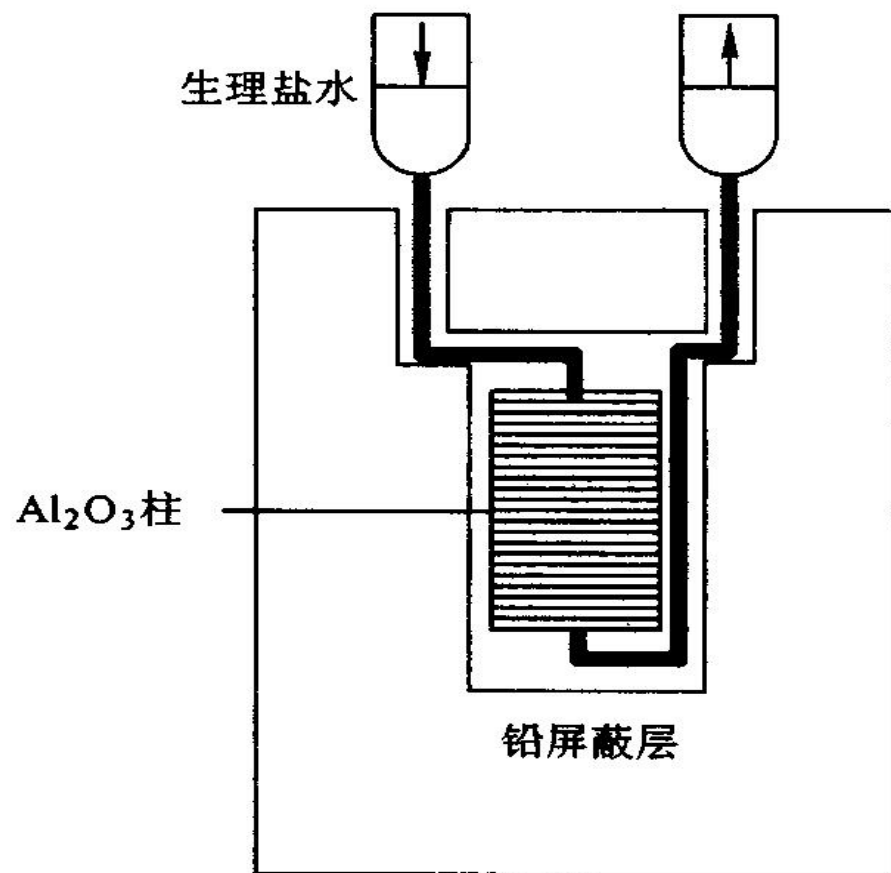


图2-3  $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器示意图



## 2. 回旋加速器生产

是指将带电粒子加速后轰击靶原子核制造放射性核素的装置，用它加速带电粒子，如质子、氘核、氚核、 $\alpha$ 粒子。



## 回旋加速器生产的医用放射性核素

放射性核素	半衰期	核反应
$^{11}\text{C}$	20.4min	$^{10}\text{B}(\text{d},\text{n})^{11}\text{C}$ , $^{11}\text{B}(\text{d},2\text{n})^{11}\text{C}$ , $^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$
$^{13}\text{N}$	9.96min	$^{12}\text{C}(\text{d},\text{n})^{13}\text{N}$ , $^{10}\text{B}(\alpha,\text{n})^{13}\text{N}$
$^{15}\text{O}$	2.03min	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$
$^{18}\text{F}$	109.8min	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$ , $^{16}\text{O}({}^3\text{He},\text{p})^{18}\text{F}$
$^{67}\text{Ga}$	78.3h	$^{66}\text{Zn}(\text{d},\text{n})^{67}\text{Ga}$ , $^{67}\text{Zn}(\text{p},\text{n})^{67}\text{Ga}$ , $^{68}\text{Zn}(\text{p},2\text{n})^{67}\text{Ga}$
$^{111}\text{In}$	2.83d	$^{109}\text{Ag}(\alpha,2\text{n})^{111}\text{In}$ , $^{111}\text{Cd}(\text{p},\text{n})^{111}\text{In}$
$^{123}\text{I}$	13.0h	$^{124}\text{Te}(\text{p},2\text{n})^{123}\text{I}$ , $^{121}\text{Sb}(\alpha,2\text{n})^{123}\text{I}$
$^{201}\text{Tl}$	74h	$\text{Hg}(\text{d},\text{xn})^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$ , $^{203}\text{Tl}(\text{p},3\text{n})^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$



