



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

生物医学中的核技术

SHENGWU YIXUE ZHONG DE HEJISHU

► 丁丽俐 马俊 薛亮 / 编

中国科

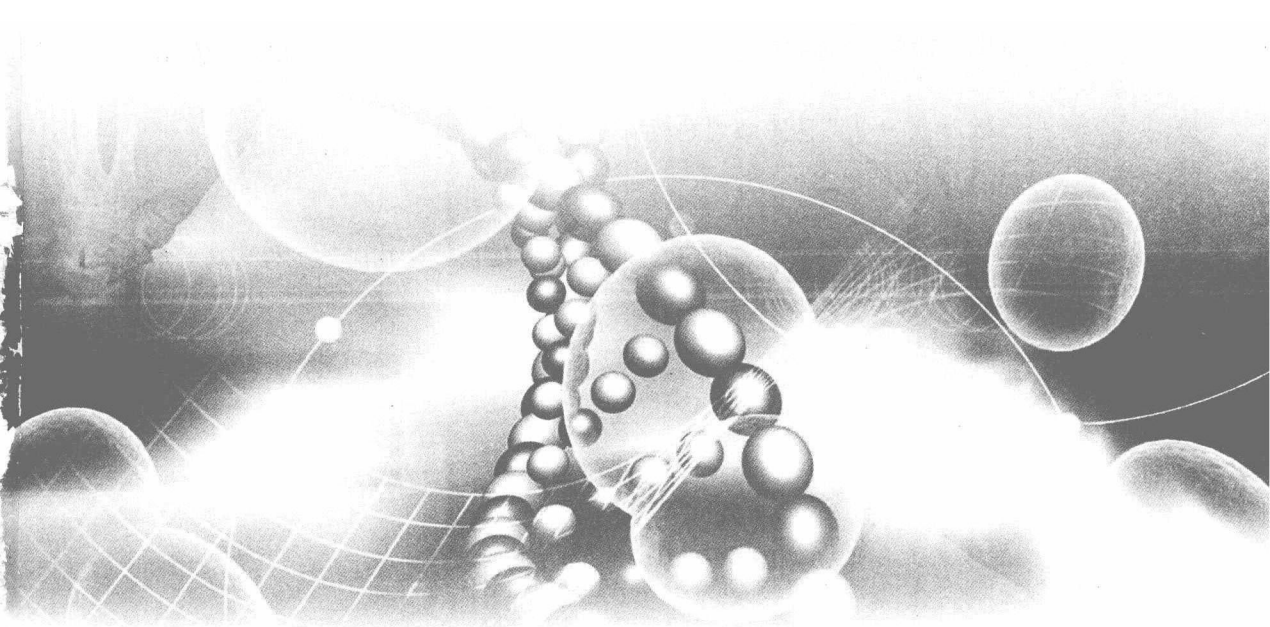
大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

生物医学中的核技术

丁丽俐 马 俊 薛 亮 / 编



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书以介绍生物和医学中的核技术为目的,同时也介绍了一些放射性在生物和医学领域的应用现状。

全书共分六章。前三章主要阐述了核物理、探测技术和核辐射防护等在生物、医学研究和应用等方面的必备知识;第四章主要介绍了放射性标记化合物的合成方法;最后两章主要介绍了核技术在生物和医学中的应用及技术。

本书是适用于生物和核医学专业本科生和研究生的基础课教材,也适于从事辐射管理工作人员的参考及新从事放射性工作人员的岗前培训。

图书在版编目(CIP)数据

生物医学中的核技术/丁丽俐,马俊,薛亮编. —合肥:中国科学技术大学出版社, 2010. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-312-02577-8

I. 生… II. ①丁… ②马… ③薛… III. 核技术应用—生物医学工程—高等学校—教材 IV. R318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 166521 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:710×960 1/16 印张:14.25 字数:270 千

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~3000 册

定价:26.00 元

前 言

1896年贝可勒尔(Becquerel)发现天然放射性,这是人类首次观察到由核衰变而产生的核辐射现象。尽管当时人们对放射性的衰变规律、射线性质还不了解,但放射性就已经应用于医学、生物学领域。粒子加速和射线探测技术的发展,为核技术的广泛应用提供了必要的技术前提。目前核技术应用已经非常广泛,而且还在不断地发展。

