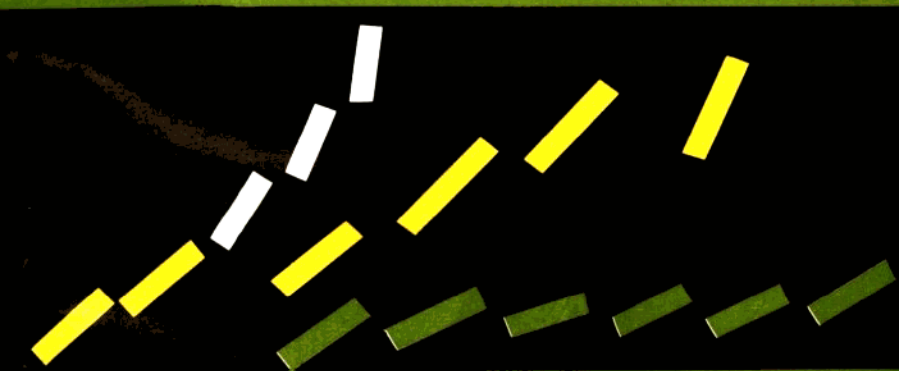


辐射 生物物理学

丘冠英 冯胜彦 编著



武汉大学出版社

内 容 简 介

本书包括辐射物理学、射线的性质及其与物质的相互作用、电离辐射生物学作用原理、定量辐射生物学、辐射剂量和辐射防护、放射性探测技术、核素示踪方法、射线的利用等内容。全书系统地介绍了辐射生物物理学的基本知识和基本应用技术，并编入了作者在这方面的有关科研成果。选材上注重基本理论与基本概念，叙述上力求深入浅出、简明易懂。

本书可作为高等院校生物学、农学、医学有关专业的基础教材，也可供从事辐射生物学、核医学、原子能农学、环保科学等领域的科技人员参考。

前 言

辐射是能量在空间的传播。按其能量的大小，辐射可分为低能辐射和高能辐射。低能辐射的量子能量一般在 10eV 以下，通常指可见光、红外线和紫外线。它与物质相互作用时一般只能引起原子的振动和激发（短波紫外线也能引起电离作用）。高能辐射的量子能量比紫外线大得多，一般为 $10^4\sim 10^6\text{eV}$ 。它与物质相互作用时，不但能引起分子或原子的激发，而且能引起强烈的电离作用。所以，高能辐射又称为电离辐射（ionizing radiation）。

电离辐射可分为两类：一类叫带电致电离粒子（或带电电离粒子）。它是那些具有足够大的动能，可以由碰撞产生电离的带电粒子（如电子、质子和 α 粒子等），另一类叫不带电致电离粒子（或不带电电离粒子）。它是能够使物质释放出带电电离粒子或引起核变化的那些不带电粒子（如中子、光子等）。

辐射生物物理学（Radiation Biophysics）涉及的主要是电离辐射。非电离辐射（如紫外线、可见光和红外线等）的作用被认为属于光生物学领域，本书不拟讨论。有些作者把上述辐射以及激光、射频辐射等均包括其中，可称为广义辐射生物物理学。

19世纪90年代发现了X射线和天然放射性以后，电离辐射强烈的生物学效应立刻引起了人们的注意。可以说，与此

同时就开始了电离辐射对机体影响的研究。此后不久，肿瘤研究工作者观察到肿瘤组织比正常组织对射线更敏感，放射疗法便由此产生。几乎在这同时，有人发现射线也能致癌。这些现象引起了临床医生、物理学家、化学家和生物学家的注意，促进了多种学科间的交流和合作。因此，到本世纪初，便逐渐形成了一门新的边缘学科——辐射生物物理学。多年来，它一直是生物物理学中最流行的领域之一，也是生物物理学最老的一个分支。它的主要任务是研究电离辐射对机体的作用（着重原初过程）及其机制，以及辐射和核素在生命科学中的应用。

