

第一章 核物理基本知识

原子核物理是研究原子核的结构和性质、原子核的转变及其规律、射线与物质的相互作用的一门科学。

第一节 原子核结构

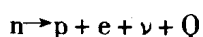
一、原子的结构

原子是很微小的粒子 半径为 10^{-8} cm 数量级。古希腊哲学家认为原子是构成物质的最小单元 直至 19 世纪末发现了电子和放射性以后,原子不可分割的概念才被否定。近代物理学认为,原子由原子核及核外电子组成。通常情况下核外电子是按照泡利 (Pauli) 不相容原理、洪特 Hund 规则及最低能量原理排布在核外轨道中 此时原子处于稳定状态 原子的这种状态也称为基态 (ground state)。当原子受到外界作用 (如射线照射) 时,其某个或某些电子可能获得能量,从较低能级的内层跃迁到较高能级的外层,即所谓的激发 (excitation) 此时原子就处于激发态 (excited state)。激发态原子是不稳定的,高能级轨道的某个或某些电子很快就会向低能级轨道跃迁以填补所空缺的电子。此时原子从激发态回到基态,称为退激 (de - excitation) 电子的多余能量则以光子 (quantum) 形式释放出来。

如果电子获得的能量较大,则该电子可脱离原子核引力的束缚而离开原子成为自由电子,原子本身则变成带正电荷的离子。这一现象称为电离 (ionization)。

二、原子核的组成和性质

与原子相比,原子核的半径只有原子的十万分之一 (10^{-13} cm) 但其质量却占整个原子的 99.9% 以上。原子核主要由质子 (proton 简写为 p) 和中子 (neutron 简写为 n) 组成 质子和中子统称为核子 (nucleon), 中子的质量略大于质子。通常用符号 ${}^A_Z X$ 表示不同的核素 其中 X 为元素符号, Z 是原子序数 等于核内质子数, A 是原子质量数,大致等于核内质子数与中子数之和。Z 也可不标出而简写成 ${}^A X$ 如 ${}^1 H$ ${}^{131} I$ 等。中子是一种不带电荷的中性粒子,静止质量为 1.6747×10^{-24} g。质子就是氢核,它带有一个正电荷 静止质量为 1.6725×10^{-24} g。自然界里中子并不单独存在,而是在原子核发生变化时,才从原子核里释放出来。中子处于自由状态时不稳定,会蜕变成为一个质子、一个电子和一个中微子。



式中 e 表示电子,静止质量为 9.1089×10^{-28} g; ν 表示中微子 (neutrino) 静止质量不到电子静止质量的万分之五; Q 表示衰变过程中释放的能量。

不同的原子核由不同数目的中子和质子组成,如氢原子核仅由一个质子组成,氦原子核

则由一个质子和一个中子所组成。在一个原子核里，质子和中子的数目是以一定比例存在的。一般说来，在质子数小的稳定核中，中子数差不多等于质子数或略多一些，只有 ^1H 和 ^3He 例外；在质子数大的稳定核中，中子要比质子多；在质子数很大时，中子要比质子多50%左右。当质子和中子的比例失调时，核就会不稳定。

核子间除了有质子与质子间的静电排斥力（库仑力）外，尚存在一种很强的具引力性质的力，称核力（nuclear force）。核力克服了静电斥力而使核子得以紧紧地结合在一个小体积里。核力的性质尚未完全了解，已知有以下几点：

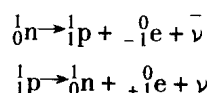
1. 核力大 核子之间的作用力非常大，超过了自然界中已知的其他作用力（万有引力、电磁作用力等），研究表明核力约比库仑力大100倍。有一个简单的对比，普通的纸是由分子组成的，我们可以一扯就破，如果这张纸是由原子核组成的，那就得几百辆机车的力才能扯破它。

2. 力程短 所谓力程是指力作用所能达到的空间距离。实验指出，两个核子间的距离在 $5 \times 10^{-13} \text{ cm}$ 以内时，它们之间的作用力很强，远远超过质子与质子之间的静电排斥力。而当核子间的距离大于 $5 \times 10^{-13} \text{ cm}$ 以后，作用力很快就减低以至微不足道。

3. 核力大致相等 核力与电荷无关，质子与质子之间，中子与中子之间以及中子与质子之间的核力大致相等。

4. 饱和性 由于每个核子只能在很短的力程内和其他核子相互作用，因此，每个核子至多只能和周围的几个核子起作用，这种性质称为核力的饱和性。

5. 交换性 质子和中子起核力作用时能交换其电荷，质子变为中子，中子变为质子：



式中 $\bar{\nu}$ 和 ν 分别称为中微子和反中微子。此外，实验还表明核子不能无限靠近，因此，它们之间一定还存在一种目前尚不为人所知的斥力。

三、核素、同位素、同质异能素

1. 核素 核素（nuclide）是表示某种原子具有一定特征的名称。具有相同的质子数、中子数和能态的原子称为一种核素。反之，质子数、中子数及能态不同的原子为不同的核素，如 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{99}Tc 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 都是不同的核素。由此可见，每种元素可有多种核素。现已知的核素约有2000种，分别属于100多种元素。

2. 同位素 在同一种元素的各种核素中，质子数相同，但中子数不同，或质子数、中子数均相同但核的能态不同，这类核素称为该元素的同位素。同一元素的不同同位素，核物理性质可有很大差异，但核外电子数相等，故化学行为基本相同。如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 是同位素，其中 ^1H 、 ^2H 是稳定同位素（stable isotope），而 ^3H 是放射性同位素（radio isotope），前者不能自发发生核转变而后者会自发发生核转变并放出不同射线。 ^{125}I 和 ^{131}I 也是放射性同位素， ^{131}I 和 ^{131}Xe 就不是同位素而是同质异荷数（isobar）。

3. 同质异能素 核内中子数和质子数都相同，但核所处的能态不同的核素称为同质异能素（isomer）。如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 ^{99}Tc ，其中 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 是 ^{99}Tc 的激发态，前者质量数后的符号‘m’表示亚稳态（metastable state），有时也写在元素符号的右上角。显然，同质异能素是同位素的特例。

四、质量 (mass)、能量 (energy) 和结合能 (binding energy)

基本粒子的质量都十分小，用克作单位实在太大了，国际上统一规定以 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 作为一个原子质量单位 (atomic mass unit, 简称为 amu)，一个 ^{12}C 原子的静止质量为 $12.000\,000\text{ amu}$ ，其他原子或粒子的质量就可以与 ^{12}C 作比较而定。按此标准， $1\text{ amu} = (1.660\,53 \pm 0.000\,08) \times 10^{-24}\text{ g}$ ，电子、质子和中子静止质量分别为 $5.485\,97 \times 10^{-4}\text{ amu}$ 、 $1.007\,276\,6\text{ amu}$ 和 $1.008\,665\,4\text{ amu}$ 。

在原子核物理中，一般采用的能量单位是电子伏特 (eV) 与其他能量单位的关系是：

$$1\text{ eV} = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19}\text{ J (焦耳)}$$