几十年来,核技术在生物学和医学中的应用,使生物学研究取得了一系列令人瞩目的成就。在医学领域中,不仅在医学的基础研究中,而且在临床诊断和治疗上,核技术的应用都是不可缺少的。

所以,为核医学和分子生物专业的学生、技术人员和医生提供一本深度适度,分子生物学、核医学中的物理学和所使用仪器方面的入门课本是非常必要的。本课本的愿望就是尽可能地满足以上需要。

本书主要分为五个部分:有关原子物理和核物理的基本原理;核辐射测量技术;有关辐射防护标准和知识;标记化合物的制备;核技术在生物和医学中应用举例。

本书由三位作者合作编写而成,由丁丽俐主编。第1~4章、第5章第1~4节由丁丽俐编写,第5章第5~8节、第6章由马俊和薛亮编写。

由于本书综合性较强,又限于我们的知识结构和写作水平,难免有错误和不足之处,以及因不同人编写造成书写风格不够一致、有少数内容重复等现象。恳请读者谅解和批评指正。

编者

2009年7月

目 次

前言	(i)
第 1 章 放射性核素与放射性	(1)
1.1 原子、原子核及其稳定性	(1)
1.1.1 原子	(1)
1.1.2 原子核	(4)
1.2 原子核衰变及放射性	(7)
1.2.1 一般概念	(7)
1.2.2 化学和放射性	(8)
1.2.3 核衰变类型	(8)
1.3 放射性衰变规律	(15)
1.3.1 放射性核素衰变的基本规律	(15)
1.3.2 半衰期	(18)
1.3.3 放射性核素连续衰变定律	(19)
1.3.4 放射性强度及其单位	(22)
1.4 核射线与物质的相互作用	(23)
1.4.1 带电粒子与物质的相互作用	(23)
1.4.2 γ 辐射与物质的相互作用	(26)
第 2 章 放射性核素的探测	(31)
2.1 气体电离探测器	(31)
2.1.1 工作原理	(31)
2.1.2 电离室	(34)
2.1.3 正比计数器	(35)
2.1.4 G-M 计数器	(38)
2.2 闪烁探测器	(42)
2.2.1 基本原理	(42)
2.2.2 固体闪烁探测器	(43)

2.2.3 液体闪烁(LS)探测器	(49)
2.3 半导体探测器	(57)
2.4 放射性探测器中使用的电子仪器	(59)
2.4.1 前置放大器	(60)
2.4.2 放大器	(60)
2.4.3 脉冲高度分析器	(61)
2.4.4 定标器	(62)
2.5 放射性样品的测量	(63)
2.5.1 影响样品测量的因素	(63)
2.5.2 探测器的测量方式	(64)
2.6 核计数的统计学处理	(65)
2.6.1 核衰变的统计性	(65)
2.6.2 统计误差的表示及运算	(66)
2.6.3 统计分析的应用	(67)
2.6.4 测量数据的分析	(71)
第3章 核辐射防护	(72)
3.1 辐射防护中的基本概念及单位	(72)
3.1.1 照射量	(72)
3.1.2 吸收剂量	(73)
3.1.3 剂量当量	(74)
3.1.4 照射量与吸收剂量的关系	(75)
3.1.5 照射量(率)与放射源活度之间的关系	(78)
3.2 辐射对人体健康的影响	(78)
3.2.1 辐射对生物体损伤历史	(78)
3.2.2 核辐射的生物效应	(79)
3.3 核辐射的防护标准	(81)
3.3.1 辐射防护标准的发展历史简介	(82)
3.3.2 我国现行的辐射防护标准	(83)
3.3.3 剂量当量限值的安全评价	(85)
3.4 核辐射防护方法及剂量计算	(86)
3.4.1 内照射防护	(86)
3.4.2 外照射防护	(90)
3.5 放射性污染的清除和废物处理	(95)