## 第四节 放射性核素的临床应用

### 一、放射性核素在肿瘤放射治疗中的应用

**放射治疗**简称**放疗**，放射治疗是利用肿瘤组织对射线的高度敏感性，通过放射治疗机发射出的射线对肿瘤组织进行照射，以达到治疗疾病的目的。放射治疗作为治疗恶性肿瘤的一个重要手段，对于许多癌症可以产生较好效果。

#### 1. $^{131}\text{I}$ 治疗

其物理半衰期为8.04天，放射多种能量粒子 $\beta^-$ 和 $\gamma$ 光子

通过 $\beta$ 射线的电离辐射作用，可对甲状腺疾病进行放射性治疗

利用 $\gamma$ 射线可进行甲状腺显像和功能检查



## 2. $^{32}\text{P}$ 治疗

半衰期为14.28天，只发射 $\beta$ -粒子而不发射 $\gamma$ 光子

用于恶性肿瘤骨转移，腔内注射、皮肤病、血管瘤和恶性肿瘤的治疗，还用于真性红细胞增多症、原发性血小板增多症治疗等

## 3. $^{198}\text{Au}$ 治疗

常用于腔内血管瘤、恶性肿瘤等治疗

## 4. $^{60}\text{Co}$ 治疗

发出能量分别为1.17 MeV和1.33MeV的两种 $\gamma$ 射线，主要用于治疗深部肿瘤，如颅脑内的肿瘤



## 5. 放射免疫治疗

是将对肿瘤具有特异亲和力抗体用放射性核素标记后经一定途径引入体内，以肿瘤细胞为靶细胞，与相关肿瘤细胞表面抗原特异结合，使大量的放射性核素滞留在肿瘤细胞，对其进行集中照射，抑制或杀伤肿瘤细胞，而周围组织损伤较轻。



## 二、放射性核素在核医学检查中的应用

### (一) 示踪诊断

#### 1. 直接探测

是用探测仪在体外直接探测示踪原子由体内发射的射线。

#### 2. 外标本测量

将放射性药物引入体内，然后取其血、尿、粪或活体组织等样品，测量其放射性活度。

#### 3. 放射自显影

放射性核素发出的射线能使胶片感光，可利用胶片来探测和记录放射性。它是追踪标记药物或代谢物在体内去向的一种有效方法。

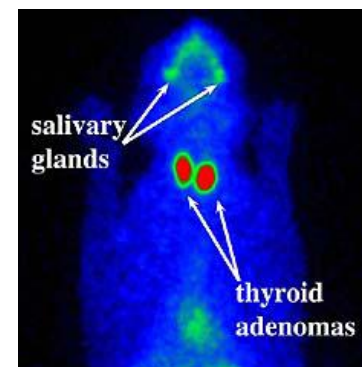
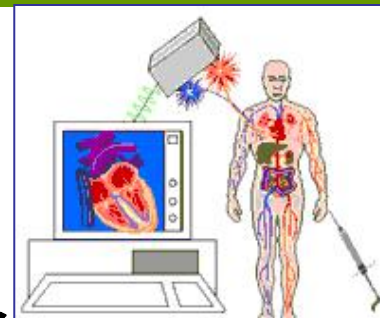
## 示踪诊断:

经放射性核素标记的药物引入人体后, 通过体外探测射线而测量其药物在体内的分布, 聚集和流通量。

如: 对人体无害的放射性**钠-24** ( $T=15.03\text{H}$ ) 溶液, 可进行人体血液循环的示踪实验。

对于贫血症患者, 可注射标记**铬-51** (铬酸钠分子  $\text{Na}_2\text{CrO}_4$ ) 的红血球, 用以测定体内红血球的寿命。

**碘-131** 可以用来做各种各样的医疗检查。例如, 确定血液量、肝脏的功能、甲状腺癌的转移、脑肿瘤以及测定甲状腺的大小、形状和功能等等。





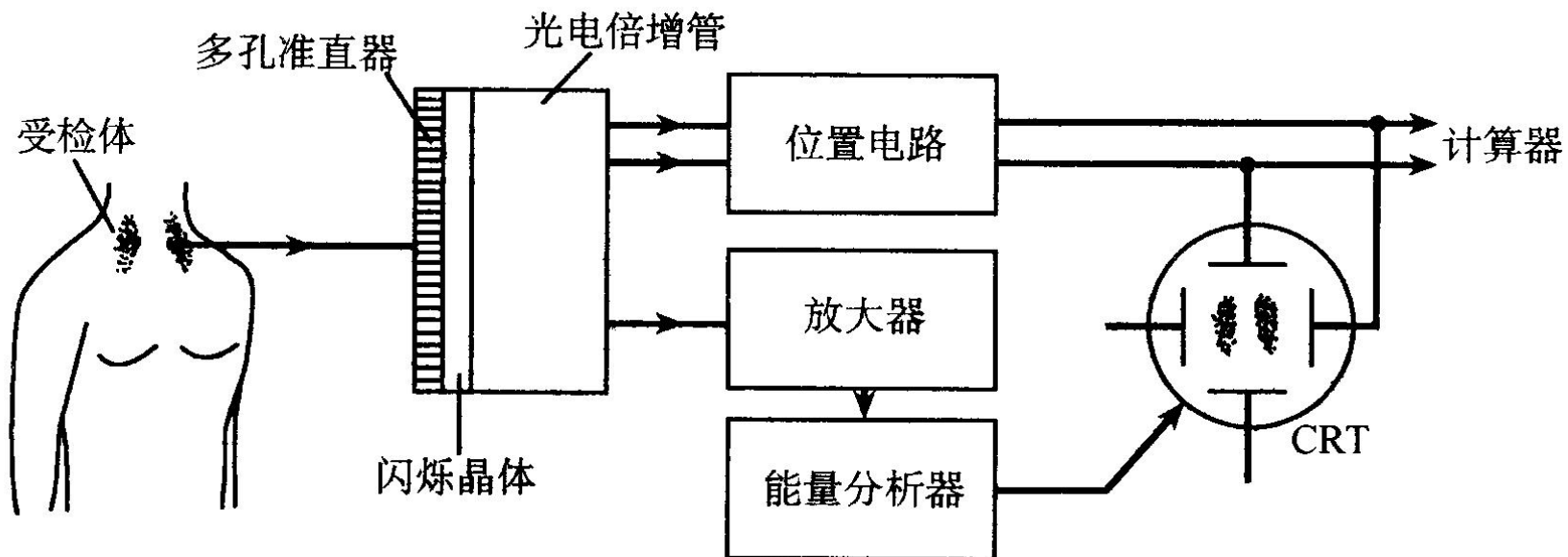
## (二). 核素成像

经放射性核素标记的药物引入人体后,通过体外探测射线,不仅对各种内脏器官及其病变进行立体显像,而且可以观察各种功能和代谢的动态变化图像。优点是特异性好,功能成像和早期诊断。

1.  $\gamma$  照相机成像
2. SPECT (单光子发射型计算机断层成像)
3. PET (正电子发射型计算机断层显像)