在这个学科发展的前十年，基本上是纯粹的实验研究，但是也作了一些重要的观察。其中的许多现象至今仍未能完全得到解释，例如Holtusen发现的氧效应，温度和代谢强度对组织和细胞的辐射敏感性的影响等。由Christen首先提出的高能辐射的生物学作用和组织吸收的能量密切相关的这一设想，促使物理学家研究出最早的剂量测量法，并开创了定量辐射生物物理学的基础。

20年代后期，Muller发现X射线能使果蝇发生突变，从而使辐射生物物理学的发展达到一个高峰。这个发现不仅表明对辐射防护的重要，而且对农业生产和遗传学的研究也很有意义。30年代末，Rajewsky和Schraub对环境问题的研究证明，Ergebirge铀矿工人的奇特职业病，原来是氡及其子体产生的 α 射线所诱发的肺癌。

在这一时期中，定量辐射生物物理学得到了发展。其特点是应用数学和统计学方法来解释实验结果（Blau & Altenburger, 1922; Dessauer, 1922）。简单地说，辐射的

作用被作为机体吸收的辐射能量的函数，亦即被作为辐射剂量的函数来研究。人们试图从剂量效应曲线形状的统计学分析，得出关于作用机理本质的结论。这种解决途径导致了“击中理论”的公式化。后来这个理论逐步地被扩充和发展，于是成了现在人们所说的“靶学说”。当 Lea (1946) 的书和 Timofeeff-Resovsky & Zimmer (1947) 的书出版的时候，人们的兴趣达到了又一个高峰，终于使辐射生物物理学作为一门独立的分支学科而建立起来。

正如恩格斯曾经指出的：“科学的发生和发展与生产的需要有着密切的关系，并决定于人类社会需要的实际利益”。如果说，辐射生物物理学在前40年的形成和发展主要取决于医学，特别是肿瘤学的需要，那么，从40年代起，两项重大技术的发展进一步促进了这门学科的迅速成长。这就是和平利用原子能的核反应堆的建立和核武器原子弹的出现。一方面，由于辐射的利用日益广泛，因而有力地加强了辐射防护的研究工作；另一方面，由于利用核反应装置可以大量生产廉价的人造放射性核素和强照射源，从而促进了辐射生物物理学的另一领域——核技术在医学、农业和生物学以及其它领域的应用的的发展。

辐射生物物理学工作者的一个突出贡献在于：他们很早就观察到研究生命过程的核素示踪方法具有巨大价值，并且发展了从盖革—缪勒计数管到放射自显影术，以及液体闪烁计数器等各种测量放射性的方法。今天，核素示踪法已成为生命科学研究中的一种有力手段。此外，用放射性核素来诊断许多疾病，从而产生了临床放射学的一个新领域——核医学。同时，辐射在治疗多种疾病、诱变育种、防治病虫害和

食品保藏等方面，也得到了日益广泛的应用。据不完全统计，目前世界上生产的放射性核素及其标记化合物中，用于医学和生物学的就占80~90%，联合国和美、英、日等不少国家都有规模庞大的原子能中心，其中核医学、核生物学占重要地位。据报道，有的国家目前平均每3个就诊病人里，就有1人接受核医学方法的检查。在生命科学方面的期刊中，有关核技术和核辐射应用的论文的比重逐年增加。以《J. Biol. Chem.》为例，应用核素技术的文章在1944年仅占该刊论文总数的5%，1956年增加到46%，1966年已超过半数，而到70年代则进一步上升到60%以上了。由此可见核技术在生命科学研究及临床医学上应用的广泛性和重要性。

今后，辐射将继续成为人类生活中的一个重要因素，这是无可置疑的。核技术当前及未来的发展表明，若要从核反应过程所产生的主要副产品——各种类型的辐射中获得最大的利益，而受到最小的危害，就必须在辐射生物学领域继续深入开展研究，阐明其作用的机制，寻求在医学、农学和生物学中进一步利用辐射能的途径，采用更有效的方法防止机体受辐射的危害。为此就需要培养学生和青年科学工作者从事这些工作，同时也要求人们应该象熟悉煤、石油和其它传统的燃料那样，对于原子核能，特别是对核反应产物影响生命的过程有所了解。总而言之，我们需要学会“成功地同辐射打交道”（Zimmer, 1968）。