3.5.1 放射性污染的清除	(95)
3.5.2 放射性废物的处理	(97)
第4章 放射性核素的生产与标记化合物的合成	(102)
4.1 放射性核素的生产	(102)
4.1.1 反应堆生产放射性核素	(102)
4.1.2 加速器生产放射性核素	(105)
4.1.3 放射性核素发生器生产放射性核素	(106)
4.2 放射性标记化合物命名与制备	(109)
4.2.1 标记化合物的命名与书写	(109)
4.2.2 放射性标记化合物的制备	(109)
4.3 标记化合物的质量控制	(116)
4.3.1 物理检验	(116)
4.3.2 化学检验	(117)
4.3.3 生物学检验	(117)
4.4 标记化合物的自分解及其机理	(118)
4.4.1 辐射自分解机理	(118)
4.4.2 减少辐射自分解的方法	(119)
第5章 放射性核素在生物和医学应用中的相关技术	(120)
5.1 放射自显影技术	(121)
5.1.1 放射自显影的一般过程	(122)
5.1.2 自显影的阅读与相对定量	(126)
5.2 放射免疫测定法	(127)
5.2.1 基本原理	(127)
5.2.2 基本步骤	(128)
5.3 放射性示踪技术	(130)
5.3.1 放射性示踪技术的优缺点	(130)
5.3.2 示踪实验的设计及步骤	(131)
5.3.3 放射性核素稀释分析法	(132)
5.4 活化分析	(133)
5.4.1 基本原理	(134)
5.4.2 活化分析的主要优缺点	(136)
5.4.3 活化分析的一般程序	(136)
5.4.4 活化分析在生物学和医学中的应用	(137)

5.5	回旋加速器	(138)
5.6	γ 照相机	(140)
5.6.1	系统构成	(140)
5.6.2	准直器	(141)
5.6.3	闪烁晶体	(141)
5.6.4	光电倍增管	(142)
5.6.5	位置计算电路	(142)
5.6.6	显示记录系统	(143)
5.7	发射型计算机断层显像技术	(143)
5.7.1	单光子发射型计算机断层显像	(144)
5.7.2	正电子发射型计算机断层显像	(145)
5.7.3	图像重建	(147)
5.8	PACS	(151)
第6章	放射性核素在生物和医学中的应用	(153)
6.1	核医学发展简史	(153)
6.1.1	理论创新	(153)
6.1.2	试剂研发	(154)
6.1.3	相关仪器	(154)
6.1.4	确立与发展	(154)
6.2	核医学显像技术应用	(156)
6.2.1	核医学影像诊断的特点	(156)
6.2.2	代谢显像	(157)
6.2.3	受体显像	(159)
6.2.4	灌注显像	(160)
6.2.5	反义基因显像	(162)
6.2.6	核医学影像诊断的局限	(163)
6.3	放射性核素治疗	(164)
6.3.1	放射性核素治疗的原理	(164)
6.3.2	^{131}I 治疗甲状腺功能亢进症	(165)
6.3.3	骨转移癌核素内照射治疗	(167)
6.3.4	放射性核素基因治疗	(168)
6.3.5	放射性核素治疗药物	(168)
6.4	放射性核素在分子生物学中的应用	(171)

6.4.1	Southern 印记杂交(Southern Blotting)	(171)
6.4.2	Northern 印记(Northern Blotting)	(172)
6.4.3	原位杂交(situ-hybridization)	(173)
6.4.4	DNA 序列测定	(174)
6.4.5	^{32}P 放射性标记检测蛋白质的磷酸化	(176)
6.4.6	蛋白与核酸的作用	(176)
6.5	放射性核素在细胞生物学中的应用	(177)
6.5.1	测定线粒体内膜电势	(177)
6.5.2	研究基因的表达(run-on 转录分析)	(177)
6.5.3	胞内运输的研究	(178)
6.5.4	细胞 DNA 损伤及修复的研究	(179)
6.5.5	细胞分化中的研究	(180)
6.5.6	受体研究	(181)
6.6	放射性核素在生物化学中的应用	(181)
6.6.1	遗传物质 DNA	(181)
6.6.2	胆固醇及卟啉的生物合成	(182)
6.6.3	非洲锥虫的脂肪酸代谢	(183)
6.6.4	细胞色素氧化酶的研究	(184)
6.6.5	植物的硫营养代谢	(184)
6.7	放射性核素其他方面的应用	(185)
6.7.1	基因显像	(185)
6.7.2	放射免疫显像	(187)
参考文献		(189)
附录 1	放射性核素的毒性分组	(191)
附录 2	各向同性点源照射量率积累因子	(194)
附录 3	各向同性点源 γ 射线减弱 K 倍所需屏蔽层厚度(cm)	(196)
附录 4	常用放射性核素表	(210)