## 1. $\gamma$ 照相机

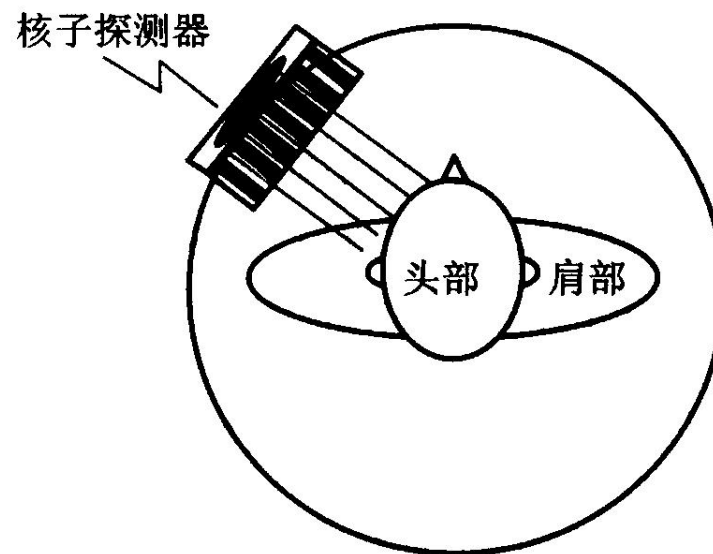


$\gamma$ 照相机常用的放射性核素有

$^{99m}\text{Tc}$   $^{201}\text{Tl}$   $^{131}\text{I}$   $^{67}\text{Ga}$

## 2. 单光子发射型计算机断层成像SPECT

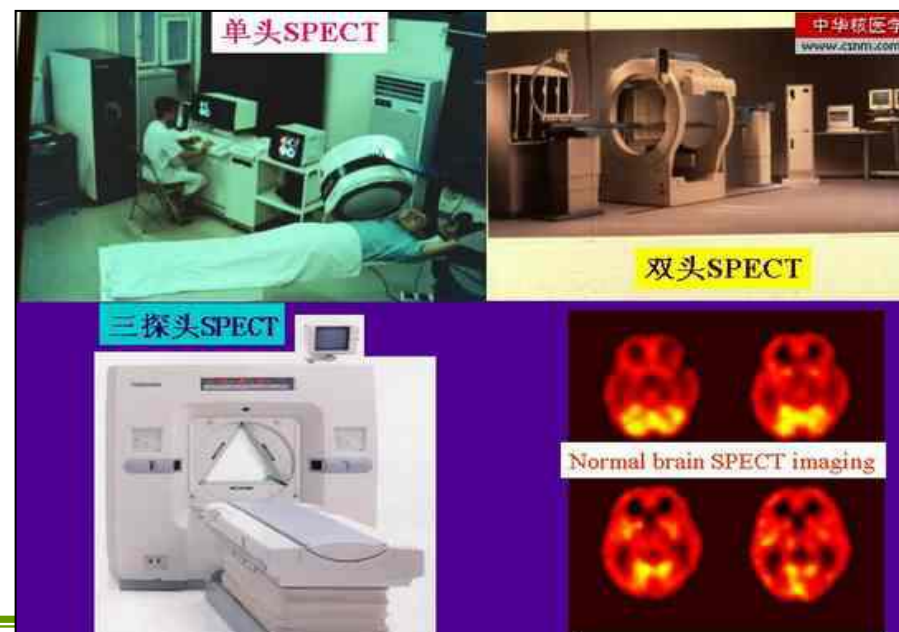
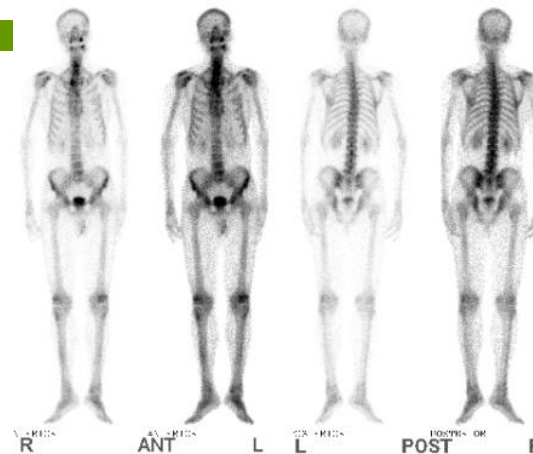
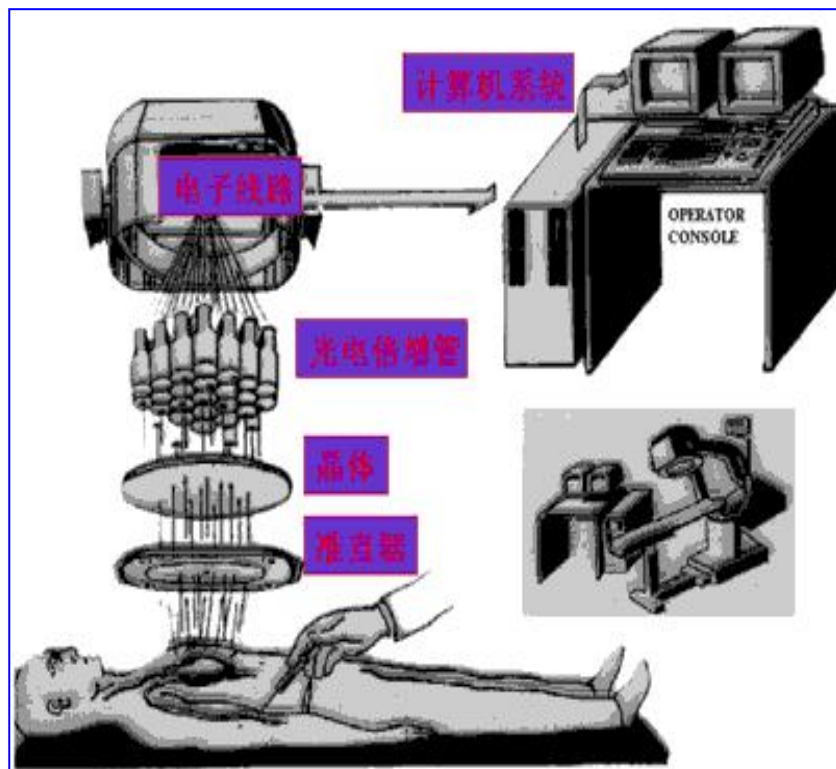
SPECT是先将示踪核素（如， $^{99m}\text{Tc}$ ， $^{131}\text{I}$ ， $^{201}\text{Tl}$ ，等）注入体内，本身成为一个发射体，再由探测器将示踪核素在机体内的吸收代谢，在器官或组织的分布测出，经计算机处理并重建图像。

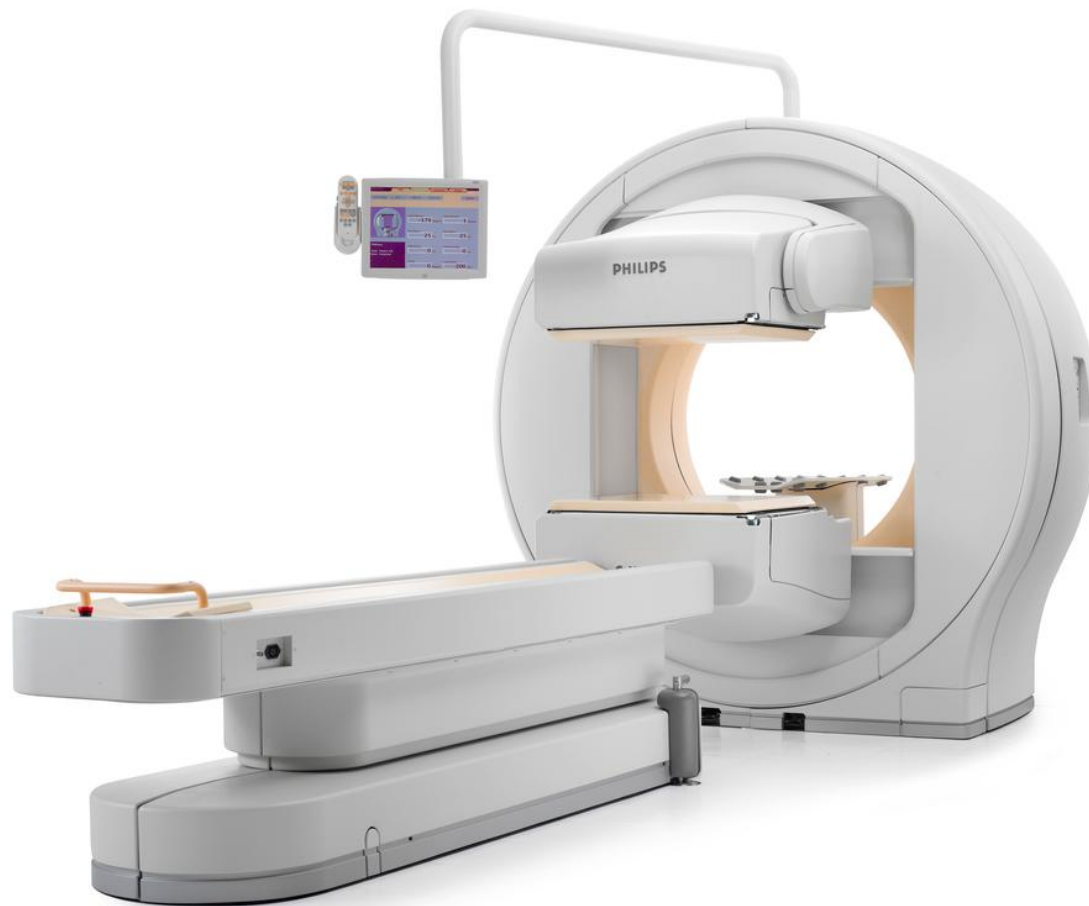




# SPECT (单光子发射型计算机断层成像)

(Single Photon Emission Computed Tomography)



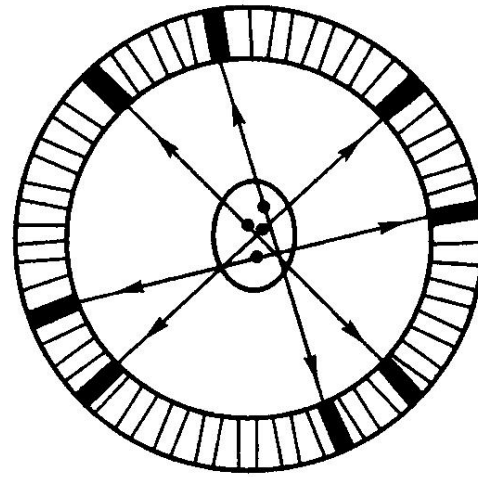


**SPECT**



### 3. 正电子发射型计算机断层成像PET

是利用正电子的湮没辐射特性，将能发生 $\beta^+$ 衰变的核素或其标记化合物引入体内某些特定的脏器或病变部位，通过探测正电子湮没时向体外辐射的 $\gamma$ 光子，获得成像所需的各向投影数据，再由计算机分析处理，实现图像重建。





# 正电子发射型计算机断层显像 (PET 派特)

Positron Emission Tomography



PET在临床的显像过程是从回旋加速器得到要使用的发射正电子的放射性核素（如： $^{18}\text{F}$ ）后，将放射性核素标记到葡萄糖上，构成能够参与人体组织血流或代谢过程的化合物（ $^{18}\text{F}$ -FDG），给受检者注射化合物FDG后，让受检者在PET的有效视野范围内进行PET显像。以一定时间内的统计计数所重建的图像即反映了放射性示踪剂在体内的浓度分布或者说葡萄糖代谢状况，因而PET影像是一种功能图像。



# 正电子发射型计算机断层显像 (PET 派特)

Positron Emission Tomography

是目前世界上最先进、最昂贵的检查项目之一，也是目前唯一可在活体上显示生物分子代谢、受体及神经介质活动的新型影像技术，现已广泛用于多种疾病的诊断与鉴别诊断、病情判断、疗效评价、脏器功能研究和新药开发等方面。



PET

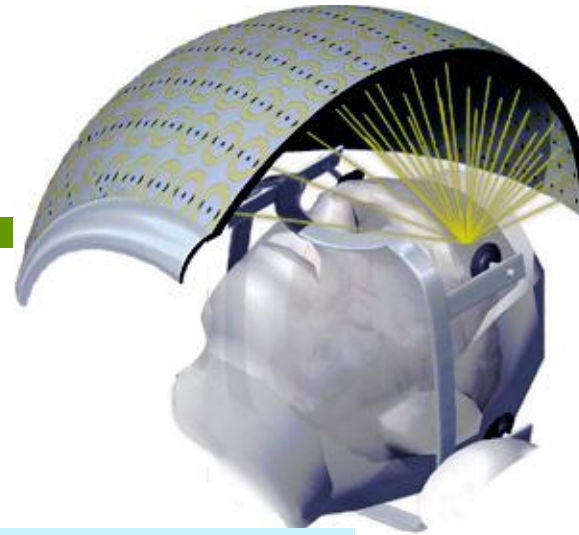


PET/CT

## $\gamma$ -刀

$\gamma$ -刀:

一个布满直准器的半球形头盔，头盔内能射出201条钴60高剂量的离子射线——伽玛射线。它经过CT和磁共振等现代影像技术精确地定位于颅内某一部位——靶点，201条射线从不同位置聚集在一起可致死性地摧毁靶点。



“X刀”在不治疗时就没有射线，而伽马刀是持续的有射线放出，虽然有防护，但是从事伽马刀的医护人员还是会更多的受到射线照射，医护人员在工作几年后的体检中经常有血常规的异常，所以在要生育前后都应该调离伽马刀的治疗。



## 小 结

放射性核素的衰变类型，包括 $\alpha$ 衰变、 $\beta^-$ 衰变、 $\beta^+$ 衰变、电子俘获、 $\gamma$ 衰变

放射性核素的衰变规律按指数规律衰变，半衰期  $T$ ，平均寿命  $\tau$ ，放射性活度  $A$

放射性核素的三种制备方法：反应堆中子照射生产、放射性核素发生器生产、回旋加速器生产

放射性核素在肿瘤放射治疗及核医学检查中的应用