目 录

前言	(1)
第一章 辐射物理学	(1)
§ 1 原子、原子核和核素	(1)
§ 2 天然放射性和人工放射性	(4)
§ 3 稳定和不稳定的核素	(5)
§ 4 爱因斯坦方程和结合能	(7)
§ 5 核力与原子核模型	(10)
§ 6 放射性衰变定律、衰变常数和半衰期	(12)
§ 7 放射性活度与比活	(17)
§ 8 核衰变的类型及衰变图	(20)
第二章 射线的性质及其与物质的相互作用	(30)
§ 1 带电致电离粒子	(30)
§ 2 X射线和 γ 射线	(39)
§ 3 中子	(44)
§ 4 核反应	(46)
§ 5 传能线密度与相对生物学效应	(49)
第三章 电离辐射生物学作用的原理	(54)
§ 1 直接作用和间接作用	(54)
§ 2 水的辐射分解和水自由基	(56)
§ 3 辐射生物效应的发展过程	(59)
§ 4 辐射敏感性	(62)

§ 5	影响辐射生物效应的若干因素·····	(66)
§ 6	电离辐射对活细胞的作用·····	(74)
§ 7	分子水平的辐射损伤与修复·····	(79)
§ 8	辐射敏感性差异的本质·····	(83)
第四章	定量辐射生物学·····	(87)
§ 1	剂量效应曲线·····	(87)
§ 2	靶学说·····	(89)
§ 3	双元辐射作用理论·····	(99)
§ 4	辐射生物学的分子理论·····	(106)
§ 5	辐射原发作用的其他假说·····	(108)
第五章	辐射剂量与辐射防护·····	(114)
§ 1	剂量单位·····	(114)
§ 2	本底辐射·····	(121)
§ 3	放射防护标准与ICR P的新建议·····	(124)
§ 4	外照射的防护·····	(128)
§ 5	内照射的防护·····	(133)
§ 6	放射性污染的清除及废物的处理·····	(135)
第六章	辐射剂量与放射性活度的探测·····	(138)
§ 1	照射量的测定与电离室·····	(138)
§ 2	吸收剂量的测量方法·····	(140)
§ 3	热释光剂量计·····	(142)
§ 4	放射性活度的测量与定标器·····	(144)
§ 5	正比计数器与盖革计数器·····	(149)
§ 6	固体闪烁计数器与能谱仪·····	(155)
§ 7	半导体计数器与多道能谱仪·····	(160)
§ 8	样品的制备与测量·····	(162)

§ 9	液体闪烁计数器·····	(167)
§ 10	液体闪烁测量中的样品制备·····	(175)
§ 11	数据的处理 (计数的统计) ·····	(182)
第七章	核素示踪方法 ·····	(191)
§ 1	核素示踪法的依据和特点·····	(192)
§ 2	放射性核素及标记化合物的制备·····	(197)
§ 3	核素示踪实验的设计·····	(203)
§ 4	核素示踪方法的基本原理·····	(211)
§ 5	放射免疫分析法·····	(223)
§ 6	放射自显影技术·····	(237)
§ 7	细胞增殖与细胞周期测定·····	(246)
§ 8	分子探针的标记与分子杂交技术·····	(249)
§ 9	活化分析法·····	(253)
§ 10	稳定性核素示踪法的特点·····	(255)
第八章	射线的利用 ·····	(259)
§ 1	辐射源·····	(259)
§ 2	放射治疗·····	(261)
§ 3	射线在农业生物学中的利用·····	(262)
习题	·····	(268)
附录	·····	(273)
主要参考资料	·····	(314)