第 1 章 放射性核素与放射性

1.1 原子、原子核及其稳定性

1.1.1 原子

1. 原子结构及其稳定性

世界上所有的物质都是由原子组成。原子结合形成分子(如:氧气、氢气等)和化合物(如:水、二氧化碳等),原子是保持元素性质的最小单位。

“原子”一词来自于希腊文,意思是“不可分割的微粒”。公元前 5 世纪,古希腊哲学家德谟克利特(Democritus)最早提出了“世界万物都是由原子组成”的观点。他还认为“原子之间有空隙”,“原子不能消失,也不能无中生有”。但当时他的这些超越时代的观点,因为不能提供确凿的令人信服的证据,且未被古希腊赫赫有名的哲学家亚里士多德(Aristotle)接受,而长期遭到冷落。英国科学家约翰·道尔顿(J. Dalton)是世界上第一个将原子学说从一种推测、一种哲学概念转变为真正的科学原理的人。道尔顿通过大量的实验证明了原子是客观存在的,提出了“近代原子论”。其要点是:物质都是由一定质量的原子组成的;原子是非常微小的、肉眼看不见的实心球体;原子是不可分割的,在化学变化中它的性质不变;元素是由同类原子构成;一种元素的所有原子在质量上和性质上都是相同的。道尔顿的原子论今天看来是有很大缺陷的,但它对近代化学的发展起到非常重要的作用。到 19 世纪末,人们都一直认为原子是不可分的。直到 1895 年德国物理学家伦琴(Roentgen)在做阴极射线实验时,意外发现了一种穿透能力很强的射线,因为当时伦琴不知道这个射线是什么,它就像数学里的未知数,所以伦琴就给它起名叫 X 射线。1896 年法国科学家贝可勒耳在研究 X 射线和荧光的关系时偶然发现天然放射线。1899 年英国科学家汤姆逊(J.J. Thomson)发现电子。这些发现揭示了各种原子内

部是有一定结构的,打开了两千多年的漫长岁月中深锁着的“原子是不可分割的”大门,迈出了研究原子结构的第一步。1910年英籍新西兰科学家卢瑟福(Rutherford)用大量实验证明:原子是由密度很大,带正电的核与围绕核、相对轻、带负电的电子云组成。在正常状态下,核外电子数与核带正电荷数相同,原子呈电中性。按经典理论,电子绕核转动时会损失能量,并且螺旋地进入核子。但事实上这种现象没有发生。原子的结构是很稳定的。1913年尼耳斯·玻尔(Niels Bohr)在卢瑟福的核模型基础上提出:电子只能在核外一定的轨道上旋转,这些可能轨道的周长和电子动量的乘积必须等于普朗克常数的整数倍:

$$2\pi r \times mv = nh \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.1)$$

(1.1)式中: r 为电子与核之间的距离, m 为电子的质量, v 为电子的运动速度, h 为普朗克常数($=6.6 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$), n 为任何正整数。即当电子的角动量等于 $h/2\pi$ 的整数倍时(即: $mr v = nh/2\pi$),电子在这样的轨道上运动可以不放出任何能量,保持原子的稳定性,这种状态称为定态。原子各定态之间是不连续的,即量子化的。其中 $n=1$ 时的定态叫做基态。电子由一个定态跃迁到另一定态时,会吸收或放出能量,吸收或放出能量的大小取决于两个定态的能量差:

$$\Delta E = E_n - E_{n'} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

(1.2)式中: $E_n, E_{n'}$ 分别代表电子在轨道 n, n' 的定态能量, c 为光速($=3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$), λ 代表波长。

当 $\Delta E < 0$ 时,表示吸收能量,即电子是由能量低的轨道跃迁到能量高的轨道。能量以光子的形式被电子吸收,从而形成该原子的特征性的吸收光谱,这个过程叫做激发。处于激发态的原子是不稳定的,迟早会放出多余的能量回到稳定的基态。如果吸收的能量足够大,电子则可以完全摆脱原子核的吸引而成为自由电子,这种现象叫电离,失去电子的原子称为离子。从原子的一个已知壳层中电离一个电子所需的能量称为那个壳层的结合能。

当 $\Delta E > 0$ 时,表示放出能量,即电子由能量高的轨道跃迁到能量低的轨道上。多余的能量以电磁波(光子)的形式发射出来,形成原子特征性的发射光谱。一般当 $\Delta E < 100 \text{ eV}$ 时,所释放的电磁波属于紫外光、可见光及红外辐射;当 $\Delta E > 100 \text{ eV}$ 时,归为X辐射。