此外，还常用兆电子伏 (MeV) 和千电子伏 (keV) 作为能量单位，

$$1\text{ MeV} = 10^3\text{ keV} = 10^6\text{ eV}。$$

质量和能量都是物质必须具备的属性，任何物体都同时具有质量和能量，按照相对论给出的质能关系式，

$$E = mc^2$$

式中 E 为物质的能量， m 为物质的质量， c 为光在真空中的速度。上式表示质量为 m 的物质完全消失后转化为能量 E 。注意 这与化学反应不同 在化学反应中，一种物质的消失实际上主要转化为另一种物质，例如在煤炭的燃烧中， C 实际上转化为 CO_2 而并未消失。

根据上式，能量也可以转化为质量，这将在第四节中表述。

根据狭义相对论 物质的质量随着物质的速度改变 即：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

式中 m_0 为物质的静止质量， v 为物质的运动速度。物质相应的能量为：

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

常见的几种基本粒子的静止质量能如下：

| | |
|---------------|------------------------------------|
| 1 amu 相应的能量 |) = 931.478 MeV |
| 1 e | 0.511 006 MeV |
| 1 p | 938.256 MeV |
| 1 n | 939.550 MeV |
| ^4He | $3.728\,33 \times 10^3\text{ MeV}$ |

对光子 (电磁辐射) 而言，它没有静止质量，因而也就没有相应的静止质量能。光子的能量 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ 全部相当于动能。根据质能关系式 光子具有动质量：

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

$h = 4.14 \times 10^{-15}\text{ eV}\cdot\text{s}$ 称普朗克常数 λ 为光子的波长。

实验核物理提供这样的事实：由中子、质子和电子所组成的原子其质量并不等于各个粒子的代数和，而是比它小。如氦原子的质量就比组成它的各个成分的质量总和小：

$$m_{2\text{H}} - (m_{\text{n}} + m_{\text{p}} + m_{\text{e}})$$

$$= 2.014\ 102 - (1.008\ 665 + 1.007\ 277 + 0.000\ 549) = -0.002\ 389\ \text{amu}$$

这个差值称为质量亏损 (mass defect)。质量亏损现象与核子的结合能密切相关。在原子核中，核子间存在很强的相互作用力，当自由存在的单个核子相互靠近而结合成原子核时便释放出大量的能量，这种能量称为结合能。根据能量守恒及质能关系式，能量的减少（由于释放了能量）意味着质量减少，即一部分质量转化为能量释放出去了，所以核的质量比其组成核子的质量总和小，所减少的质量就是质量亏损。根据质能关系式，可由质量亏损计算原子核的结合能。如氦的结合能应为：

$$931.478\ \text{MeV} \times 0.002\ 389\ \text{amu} = 2.225\ \text{MeV}。$$

此外 实验还证实了它的逆过程 用能量为 2.225 MeV 的光子照射氦核时，氦核即一分为二，放出中子和质子。为了便于比较，通常以比结合能 B/A 表示， B 为结合能， A 是质量数， A 一般取整数。比结合能 B/A 和原子质量数 A 的关系见图 1-1。

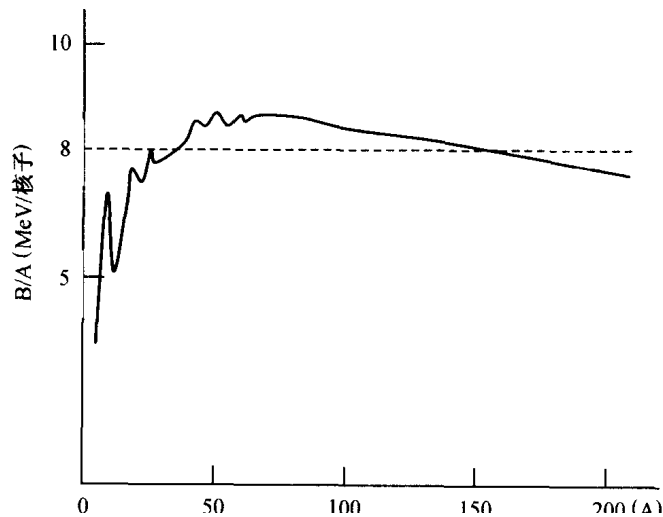


图 1-1 原子核平均结合能 (B/A 曲线)

对于 A 较小的核，比结合能变化较大。当 A 大于 20 后 比结合能的变化比较小 当 A 大于 140 后 比结合能逐渐降低。当 A 为 238 时 比结合能的值约为 7.5 MeV。所谓核能的释放，就是使比结合能低的核转变成比结合能高的核。有两种方法能够达到这个目的。第一种方法是利用重核分裂成为两个质量中等的核，称为裂变反应 (fission reaction) 所得到的能量称为裂变能。例如：

$${}^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{95}\text{Y} + {}^{139}\text{Xe} + 2\text{n} + Q$$

$$Q = [(235.043\ 943 + 1.008\ 665) - (94.912\ 540 + 138.917\ 840 + 1.008\ 665 \times 2)] \times 931.478$$

$$= 190.858\ \text{MeV}$$

第二种方法是将两个或数个轻的核聚合成一个较重的核，称为聚变反应 (fusion reaction)，所得到的能量称为聚变能。例如：

$${}^2\text{H} + {}^3\text{H} = {}^4\text{He} + \text{n} + Q$$

$$Q = [(2.014\ 102 + 3.016\ 050) - (4.002\ 603 + 1.008\ 665)] \times 931.478 = 17.59\ \text{MeV}$$

若以单位质量的物质释放的能量进行比较，聚变能远大于裂变能。

第二节 原子核转变

一、稳定原子核和不稳定原子核

原子核可分为两大类：一类为稳定存在的，不会自发地发生核内成分或能级的变化，或者发生的概率非常小，半衰期超过 10 亿年。这类原子核称为稳定性原子核，相应的核素称为稳定核素。另一类原子核则是不稳定的，会自发地转变为别的原子核，或自发地发生核能态变化，变化时伴有射线的发射。这类原子核称为放射性原子核，相应的核素称为放射性核素 (radioactive nuclide)。放射性核素分为两大类，一类是自然界存在的天然放射性核素，另一类是核反应产生的人工放射性核素。

在已知的约 2000 种核素中，稳定核素仅有 274 种。将这些核素的质子数 Z 对中子数 N 作图 (图 1-2) 便可看到原子序数小的稳定核素大致处在 $N = Z$ 的直线上。当质量数 A 增加时，稳定原子核所处的位置逐渐向这条线的下方中子数增多的方向偏移。由此可见，稳定性核素的质子 / 中子比值有特定的规律，不能太大或太小，因为核子间除相互吸引的短程核力外，还有质子间相互排斥的库仑力 (coulombian force) 如果太大或太小，核内两种力的平衡情况就发生变化。原子序数增大时，质子数增多，库仑斥力加大，此时就需要中子数增加得

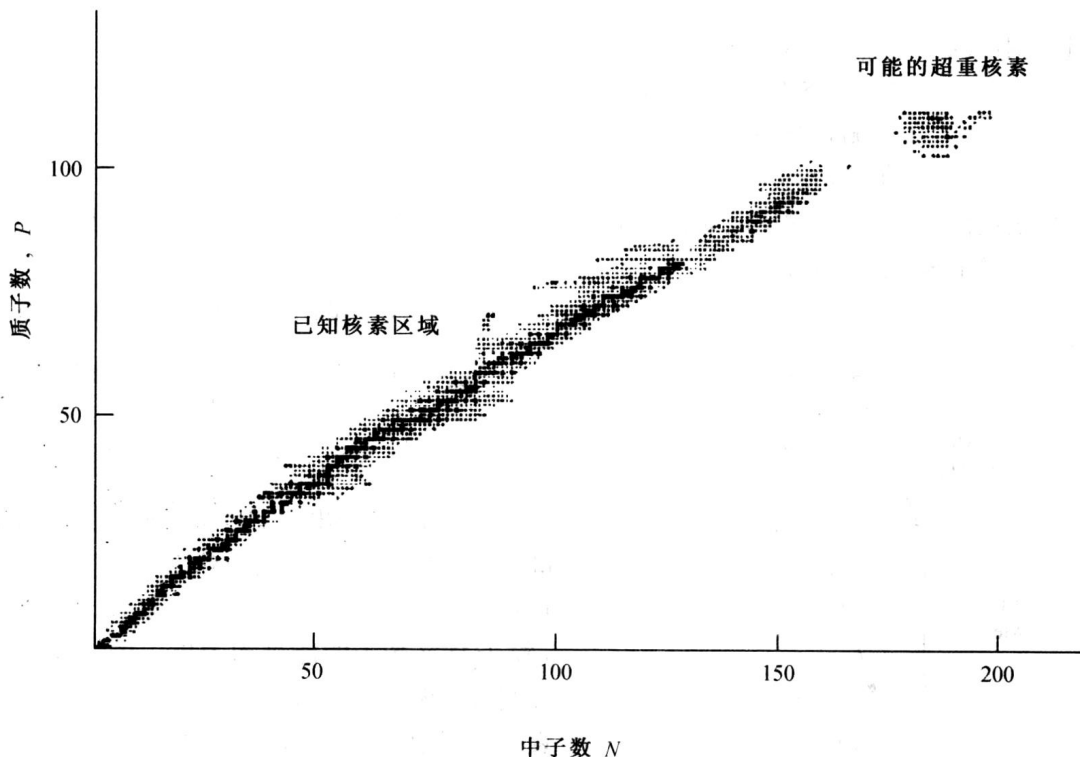


图 1-2 核素图

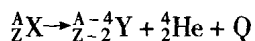
更多些，使核力得以增强，同样亦加大了质子间距离，使斥力不致增加太多，结果两力间仍能取得平衡，保持核的稳定。但是质子数增大到一定值 ($Z > 83$)后，核力不再能与库仑斥力保持平衡，就会引起原子核的衰变。由此可见，造成原子核不稳定的因素主要有两个：一是核内中子数与质子数比例失调；二是核内核子数过多。

二、放射性核衰变方式

不稳定的原子核自发地发生转变并放出射线，这个过程称为放射性衰变，简称核衰变 (nucleus disintegration)。不同的放射性原子核往往有不同的衰变方式，在不同形式衰变过程中发射出不同的射线，主要有以下几种类型。

(一) α 衰变 alpha decay)

不稳定核自发地从核内放射出 α 粒子而变成另一种核的过程称为 α 衰变， α 衰变主要发生于重元素的核素 (即原子序数大于 83)，可用以下通式表示：



式中 X 表示母核 (parent nucleus)，Y 表示子核 (daughter nucleus)， α 粒子实际就是两个质子和两个中子组成的氦核。母核经 α 衰变后，子核比母核少了两个中子和两个质子，因而中子数和质子数之比发生了改变，且核内核子数减少，使子核趋向于稳定。式中 Q 表示在衰变过程中由原子核内部所释放出的能量，称为衰变能 (decay energy)。例如：



$$\begin{aligned} \text{质量亏损 } (\Delta m) &= m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\text{He}} \\ &= 226.025\,438 - 222.017\,610 - 4.002\,603 \\ &= 0.005\,225 \text{ amu} \\ Q &= 931.478 \times 0.005\,225 = 4.87 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Q 是正值，说明上式的反应能自发进行，所以凡是能够产生 α 衰变的核素其母体质量一定大于子体和氦核的质量之和。

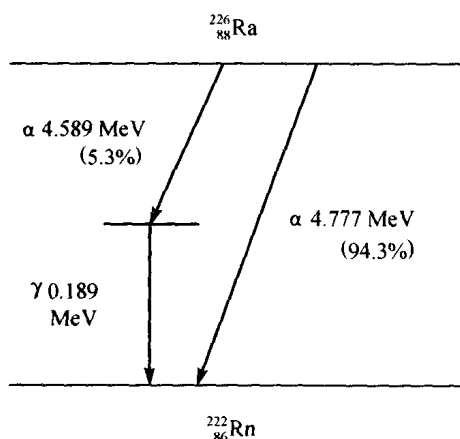


图 1-3 ${}^{226}\text{Ra}$ 的衰变示意图

衰变能按质量比分配于子核和 α 粒子：

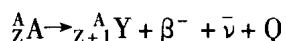
$$E_{\text{Rn}} = 4.87 \frac{m_{\text{He}}}{m_{\text{He}} + m_{\text{Rn}}} = 0.086 \text{ MeV}$$

$$E_{\alpha} = 4.87 \frac{m_{\text{Rn}}}{m_{\text{He}} + m_{\text{Rn}}} = 4.77 \text{ MeV}$$

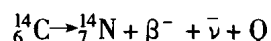
实测结果，释出的 α 粒子有两组：一组的能量为 4.777 MeV，占 94.3%；另一组的能量为 4.589 MeV，伴有 0.1888 MeV γ 射线，占 5.7%。 α 粒子及 γ 光子的能量均为单一的。 ${}^{226}\text{Ra}$ 核的衰变可用图 1-3 表示，该图称为衰变纲图。注意衰变纲图中箭头所指的方向表示子核原子序数的增减。

(二) β^- 衰变 β^- decay)

因原子核内中子相对过多造成核内不平衡，导致一个中子转变成质子，同时释出一个负电子的过程称为 β^- 衰变。核内释出的负电子通常称为 β^- 粒子或 β^- 射线。发生 β^- 衰变同时还产生一个反中微子 (antineutrino 简称 $\bar{\nu}$)。 $\bar{\nu}$ 是一种质量极小的中性基本粒子，穿透性极强。 β^- 衰变可用下式表示：



在衰变中 母体和子体的质量数 A 相同 但子体的原子序数 Z 增加 1 个单位 例如：



$$\Delta m = m_c - (m_N + m_\beta + m_{\bar{\nu}} - m_e)$$

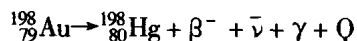
因为 $\bar{\nu}$ 质量极小，仅为电子质量的 5/10 000 可忽略 则：

$$\Delta m = 14.003\ 242 - 14.003\ 074 = 0.000\ 168\ \text{amu}$$

$$Q = 0.000\ 168 \times 931.478 = 0.156\ \text{MeV}$$

β^- 衰变所产生的衰变能在子核、 β^- 及 $\bar{\nu}$ 三者之间分配。由于子核质量比 β^- 粒子大数千倍以上 因此只分配到极少的能量 往往忽略不计 能量主要在 β^- 及 $\bar{\nu}$ 之间分配 这种分配是随机的 取决于衰变时 β^- 粒子与 $\bar{\nu}$ 之间形成的夹角。当 β^- 粒子与 $\bar{\nu}$ 之间的夹角成 180° 时 β^- 粒子的能量最小，接近于 0 因为 $\bar{\nu}$ 的质量仅为 β^- 粒子的万分之五，衰变能基本上都分配给了 $\bar{\nu}$ ；当两者之间的夹角为 0° 时 β^- 粒子能量最大。故 β^- 粒子的能量可以是零到全部衰变能 (E_{\max}) 之间的任何数值 其能量分布为一个连续能谱 (图 1-4)。其中 $E = 1/3 E_{\max}$ 的 β^- 粒子出现的概率最大 β^- 粒子的平均能量约为 40% E_{\max} 。

如果 β^- 衰变伴有 γ 光子发射，则核衰变能有一部分用于 γ 跃迁 (γ 跃迁的能量是单一的) 此时 β^- 粒子的 E_{\max} 就等于衰变能减去 γ 光子的能量。例如：



$$\Delta m = 197.968\ 231 - 197.966\ 756 = 0.001\ 475\ \text{amu}$$

$$Q = 0.001\ 475 \times 931.478 = 1.373\ 9\ \text{MeV}$$

因为 γ 射线能量为 0.412 MeV 因此 β^- 粒子的最大能量

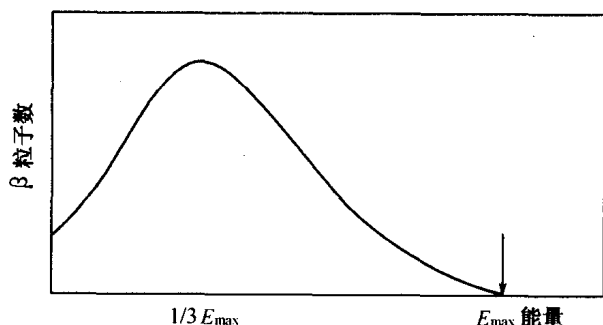


图 1-4 β 能谱示意图

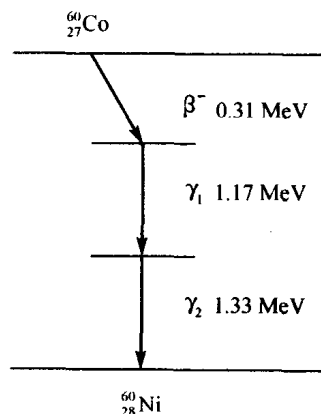


图 1-5 ${}^{60}\text{Co}$ 的衰变纲图

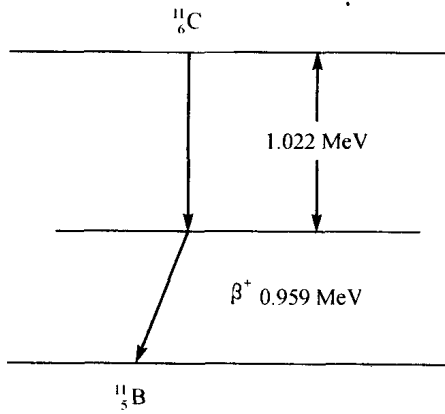
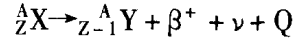
$$E_{\max} = 1.3739 - 0.412 = 0.9619 \text{ MeV}$$

有时核在发生 β^- 衰变时，每次可以连续发射 2 个 γ 光子 此时 β^- 粒子的 E_{\max} 为衰变能减去两次跃迁的能量，如 ^{60}Co 的 β^- 衰变(图 1-5) 两次 γ 跃迁的能量分别为 1.173 MeV 及 1.333 MeV 故 β^- 粒子的最大能量

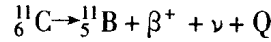
$$\begin{aligned} E_{\max} &= Q - (1.173 + 1.333) \\ &= 0.315 \text{ MeV} \end{aligned}$$

(三) β^+ 衰变 positron decay, β^+ decay)

当核内中子相对缺少时，核内的一个质子转变为一个中子，同时从核内释放出一个正电子的过程称为 β^+ 衰变。正电子亦称 β^+ 粒子或 β^+ 射线，质量与负电子相同，所带电荷相反。迄今为止 发生 β^+ 衰变的都是人工放射性核素。同 β^- 衰变一样， β^+ 衰变的母核与子核的质量数 A 无变化，但子核的电荷数要比母核的电荷数减少一个单位。 β^+ 衰变的同时发射 β^+ 粒子及穿透性极强、质量极小的中性基本粒子中微子(neutrino, 简称 ν) 一般通式为：



例如图 1-6 中，



$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{C}} - m_{\text{e}} - m_{\text{B}} - m_{\beta^+} \\ &= 11.011432 - 11.009305 - 2 \times 0.0005486 \\ &= 0.0010298 \text{ amu} \end{aligned}$$

$$Q = 0.0010298 \times 931.478 = 0.959 \text{ MeV}$$

由此可见， β^+ 衰变的条件是 $m_Z > m_{Z-1} + 2m_e$ 。

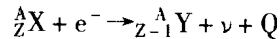
其中 $2m_e$ 的质量亏损正好是形成一对正负电子所必需的 1.022 MeV 能量来源。

β^+ 粒子的能谱与 β^- 粒子相似，也是连续的，其 E_{\max} 近似等于 Q 。

图 1-6 ${}^{11}\text{C}$ 的衰变纲图

(四) 电子俘获 (electron capture, EC)

有时核内中子过少，但又不具备 β^+ 衰变的条件 ($m_Z > m_{Z-1} + 2m_e$) 在这种情况下原子核可直接通过从核外俘获一个轨道电子，使核内一个质子转变为中子，以使原子核达到稳定，这个过程称为电子俘获。该过程也伴有中微子发射，可用下式表示：



整个系统的电子数目在衰变前后无增减，但子核的原子序数比母核减少一个单位，同时在俘获电子时，又必须消耗相当于电子结合能的能量 E_i ($i = K, L, M, \dots$)。由于 K 层电子被俘获的概率最大，这种衰变有时也称为 K 俘获。

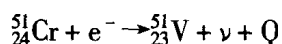
电子俘获时，发生质能转换的质量亏损是：

$$\Delta m_Z = m_Z - m_{Z-1} - E_i/c^2$$

因此，产生电子俘获的必要条件为：

$$m_Z > m_{Z-1} + E_i/c^2$$

母核发生 K 俘获后，子核的 K 层电子就少了一个，留下一个空位，这时比 K 层电子能量更高的电子层如 L 层的电子就有可能跃迁到该空位，同时将多余的能量相当于跃迁前后两壳层能级的差以 X 射线形式辐射出来。这 X 射线必定是子核的特征 X 射线。如图 1-7。



有时电子跃迁释放的能量也可不以特征 X 射线的形式释出，而是传递给另一壳层电子，一部分用以克服该电子结合能使之逸出成为自由电子，其余部分则成为该电子的动能。这样释出的电子称为俄歇电子 (Auger electron)。电子俘获时释出的 X 射线或俄歇电子都不是直接来自核内，而是来自核外层电子能级变化的次级辐射，它们在能量方面的特点是：① 能量都较低，通常是 keV 级；② 能量都是定值而不是连续谱；③ 能量随被俘获的电子和跃迁电子所处壳层不同而不同，所以每种核素电子俘获衰变都可发射几种不同能量的 X 射线和俄歇电子，各有一定的概率；④ 俄歇电子能量一般都略低于相应的 X 线。实际工作中可通过测定 X 射线和俄歇电子来了解电子俘获的发生。

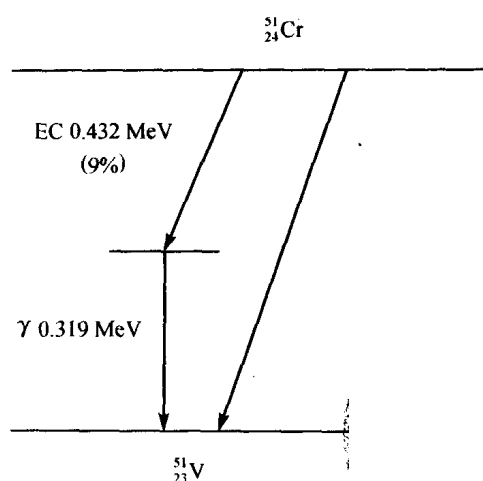


图 1-7 ${}^{51}\text{Cr}$ 的衰变纲图

β^+ 衰变与电子俘获都发生在缺中子的核素中，同一种核素有时可同时进行这两种衰变，如 ${}_{30}^{65}\text{Zn}$ 。少数核素甚至可同时进行 β^+ 、 β^- 和电子俘获三种衰变。

(五) γ 衰变 跃迁)

原子核从能量较高的状态 (激发态) 跃迁到能量较低的状态或最低能量状态 (基态) 时，会放出 γ 射线。有许多放射性核素在发生 α 或 β 衰变后，生成的子核往往处于激发态，由激发态向基态过渡时便会发生 γ 衰变。

γ 射线的性质与 X 射线相似，都是一种电磁辐射，但前者来自核本身的变化，后者则是次级辐射。

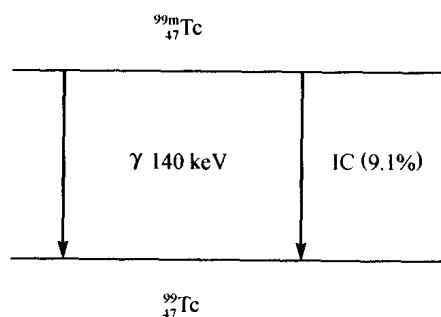
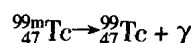


图 1-8 ${}^{99m}\text{Tc}$ 的衰变示意图

大部分原子核处于激发态的时间十分短暂 ($< 10^{-11}$ s)，因而 γ 衰变可以看成是伴随着 α 、 β 衰变同时发生。也有些原子核衰变时，子体处于激发态的时间较长，可以把 γ 衰变的半衰期单独测量出来，这种激发态称为同质异能态，子核常被看作一种单独的核素，称为同质异能素。它本身又作为母体，经 γ 衰变而变成 Z 和 A 都相同但能量状态不同的子核 (图 1-8)，例如：



处于同质异能态的原子核还可通过发射内转换电子 (internal conversion electron) 使核从激发态回到基态 (图 1-8)。内转换电子就是核的激发能直接传给核外电子，使之向外发射电子。这种内转换电子具有单一能量，不同于 β 射线。因此，发射 γ 射线和内转换电子是核

从激发态跃迁到较低能级或基态时的两种基本方式。内转换现象发生后，由于 K 层或 L 层电子发射后会留下一个空位，因而也会继续发生次级辐射，如发射特征 X 射线或俄歇电子。

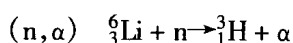
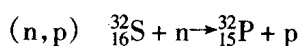
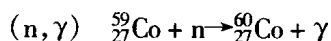
三、人工核反应 (artificial nuclear reaction)

原子核结构的变化，除了放射性核素的自发蜕变外，还可用人工方法引起原子核结构的变化。人工核反应就是以高能粒子或光子轰击靶原子核使之发生改变的反应。这些高能粒子可以是天然的 α 粒子，但主要是经过加速器加速的质子流、氘核流、氦核流等带电粒子流及反应堆产生的中子流等。

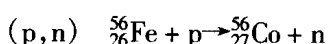
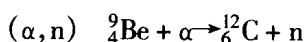
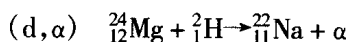
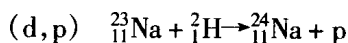
人工核反应的产物可以是非放射性核素，也可以是放射性核素。

(一) 人工核反应类型

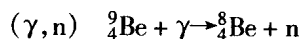
1. 中子引起的核反应



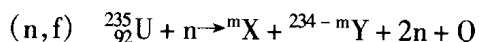
2. 带电粒子引起的核反应



3. γ 射线引起的核反应



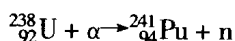
4. 裂变反应



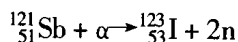
上式表示 ${}^{235}\text{U}$ 原子核受到中子轰击后裂变成两个中等质量的碎片。

(二) 核反应的意义

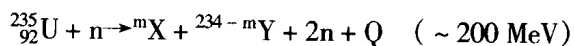
1. 获得新核素



2. 制备放射性核素



3. 获得原子能



第三节 放射性核素衰变规律及放射性活度

放射性核素的衰变是原子核内激烈运动变化的表现。原子核衰变会发生两方面的变

化。发射 α 、 β 、 γ 等射线 ② 原子核本身变成另一种原子核。如 ^{14}C 原子核 当发生 β^- 衰变时 发射出 β^- 射线同时蜕变成 ^{14}N 原子核。由于放射性核素总是处于不断的衰变过程中，因此，一定量的放射性核素 总是随着时间不断地减少 同时源源不断地生长出它的子体。

不同的放射性核素，其放射性随时间的变化差异很大。如临床上广泛使用的 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 其放射性只要每隔 6.02 h 就会减弱一半，但在基础医学研究中常用的 ^3H 要经过 12.33 年 放射性才减弱一半。以下介绍几种典型的衰变类型。

一、子体为稳定核素的放射性衰变规律

子体为稳定核素的衰变规律是最基本的，目前生物医学上应用的多数放射性同位素都属于这一类 如 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{51}Cr 、 ^{125}I 、 ^{131}I 、 ^{198}Au 、 ^{203}Hg 等。

(一) 衰变规律和衰变常数

放射性核素的衰变符合统计规律（详见第二章中的放射性测量的统计规律）。实验证明，放射性衰变是一级反应，即每秒衰变的原子核数与该时刻存在的原子核数成正比。设 dN 为时间 dt 内衰变的原子核数， N 表示现有的原子核数目，则：

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

式中 λ 表示单位时间内每一个核的衰变概率（单位是时间⁻¹ 例如 s^{-1} 、 min^{-1} 等）称为衰变常数 (decay constant)， $\frac{dN}{dt}$ 为衰变率 (rate of disintegration)。 λ 是各种放射性核素的特征参数，不受任何外界因素的影响（如温度、压力、磁场等）

将上式重排并积分 即

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

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

当 $t_0 = 0$ 时，

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t$$

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

或

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

N_t 或 N 为 t 时剩下的原子核数，若要计算衰变掉的原子核数，则

$$N_0 - N = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

(二) 半衰期 (half-life, $T_{1/2}$)

半衰期是指放射性核素的原子核数因衰变而减少到原来一半所需的时间。半衰期同样表征了放射性核素的物理特征，故该半衰期也称物理半衰期。与衰变常数相比，半衰期往往显得更为直观。

$$\text{当 } t = T_{1/2} \text{ 时, } N = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2}$$

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

此即衰变常数与半衰期的相互关系。

此外，生物体内的放射性核素，由于生物代谢过程从体内排出，排出至原来一半所需要的时间，称为生物半衰期 (T_b)。放射性核素由于放射性衰变和生物代谢的排出，两者共同作用而减少到原来一半所需的时间，称为有效半衰期 (T_{eff})。

设某放射性核素的物理衰变常数为 λ ，而在单位时间内由于生物代谢过程从体内排出的生物衰变常数为 λ_b 根据统计学的概念：

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_b$$

或

$$\frac{0.693}{T_{\text{eff}}} = \frac{0.693}{T_{1/2}} + \frac{0.693}{T_b}$$

即：

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_b \cdot T_{1/2}}{T_b + T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$ 及 T_{eff} 可由实验测出，根据上式可间接算出 T_b 。

衰变较快的核素 可通过实验求其 $T_{1/2}$ 。具体方法是在不同时间测出其放射性计数，在半对数坐标上作出的衰变曲线是直线，从图上可很容易地读出 $T_{1/2}$ (图 1-9)。不同放射性核素 其 $T_{1/2}$ 是不同的。如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 $^{113\text{m}}\text{In}$ 的 $T_{1/2}$ 分别为 6.02 h 和 104 min。因此 测得的 $T_{1/2}$ 可帮助判断未知核素。有时测定衰变曲线还可识别有无放射性杂质。如果将两种半衰期相差比较大的放射性核素混合在一起，如 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 和 $^{113\text{m}}\text{In}$ 测得的结果在半对数坐标纸上作图 结果衰变曲线从直线变为曲线 (图 1-10) 但经过 6~7个 $^{113\text{m}}\text{In}$ 的 $T_{1/2}$ 后，衰变曲线又从曲线变为直线。其中，斜率大的直线为 $^{113\text{m}}\text{In}$ 的衰变曲线，斜率小的直线为 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的衰变曲线。

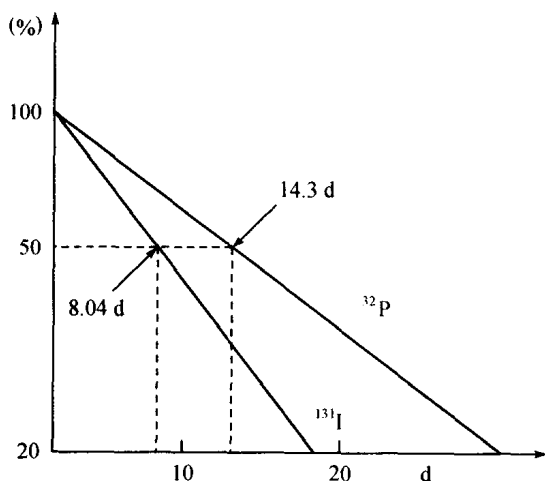


图 1-9 图解法求半衰期

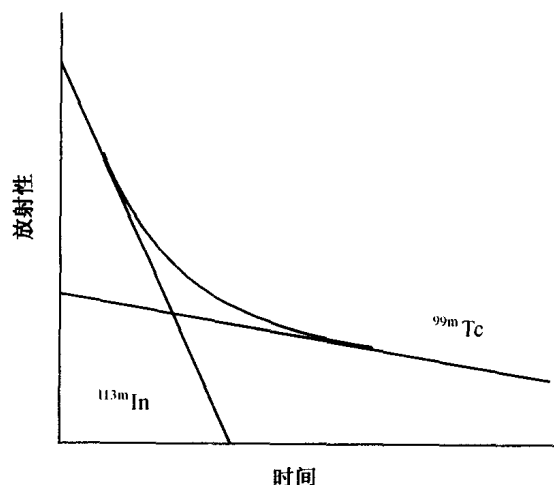
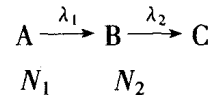


图 1-10 图解法求两种混合核素的半衰期

二、子体为放射性核素的连续衰变 (chain decay)

核医学常用的放射性核素中,有一些是从其母体衰变得到的,例如在核医学中应用最广泛的 ^{99m}Tc 就是从其母体 ^{99}Mo 经 β^- 衰变而得到的, ^{99m}Tc 再衰变成 ^{99}Tc 。因此,在 $^{99}\text{Mo} - ^{99m}\text{Tc}$ 发生器中欲知子体 ^{99m}Tc 放射性活度的变化,就必须同时考虑其生长和衰变两个因素。以A和B分别代表放射性母体和子体,C代表B的衰变产物。为简化起见假定C是稳定性核素,则连续衰变可用下式表示:



式中, N_1 和 N_2 分别为母体和子体的原子数,则子体B的变化应为:

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

积分运算后得:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_1)_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

将放射性物质在单位时间内衰变的次数定义为放射性活度,用A表示(参见本节三和四), $A = \lambda N$ 上式可进一步写成

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_1)_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

实际工作中有以下三种情况:

1. $\lambda_2 \gg \lambda_1$ 子体核素的衰变远远快于母体。因为 $\lambda_2 \gg \lambda_1$ 则

$$A_2 \approx (A_1)_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

当 t 为子体核素的6~7个 $T_{1/2}$ 后随着 t 的增大, $e^{-\lambda_2 t}$ 趋近于零则

$$A_2 \approx (A_1)_0 e^{-\lambda_1 t} = A_1$$

即子体的衰变速率等于母体的衰变速率,体系达到了平衡,这种平衡称为长期平衡或久期平衡(secular equilibrium)。由于 λ_1 很小, $e^{-\lambda_1 t}$ 趋近于1故上式也可写成:

$$A_2 \approx A_1 = (A_1)_0$$

例如: $^{113}\text{Sn} - ^{113m}\text{In}$ 衰变体系就属于这一类:



^{113}Sn 和 ^{113m}In 的半衰期分别为118 d和104 min 相应的衰变常数

$$\lambda_1 = 6.798 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1} \quad \lambda_2 = 1.11 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

经过10~12 h后体系即达到平衡,子体的放射性等于母体的放射性。

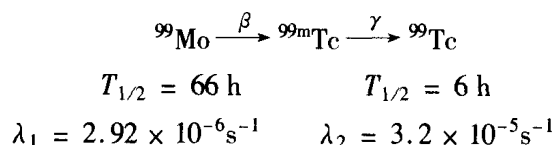
2. $\lambda_2 > \lambda_1$ 在此体系中,子体核素的衰变快于母体但与 λ_2 相比 λ_1 不可忽略。当 t 较大时例如当 t 为子体核素的6~7个 $T_{1/2}$ 后随着 t 的增大, $e^{-\lambda_2 t}$ 比 $e^{-\lambda_1 t}$ 先趋近于零则

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_1)_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1$$

即
$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \text{常数}$$

此后，在一段时间内子体的衰变速率与母体的衰变速率成一定的比例，体系达到了平衡。但由于 λ_1 不是很小 在过了一定的时间之后 母体的原子核逐渐衰变完 故体系的平衡只能维持一定的时间，此平衡称为暂时平衡 (transient equilibrium)。从上式可以看出，在暂时平衡期间子体的放射性大于母体的放射性，例如 $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$ 衰变体系就属于这一类型：



3. $\lambda_1 > \lambda_2$ 子体核素的衰变率比母体慢，经过一段时间后，母体绝大部分变成子体，混合物按照子体的衰变率进行衰变，体系不存在平衡。

三、放射性活度 A 及其单位

放射性活度在 20 世纪 80 年代以前也称放射性强度，它表征了放射性物质的衰变速率。放射性活度以放射性物质每秒衰变次数来量度，单位是衰变数/秒 (dps) 即 $A = -\frac{dN}{dt}$ ，国际单位是 Bq (Becquerel)，其常用的派生单位有 kBq、MBq、GBq、TBq 等。1 Bq = 1 dps。

放射性活度的旧专用单位为 Ci (居里) 派生单位是 mCi、 μCi 等。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 2.22 \times 10^{12} \text{ dpm}$$

dpm 的含义是每分钟衰变次数。两种单位的换算如下：

$$\begin{array}{l}
 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq} \\
 1 \text{ mCi} = 1 \times 10^{-3} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = 37 \text{ MBq} \\
 1 \mu\text{Ci} = 1 \times 10^{-6} \text{ Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ Bq} = 37 \text{ kBq}
 \end{array}$$

Bq 数相同的两个放射源，只是表示它们在每秒钟内衰变的次数相同，并不表示发射的粒子数相同。如 10 Bq ^{60}Co 与 10 Bq ^{32}P 只表示两种放射源在每秒钟内均发生 10 次核衰变，而与衰变形式及发射的粒子数无关。前者每次衰变时除了发射一个 β^- 粒子外 还同时发射 2 个 γ 光子，后者衰变时只放出一个 β^- 粒子而无 γ 射线。

四、放射性活度和放射性核素的原子数及质量间的关系 (表 1-1)

因为放射性活度 A 与原子数 N 间有如下关系：

$$A = \lambda N$$

而 $N = 6.023 \times 10^{23} \times$ 摩尔原子数，所以一定质量放射性核素的放射性活度可计算如下：

设某一核素 (无载体 carrier free) 的质量为 m 毫摩尔原子 则：

$$\begin{aligned}
 N &= 6.023 \times 10^{23} \times m \times 10^{-3} \\
 A &= \lambda N = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot N = \frac{N}{1.44 \times T_{1/2}(\text{min})} (\text{dpm}) \\
 A &= \frac{6.023 \times 10^{23} \times m \times 10^{-3}}{1.44 \times T_{1/2}} (\text{dpm})
 \end{aligned}$$

例如： ^3H 的 $T_{1/2}$ 为 12.33 年 试求 1 mmol $^3\text{H} - 1,7,8, \text{DHM}$ 的理论放射性活度 1 摩尔 ^3H

- DHM 中有 3 摩尔 ^3H 原子):

$$A = \frac{6.023 \times 10^{23} \times 3 \times 10^{-3}}{1.44 \times 12.33 \times 365 \times 24 \times 60} = 1.936 \times 10^{14} (\text{dpm})$$

表 1-1 常用放射性核素的质量 (g) 与活度 (GBq) 关系表

| 核素 | g/GBq | 核素 | g/GBq |
|------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|
| ^3H | 2.81×10^{-6} | ^{86}Rb | 3.32×10^{-7} |
| ^{11}C | 3.22×10^{-11} | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 5.14×10^{-9} |
| ^{14}C | 6.05×10^{-3} | $^{113\text{m}}\text{In}$ | 1.62×10^{-9} |
| ^{13}N | 1.86×10^{-11} | ^{125}I | 1.50×10^{-6} |
| ^{18}F | 2.84×10^{-10} | ^{131}I | 2.32×10^{-7} |
| ^{24}Na | 3.11×10^{-9} | ^{133}Xe | 1.46×10^{-7} |
| ^{32}P | 9.46×10^{-6} | ^{131}Cs | 2.62×10^{-7} |
| ^{35}S | 6.32×10^{-7} | ^{133}Ba | 1.09×10^{-4} |
| ^{45}Ca | 1.53×10^{-6} | ^{198}Au | 1.11×10^{-7} |
| ^{51}Cr | 2.92×10^{-7} | ^{197}Hg | 1.09×10^{-7} |
| ^{59}Fe | 5.46×10^{-7} | ^{203}Hg | 1.96×10^{-6} |
| ^{60}Co | 2.39×10^{-5} | ^{226}Ra | 2.67×10^{-2} |
| ^{67}Ca | 4.51×10^{-6} | ^{238}U | 8.08×10^4 |
| ^{75}Se | 1.86×10^{-6} | | |

五、放射性活度和脉冲计数率

在实际测量中, 我们测量得到的往往并不是放射性活度 A 而是与活度成正比的脉冲计数率 它的单位通常用脉冲计数 / 分钟表示 简称 cpm(counts per minute) 一般用 I 表示。 I 与 A 的关系为:

$$I = EA$$

式中 E 为比例常数 称为仪器的测量校正系数或测量效率 它与仪器的性能、样品的情况及测量时的条件等因素有关。

例如: 3.7 kBq 的 ^{131}I 模拟源 由 ^{137}Cs 和 ^{133}Ba 组成, $T_{1/2} = 30$ 年 其活度为:

$$3.7 \text{ kBq} = 2.22 \times 10^5 \text{ dpm}$$

用 γ 计数器测量 测得脉冲计数率为 $6.66 \times 10^4 \text{ cpm}$ 则该仪器在此测量条件下的测量效率为:

$$E = \frac{I}{A} = \frac{6.66 \times 10^4}{2.22 \times 10^5} \times 100\% = 30\%$$

知道仪器的测量效率 E , 就可进一步测得未知样品的放射性活度 A 。例如现有 $\text{Na } ^{131}\text{I}$ 样品溶液 用此仪器在同样条件下测得 $I = 3.33 \times 10^4 \text{ cpm}$ 则:

$$A = \frac{I}{E} = \frac{3.33 \times 10^4}{30\%} = 1.11 \times 10^5 \text{dpm} = 1850 \text{Bq}$$

由此可得 $\text{Na } ^{131}\text{I}$ 样品溶液的放射性活度为 1850 Bq。

第四节 射线和物质的相互作用

射线和物质的相互作用，包括两个相互联系的方面。一方面是射线对物质的作用，即引起物质的电离 (ionization) 和激发 (excitation) 另一方面是物质对射线的作用 (使射线减速、散射 (scattering) 或被吸收 (absorption))。带电粒子和非带电粒子与物质间相互作用的机制不同，分别讨论如下。

一、带电粒子与物质的相互作用

放射性核素发射的带电粒子有 α 、 β^- 、 β^+ 及内转换电子等，它们与物质的相互作用主要有如下几个方面。

(一) 电离和激发

电离是带电粒子与物质原子核外的‘束缚’电子 (bound electron) 间相互作用的结果。这种相互作用表现为 α 和 β^+ 粒子与核外电子间的吸引力及 β^- 粒子和核外电子间的排斥力。当入射的带电粒子能够提供足够大的动能时，束缚电子可能克服核的束缚而成为自由电子。失去电子的原子称为离子，自由电子和离子合称离子对 (ion pair)。使物质的中性原子变成离子对的过程称为电离。在空气中产生一对离子所需的平均能量约为 34.2 eV。电离的能量从带电粒子的动能中获得。这种电离作用是某些探测器能够测量射线的物质基础，又是射线引起被作用物质物理变化和化学变化及生物效应的主要机制。电离作用的强弱通常用电离密度这个概念度量，单位是离子对/cm，即射线在每厘米路程上产生的离子对数。电离密度与粒子本身和介质有关，它与带电粒子速度的平方成反比，还与带电粒子本身所带的电荷及物质密度有关。粒子速度小、电荷大、介质密度大，则电离密度大，反之则小。如 α 粒子所带电荷比 β 粒子多，且速度慢，因此 α 粒子的电离作用比 β 粒子及 γ 射线大得多，在局部引起的物理、化学及生物效应也大得多，而射程却短得多。如果核外电子获得的能量不足以使其脱离原子，则核外电子可以从内层轨道跃迁到外层轨道，即原子由基态转入高能态，这种过程称为激发。当该电子退激时，多余的能量以其他形式，如特征波长的 X 射线或热能等释出。激发作用同样是一些探测器工作的物质基础，并导致被作用物质产生一系列物理、化学及生物等效应。

射线在物质中形成离子对时要耗能，使物质中的原子激发时也要耗能，因此射线通过物质时将逐渐丧失动能而减速。介质密度越大，单位距离损失的能量越多，减速也越大。

(二) 散射

带电粒子在物质中因受原子核库仑电场的作用而改变运动方向，称为散射。 α 粒子动量大，散射现象不显著； β 粒子动量小，易被散射，且散射角度大，因此散射比 α 粒子显著得多，而且在物质中往往是一种多次散射的混合过程。散射的结果使射线的方向在一定程度

上杂乱无章，给测量及安全防护都带来一定问题。

(三) 轫致辐射

高速电子或其他带电粒子经过原子核附近时受到原子核库仑电场作用而急剧减速，一部分动能以光子的形式辐射出来，这种辐射称为轫致辐射 (bremsstrahlung)。带电粒子由于产生轫致辐射而损失部分能量。轫致辐射的产生与粒子质量的平方成反比，与粒子所带的能量成正比，与介质原子序数平方成正比。因此，高能 β^- 粒子与原子序数大的物质如铅、钨等作用时易产生轫致辐射。防护时应采用原子序数较低的材料如有机玻璃、塑料、铝等。

(四) 契伦科夫辐射

高能电子或其他带电粒子通过折射率较大的透明介质时如果电子的速度足够大在电子经过之处，将沿一定方向发射出接近紫外线波长范围的可见光，这种辐射称为契伦科夫辐射 (Cerenkov radiation)。契伦科夫辐射有时可作为探测高能 β^- 粒子的手段 (详见第二章液闪测量部分)

(五) 吸收和射程

带电粒子在与物质相互作用的过程中逐步损失能量。当其动能全部或接近全部丧失时，会和周围的物质发生一些特殊的作用，如 β^+ 湮灭，或形成自由电子等，其结果是原来的射线不复存在。这一现象称为吸收。吸收作用与物质的厚度、密度以及粒子本身的性质和能量有关。

1. α 粒子吸收 当 α 粒子的能量因电离和激发等作用而完全耗尽后，就会俘获介质中的两个自由电子而变成中性的氦原子。这时 α 粒子就被物质所吸收。射线被吸收前，在物质中经过的距离就是它在该物质中的射程 (range)。一定能量的 α 粒子在一定密度的物质中有一定的射程 (表 1-2) 能量相同的 α 粒子有基本相同的射程。在射程范围内，电离密度随 α 粒子能量减少速度减慢而逐渐加大 (图 1-11)。

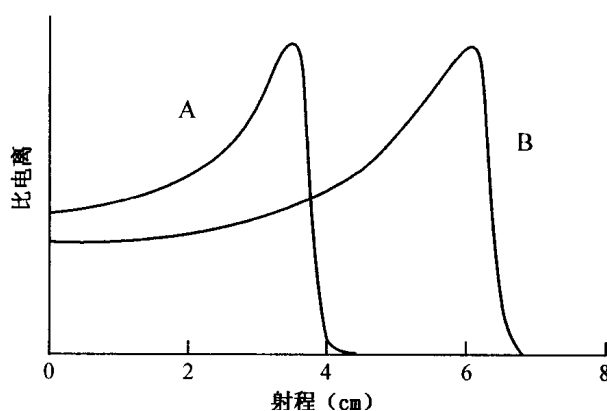


图 1-11 α 射线在空气中的射程及电离密度

图中 A 与 B 分别为两种不同能量的 α 射线

α 粒子碰到核外电子时，因其静止质量比电子大 7 000 倍 故运动方向基本不变 因此 α