第一章 辐射物理学

现在人类对原子和原子核的结构和性质已经有了相当的了解，在此基础上已使原子核为人类做出了相当大的贡献。本章介绍与辐射生物物理学有关的辐射物理学的基本内容。

§ 1 原子、原子核和核素

原子是由电子和原子核组成的。原子核处于原子的核心。在核的周围是沿一定轨道绕核运动的电子云。每一轨道最多只能容纳两个电子，而几个轨道组合在一起形成壳层结构，每一轨道代表一个确定的能级 (energy level)。电子从一轨道跃迁至另一轨道就要涉及能量的变化，结果便有给定能量的量子释出。最内诸壳层间的电子跃迁将导致发射X射线，其波长表征发射壳层和相应元素的特征。外诸壳层间的电子跃迁则产生光辐射并给出特征谱线。

与放射性相联系的各种现象都同原子核有关，因此属于原子核物理学 (Nuclear Physics) 研究的范畴，而原子物理学 (Atomic Physics) 则研究各种核外现象。

原子的直径约为 $1 \text{ \AA}$ (10^{-8} cm)，质量很小 (约 $10^{-24} \sim 10^{-22} \text{ g}$)。相对于原子来说，原子核又要小一万倍 (直径约为 10^{-12} cm)，但它却几乎集中了原子的全部质量。据此可以算出原子核的密度约为 $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ 。原子核由质子和

中子组成。中子不带电荷，质子带一个基本单位正电荷，核的质子数称为原子序数（ Z ），它是化学元素的基本特征。质子和中子（ N ）通称为核子（nucleon）。我们将涉及到的另一个重要的量是质量数 A ，它是核内质子数与中子数之和。以原子质量单位（ u ）为单位时，它又是原子精确质量（ M ）最相近的整数。即

$$Z + N = A \approx M$$

原子核的另一个特征是原子核所处的能量状态。具有特定数目的质子和中子，并具有同一能量状态的一类原子核或原子称为核素（nuclide），通常用 A_ZX 或 AX 表示不同核素。

在这里， X 为化学元素符号。例如： ${}^{35}_{16}S$ 、 ${}^{60}_{27}Co$ 等，它们都是独立的不同的核素（在早期文献里，会看到一种老式写法，即把 A 写在 X 的右上角，如 C^{14} 、 p^{32} 等）。

半衰期较长的激发态原子核称为基态原子核的同质异能素（isomer）。例如， ${}^{99m}_{43}Tc$ 和 ${}^{99}_{43}Tc$ 其 A 和 Z 相同，但前者代表核处于激发态，在符号左上角 A 之后加上“ m ”以示区别。它们是独立的两种核素。

Z 值相同而 A 值不同（因中子数不同）的一组核素称为该元素的同位素（isotope）。它们在元素周期表中占居同一位置。例如氢有三种同位素：氢（ 1_1H , hydrogen）、氘

（ 2_1H , deuterium, D ）和氚（ 3_1H , tritium, T ）。元

素的原子量正是同位素质量按它们在自然界存在的百分含量求得的平均值。例如大气中的氧包括三种同位素，它们的质量和含量如下：

	^{16}O	^{17}O	^{18}O
质量 (u)	15.994915	16.999134	17.999160
含量 (%)	99.7587	0.0374	0.2039

因此氧的原子量为：

$$15.994915 \times 0.997587 + 16.999134 \times 0.00037 + 17.99916 \times 0.00204 = 15.9994$$

应该指出的是，“同位素”这一术语常常用得不够严谨，在本来应该用“核素”的场合却用了“同位素”。例如把 ^3H 、 ^{35}S 和 ^{14}C 都称为同位素，实际上它们是三种不同的核素，分别属于三种不同的元素。不过为了照顾已形成的习惯，本书对这两个术语也不加严格限制。

此外，还有同量异位素(isobar)、同中子异荷素(isotone)，它们的Z、N、A关系如表1—1所示。

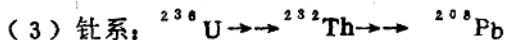
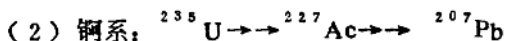
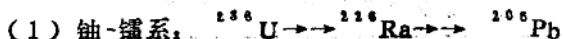
表 1 - 1 核素的类别和Z、A、N关系