1925年玻尔的原子模型被泡利不相容原理(Pauli Exclusion Principle)进一步完善。根据这个原理:一个原子中不可能存在四个量子数完全相同的两个电子,每一个原子轨道最多只能容纳两个电子,而且这两个电子的自旋方向必须相反。所以对于主量子数为 n 的电子层,其轨道总数为 n^2 个,该层能容纳的最多的电子数

为 $2n^2$ 个(最外面壳层轨道例外,最多只能容纳 8 个电子)。玻尔模型实际上是一个过于简单化的模型。根据现代理论,轨道电子不是在一个精确的圆的轨道上运动,而是围绕核在一个不精确定义的空间区域中运动。但无论如何,尼耳斯·玻尔模型是相当适用的,尤其在教学中。

2. 原子的辐射

当一个原子的电子从外层轨道跃迁到离核较近的轨道上时,原子除了通过发射特征 X 射线来释放能量以外(见图 1.1),也可通过发射俄歇电子(Auger electron)释放能量(见图 1.2)。即电子从外层轨道跃迁到内层轨道时,将所释放的能量移交给另一个轨道电子,这个电子获得足够的能量以后,从原子中发射出来,这个过程被称为俄歇效应。发射出来的电子,称为俄歇电子。

俄歇电子的运动能量等于最初含空穴的轨道的结合能与最终含有两个空穴的轨道的两倍结合能之差,即 $E_K - 2E_L$ (注:忽略在 L 壳层中两个亚态之间很小的能量差。如图 1.2)。此时,原子轨道中存在着两个空穴。因此,在俄歇效应发生以后,其他外层电子将填充这些空穴。结果又导致特征 X 射线或俄歇电子的发射。在俄歇电子发射中,通常用 e_{abc} 来表示所涉及的原子轨道壳层, a 表示最初含

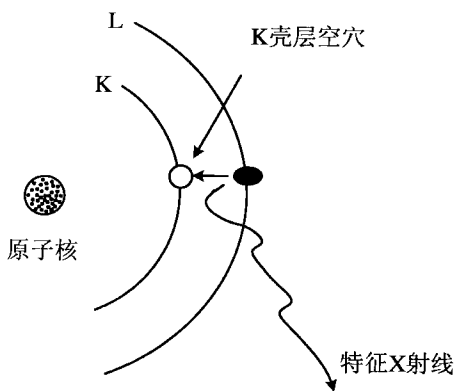


图 1.1 特征 X 射线发射示意图

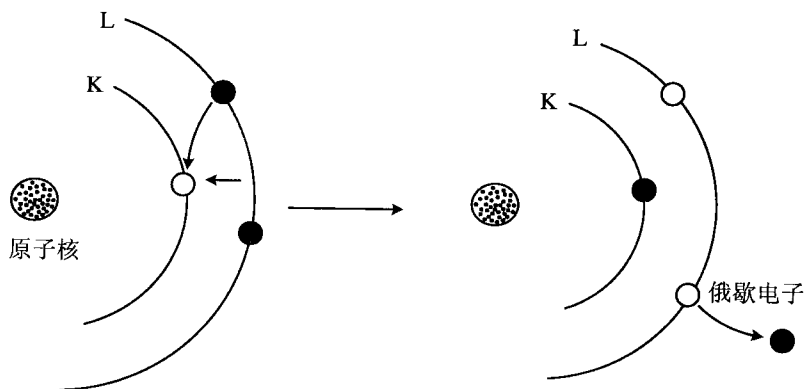


图 1.2 激发态原子退激时发射俄歇电子(基于 Sorenson and Phelps(1987))

有空穴的原子轨道壳层, b 表示电子跃迁填充空穴的电子所在的原子轨道壳层, c 表示俄歇电子被发射的原子轨道壳层。图 1.2 电子发射是一个 KLL 俄歇电子, 则可用 e_{KLL} 表示。

