

放射性核素在生物学中应用

● 王侯聪 编著

出版社

放射性核素 在生物学中应用

王侯聪 编著

厦门大学图书馆存



作者王侯聪
1995年



厦门大学出版社

9512387

(闽)新登字 09 号

放射性核素在生物学中应用

王侯聪 编著

*

厦门大学出版社出版发行

福建省沙县印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 8.75 印张 2 插页 220 千字

1994 年 8 月第 1 版 1994 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—1000 册

ISBN 7-5615-0917-0/Q·27

定价:8.00 元

前 言

随着现代科学技术的迅速发展、放射性核素正广泛地应用于生物学、医学和农学等学科各个领域,大大地推动这些学科进入分子水平的新阶段。核素的应用已有近百年的历史,它涉及的知识面和实验技术都十分广泛,要在这极有限的篇幅里,全面、详细地介绍各种技术是不可能的。我们在多年的教学实践和原有教材的基础上,并参考兄弟院校的有关教材编写了本书。在编写中除注意到教学上需要的系统性和完整性外,力求简明介绍一些技术的基本原理和应用。同时,对一些已不常用的技术和众所周知的知识作了必要的删略,而增添了一些在生物学中应用的新进展。

在编写本书的过程中,承蒙导师黄厚哲教授的鼓励和关怀,并得到厦门大学出版社和沈国英、邱思密、林均民等老师的大力支持。在此,向他们及在本书中引用了资料的作者,一并致最诚挚的感谢!

由于水平有限,时间匆促,难免有错漏之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 核物理基础知识	(1)
第一节 原子、核素、同位素	(1)
第二节 原子核的稳定性及核衰变	(4)
第三节 原子核衰变规律	(16)
第四节 核辐射与物质的相互作用	(23)
第二章 核辐射的探测及样品测量方法	(29)
第一节 气体电离探测器	(30)
第二节 固体闪烁计数器	(39)
第三节 液体闪烁计数器	(46)
第四节 契伦科夫计数	(66)
第五节 半导体探测器	(68)
第六节 放射性样品的测量	(72)
第七节 测量数据的统计学处理	(82)
第三章 核辐射的生物学效应及放射卫生防护	(91)
第一节 核辐射剂量单位	(91)
第二节 核辐射的生物学效应	(95)
第三节 我国现行的放射卫生防护标准	(107)
第四节 放射卫生防护的基本措施	(113)
第五节 放射性污染的清除和废物处理	(122)
第四章 放射性核素在生物学中的应用	(131)
第一节 放射性标记化合物	(131)
第二节 示踪原子法的原理和特点	(139)

第三节	放射性示踪原子法实验设计的一般原则和程序	(151)
第四节	物质代谢的示踪法	(165)
第五节	核素稀释法	(177)
第六节	饱和分析法	(182)
第七节	酶的放射分析法	(195)
第八节	示踪动力学	(198)
第九节	活化分析	(207)
第十节	放射自显影技术	(217)
第十一节	古生物学研究中的年代测定	(249)
第十二节	核素示踪技术在分子生物学中的应用	(253)
参考文献		(267)
附录一	常用放射性核素	(268)
	放射性衰变计算表	(273)

第一章 核物理基本知识

第一节 原子、核素、同位素

一、原子的结构

原子是保持元素性质的最小单位,半径约为 10^{-8} cm。它只是无穷尽的物质结构的一个阶层。虽然各种元素的性质不同,但各种元素的原子结构却十分相似。实验证明:原子是由带正电荷的原子核和核外电子所构成。在正常状态下,原子是呈电中性的。由于各种原子的质子、中子和电子的数量的不同,它们也就具有不同的物理、化学性质。自然界中最轻的原子是氢,最重的原子是铀。

原子的质量很小,大约是 $10^{-24} \sim 10^{-22}$ g。原子的质量通常用“原子质量单位”来表示。即以核素 ^{12}C 原子量的 $\frac{1}{12}$ 作为1个原子质量的单位,记为u(1原子质量 $\approx 1.6605 \times 10^{-24}$ g),其它元素的原子质量与这个质量单位相比较,就得到该原子的相对质量(原子量)。与碳单位相应的阿佛加德罗常数 $N_A = 6.022045 \times 10^{23}$ 。