名 称	Z	A	N	例	
同位素	同	异	异	$^{31}_{15}\text{P}$	$^{32}_{15}\text{P}$
同量异位素	异	同	异	$^{32}_{15}\text{P}$	$^{32}_{16}\text{S}$
同中子异荷素	异	异	同	^2_1H	^3_2He
同质异能素	同	同	同	$^{110}_{47}\text{Ag}$	$^{110\text{m}}_{47}\text{Ag}$

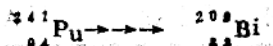
§ 2 天然放射性和人工放射性

原子核的放射性现象最初是从天然存在的某些物质中发现的。

1895年德国物理学家伦琴 (Röntgen) 发现了X射线。这一发现立即引起了许多研究者的兴趣。1896年法国物理学家贝克勒尔 (Becquerel) 发现了天然放射现象。在贝克勒尔工作的基础上, 居里 (Curie) 夫妇发现了84号元素钋 (Po) 和88号元素镭 (Ra) 也有天然放射性, 并于1898年正式命名了“放射性” (radioactivity)。随后的工作证明原子序数在84号以后的元素都有放射性, 而84号以前的某些核素, 如 $^{40}_{19}\text{K}$ 、 $^{87}_{37}\text{Rb}$ 、 $^{147}_{62}\text{Sm}$ (钐) 等, 也有放射性。人们还发现现存的天然放射性重元素都是分别由三个始祖核素衰变而成的。它们分别形成三个天然放射性系列:



后来随着人造放射性核素的大量实践, 又发现了一个新的放射性系列, 镎系:



天然放射性的发现是一个具有重大意义的事件, 它揭开

了原子时代的序幕。然而放射性核素的广泛应用则是在人造放射性核素被发现，并大量生产后才得到迅速发展的。这是因为天然放射性核素的品种有限（只有六十多种），提炼相当困难，价格十分昂贵，因而限制了它们的应用。

1934年约里奥-居里（Joliot-Curie）夫妇研究（ n, α ）反应时发现了人工放射性核素，随后发现很多核反应的剩余核是放射性的，从此便开始了人工放射性核素的生产。现在已发现和应用的放射性核素中，绝大多数是人工生产的。人工放射性核素是利用中子或高能带电粒子轰击靶物质来生产的。

§ 3 稳定和不安定的核素

核素按其性质分为稳定性核素和不稳定性核素。顾名思义，前者核结构稳定；后者不稳定，它的原子核会自发地放出射线而变成另一种核素，因此又叫做放射性核素（radio-nuclides）。

为什么天然元素中，有的原子核是稳定的，有的是有放射性的呢？人们对此还不十分了解。然而一个明显的事实是，核的稳定性与原子核的中子数和质子数之比（ N/Z ）有关。由图 1—1 可见，在低 Z 值的核素中，除氢外，它们的稳定性核素具有大致相同的 N 、 Z 值（ $N = Z$ ），如 ${}^4_2\text{He}$ 、

${}^{12}_6\text{C}$ 、 ${}^{16}_8\text{O}$ 等。随着核素 Z 的增大，中子数愈来愈多地超过质子数，这样的核素大多数是稳定的。最重的稳定核是

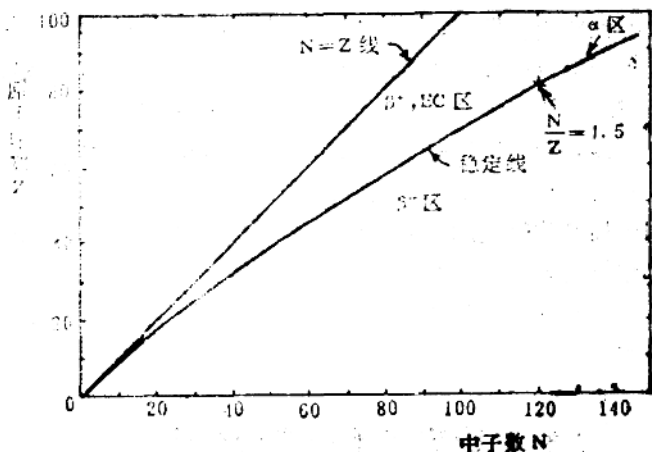


图1—1 常见稳定核的中子数-质子数曲线

$^{208}_{82}\text{Pb}$ 和 $^{209}_{83}\text{Bi}$ 。它们的 N/Z 大都在 $1.5:1$ 左右。而 Z 值在 83 以上的重原子核则都是不稳定的，放射 α 粒子是这些重的不稳定核素的特征。