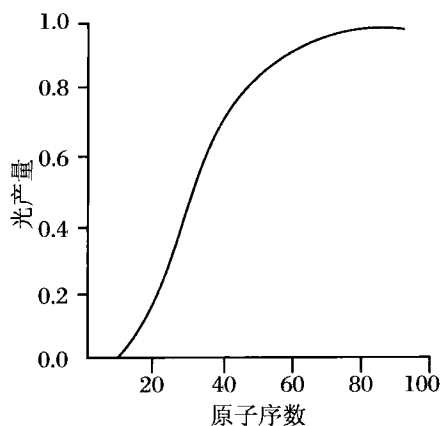


图 1.3 原子辐射光产量与原子序数之间的关系

特征 X 射线发射和俄歇电子的产生, 这两个过程发生的几率大小与原子的原子序数有关(见图 1.3), 原子序数越大的原子, 发射特征 X 射线的几率就越大, 反之, 轻元素发射俄歇电子的几率大。

1.1.2 原子核

1. 原子核的组成

1911 年, 卢瑟福用一束 α 粒子轰击金属薄膜, 发现有大角度的 α 粒子散射。故实验结果得出: 原子中存在一个带正电的核心, 叫做原子核。1919 年卢瑟福又通过实验证明核内存在质子。1920 年詹姆斯·查德威克(J. Chadwick)通过实验测出原子核的电荷数 Z , 证明核电荷数 Z 等于其元素的原子序数。1932 年詹姆斯·查德威克又通过实验证明原子核中还含有一种不带电荷的中性粒子, 其质量与质子质量几乎相等, 并命名为中子。沃纳·卡尔·海森堡(W. K. Heisenberg)立即提出了原子核是由质子和中子组成假说。此后科学家通过几十年大量的实验证实了此假说。质子、中子又统称为核子。核子和电子的特性见表 1.1。核子的质量要比电子质量大近 2000 倍, 但核的直径比原子的直径小很多, 分别为 10^{-13} cm 和 10^{-8} cm。核的体积正比于组成该核的核子数; 对于所有的核来说物质密度是一个常数, $\rho \approx 10^{14}$ g/cm³, 因此核物质的密度是非常高的。

表 1.1 核子和电子的基本特性

粒子	电荷(*)	质量(u)	质量(MeV)
质子	+1	1.007277	938.211
中子	0	1.008665	939.505
电子	-1	0.000549	0.511

* 1 单位电荷 = 1.602×10^{-19} C

由于原子是电中性的, 因而原子核所带的电量一定等于核外电子的总电量, 但

符号相反。中子不带电,质子带正电。因此,电荷数为 Z 的原子核含有 Z 个质子和核外电子。原子核所有核子的总数等于其质量数 A 。 $A - Z$ 等于中子数 N 。质量数 A 约等于,但不完全与原子量(AW)相同。原子量是原子的质量同 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 的比值。一般元素周期表上提供的数据是原子量,因此核质量需扣除电子的质量和与其结合能相当的质量,但一般因电子结合能很小,故可忽略。

元素、原子、同位素等概念在中学的教科书中都已介绍过。而“核素”的概念是以前没有提及过的。具有特定质量数、质子数和核能态的一类原子称为核素(nuclide)。核素通常用符号 ${}_Z^AX$ 来表示,其中 X 是元素符号, A 是原子核的质量数, Z 是原子核的质子数。当核素的核处于较高的能量状态时,则在核质量数 A 的旁边加 m ,例如: ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$ 和 ${}_{43}^{99}\text{Tc}$,它们的质子数和质量数均相同,只是原子核所处的能量状态不同,所以它们也被称为同质异能素。依此类推,质量数相同,质子数不同的核素称为同质(量)异位素。中子数相同,质子数不同的核素称为同中子素。

一个原子的核的性质是由原子核的组成决定的,除与其核电荷数(质子数) Z 有关外,也与该原子核中中子数 N 有关。例如: ^{127}I 和 ^{131}I 都是碘,它们的核电荷数相同(为 53),而中子数不同(分别为 74, 78)。它们的物理、化学性质基本相同,但核性质相差很大(^{127}I 的核是稳定性核,而 ^{131}I 的核是不稳定核,它会自发放射 β 射线),正因为如此, ^{131}I 可以作为示踪剂,代替 ^{127}I ,且一般的生物体不区别对待它们。