原子的核心部分称为原子核,简称“核”。原子核的半径约 $1.1 \sim 1.5 \times 10^{-15}$ m 它与原子的半径相差几十万倍。因此,原子核只占原子体积中的极少部分。原子核是由带正电荷的质子和不带电的中子所构成的,它们统称为核子。质子数与核外电子数相同,且带

相等的总电荷但符号相反。中子的质量为 $1.6747 \times 10^{-24} \text{ g} = 1.008665 \text{ u}$, 质子的质量为 $1.6724 \times 10^{-24} \text{ g} = 1.007276 \text{ u}$ 。

核子在核中不断地运动, 它们非常紧密地相处, 形成一个相对稳定的集体, 核子间的相互作用力称为核力, 属于一种基本粒子的强相互作用。核力是了解原子核结构、性质和核反应等问题很关键的问题。经过几十年的努力, 人们对核力已获得了某些定性的知识。例如: 核力是“短程力”, 其作用范围只有约 $2 \times 10^{-15} \text{ m}$, 稍大于这个范围, 核力就迅速减少, 甚至接近于零, 核子相互作用强度很大, 它比静电斥力约大 130 倍; 由于核力与核子是否带电荷无关, 所以任何两个核子间的核力都是相同的; 核力还具有“饱和性”, 它只能与邻近的几个核子之间才有作用力, 而不是与核内所有核子都能起作用。核力还具有交换性, 两核子的位置交换是通过 π 介子为媒介, 质子发射 π^+ 介子而变成中子, 中子吸收 π^+ 介子而变成质子。

原子核外的轨道电子可以有 1~100 多个, 它们在核外高速运动, 好象一团云雾似的, 因此又称它们为“电子云”。电子带负电, 电量为 $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, 是电量的最小单位, 常用符号 e 表示。电子质量 $= 0.000549 \text{ u} \approx 9.1096 \times 10^{-28} \text{ g}$ 。对于中性原子来说, 轨道电子所带的负电荷数等于原子核所带的正电荷数, 也等于原子序数 Z 。

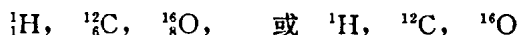
轨道电子都沿着一定的轨道(圆形或椭圆形)围绕着原子核旋转。每一轨道只能容纳两个自旋方向相反的电子, 这些轨道组成一系列壳层, 每一壳层中又分几个亚层。这一个个壳层称为能级或量子级。壳层用 K, L, M, N, O……来表示, 最靠近原子核的壳层称为 K 壳层。填充在各壳层上的电子依次分别称为 K, L, M, N……电子, 并统称为轨道电子。每个壳层允许填充的最大电子数为 $2n^2$, $n=1$ 即为 K 层, $n=2$ 为 L 层, 依此类推。当某壳层填充的电子数达到该壳层的最大电子数时, 该壳层称为满壳层。

不同壳层的每一轨道上绕行的电子具有一定的能量, K 层离核最近, 故与原子核的相互吸引力最强, 其电子具有的势能最低, 称为基态。L 层次之, 愈往外层, 电子受到原子核的吸引力愈小, 其势能也就愈高。

二、核素、同位素

1、核素:

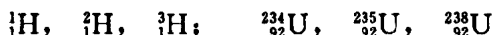
具有特定核特征的一类原子称为核素。原子核所带的电荷和质量是它的两个重要特征, 通常用 A_ZX 来表示核素的两种特征。X 表示某一核素的化学符号, A 表示原子核的质量数, 它等于质子和中子的质量数的总和, 写在左上角; Z 表示原子核内的质子数, 等于原子序数, 写在左下角。由于核素本身就有确定的质子数, 常简写成 AX 。如:



现已知核素约 2000 种左右, 其中 1500 种左右是放射性核素。170 余种核素可作为示踪剂应用。

2、同位素

原子序数相同而质量数不同的核素, 它们在元素周期表上占有同一位置者称为同位素。各同位素的原子核中具有相同的质子数, 它们的核外电子数也相同, 但是中子数不同。因此它们的化学性质几乎完全相同, 但核性质不同。已知在自然界 90 多种元素中, 除 20 种外, 实际上都是两种或更多种同位素的混合物而存在的。例如:



它们分别为氢的同位素和铀的同位素。

自然界中某一种元素的各种同位素, 它们总是保持着一定的比

例。其中一种同位素所占的百分数称为“同位素丰度”。例如氧的几种稳定同位素的丰度分别为 $^{16}_8\text{O}$, 99.756%, $^{17}_8\text{O}$, 0.039%, $^{18}_8\text{O}$ 0.205%。

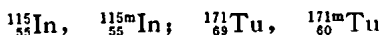
除了同位素外,还存在着一些质量相同但原子序数不同的同量异位素。如:



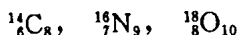
同中子异荷素,即相同的中子数而质子数不同,如:



同质异能素,它们的质子数和中子数都相同,但核处于不同的能级状态(处于较高能级的通常用 m 表示),如:



等中子过量素:原子质量、原子序数和中子数都不同,但中子数减原子序数(即过量的中子数)相等。如:



第二节 原子核的稳定性及核衰变

1896 年 Henri Becquerel 首先发现天然放射性,他用铀和感光板发现了铀发射一种类似 X 射线的贯穿辐射,它会使感光板感光。随后,居里夫人发现钍也具有与铀相似的现象,他把元素具有的辐射现象称为“放射性”。这是原子核物理学史上极为重要的事件之一。

一、原子核的稳定性

原子核可分为两大类:稳定存在的和会自发转变为别的原子

核或能态,并放射出某种射线的放射性素。

在已发现的 109 种元素约有 2000 种核素中,只有 274 种是稳定性核素。

1、质量亏损、结合能与核稳定性的关系

原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量之和。当质子和中子互相靠近到一定程度,由于核力的强作用而结合成原子核时,新核的质量比核子单独存在时的质量减少了。这种质量之差称为该原子核的质量亏损。所有原子核都有正的质量亏损。即

$$\Delta m(Z, A) = Zm(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A) > 0$$

式中 $m(^1\text{H})$ 为 ^1H 的原子质量; $m(Z, A)$ 是电荷数为 Z 、质量数为 A 的原子质量。如 ^2H 核由一个质子和一个中子组成时其质量亏损为

$$\begin{aligned}\Delta m &= m(^1\text{H}) + m_n - m(^2\text{H}) \\ &= 1.007825 + 1.008665 - 2.014102 \\ &= 0.002388 \text{ u}\end{aligned}$$

爱因斯坦指出,物质的能量和质量相互转化的相关方程是 $E=mc^2$ 。它表示质量和能量是物质不可分割的两个属性。既然核子结合成原子核时质量减少了 Δm ,那么相应能量的减少就为 $\Delta E = \Delta mc^2$ 。这表明核子结合成原子核时,会释放出能量。这个能量称之为原子核的结合能(E_b)。据此定义, ^2H 核的结合能为:

$$\begin{aligned}E_b &= \Delta E = \Delta mc^2 \\ &= \frac{1.6602 \times 10^{-27} \times 0.002388 \times (2.9979 \times 10^8)^2}{1.6022 \times 10^{-13}} \\ &\approx 2.224 \text{ MeV}\end{aligned}$$

对于任何核来说,结合能为:

$$E_b = [Zm(^1\text{H}) + (A - Z)m_n - m(Z, A)]c^2$$

2、平均结合能和原子核的稳定性

原子核的结合能除以质量数 A 所得的商,称为平均结合能

即: $\epsilon = \frac{E_b}{A}$

它表示原子核拆散成核子时,外界对每个核子所做功的最小平均值。原子核的平均结合能越高,说明核子在核内结合得越紧,原子核越稳定。 ^2H 核的平均结合能为 $2.224/2=1.112 \text{ MeV}$, ^4He 核的平均结合能为 $28.296/4=7.074 \text{ MeV}$ 。这就表明核子在 ^4He 核中比在 ^2H 核中结合得更紧。