因此科学家们认为，各种核素的稳定性看来存在一个大体确定的最佳 $N:Z$ 比；中子过多的核有减少中子的倾向，通常通过 β^- 衰变向最大稳定线靠拢；质子过多的核素常通过电子俘获或 β^+ 衰变，减少质子从而向最大稳定线靠拢。

原子的稳定性还与 Z 和 N 的奇偶性有关。稳定性核素的 N 和 Z 值多为偶数。换言之，偶—偶核最稳定（例如 ^4_2He ），奇—偶（或偶—奇）核次之，奇—奇核最不稳定。此外原子

核的稳定性还取决于原子核的结合能大小。

§ 4 爱因斯坦方程和结合能

计算和严格的实验证明，各种原子核的质量总是小于构成它们的核子质量的总和。以 ^{12}C 为例，它的原子核质量为 12.000000 u 。 ^{12}C 的原子核由6个中子和6个质子组成，核外有6个电子。其核子和电子的质量为

$$6 \times 1.007825 + 6 \times 1.008665 = 12.09894\text{ u}$$

式中，1.007825是氢原子质量，它包括了一个质子和一个电子。上述计算结果表明， ^{12}C 的质量比它的核子的总质量小 0.09894 u ，这个损失的质量称为“质量亏损”（mass defect）。

核反应中的能量变化和原子质量减少（质量亏损）的关系符合爱因斯坦方程：

$$E = mc^2 \quad (1-1)$$

式中， E 为释放的能量（焦耳，J）， m 为质量亏损（千克，Kg）， c 为光速（ $C = 2.997924580 \times 10^8\text{ m/s}$ ）。利用这个方程可以求出相当一个原子质量单位的能量。因为 $1\text{ u} = 1.6605655 \times 10^{-27}\text{ Kg}$ ，代入上式

$$E = \frac{1.6605655 \times 10^{-27}\text{ Kg} \times (2.997924580 \times 10^8)^2}{1.6021892 \times 10^{-13}\text{ J}}$$

$$\frac{10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{10^{-13}\text{ J}}$$

$$= 931.5016\text{ Mev}$$

因此方程 1—1 可表示为:

$$E = 931.5m \quad (1-2)$$

式中, m 的单位为 u ; E 的单位为 Mev 。

质量亏损现象与核子的结合能 (bound energy) 密切相关。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。这种能量叫做结合能。原子核的结合能等于核内质子、中子及轨道电子的质量之和减去核素的精确质量所得之差。结合能的大小可从方程 (1—2) 求得。

例如 $^{12}_6C$ 的结合能是:

$$0.09894 \times 931.5 = 92.1626 Mev$$

这样算出的结合能包括中子和质子结合成核的结合能以及核与电子结合成原子的结合能。但是核和电子的结合能比起核子之间的结合能要小好几个数量级, 因此上面计算的结果即被看作是核的结合能。

各种核素的结合能各不相同。为了便于比较, 通常用每一核子的结合能 (平均结合能) 来表示。将核的结合能除以质量数 (核子数) 即得到该原子核核子的平均结合能。例如

$^{12}_6C$ 核的平均结合能为:

$$92.1626 \div 12 = 7.68 Mev$$

图 1—2 表示各种原子核每一核子的平均结合能与原子质量数的关系。有趣的是, 在周期表的中部 (铁附近) 的核素, 平均结合能最大。 A 小于 20 和大于 200 的核素的平均结合能均较小。这意味着使周期表两端的核素转变为周期表中部的核素时, 便可以放出大量的能量。所谓原子能 (确切地说是原子核能) 的释放, 就是使核子的平均结合能低的核转