2. 原子核的稳定性

在核素中,核子主要受到两种力的作用。一种是存在于两个带正电的质子之间的库仑斥力,另一种是存在于任何两个核子之间的,具有很强吸引力的力,称为核力(Exchange forces)。核力大而力程短(约 10^{-15}m),被视为只能对核素中的各核子起作用。核子间核力的作用要比库仑力强,所以它能够克服质子之间的库仑斥力,而把核子凝集成为原子核。但原子核中的各核子又不会被吸引到一起,实验证明当核子之间的距离小到 $4 \times 10^{-16}\text{m}$ 时,核力将从吸引力转化为极强的排斥力,因此每个核子在核内都占有同样大小的体积。

人们发现,原子(原子核)的质量总是小于组成它的各个粒子的质量之和。这种质量之差称为该原子(核)的质量亏损。根据爱因斯坦相对论中,质能之间的关系可知,质量的消失必然有能量的产生。在这里质量亏损(Δm),所产生的能量称为原子(核)的结合能(E_B),爱因斯坦研究相对论得出的质能之间的关系如下:

$$E_B = \Delta mc^2 \quad (1.3)$$

例如:以 ^{12}C 为例,这个原子是由 6 个质子、6 个中子和 6 个电子组成, ^{12}C 的原子量为 $12.0u$ 。而组成 ^{12}C 的各粒子质量和为:

$$\begin{array}{r}
 \text{电子 } 6 \times 0.000549 u = 0.003294 u \\
 \text{质子 } 6 \times 1.007277 u = 6.043662 u \\
 + \quad \text{中子 } 6 \times 1.008665 u = 6.051990 u \\
 \hline
 12.098946 u
 \end{array}$$

则 $\Delta m = 0.098946 u$ 。因为 $1 u = 931.5 \text{ MeV}$ ，那么一个 ^{12}C 原子的结合能等于 $0.098946 \times 931.5 = 92.17 \text{ MeV}$ 。

原子的结合能是自由存在的单个核子和电子相互靠近组成一个原子，所需的最小能量。在原子结合能中只有很少的一部分是电子的结合能，绝大多数是核的结合能。为了方便计算常将电子结合能忽略。

原子核的结合能除以质量数 A 所得的商，称为平均结合能 ($\bar{E} = E_B/A$)。它反映了原子核中的每个核子对结合能的贡献，平均结合能越高，说明核子在核内结合的越紧密，原子核越稳定。从图 1.4 原子序数 (Z) 与中子数 (N) 的相互关系，及图 1.5 平均结合能曲线上可以得出以下几点：

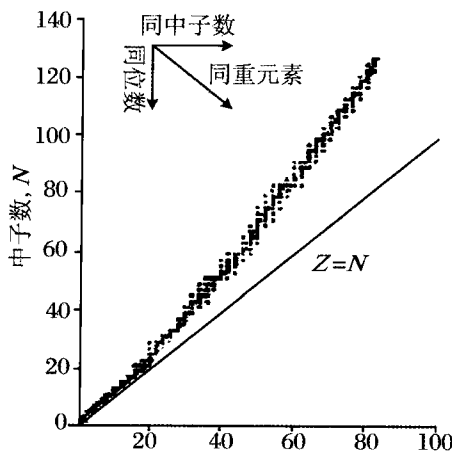


图 1.4 稳定性核素的原子序数与中子数之间的关系

(它们围绕在一个假想的稳定线周围，对于轻元素 $N \approx Z$ ；
对于重元素 $N \approx 1.5Z$)

(1) 在轻核区，随质量数增加，平均结合能有增加的趋势，但有周期性变化。在质子和中子均为偶数且相等时(如： ^4_2C , $^{16}_8\text{O}$, $^{20}_{10}\text{Ne}$, $^{24}_{12}\text{Mg}$ 等)出现峰值，平均结合能较大。可见原子核的质子和中子数相等并呈偶数时，原子核有较大的稳定性。