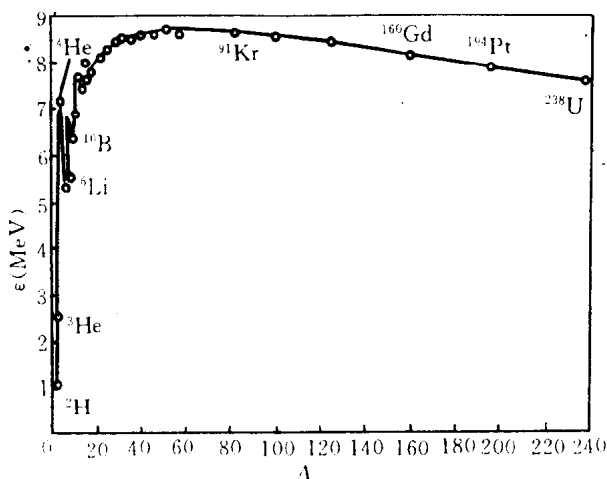


图 1-1 原子核的平均结合能和质量数的关系。

图 1-1 表示了平均结合能与质量数的关系曲线。从曲线上可以看出以下几点:

(1) 轻核区平均结合能数值有周期性的变化: ^4_2He , ^8_4Be , $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$ 和 $^{20}_{10}\text{Ne}$ 核的平均结合能为极大; ^6_3Li , $^{10}_5\text{B}$ 和 $^{14}_7\text{N}$ 等核的平均结合能为极小。若将平均结合能小的核聚变成平均结合能大的核,会释

放出很大的能量。

(2) 质量数 $A=40\sim 120$ 的中等核的平均结合能高,而且几乎接近一个常数($\epsilon \approx 8.6 \text{ MeV}$)

(3) 重核的平均结合能比中等核的低。如铀的平均结合能约为 7.6 MeV 。当重核裂变成两个中等核时,原子核的平均结合能升高,也会释放出很大的能量。

3、原子核稳定性的经验规律

(1) 原子核稳定性与质子、中子数比值的关系

在任何一个稳定原子核中,质子和中子的数目有严格的比例。对于 $A < 20$ 的轻核,其稳定核素的中子数和质子数是相等的。中等质量的稳定性核素的中子数与质子数之比约为 $1.3 \sim 1.4$ 而在重核区 N 与 Z 之比约为 $1.5 \sim 1.6$ (见表 1-1)。

表 1-1 元素周期表中,原子核内质子与中子数比例逐渐加大

原子序数	1	2	20	40	84	92
元 素	${}^1_1\text{H}$ (氢)	${}^4_2\text{He}$ (氦)	${}^{40}_{20}\text{Ca}$ (钙)	${}^{90}_{40}\text{Zr}$ (锆)	${}^{210}_{84}\text{Po}$ (钋)	${}^{238}_{92}\text{U}$ (铀)
质子:中子	1:0	1:1	1:1	1:1.3	1:1.5	1:1.62
					↑ 原子核全是放射性的	↑ 自然界存在的最后一个元素

比值增大的主要原因是核内两种力(核力和库仑力)的平衡情况发生变化。当原子序数增大时,质量数增多,库仑斥力加大,就需要中子数增多,使核力得到增强,同时也加大质子间的距离,使库仑力不致增加太多,结果两种力之间仍能取得平衡,保持核的稳定。当质子数增大到一定值($Z > 83$)后,核力和库仑力再也不能保持平衡。故天然存在的 $Z > 83$ 的核素均为不稳定核素。用人工方法改变稳定核素的中子和质子的组成比例,也会造成核的不稳定。这种核素称为人工放射性核素。

(2) 原子核稳定性与 Z 、 N 的奇偶关系

核的稳定性还与核内中质子和中子的奇偶数有关。如果将 270 种稳定核素进行分类,发现 Z 和 N 均为偶数的核非常稳定,此类核称为偶-偶核,占有 161 个。 Z 和 N 都是奇数的稳定核素只有 ^1H 、 ^6Li 、 ^{10}B 和 ^{14}N 是稳定核,此类核称奇-奇核。质子数为奇数,中子数为偶数,有 50 个核是稳定的。质子数为偶数,中子数为奇数,也有 55 个稳定核素。

(3) 原子核稳定性与“幻数”的关系

当质子数 Z 为 2、8、20、28、50 和 82 或者中子数 N 为 2、8、20、28、50、82 和 126 时,稳定性核素较多, N 和 Z 的这些数值称为“幻数”。如特别稳定的 ^{208}Pb ,其质子数 $Z=82$,中子数 $N=126$, Z 和 N 都是幻数,这种核称“双幻数核”。

二、放射性核衰变

不稳定核素不断地按照一定规律自发地产生原子核结构的改变,并放射出某种射线,而自己转变为另一种核素,这种过程称为核衰变。核衰变是放射性原子核的特性,它基本上和原子的物理、化学性质无关,它也完全不受外因的影响。具有放射性的核素称为“放射性核素”。放射性原子核可放射出 α 、 β 、 γ 射线。

核衰变后所产生的新核有的是稳定的,有的还是不稳定。不稳定的核会继续衰变,直至稳定为止,通常把衰变前的核称为母核,衰变后的核称为子核。

放射性核素的衰变方式有多种,这里主要讨论五种,即 α 衰变, β^- 衰变, β^+ 衰变,电子俘获和 γ 衰变。

每种放射性核素的衰变过程和状态,可简明地使用衰变图来表示,如图 1-2。

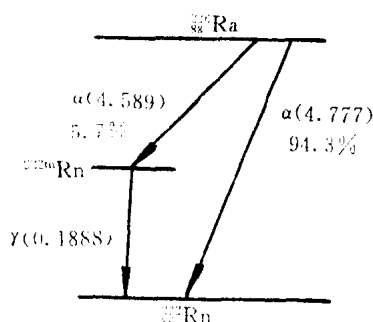
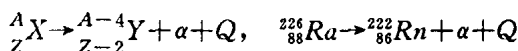


图 1-2 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

1. α 衰变

放射性核素的核自发地从核内放射出 α 粒子,而变成为另一种核的过程称为“ α 衰变”。 α 粒子实际上是氦的原子核(^4_2He),它带 2 个正电荷,质量近似等于质子质量的四倍($m_\alpha=4.001502\text{ u}$)。因此,经 α 衰变后产生的子核,其原子量 A 比母核小 4,原子序数 Z 减少 2。设 X 代表母核, Y 代表子核,则 α 衰变可用下式表示:



式中的 Q 为衰变能,任何衰变过程总会伴随着能量的释放,即衰

变能: $Q_\alpha = \{m(Z, A) - [m(Z-2, A-4) + m(2, 4)]\}C^2$ 。

α 衰变的衰变能大部分成为 α 粒子的动能,小部分成为核的反冲能。凡是能够产生 α 衰变的核素一定是母体的质量大于子体和核素氦的总质量即: $m_Z > m_{Z-2} + m_{\text{He}}$ 。

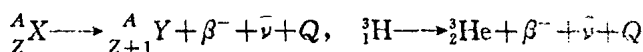
这就说明为什么有些核素可以作 α 衰变,而有些核素不能作 α 衰变的原因。原子序数大于 82 的天然核素绝大部分都作 α 衰变,如: $^{226}_{88}\text{Ra}$, $^{210}_{84}\text{Po}$ 等。原子序数小于 82 的只有 $^{147}_{62}\text{Sm}$, $^{144}_{60}\text{Nd}$, $^{180}_{74}\text{W}$ 和 $^{190}_{78}\text{Pt}$ 可作 α 衰变,它们的半衰期都很长。

由一种核素放射出来的 α 粒子的能量是单一的。如果伴随有 γ 射线的 α 衰变的核素常常放射出几种能量的 α 粒子。从天然放射性核素放射出来的 α 粒子通常具有 $4\sim 9\text{ MeV}$ 的能量。其速度大约为光速的二十分之一 (2 万公里/秒)。 α 射线的电离能力很强, 一个 α 粒子在空气中运行 1 厘米 的径迹上可产生 4 万 离子对, 在生物组织 (组织密度比空气密度大 770 倍) 中 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 的径迹上也可产生 4 万 离子对。这样 α 射线的贯穿能力就很小, 它在空气中的射程只有 10 cm 以下, 在生物组织中的射程也只有 $60\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 。因此 α 粒子很容易被其它物质所吸收, 例如一张薄纸即可把 α 粒子完全吸收掉。

2. β 衰变的三种形式

1) β^- 衰变:

β^- 衰变是由于原子核内中子数与质子数的比率较大, 而造成核不稳定, 不稳定核里的一个中子转变成一个质子并放射出 β^- 粒子的过程称为“ β^- 衰变”。 β^- 衰变的通式如下:



式中的 $\bar{\nu}$ 是反中微子, 其静止质量上限约为电子质量的万分之七。 β^- 粒子的质量为 0.000549 u 。它的质量数远小于核的质量。因此, 可以认为 β^- 衰变后子核和母核的质量数 A 是相同的, 但子核的原子序数 Z 却比母核增加 1 。自然界中核素的 β 衰变主要是 β^- 形式。

β^- 衰变时产生的衰变能 Q 可以从母核的质量与子核、 β^- 粒子和反中微子的总质量的差求出。由于反中微子的质量十分微小, 可以略去不计,

$$Q_{\beta^-} = [m(Z, A) - m(Z+1, A)]c^2$$

又因衰变能是正值, 所以产生 β^- 衰变的条件是母核质量必需

大于子核的质量: $m(Z, A) > m(Z+1, A)$

从上面 β^- 衰变通式可以看出: β^- 衰变有三个生成物, 即 ${}^A_{Z+1}Y$ 、 β^- 和 $\bar{\nu}$ 。因而在衰变时所释放出来的衰变能 Q 将由这三种粒子共同带走。三种粒子的运动方向是任意的, 因此, 每个粒子所带走的能量将是不固定的。子核 ${}^A_{Z+1}Y$ 的质量要比 β^- 粒子和反中微子的质量大几千~几十万倍, 子核所带走的能量是微不足道的, 大部分能量均以 β^- 和反中微子的动能形式带走。因衰变能 Q 在 β^- 和 $\bar{\nu}$ 之间的分配是任意的, 这样 E_{β^-} 可以从最小值(近乎零)至最大值(近乎 Q) 形成一个连续的能量分布, 亦称能谱, 如图 1-4 所示。接近最大能量 $E_{\max}$ 的 β^- 粒子是很少的, 但通常以最大能量值作为某一核素 β^- 射线的特征能量。在实际计算 β^- 射线的剂量时, 常用平均能量值 $\bar{E}_{\beta^-}$, 它约等于最大能量值的 $\frac{1}{3}$, $\bar{E}_{\beta^-} \approx \frac{1}{3} E_{\max}$ 。

许多作 β^- 衰变的核素只放射出 β^- 粒子, 如 ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$ 等。但有些核素在进行 β^- 衰变时伴有放射 γ 射线, 如: ${}^{60}\text{Co}$, ${}^{137}\text{Cs}$ 等。 β^- 粒子也能使物质发生电离, 在空气中能产生 1000 到 25500 离子对, 在 1 cm 的径迹上产生 60~7000 个离子对。在空气中的射程是由几米到几十米长, 在空气中的初速为每秒 20 万公里左右。

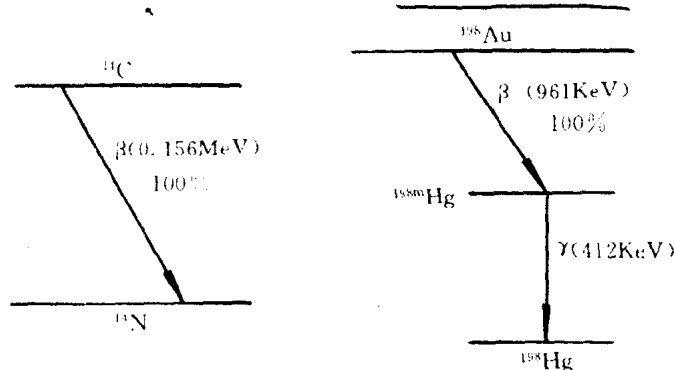


图 1-3 ${}^{14}\text{C}$ 和 ${}^{198}\text{Au}$ 的衰变图