(2) 中等质量 ($A = 40 \sim 120$) 的原子核，平均结合能数值最大，且近乎常数 ($\bar{E} \approx 8$)。

(3) 重核($A > 200$)的平均结合能比中等质量的核小,其稳定核的中子与质子之比为 $1.5 : 1$ 。

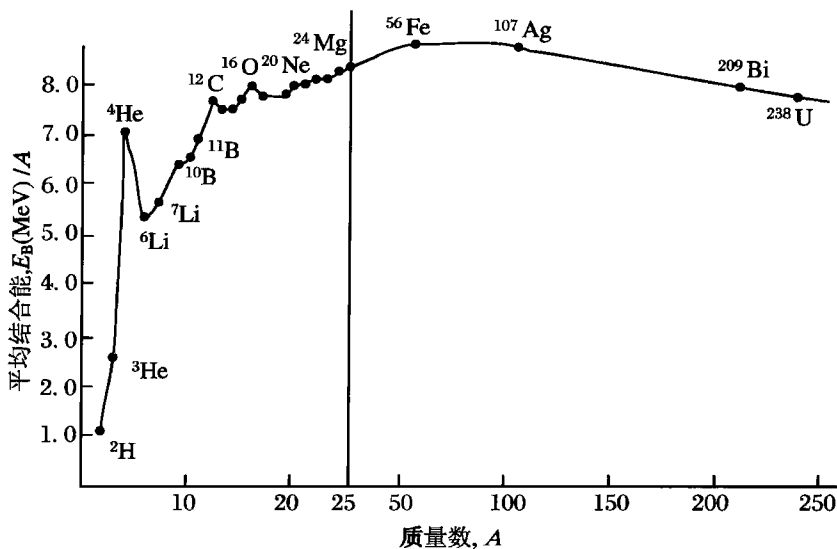


图 1.5 稳定性核素平均结合能与质量数之间的关系

1.2 原子核衰变及放射性

1.2.1 一般概念

在自然界中存在着稳定的和不稳定的两类原子核,不稳定的原子核不断地自发产生结构的改变,使自己转变成另一种核素,这种过程称核衰变。不稳定核自发放射各种射线的现象,称为放射性。核衰变是放射性原子核的特性,它基本上不受外界因素的干扰(例如:温度、压力、磁场,甚至化学反应)。放射性核素本身,我们称其为“母体”。一次衰变后产生的新核素,我们称之为“子体”。若“子体”仍然是放射性核素,再一次衰变所产生的新核素即为“第二代子体”。依此类推,在衰变过程中所释放的能量叫做衰变能。大多数能量是以发射粒子或光子的形式释放,很

少部分(通常没有意义)给予反冲核。所以核衰变不仅导致一种核素转变成另外一种核素,同时也是质量转变成能量的过程。

每一种放射性核素都有自己一些特性,这包括放射性衰变类型、放射线种类、能量大小和放射性核素半衰期长短等。反过来,通过对这些特性的分析,可确定放射性核素的性质。

1.2.2 化学和放射性

放射性衰变过程主要与原子核有关,而化学反应主要与原子核外轨道电子有关。因此一个原子具有放射性不影响它的化学行为,反之,一个原子的化学状态也不影响它的放射性特征。放射性和化学特性的相互独立,在放射性示踪研究中有重大意义,即放射性示踪物在示踪过程中,它的化学和生理学行为与其稳定性核素相同。

但有两种情况的例外:第一,由于同位素之间有质量差异,尤其是轻元素,可能会因此影响其化学行为,这称为同位素效应。第二,在放射性核素衰变过程中有可能涉及核外电子(例如:内转换效应、轨道电子俘获)能够轻微地改变原子的化学状态。但它们的影响微乎其微,只在精心计划的核物理实验中被发现。

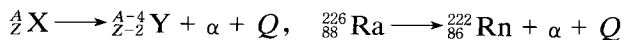
1.2.3 核衰变类型

一般来说,放射性的核在衰变过程中伴随着核射线的发射。各种放射性核素放射出来的射线并不都是一样的,最常见的核射线有: α 粒子、 β 粒子和 γ 射线。这些射线的本质和特点,将在下面与核衰变一起介绍。

核衰变类型是根据其发射核射线种类进行命名的。因此,最常见的有: α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变。此外,随着核辐射测量技术的发展,仍在不断发现一些新的衰变方式,如质子衰变、双 β^- 衰变、 ^{12}C 衰变、 ^{20}Ne 衰变等,这里我们主要讨论最常见的三类核衰变。

1. α 衰变

α 衰变是指放射性核发射 α 粒子衰变为另一种核的过程。 α 粒子实际上是氦的原子核(^4_2He),它带有两个单位的正电荷,质量约为 $4u$ 。因此,经 α 衰变后产生的子核,其原子量(A)比其母核小4,原子序数(Z)减少2。 α 衰变可以用下列通式表示:



上式中: X 代表母核, Y 代表子核, Q 为衰变能(即母核衰变成子核时所释放的能量)。根据能量守恒定律,由上式可得: